



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOSÉ VICENTE GOUVEIA NETO

ANÁLISE COMPARATIVA DE DADOS EM VIGA MSTA

CARAÚBAS RN

2018

JOSÉ VICENTE GOUVEIA NETO

ANÁLISE COMPARATIVA DE DADOS EM VIGA MISTA

TCC apresentado a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Ana Paula ferreira Ramos

CARAÚBAS

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

n474a neto, josé vicente gouveia.
análise de dados em viga mista / josé vicente
gouveia neto. - 2018.
56 f. : il.

Orientadora: Ana paula ferreira ramos.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-Árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2018.

1. análise estrutural. 2. esforços internos .
3. nbr 8800:2008. I. ramos, Ana paula ferreira,
orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Setor de Informação e Referência

Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)
JOSÉ VICENTE GOUVEIA NETO

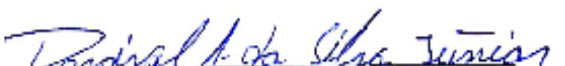
ANÁLISE COMPARATIVA DE DADOS EM VIGA MISTA

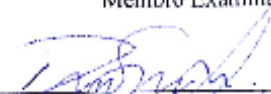
TCC apresentado a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 16 / 04 / 2018.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr.ª Rejane Ramos Dantas (UFERSA)
Presidente


Prof. Dr. Dorgival Alberto da Silva Júnior (UFERSA)
Membro Examinador


Prof. Dr. Rudson de Souza Lima (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à Deus pela força, sem ele nada seria possível.

Agradeço aos meus pais, Paulo Fernando Gouveia e Antônia Maria da Silva. Pessoas que sempre foram minha mola propulsora, e se conquistei algo, é mérito deles.

Agradeço as minhas irmãs, sem ela nada seria possível, sempre com todo apoio me deram forças e me motivaram.

Agradeço Ana Paula Ferreira Ramos por sua brilhante orientação e paciência, pois, me acolheu de uma forma que pude desenvolver uma boa ideia sempre muito solícita e presente.

Agradeço a Banca Examinadora por sua disponibilidade de examinar meu trabalho. Agradeço profundamente pelas contribuições feitas, afim de que possa melhorar para atividades futuras.

Agradeço a Danilo Luan Almeida Soares, fiel companheiro nesse primeiro ciclo de estudos. Sempre esteve por perto, tanto ele quanto sua família que me adotaram como membro do seu núcleo familiar.

Agradeço a todos amigos e colegas, tantos os da universidade como os de fora dela, todos fizeram parte dessa conquista. Aos professores que contribuíram com cada pedaço de conhecimento para essa conquista.

É uma disciplina que promove, com visão integrada, o gerenciamento e o compartilhamento de todo o ativo de informação possuído pela empresa. Esta informação pode estar em um banco de dados, documentos, procedimentos, bem como em pessoas, através de suas experiências e habilidades.

Gartner Group

RESUMO

Considerando que o cenário do mercado da construção civil pede por novas soluções estruturais, e os centros de pesquisa se empenham cada vez mais em busca de conhecer melhor a estrutura mista de aço-concreto, tendo em vista o grande campo de aplicação de tal solução. O presente trabalho se propõe a analisar dois casos de viga mista simplesmente apoiada de concreto e aço a fim de comparar seus resultados com a NBR 8800:2008, a partir dos esforços internos. A NBR 8800:2008 qual trata do projeto e dimensionamento de estruturas de aço, utiliza-se o software Viga 3.0 para obter os resultados e confrontar com os exemplos. Os resultados quando confrontados com os exemplos equivalentes mostraram-se muito próximos, mostrando uma convergência do software com a norma e os autores, os quais foram confrontados. Conseguindo fazer um estudo introdutório de tal tema que já é bem difundido nos grandes centros mundo a fora, e deixar como sugestão à comunidade acadêmica sua aplicação no âmbito de ensino.

Palavras-chave: Análise estrutural. NBR 8800:2008. Esforços internos.

ABSTRACT

Considering that the construction market scenario calls for new structural solutions, and research centers are increasingly striving to better understand the mixed steel-concrete structure, given the wide scope of such a solution. The present work proposes to analyze two cases of mixed beam supported by concrete and steel in order to compare its results with NBR 8800: 2008, based on internal efforts. A NBR 8800: 2008 which deals with the design and dimensioning of steel structures, the Viga 3.0 software is used to obtain the results and compare with the examples. The results when confronted with the equivalent examples were very close, showing a convergence of the software with the norm and the authors, who were confronted. Being able to make an introductory study of such a theme that is already widespread in the great centers world-wide, and leave as a suggestion to the academic community its application in the scope of teaching.

Keywords: Structural analysis. NBR 8800:2008. Internal efforts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de vigas mistas aço-concreto. a) Laje com face inferior plana; b) Laje com forma de aço incorporada; c) Viga totalmente embutida; d) Viga parcialmente embutida **Erro! Indicador não definido.**

Figura 2: formatação de uma viga biapoiada submetido a força gravitacional.**Erro! Indicador não definido.**

Figura 3: Tipos de deformações. a) Intração nula; b) interação total; e, c) interação parcial **Erro! Indicador não definido.**

Figura 4: Distribuição de tensões e deformações na seção em função do grau de conexão. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5: Conector de cisalhamento tipo pino em viga de aço.. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 6: a) Viga mista em corte; b) Diagrama de esforços da viga que foi confeccionada com escoramento. c) Crescimento dos momentos fletores; d) Comparativo do deslocamento vertical da viga escorada e não escorada. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 7: a) Seção mista com ligação parcial; (b) diagrama de deformações; (c) diagramas de tensões na ruptura. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 8: Largura efetiva da laje para fins de cálculo. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 9: Layout do software Viga mista 3.0. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 10: Sistema de piso misto de um edifício de escritório.. **Erro! Indicador não definido.**

MINÚSCULAS ROMANAS

A	Comprimento, distância; espaçamento entre enrijecedores.
b	Largura de uma chapa; largura de mesa comprimida de uma viga; lado do filete de solda.
b_e	Largura efetiva da laje em viga mista; largura efetiva de placa enrijecida em flambagem local.
b_f	Largura de mesas em vigas I . Distância da face externa da mesa ao ponto da alma em que se inicia a transição para a mesa (início do arredondamento em perfis laminados; do cordão de solda em vigas soldadas compostas de chapas).
d	Diâmetro nominal do conector.
e	Parâmetro de esbeltez de coluna.
f	Resistência do material a tração ou compressão.
f_c	Tensão resistente à compressão com flambagem
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto.
f_{el}	Tensão limite de proporcionalidade ou de elasticidade do aço.
f_y	Tensão limite do escoamento do aço.
h	Altura total de uma viga.
h_c	Espessura da laje de concreto em viga mista.
h_w	Altura da alma tomada igual a h_0 em perfis soldados e a h_0 menos os trechos de
h_0	Distância entre as faces internas das mesas de viga.
i	Raio de giração.
l	Comprimento do vão (pode-se também utilizar L).
l_{ft}	Comprimento da flambagem de uma haste.
t	Espessura de uma chapa.
t_w	Espessura da chapa de alma de uma viga.
t_f	Espessura de mesa de viga I .
y_c	Distância do bordo comprimido à linha neutra.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores limites de $be1$ e $be2$ expostos na figura 08.....	29
Tabela 2: Comparativos dos resultados de MARCONCIN (2007) com o Software Viga 3.0.	34
Tabela 3: Comparativo de resultados do Pfeil (2009) com a simulação no Viga mista 3.0.....	35
Tabela 4: Cargas permanentes do Problema 01.....	39
Tabela 5: Sobrecargas do Problema 01	39
Tabela 6: Dados da viga do Problema 01	39
Tabela 7: Dados da laje	40
Tabela 8: Dados dos conectores de cisalhamento	40

MAIÚSCULAS ROMANAS

A	Área da seção transversal de uma laje.
A_f	Área de mesa de viga em I .
A_g	Área bruta.
A_m	Área do metal base.
A_n	Área líquida de uma peça com furos ou entulhes; área da alma de viga I .
A_0	Área da alma de viga I .
C_t	Coeficiente de redução para determinação de área líquida efetiva em peças tracionadas.
C_v	Raço entre a tensão crítica de flambagem elástica e a tensão de escoamento a cisalhamento.
E	Módulo de elasticidade (módulo de Young); para o aço tomado igual a 2000000 MPa. Módulo de elasticidade do concreto.
E_c	Módulo de elasticidade do concreto.
E_s	Módulo de elasticidade do aço.
I	Momento quadrático de uma área referido ao eixo que passa no centro de gravidade (comumente denominado momento de inércia).
K	Comprimento de flambagem.
M	Momento fletor.
M_d	Momento fletor solicitante de projeto.
M_{dres}	Momento resistente de projeto.
M_p	Momento de plastificação total da seção.
N_{cr}	Carga crítica.
R_n	Resistência nominal.

MINÚSCULAS GREGAS

- A Coeficiente de dilatação térmica do aço $\alpha = 1,2 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; relação $\frac{E_s}{E_c}$ entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto.
- γ Coeficiente de segurança; peso específico do material; para aço $\gamma = 77 \text{ kN/m}^3$.
- ε Deformação unitária $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$.
- λ Parâmetro de esbeltez de coluna.
- λ_b Esbeltez de placa de largura b e espessura $t = b/t$
- μ Coeficiente de atrito
- ν Coeficiente de deformação transversal (coeficiente de Poisson); para o aço admitido $\nu = 0,3$.
- σ_{bc} Tensão normal de compressão devida à flexão.
- σ_c Tensão normal de compressão.
- σ_{cr} Tensão crítica.
- σ_r Tensão residual em perfis laminados ou soldados (tomada igual a $0,3f_y$).
- σ_t Tensão de tração.
- τ Tensão de cisalhamento.
- φ Coeficiente de fluência.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivos gerais	17
1.2.1 objetivos específicos	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 SISTEMA HORIZONTAL.....	18
2.2 VIGA MISTA	18
2.2.1 Sobre o comportamento estrutural da viga mista.....	19
2.3 CONECTORES DE CISALHAMENTO	22
2.4 RETRAÇÃO E FLUÊNCIA DO CONCRETO	24
2.5 CONSTRUÇÃO ESCORADA E NÃO ESCORADA	24
2.6 RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS MISTAS	26
2.6.1. Classificação das seções quanto a flambagem local	26
2.6.2 Resistência à flexão de vigas com seção de aço compacta e com ligação parcial	27
2.6.3 Largura efetiva da laje	28
2.6.4 Seção homogeneizada para cálculos em regime elástico	29
2.6.5 Relação entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto.....	30
2.7 VIGA MISTA 3.0	30
3. METODOLOGIA.....	32
3.1 PROBLEMA 01.....	32
3.2 PROBLEMA 02.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. RESULTADOS COMPARATIVOS E ROTEIRO DE CÁLCULO	34
4.1.1 Problema 01	34
4.1.2 Problema 02	35
5. CONCLUSÃO.....	37
6. SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS	37
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
ANEXO 01.....	39

ANEXO 02.....52

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico e econômico, no início do século 20, se fez necessário a busca por novas soluções estruturais para poder oferecer o suporte as maiores e mais arrojadas construções. Com isso houve o aprimoramento dos sistemas estruturais de construções. Entre os sistemas desenvolvidos, o sistema estrutural misto de concreto e aço ganhou destaque, pois, tem a finalidade de aproveitar as melhores características do concreto e do aço.

Segundo Alva (2000), um sistema misto de aço-concreto envolve a conexão mecânica por conectores de cisalhamento de um perfil de aço geralmente em I com uma laje de concreto. Ao analisar o histórico da construção mista é perceptível que esta é diretamente relacionada ao desenvolvimento do aço estrutural e do concreto armado. Levando em conta que em países como a Inglaterra, que foram o berço da revolução estrutural, esse sistema é bem amadurecido, pois os primeiros estudos começaram por lá. Inicialmente empregava-se o concreto em perfis metálicos a fim de proteger o aço de agentes corrosivos e do incêndio, sem clara visão da contribuição estrutural que o mesmo agrega dentro do sistema.

De acordo com Malite (1990), o estudo do sistema começou na Inglaterra, em 1914, quando à empresa *Redpath Brown Company* deu início nos estudos para aplicação em sistemas de pisos. Em 1930 o método de cálculo já estava definido, e vários empreendimentos como prédios e pontes começaram a adotá-lo como solução estrutural. Em 1944, o tema foi colocado como norma regulamentadora do *American Association of State Highway Officials* (AASHO).

Alva (2000), diz que a partir dos anos 50 e 60 que se começou a adotar o sistema estrutural misto no Brasil, restrito a algumas pontes e edifícios. A solução estrutural só começou a partir de tal data pois foi quando a metalurgia teve seu desenvolvimento, e também se buscou atender a uma nova demanda arquitetônica para projetos mais arrojados. Começando assim a produção e o desenvolvimento do aço estrutural no Brasil e posteriores estudos encima do concreto armado. Assim foram construídos diversos edifícios, tendo como marco inicial um edifício garagem denominado por: Posto de automóveis América em 1954. A primeira norma a abordar o assunto foi a NBR 8800 (1986) “Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios”, a qual abordava apenas a viga mista.

De acordo com Alva (2000) a utilização das vigas mistas, que combinam aço estrutural e concreto armado, ganham espaço pois combinam dois materiais já consolidados na construção civil. Porém, sua viabilidade econômica é maior quando utilizadas em construções de médio e grande porte, pois leva em consideração gastos extra como qualificação da mão de obra e equipamentos maiores. Com isso é possível aproveitar melhor os espaços e conceber maiores vãos, com maior rigidez quando comparados a estruturas de concreto.

1.1 JUSTIFICATIVA

Outra vantagem desse sistema é o atendimento ao padrão das organizações internacionais quanto às questões ambientais, especialmente a ISO 14001, já que consegue um canteiro de obra mais limpo, racionalizando os materiais e mão de obra. E levando em consideração as questões de recursos renováveis o aço é um produto 100% reciclável, ainda possibilitando desmontagem e reutilização das estruturas.

Segundo Malite (1990), o sistema misto ainda diminui em trinta por cento, o peso total da estrutura comparada com o emprego do aço utilizado isoladamente. Ainda faz com que o capital retorne mais rápido ao investidor, em vista que a execução é mais curta e resulta na entrega mais rápida para utilização da obra.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Familiarização com tem em questão, revisão bibliográfica, conhecimento da NBR 8800:2008 e análise comparativa de exemplos de vigas biapoidas simplesmente apoiadas.

1.2.1 objetivos específicos

Logo, com base no exposto, o objetivo deste trabalho é realizar uma comparação de metodologias de cálculos em vigas mistas com a norma atual. Para isso serão desenvolvidos dois problemas. O primeiro exemplo consiste em um problema calculado de acordo com a NBR 8800:1986 de um sistema de pisos mistos, e leva em conta a comparação da norma de 1986 com a atualizada de 2008. O segundo exemplo foi proposto e resolvido com base na

NBR 8800:2008, o objetivo foi comparar de forma numérica o exemplo analítico a fim de verificar a convergência de resultados em ambos métodos que levam em conta a norma atualizada de 2008.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMA HORIZONTAL

De acordo com ALVA (2000), o sistema estrutural horizontal constituído por viga mista tem por objetivo, receber a cargas gravitacionais e acidentais, transmiti-las as fundações. Também devendo levar até às fundações solicitações horizontais que são resultado da força do vento. No sistema em questão os esforços solicitantes são predominantemente de flexão.

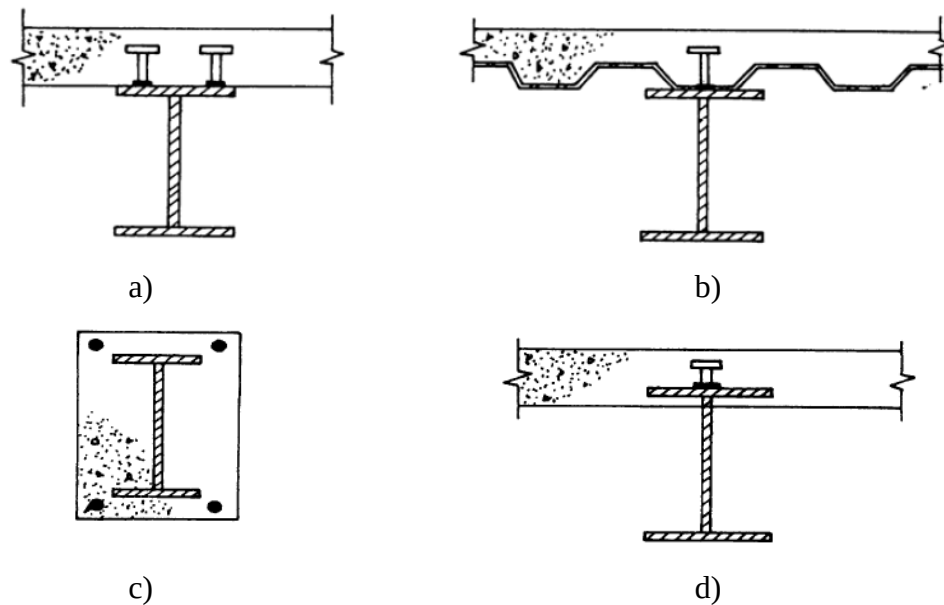
Segundo SÁLES (1995), para poder cumprir seu papel de sistema horizontal a viga mista deve ter rigidez considerável. A utilização da viga mista como solução em um sistema horizontal trás a vantagem de aumentar a rigidez do conjunto. Uma segunda vantagem seria a economia de material, pois, como ela é constituída de aço na viga e concreto armado na laje à mesma combina as melhores características dos materiais fazendo um consumo mais racionalizado.

2.2 VIGA MISTA

ALVA (2000), diz que uma viga mista é um elemento estrutural horizontal formado por um perfil metálico, geralmente em “I” conectado a uma laje de concreto por conectores de cisalhamento, esses soldados a viga, o qual garante a interação e o comportamento misto do sistema. A Figura 01, ilustra alguns exemplos de vigas mistas.

Figura 1: Tipos de vigas mistas aço-concreto. a) Laje com face inferior plana; b) Laje com forma de aço incorporada; c) Viga totalmente embutida; d) Viga parcialmente embutida

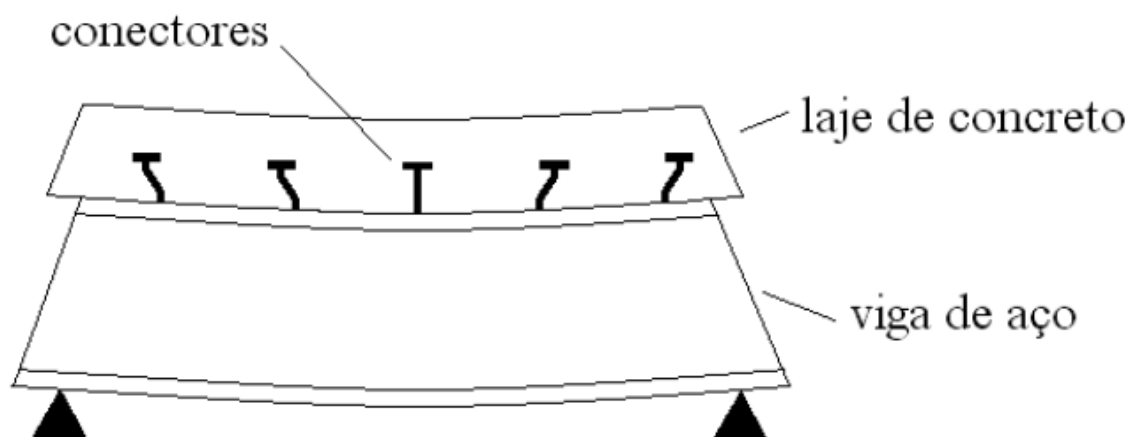
Fonte: MALITE, (1990).



2.2.1 Sobre o comportamento estrutural da viga mista

A figura 02 mostra a deformação sofrida pelo sistema misto biapoiado quando submetido a cargas gravitacionais.

Figura 2: formação de uma viga biapoiada submetido a força gravitacional.
Fonte: KOTINDA, (2006).



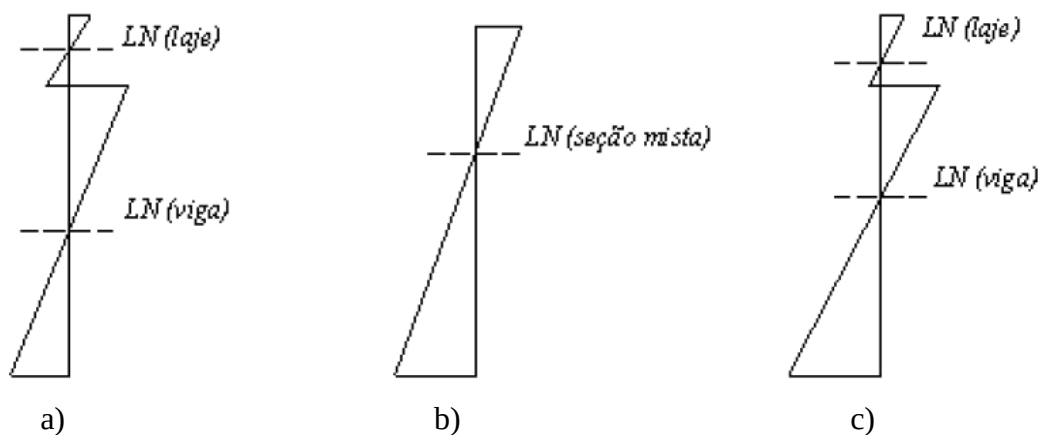
Segundo Kotinda (2006), ao observar o sistema nota-se que as fibras de concreto da laje tocantes à viga de aço tende a se expandir, enquanto as do aço do perfil em I tendem a se comprimir. Como reação a esses esforços no conjunto os conectores se deformam e levam a força para o centro do vão da viga.

A viga ilustrada acima mostra um sistema com interação parcial do sistema. Caso não houvesse restrição de movimento algum entre o sistema laje viga esse seria classificado como interação nula. Onde as duas partes do sistema se mostram independentes as forças no conjunto.

De acordo com Pfeil (2009) em um terceiro caso aconteceria a interação completa, ou seja, quando houver o aumento no número de conectores não haverá acréscimo de resistência à flexão da seção.

A Figura 03, mostra cada uma das interações explicadas acima: total, parcial e nula.

Figura 3: Tipos de deformações. a) Intração nula; b) interação total; e, c) interação parcial
Fonte: KOTINDA, (2006).

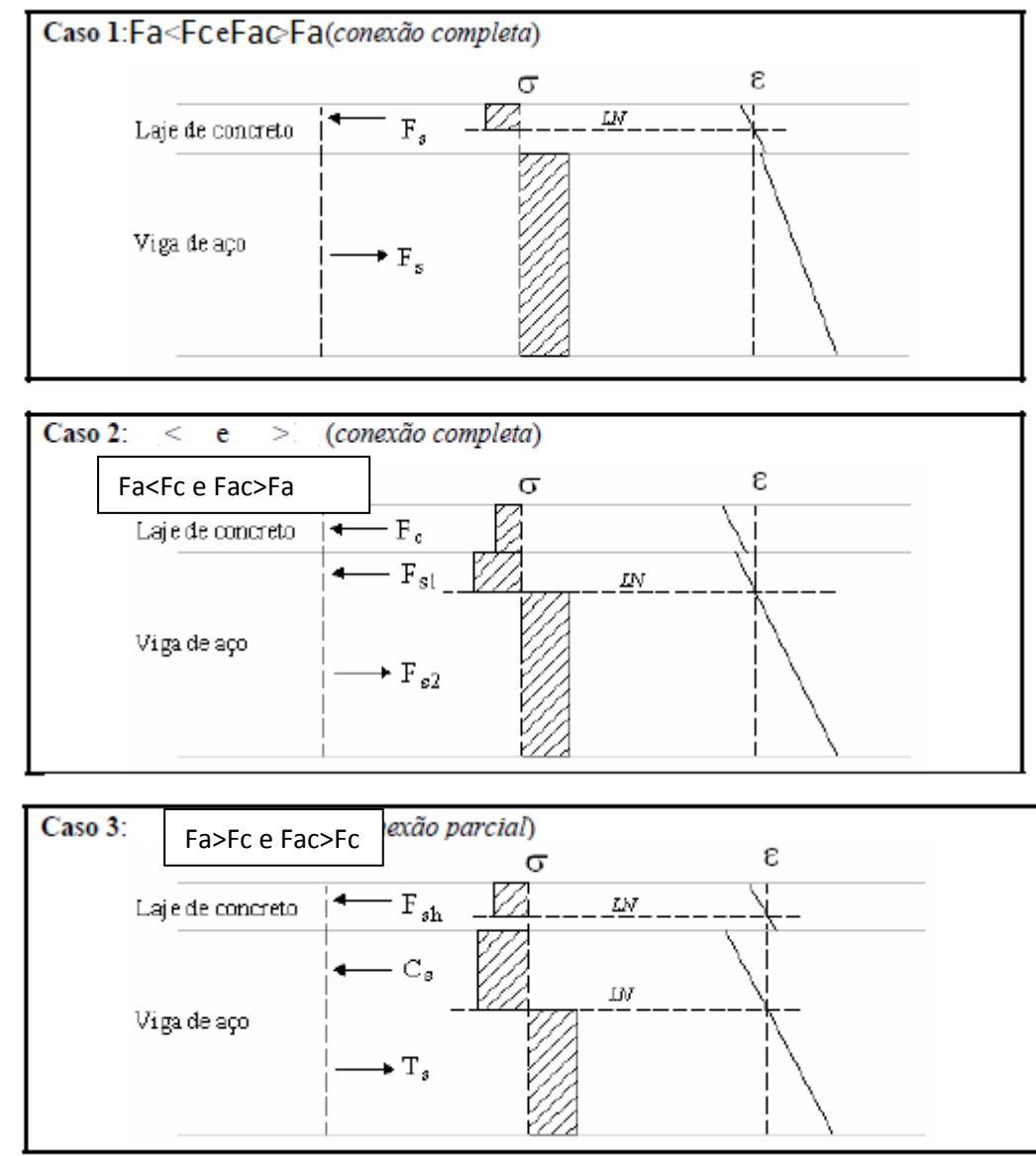


Em uma viga biapoiada, as tensões normais provenientes dos esforços solicitantes que derivam tração e compressão são respectivamente absorvidas pela viga metálica e pela laje de concreto. A distribuição das tensões vem do grau de interação do conjunto a serem expostas as solicitações.

Segundo Kotinda (2006), a distribuição dos esforços depende do grau de conexão entre o conjunto. Supondo um sistema misto que a resistência do aço seja dada por F_a e a do concreto por F_c . A capacidade de resistência do sistema seria dada, pelo número de

conectores no vão multiplicando pela resistência individual de cada um. Resultando em F_{ac} . Segue figura 04 com ilustração de tensões em três sistemas distintos.

Figura 4: Distribuição de tensões e deformações na seção em função do grau de conexão.
 FONTE: KOTINDA, (2006).



Com $F_a < F_c$ e $F_{ac} > F_a$, a viga terá limitação do momento em função do perfil de aço, sendo considerado para cálculo tração=compressão= F_a . De modo semelhante, $F_c < F_a$ e $F_{ac} > F_c$ o fator de limitação será a laje de concreto, tendo em vista a comparação de forças, tendo um equilíbrio de Tração=compressão= $(F_c + F_a)$.

Notando que a capacidade de conexão é maior que o menor valor do conjunto, está não age de maneira significativa na flexão da viga mista. Assim com uma conexão completa,

o aumento no número de conectores ou na resistência dos mesmos não aumenta a resistência à flexão da viga mista.

Quando existe uma conexão parcial, é quando a resistência ao cisalhamento é menor que a do conjunto misto. Isso ocorre quando a quantidade de conectores é menor do que o necessário para conexão completa.

Determina-se o grau de conexão de acordo com a equação 01 abaixo:

$$\eta = \frac{F_{sh}}{F_{shmin}} \quad (\text{Equação 01})$$

η : é o grau de conexão.

F_{sh} : resistência do conector ao cisalhamento;

$F_{sh,min}$: mínima resistência da conexão para haver conexão completa.

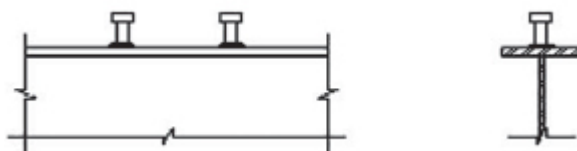
De acordo com ABNT NBR 8800:2008, os valores de η podem variar de 1,0 a 0,5. No caso de $\eta = 1,0$ quando a conexão completa e 0,5 valor mínimo que versa a norma.

Kotinda (2006) destaca a diferença entre os termos grau de conexão e grau de interação. O primeiro faz alusão a resistência da conexão ao cisalhamento da viga mista, e o segundo em relação ao escorregamento do conjunto misto. Os casos de interação parcial são os três da figura 04 e dois de grau de conexão completa.

2.3 CONECTORES DE CISALHAMENTO

De acordo com Pfeil (2009) são dispositivos mecânicos capazes de garantir a união do sistema misto, fazendo a união da laje de concreto e o perfil de aço, assegurando a transferência de esforços entre os materiais e seu comportamento misto. Absorvendo os esforços horizontais que se fazem na longitudinal da laje com a mesa superior da viga e ainda assegura a não separação. Sendo de grande utilização o modelo pino com cabeça ou *Stud bolt*. A Figura 05 mostra o conector pino com cabeça.

Figura 5: Conector de cisalhamento tipo pino em viga de aço.
Fonte: ALVA, 2000.



A resistência nominal de um conector tipo *stud bolt*, o qual está conectado no perfil metálico e laje de concreto, se dá pelas seguintes equações levando em consideração a que tiver menor valor, onde a resistência é mensurada em KN

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{Y_{cs}} \quad (\text{Equação 02})$$

$$Q_{Rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{Y_{cs}} \quad (\text{Equação 03})$$

Y_{cs} : é o coeficiente de ponderação da resistência do conector, igual a 1,25 para combinações últimas de ações normais, especiais ou de construção e igual a 1,10 para combinações excepcionais;

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

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

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

R_g é um coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores, dados vide NBR 8800:2008. O.4.2.1.2;

R_p é um coeficiente para consideração da posição do conector, dado NBR 8800:2008.

2.4 RETRAÇÃO E FLUÊNCIA DO CONCRETO

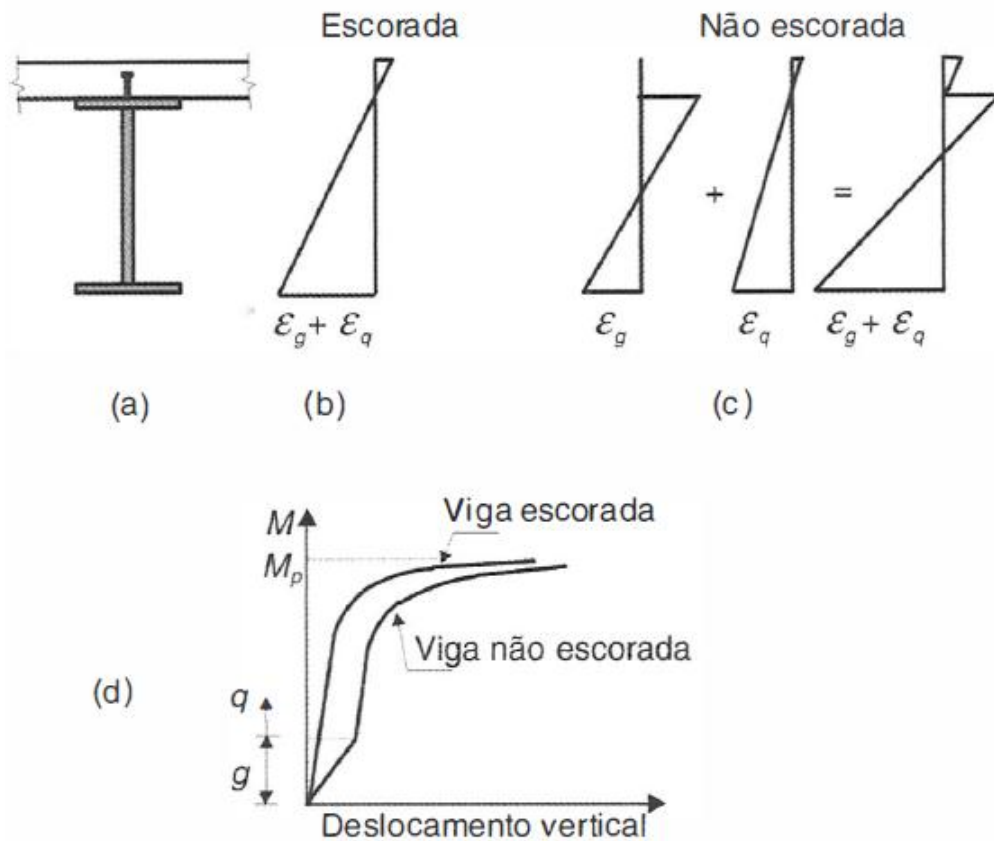
Segundo Pfeil (2009) ao endurecer, o concreto tem seu volume afetado, a depender das condições de cura ao qual o mesmo foi exposto. No sistema misto, o concreto só não retrai em função do perfil metálico que o restringe, o qual permanece em flexocompressão, enquanto o concreto em tração.

O concreto submetido a esforços que comprimem suas fibras, resultado do momento nele causado, deforma-se lentamente e sofre fluência. Essa deformação ocorre de forma lenta, podendo ser o dobro da deformação elástica instantânea. Por isso que em verificações é imprescindível a verificação da fluência.

2.5 CONSTRUÇÃO ESCORADA E NÃO ESCORADA

De acordo com Pfeil (2009), na fase execução da viga mista pode se optar por usar ou não escoramento. Ao optar pela execução da viga com escoramento a seção de aço da mesma não será solicitada por esforços, no processo de endurecimento do concreto. Quando o concreto atinge sua resistência necessária em projeto, o escoramento é retido agindo sobre a seção o peso próprio da laje (g) e outras cargas acidentais (q), agindo sobre a seção mista, e tem como exemplo a figura 6.

Figura 6: a) Viga mista em corte; b) Diagrama de esforços da viga que foi confeccionada com escoramento. c) Crescimento dos momentos fletores; d) Comparativo do deslocamento vertical da viga escorada e não escorada.



No caso da viga executada sem o escoramento, o peso próprio da seção de aço e do concreto fresco provocam maiores deformações na seção. Onde ao ser executada sem essa contenção vertical está sujeita a uma flecha de maior dimensão, podendo, a depender do sistema construtivo, danificar alvenaria e outros elementos. Mas evita o custo adicional com escoramento e a restrição de espaço. Em comparação com a viga escorada as duas atingem o mesmo momento positivo no fim da cura do concreto.

A imagem 01 mostra dois métodos construtivos: escorado e não escorado.

Imagem 01: construção não escorada



Imagem 02: construção escorada.



2.6 RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS MISTAS

2.6.1. Classificação das seções quanto a flambagem local

De acordo com a NBR 8800:2008 o sistema misto de viga biapoiada deve ter relação altura e espessura da alma de (h/t_w) igual à relação que a equação 02 mostra que o perfil estando enquadrado na equação é um perfil compacto. Enfatizando que para ser aplicada no caso em questão a viga terá momento fletor positivo, sendo, que nesse caso, a mesa não sofre flambagem local e nem lateral, pois, esta comprimida e encontra-se presa à laje. Com a laje de concreto tendo rigidez infinita no seu plano.

$$\frac{h}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{Equação 04})$$

Segundo a NBR 8800:2008 na relação entre altura e espessura da alma (h/t_w) citada aqui, a altura h é definida como a distância entre faces internas das mesas nos perfis soldados e como esse valor menos os dois raios de concordância entre a mesa e a alma nos perfis laminados.

Segundo Pfeil (2009) ao tratar de seções semicompactas, onde a equação 03 mostra.

$$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t_w} < 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{Equação 05})$$

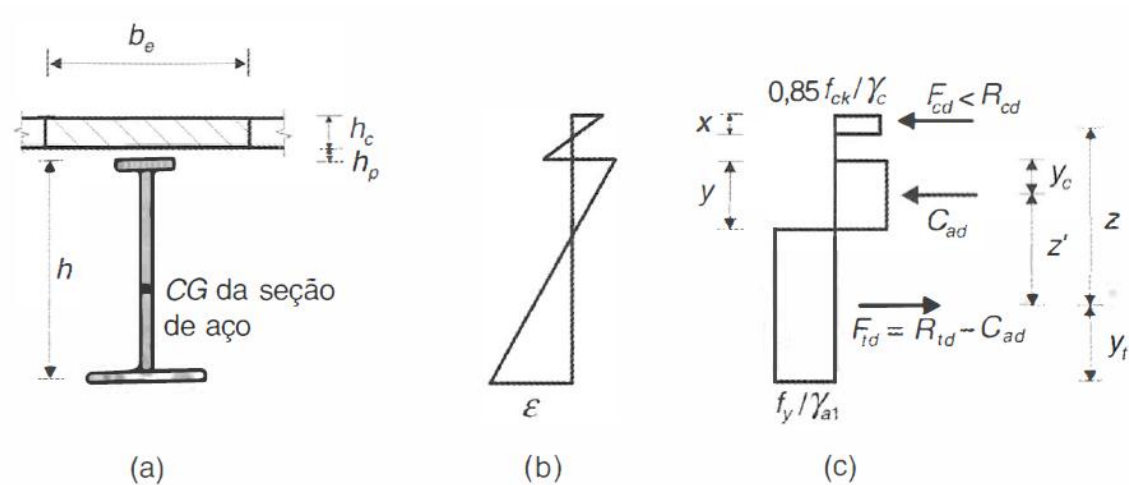
Nas quais a flambagem local ocorrerá somente depois da plastificação da seção. Em relação a viga biapoiada, a mesa superior que neste caso fica comprimida não sofre flambagem local, pois se encontra ancorada na laje de concreto armado. Em resumo ela consegue distribuir as tensões na forma totalmente plástica, então ao plastificar à flambagem local da alma e a resistência ao momento fletor da viga mista é igual ao momento de plastificação.

2.6.2 Resistência à flexão de vigas com seção de aço compacta e com ligação parcial

O momento resistente da viga com ligação parcial é calculado com os diagramas retangulares de tensões, sendo a profundidade da linha neutra da laje de concreto igual como mostrado na equação 06, vide figura 07:

Figura 7: a) Seção mista com ligação parcial; (b) diagrama de deformações; (c) diagramas de tensões na ruptura.

FONTE: PFEIL, 2009.



$$x = \frac{F_{cd}}{0,85 f_{ck} b_e / \gamma_c} \leq h_c \quad (\text{Equação 06})$$

E seu momento resistente pode ser calculado à partir da equação 07:

$M_{d\ res} = C_{ad}Z + FZ' = F_{cd} \left(h - y_t + h_p - \frac{x}{2} \right) + c_{ad}(h - y_t - y_c)$	(Equação 07)
--	--------------

2.6.3 Largura efetiva da laje

Pfeil (2009) comenta sobre a largura e as propriedades inerentes a laje de concreto armado para o sistema misto. Lembrando que a mesma é par fim de cálculos e fórmulas simplistas.

Com auxílio de fórmula da resistência. A largura efetiva depende da configuração geométrica que o sistema está disposto, como tipo de perfil metálico utilizado. Onde houver cargas concentradas a largura pode ser diminuída. A título de simplificação, as normas levam em conta valores conservadores, os quais se aplicam a qualquer tipo de carga.

De acordo com Pfeil (2009) a largura efetiva da laje é a soma de cada parcela até a linha de centro da mesma, entendendo-se por b_e largura efetiva, b_{e1} largura efetiva da primeira parcela e b_{e2} a largura efetiva da segunda parcela. Todos de acordo com a Figura 8 e Tabela 1.

Contando com l_0 , sendo a distância a qual o momento é nulo, e falando em viga biapoiada o l_0 é o vão da viga.

Figura 8: Largura efetiva da laje para fins de cálculo.
FONTE: PFEIL, 2009.

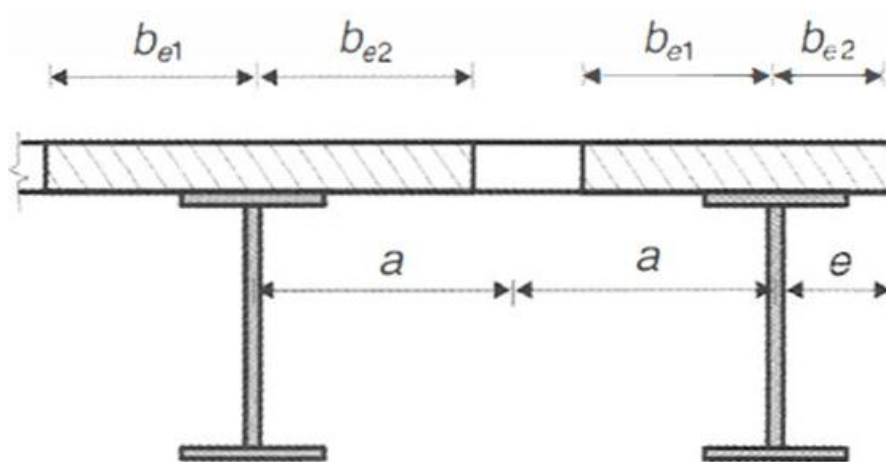


Tabela 1: Valores limites de b_{e1} e b_{e2} expostos na figura 08.

Trecho intermediário	Trecho da extremidade
$l_0/8$	$l_0/8$
A	E

2.6.4 Seção homogeneizada para cálculos em regime elástico

De acordo com Pfeil (2009) para se obter as propriedades geométricas da seção a ser analisada, é necessário fazer a homogeneização da seção, isso é, transformar a seção de concreto em uma equivalente de aço, dividindo sua área pela relação seguinte da equação 07:

$$\alpha = \frac{E_{aço}}{E_{concreto}} \quad (\text{Equação 08})$$

Eaço- Módulo de elasticidade do aço; e

Econcreto- Módulo de elasticidade do concreto.

2.6.5 Relação entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto

Pfeil (2009) fala que a deformação do concreto é não linear, ou seja, não se comporta de maneira constante em todas as etapas do carregamento ao qual está submetido. Para cada nível de tensão tem-se um módulo tangente e outro secante.

Para cargas de curta duração a NBR 8800:2008, indica uma expressão que relaciona a resistência a compressão do concreto e o valor médio do módulo secante. Vide equação 09.

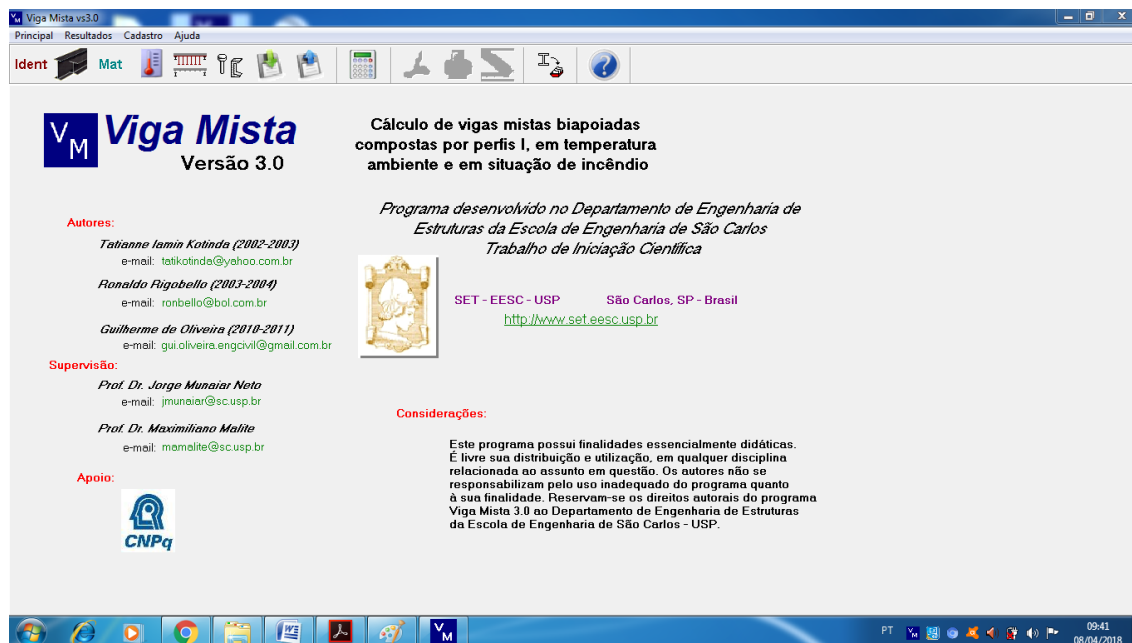
$$E_{c0} = 0,85 \times 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad \text{(Equação 09)}$$

Fck- resistência a compressão do concreto dado em MPa

2.7 VIGA MISTA 3.0

O programa viga mista VS 3.0 é um *software* de livre distribuição a fim de fomentar as pesquisas acadêmicas na área das estruturas mistas de concreto e aço com aplicabilidade nas vigas mista. Faz a análise numérica do comportamento estrutural de vigas mistas biapoiadas, compostas de perfil em I soldados ou laminados de abas paralelas. E seu *layout* é apresentado na figura 9.

Figura 9: *Layout* do *software* Viga mista 3.0.
Fonte: KOTINDA, 2011.



A análise conta tanto com temperatura ambiente como em situação de incêndio. Todo o cálculo tem como base os equacionamentos prescritos na NBR 8800:2008 e no projeto de revisão da NBR 1432:2010.

Conta com verificação de construção escorada e não escorada.

Em relação a conectores de cisalhamento, os tipos previstos em norma são tipo perfil U (laminado ou formado a frio) ou pino com cabeça (*studbolt*).

3. METODOLOGIA

A metodologia usada neste trabalho será a pesquisa exploratória, qualitativa e quantitativa a partir de um estudo de caso. Entende-se por pesquisa exploratória aquela que visa proporcionar maior familiaridade com o fato ou fenômeno, a fim de torná-lo mais claro. Envolve um levantamento bibliográfico e documental, entrevistas não padronizadas, estudo de caso, entre outras técnicas.

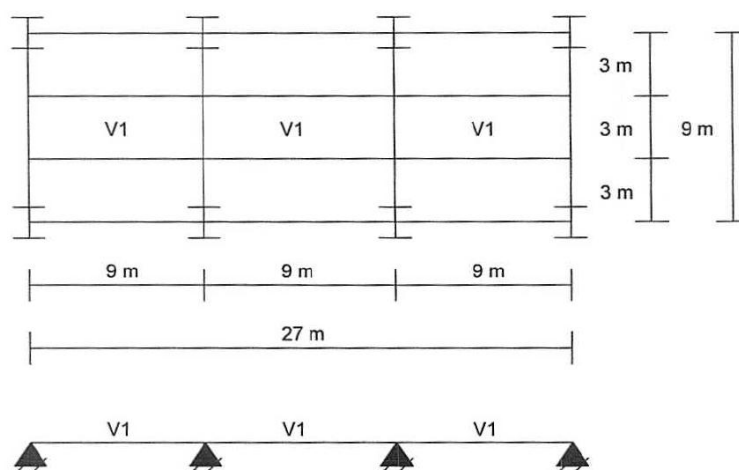
O ponto inicial do trabalho em questão se deu por meio de uma pesquisa bibliográfica para embasar o estudo. A monografia de Liliane do Rocio Marconcin, que teve como tema “Projeto de vigas mistas: confronto das recomendações normativas”, e o livro de Walter Pfeil, sob o título “Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008” serviram como base para nortear as situações de estudo deste trabalho.

Para realização do presente estudo, o trabalho foi dividido em duas etapas: a resolução do PROBLEMA 01 e a resolução do PROBLEMA 02.

3.1 PROBLEMA 01

A partir do trabalho de Marconcin (2007), foi definido que o sistema misto usado em sua monografia de especialização seria a base de comparação, através de simulações numéricas, com as recomendações da norma brasileira 8800:2008. O modelo utilizado no trabalho esta representado na Figura 10. O qual foi simulado com interação total e parcial para o problema em questão e para maiores resultados a serem comparados.

Figura 10: Sistema de piso misto de um edifício o de escritório.
FONTE: Marconcin, 2007.



Segundo Marconcin (2007) foram realizadas simulações para cada norma e todas as verificações para a viga V1 que se localiza na parte central do sistema, considerando-a como biapoiada. No caso em questão adotou-se 100mm para espessura de laje de concreto armado maciço, e sem forma incorporada. Com isso não haverá distância significativa entre a capa de concreto (H_F) e o topo do perfil metálico.

Para desenvolvimento das simulações seguintes a interação é total e parcial para os conectores.

Outros itens a serem levados em consideração para efeito de cálculo são:

Viga mista não escorada;

O concreto tem peso específico $Y_c=25 \text{ KN/m}^3$ e $f_{ck}= 20 \text{ MPa}$;

Aço empregado na confecção da viga é o CIVIL 300;

Os conectores serão do tipo pino com cabeça (Stud bolt) 3/4”.

De acordo com Marconcin (2007) as simulações se mostram semelhantes quanto ao roteiro de cálculo. Para ambas NBR 8800:1986 e NBR 8800:2006.

De início apresenta-se para fornecer dados referentes ao carregamento da seção, as medidas referentes ao perfil metálico, espaçamento entre vigas, espessura da laje de concreto, propriedades do aço, peso específico do concreto e diâmetro e comprimento dos conectores. No item segundo item apresenta-se as propriedades geométricas do perfil metálico, da laje e da seção homogeneizada. No terceiro são consideradas as cargas e esforços provenientes delas antes e depois da cura do concreto. Logo após verifica-se o esforço cortante. Próximo passo são as verificações referentes aos efeitos da flexão na seção que são: flambagem de mesa e de alma, flexão e verificação do momento fletor antes da cura. Logo entra a verificação da seção mista, para interação total e parcial. E todos esses parâmetros estão dispostos no ANEXO 01.

3.2 PROBLEMA 02

O segundo exemplo a ser analisado foi extraído de Pfeil (2009), o qual diz: um piso de edifício é formado por vigas mistas espaçadas de 2,8 m e com vão simplesmente apoiados de 9,0 m de comprimento. A laje de 10 cm de espessura será concretada sobre um sistema de fôrmas apoiadas nos perfis de aço das vigas. Trata-se, portanto, de vigas mistas não escoradas. Esse exemplo analítico será desenvolvido e comprado com as considerações da NBR 8800:2008. A memória de cálculo está descrita no ANEXO 02 deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. RESULTADOS COMPARATIVOS E ROTEIRO DE CÁLCULO

4.1.1 Problema 01

Os resultados da autora que tomam como base a NBR 8800:1986 (revisão 2006), e são comparados com os resultados gerados pelo software Viga mista 3.0 que se orienta através da NBR 8800:2008. A tabela 2 apresenta o comparativo de resultados NBR 8800:1986 e NBR 8800:2008. Contando com interação total e parcial, para obter-se maior número de resultados possíveis.

Tabela 2: Comparativos dos resultados de MARCONCIN (2007) com o Software Viga 3.0.

ESTADO LIMITE ÚLTIMO	NBR 8800:1986	Software viga 3.0 VS NBR 8800:2008
Interação total		
Momento resistente de cálculo [KN.m]	547,79	498,54
Resistência mínima dos conectores no trecho [KN]	97,66	74,61
Número de conectores necessários em meia viga	22	25
Posição da linha neutra y [mm] obs.: posição da linha neutra a partir do topo da viga de aço	-23,99	-32,71
Interação parcial		
Momento resistente de cálculo [KN.m]	476,03	436,0
Resistência mínima dos conectores no trecho [KN]		764,15
Número de conectores necessários em meia viga	11	10
Força cortante (sem reforçadores)		
Cortante resistente de cálculo [KN]	462,91	494,35
Verificação como viga de aço isolada		
Momento resistente de cálculo - FLA [KN.m]	284,09	287,04
Momento resistente de cálculo - FLM [KN.m]	284,09	287,04
Limitação de tensões		
MG/WA+ML/Wef [KN/cm ²]	24,69	36,28

Analisando primariamente a resistência do conjunto de conectores pino com cabeça há uma diferença de resistência dos mesmos, pois, a norma muda o critério de cálculo dele, assim colocando um coeficiente de minoração que divide a equação por 1,25, o qual faz com que diminua o esforço e consequentemente utilize-se uma solução menos onerosa, uma vez que quanto maior a resistência exigida do conector maior seu custo encarecendo o conjunto.

Houve uma diferença no esforço cortante, proveniente de adequação na formulação com o coeficiente de minoração que faz a divisão da força cortante em 1,25 ou 1,10 a depender do caso, com isso ocasionado a diferença de valores da força.

Enquanto o momento resistente de cálculo tanto para flambagem local da mesa quanto da alma resultaram muito próximos indicando que a norma não sofreu adequação em relação à flexão de tais elementos.

Suas principais mudanças estão na área do cisalhamento do conjunto e linha neutra plástica onde a norma foi alterada levando em consideração mais variáveis para o cálculo.

4.1.2 Problema 02

Os resultados do exemplo de Pfeil (2009) são comparados com os resultados gerados pelo software Viga mista 3.0 que se orienta através da NBR 8800:2008. A Tabela 3 apresenta o comparativo de resultados NBR 8800:1986 e NBR 8800:2008.

Tabela 3: Comparativo de resultados do Pfeil (2009) com a simulação no Viga mista 3.0

ESTADO LIMITE ÚLTIMO	NBR 8800:1986	Software viga 3.0 VS NBR 8800:2008
Interação total		
Momento resistente de cálculo [KN.m]	450	449,68
Resistência mínima dos conectores no trecho [KN]	1514,81	1513,55
Número de conectores necessários em meia viga	30	30
Posição da linha neutra y [mm] obs.: posição da linha neutra a partir do topo da viga de aço	-44,3	-44,6
Interação parcial		

Momento resistente de cálculo [KN.m]	434	387,16
Resistência mínima dos conectores no trecho [KN]	620,4	605,42
Número de conectores necessários em meia viga	12	12
Força cortante (sem reforçadores)		
Cortante resistente de cálculo [KN]	466	465,95
Verificação como viga de aço isolada		
Momento resistente de cálculo - FLA [KN.m]	274,0	248,98
Momento resistente de cálculo - FLM [KN.m]	274,0	248,98

A diferença neste caso encontra-se no caso da interação parcial, pois, o software considera que uma interação de 40% já seria suficiente para garantir a segurança estrutural, por isso de diferentes momentos. Enquanto o exemplo do Pfeil, 2009 impõe uma interação de 80%, consequentemente atingindo momento resistente maior na viga e resistência. Nos conectores, o esforço cortante resistente, necessariamente precisando ser maior para assegurar a interação à 80%.

No tocante dos resultados diferentes, isso se dá por conta do grau de interação. O software simula com o mínimo resultado para que a estrutura fique estável ao carregamento. Enquanto o exemplo do autor impõe uma interação de 80%, isso faz a diferença nos cálculos para os cálculos de momento resistente de cálculo na Flambagem local da mesa e da alma.

Enquanto aos outros resultados considerando a interação do sistema como total, ambos se fizeram muito próximos, dentro de margens de segurança. Sendo que as variáveis consideradas foram as mesmas. Confirmando que o método de cálculo foi o mesmo, e os resultados mostraram-se bem próximos.

5. CONCLUSÃO

O avanço do emprego dos sistemas mistos de concreto e aço, em nível nacional já se mostra uma realidade, tendo em vista que se encontra um mercado muito competitivo que migra para soluções que maximizem o espaço e mostrem eficiência. Além disso, apresentam soluções que conduzem a empreendimentos mais limpos e eficientes em relação a execução. Porém a normatização de cálculo de estrutura de aço passa por estudos para sua evolução, gerando reformulações, refutam e aceitam novos métodos a fim de aprimorar seus métodos de análise. Assim, a norma brasileira dá seus passos no contexto nacional para otimização e emprego de tal solução estrutural.

A partir dos objetivos do trabalho foi possível a interpretação de algumas conclusões. No problema 01, na análise do sistema misto destaca-se alguns pontos relevantes, como: análise no estado limite último, onde as principais diferenças foram encontradas no cálculo da flexão no caso da comparação da norma de 1986 com a atualização de 2008. Na relação que tange a mudança do coeficiente de majoração de 1,0 para 0,9 no momento resistente de flexão esse fator levou a resultados diferentes, isso mostra as mudanças na atualização da norma que se mostra mais cautelosa em relação aos resultados de momento. Em relação ao número de conectores também houve diferença em relação a números totais, pois, o coeficiente de minoração trouxe menor resistência ao conjunto no esforço cortante.

Já no problema 02, os resultados foram bem próximos, tendo em vista que a norma de cálculo foi a mesma. O software que simulou o exemplo fez arredondamentos que deu pequena diferença, porém insignificante em termos de análise estrutural.

6. SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Por fim, percebe-se que este trabalho apresenta subsídio para novas pesquisas, não só de maneira analítica como de maneira experimental a fim de atestar a veracidade dos exemplos propostos através do comparativo das normas existentes. Além disso é possível vislumbrar novas linhas de pesquisa sobre o assunto, visto que é de grande procura nos grandes centros de pesquisa. Também é relevante propor o estudo das estruturas mistas como componente curricular obrigatório nos cursos de bacharelado em Engenharia Civil. É com a abertura da disciplina de Estruturas Mistas de Concreto e Aço que será possível a integração da pesquisa e ensino, atendendo as necessidades do mercado atual.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. **Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto**. 2000. Tese (Doutorado em estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 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.

CONSELHO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Construção em aço. Estatísticas**.

KOTINDA, Tatianne Iamin. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. 2006. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. doi:10.11606/D.18.2006.tde-22062006-110301. Acesso em: 2017-12-25.

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

MARCONCIN, Liliane do Rocio. **Projeto de vigas mistas: confronto das recomendações normativas**. 2007. Monografia (Especialização em Tecnologia de Estruturas Metálicas) – Faculdade de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba, 2007.

PFEIL, Michèle. PFEIL, Walter. **Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 8ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SÁLES, José Jairo de. **Estudo do projeto e da construção de edifícios de andares múltiplos com estruturas de aço**. 1995. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/producao/838>. Acesso em: 03/04/2018.

Viga Mista v3.0. disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/portal/pt/software/27-pesquisa/software/217-viga-mista-30>.

ANEXO 01

As simulações numéricas servem como base para elaboração da tabela 3 exposta nos resultados.

1. Revisão da NBR 8800:2006 – Dados de Entrada

Tabela 4: Cargas permanentes do Problema 01

Peso próprio do vigamento:	$P_{viga} = 0,25 \text{ KN/m}^2$
Peso próprio da forma:	$P_{forma} = 0,35 \text{ KN/m}^2$
Peso próprio do revestimento mais regularização:	$P_{reves.} = 1,0 \text{ KN/m}^2$
Peso próprio das divisórias:	$P_{div} = 2,0 \text{ KN/m}^2$

Tabela 5: Sobrecargas do Problema 01

Sobrecarga de construção:	$P_{scc} = 1,0 \text{ KN/m}^2$
Sobrecarga de utilização:	$P_{scu} = 3,0 \text{ KN/m}^2$

Tabela 6: Dados da viga do Problema 01

Vão da viga:	$L_U = 900 \text{ mm}$
Perfil da viga:	Perfil = “W 410x53”
Altura do perfil:	$d = 403 \text{ mm}$
Largura da mesa:	$b_f = 177 \text{ mm}$
Espessura da mesa superior:	$t_{fs} = 10,9 \text{ mm}$
Espessura da alma:	$t_w = 7,5 \text{ mm}$
Espaçamento entre vigas:	$e_v = 3000 \text{ mm}$
Distância do topo do perfil até a face de capa de concreto:	$h_f = 0,0 \text{ mm}$
Aço do perfil metálico:	Aço = “CIVIL 300”
Limite de escoamento do aço:	$f_y = 300 \text{ MPa}$
Limite de resistência a tração do aço:	$f_w = 400 \text{ MPa}$
Tensão residual do aço:	$f_r = 115 \text{ MPa}$
Módulo de elasticidade do aço:	$E = 205000 \text{ MPa}$

Tabela 7: Dados da laje

Espessura da laje de concreto:	$T_c = 100 \text{ mm}$
Resistência característica a compressão do concreto:	$f_{ck} = 20 \text{ MPa}$
Peso específico do concreto:	$\gamma_c = 25 \text{ KN/m}^3$

Tabela 8: Dados dos conectores de cisalhamento

Pino com Cabeça:	
Diâmetro do conector:	$d_{cs} = 3/4$
Limite de ruptura do aço do conector de cisalhamento:	$f_{uc} = 415 \text{ MPa}$
Propriedades da seção transversal:	
Perfil metálico:	
Peso próprio do vigamento:	$P_v = 0,25 \text{ KN/m}^2$
Designação do perfil:	Perfil = “w 410x53”
Altura da alma:	$h = 381 \text{ mm}$
Área do perfil:	$A_a = 68,4 \text{ cm}^2$
Posição do centro de gravidade do perfil (em relação à base):	$Y_{ia} = 201,5 \text{ mm}$
Posição do centro de gravidade do perfil (em relação ao topo):	$Y_{ia} = 201,5 \text{ mm}$
Momento de inércia do perfil:	$I_a = 18734 \text{ cm}^4$
Módulo resistente superior do perfil:	$W_{as} = 929,7 \text{ cm}^3$
Módulo resistente inferior do perfil:	$W_{ai} = 929,7 \text{ cm}^3$
Módulo plástico do perfil:	$Z_X = 1052,2 \text{ cm}^3$

2. Memória de cálculo

a) Laje de concreto:

laje:

$$T_c = 100,00 \text{ mm}$$

Largura efetiva da laje de concreto:

$$b = \min\left(\frac{L_v}{4} \cdot e_v\right)$$

$$b = 2,25 \times 10^3 \text{ mm}$$

Módulo de elasticidade do concreto:

$$E_c = 42 \cdot Y_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \cdot 100,00 \text{ mm}$$

$$E_c = 2,35 \times 10^4 \text{ MPa}$$

b) Seção mista – seção transformada:

Para considerar os efeitos da fluência do concreto: módulo de elasticidade será dividido por 3.

Relação modular:

$$n = \frac{E}{\frac{E_c}{3}}$$

$$n = 26,19$$

Largura equivalente do aço:

$$b_e = \frac{b}{n}$$

$$b_e = 85,9 \text{ mm}$$

Área equivalente de aço:

$$A_e = b_e \cdot t_c$$

$$A_e = 85,9 \text{ cm}^2$$

Posição da linha neutra elástica (em relação à face inferior da mesa inferior do perfil metálico):

$$y_{tr} = \frac{y_{ia} \cdot A_a + A_e \cdot \left(\frac{t_c}{2} + d\right)}{A_a + A_e}$$

$$y_{tr} = 354,51 \text{ mm}$$

c) Sobrecarga:

Sobrecarga de utilização:

$$q_{scu} = P_{scu} \cdot e_v$$

$$q_{scu} = 9 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

d) Esforços na viga isolada de aço (VAI) antes da cura do concreto:

Carga de cálculo na VAI:

$$q_{d_ac} = 1,3 (q_{viga} + q_{laje} + q_{forma}) + 1,3 q_{scu}$$

$$q_{d_ac} = 15,99 \text{ KN/m}$$

Momento de cálculo na VAI:

$$q_{d_ac} = q_{d_ac} \cdot \frac{Lv^2}{8}$$

$$q_{d_ac} = 161,9 \text{ KN.m}$$

Carga nominal na VAI:

$$q_g = (q_{viga} + q_{laje} + q_{forma})$$

$$q_g = 9,3 \text{ KN/m}$$

Momento nominal na VAI:

$$M_g = \left(q_g \cdot \frac{Lv^2}{8} \right)$$

$$M_g = 94,16 \text{ KN.m}$$

e) Esforços na viga mista depois da cura do concreto:

Carga nominal na viga mista:

$$q_g = (q_{rev.} + q_{viga} + q_{laje} - q_{forma})$$

$$q_g = 16,95 \text{ KN/m}$$

Momento nominal na viga mista:

$$M_L = \left(q_g \cdot \frac{Lv^2}{8} \right)$$

$$M_g = 171,62 \text{ KN.m}$$

f) Esforços totais na viga mista:

Carga de cálculo total na viga mista:

$$q_d = 1,4 (q_{rev.} + q_{viga} + q_{laje} + q_{div.})$$

$$q_g = 37,68 \text{ KN/m}$$

Momento de cálculo total na viga mista:

$$M_L = \left(q_g \cdot \frac{Lv^2}{8} \right)$$

$$M_g = 381,21 \text{ KN.m}$$

g) Verificação do esforço cortante:

Área da alma:

$$A_w = (t_w \cdot h)$$

$$A_w = 28,57 \text{ cm}^2$$

Esbeltez da alma:

$$\lambda_w = \left(\frac{h}{t_w} \right)$$

$$\lambda_w = 50,80 \text{ cm}^2$$

Limite plástico de esbeltez da alma:

Como a viga não possui enrijecedores transversais:

$$k_v = 5$$

$$\lambda_p = 1.1 \sqrt{\left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)}$$

$$\lambda_p = 64,30$$

Limite elástico de esbeltez da alma:

$$\lambda_r = 1.37 \sqrt{\left(\frac{E \cdot k_v}{f_y} \right)}$$

$$\lambda_r = 80,08$$

Cortante de plastificação da alma:

$$V_{pl} = 0,6 \cdot f_y \cdot A_w$$

$$V_{pl} = 514,35 \text{ KN}$$

Resistência nominal ao cortante:

$$V_n = V_{pl} \quad \lambda_w \leq \lambda_p$$

$$\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_w} \cdot V_{pl} \right) \text{ e } \lambda_p < \lambda_w \leq \lambda_r$$

$$\left[1,28 \cdot \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_w} \right)^2 \cdot V_{pl} \right] \text{ e } \lambda_w > \lambda_r$$

$$V_n = 514,35 \text{ KN}$$

Resistência de cálculo ao cortante:

$$\Phi V_n = 0,90 \cdot V_n$$

$$\Phi V_n = 462,91 \text{ KN}$$

Verificação do esforço cortante:

$$Ver(V_d \cdot \Phi V_n) = "169,4 \text{ KN} < 462,91 \text{ KN. Ok"}.$$

h) Verificação da viga de aço isolada:

Flambagem local da mesa – FLM:

Esbeltez da alma:

$$\lambda_f = \left(\frac{b_f}{2t_{fs}} \right)$$

$$\lambda_f = 8,12$$

Limite plástico de esteltez da alma:

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_p = 9,93$$

Limite elástico de esteltez da alma:

$$K_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{f_w}}}$$

$$\lambda_r = 0,83 \sqrt{\frac{E}{f_y - f_r}}$$

$$\lambda_r = 27,63$$

Momento de plastificação da seção:

$$M_{pl} = z_x \cdot f_y$$

$$M_{pl} = 315,66 \text{ KN.m}$$

Momento correspondente ao início de escoamento da seção:

$$M_r = W_{as}(f_y - f_r)$$

$$M_r = 171,99 \text{ KN.m}$$

Resistência nominal à flexão:

$$M_n = M_{pl} \quad \lambda_r \leq \lambda_p$$

$$M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \text{ e } \lambda_p < \lambda_f \leq \lambda_r$$

$$\left[0,90 \cdot \left(\frac{E \cdot k_c}{\lambda_f^2} \right) \cdot W_{as} \right] \text{ e } \lambda_r > \lambda_f$$

$$M_n = 315,66 \text{ KN.m}$$

Resistência de cálculo à flexão – FLM:

$$\Phi M_{n.FLM} = 0,90 M_n$$

$$\Phi M_{n.FLM} = 284,09 \text{ KN.m}$$

Flambagem local da alma – FLA:

Esbeltez da alma:

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w}$$

$$\lambda_w = 50,8$$

Limite plástico de esbeltez da alma:

$$\lambda_r = 3,76 \cdot \frac{h}{2y_{sa}} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = 149$$

Momento correspondente ao início do escoamento da seção:

$$M_r = W_{as} \cdot f_y$$

$$M_r = 278,91 \text{ KN.m}$$

Resistência nominal à flexão:

$$M_n = M_{pl} \quad \lambda_r \leq \lambda_p$$

$$M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \text{ e } \lambda_p < \lambda_f \leq \lambda_r$$

$$\text{"Viga esbelta"} \quad \text{e} \quad \lambda_r > \lambda_f$$

$$M_n = 315,66 \text{ KN.m}$$

Resistência de cálculo à flexão – FLA:

$$\phi M_{n.FLM} = 0,90 M_n$$

$$\phi M_{n.FLM} = 284,09 \text{ KN.m}$$

Resistência de cálculo à flexão:

$$\phi M_n = \min. (\phi M_{n.FLM}, \phi M_{n.FLA})$$

$$\phi M_n = 284,09 \text{ KN.m}$$

Verificação do momento fletor:

$$Ver_{M(M_{d_{ac}} \cdot \phi M_n)} = "161,9 \text{ KN.m} < 284,1 \text{ KN.m. ok}"$$

(Conclusão do autor a ser comparado com o resultado no programa viga mista 3.0 vs).

i) Verificação da viga mista:

Resistência dos conectores de cisalhamento (CC):

$$A_{CS} = \frac{\pi d_{cs}^2}{4}$$

$$A_{CS} = 2,85 \text{ cm}^2$$

Resistência do pino com cabeça:

Ruína do concreto:

$$q_{nC} = 0,5 A_{CS} \cdot \sqrt{f_{ck} E_c}$$

$$q_{nC} = 97,66 \text{ KN}$$

Ruptura do conector:

$$q_{na} = A_{CS} \cdot f_{uc}$$

$$q_{na} = 118,28 \text{ KN}$$

Resistência do pino com cabeça:

$$q_n = \min(q_{nC} \cdot q_{na})$$

$$q_n = 97,66 \text{ KN}$$

j) Viga mista com interação total:

Verificação de resistência final da viga mista

Esbeltez da alma

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w}$$

$$\lambda_w = 50,8$$

$\lambda_w < \lambda_p$ a seção mista pode plastificar

Carga de esmagamento da laje de concreto:

$$C = f_{ck} \cdot b \cdot t_c$$

$$C = 2,97 \cdot 10^3 \text{ kN}$$

Carga de escoamento do perfil metálico

$$T = A_a \cdot f_y$$

$$T = 2,05 \cdot 10^3 \text{ kN}$$

Com $C > T$ a linha neutra plástica (LNP) está na laje de concreto:

Número de conectores de cisalhamento para interação completa:

Pino com cabeça:

$$n_{cc} = \frac{(A_a \cdot f_y)}{q_n}$$

$$n_{cc} = 21,01$$

$$n_{cc \text{ dado}} = 22$$

Posição da linha neutra plástica:

$$a = \frac{(A_a \cdot f_y)}{q_n \cdot b \cdot 0,66}$$

$$a = 69,09 \text{ mm}$$

Resistência nominal à flexão:

$$M_n = A_a \cdot f_y \cdot (y_{sa} + t_c + h_f - \frac{a}{2})$$

$$M_n = 547,79 \text{ kN.m}$$

Resistência de cálculo à flexão

$$\beta M_n = 1,0 M_n$$

$$\beta M_n = 547,79 \text{ kN.m}$$

Verificação do momento fletor:

$$Ver_M = (M_d \beta M_n) = "381,2 \text{ kN.m. Ok}"$$

Verificação da tensão de tração na mesa inferior:

Tensão de tração na mesa inferior:

$$f_{ni} = \frac{M_g}{W_{ai}} + \frac{M_L}{W_{tri}}$$

$$f_{ni} = 235,91 \text{ MPa}$$

Limite para tensão de serviço:

$$F_{ts} = 0,9 \cdot f_y$$

$$F_{ts} = 270 \text{ MPa}$$

Verificação da tensão de serviço:

$$Ver_t(f_{ni} \cdot F_{ts}) = "235,9 MPa < MPa - ok"$$

Obs.: Como tanto a verificação da resistência à flexão da seção mista como a verificação das tensões de serviço estão com folga pode-se tentar reduzir o perfil ou utilizar interação parcial para reduzir o número de conectores de cisalhamento.

Viga mista com interação parcial:

Número de conectores de cisalhamento para interação parcial:

Pino com cabeça:

$$n_{min} = \frac{\min(0,85 \cdot f_{ck} \cdot t_c \cdot b \cdot A_a \cdot f_y)}{2q_n}$$

$$n_{min} = 10,51$$

$$n_{adotado} = 11$$

Esforço resistido pela laje de concreto:

$$C = \frac{0,7n_{adotado} \cdot q_n}{0,9}$$

$$C = 835,51 \text{ KN}$$

Espessura comprimida da laje de concreto:

$$a = \frac{C}{0,66f_{ck} \cdot b}$$

$$a = 28,13 \text{ mm}$$

Compressão no perfil metálico:

$$C_1 = \frac{1}{2} (A_a \cdot f_y - C)$$

$$C_1 = 608,25 \text{ KN}$$

Tração no perfil metálico:

$$T = T + C_1$$

$$T = 144 \times 10^3$$

Posição da linha neutra plástica no perfil de aço:

Carga de escoamento na mesa superior:

$$P_f = b_s \cdot f_y \cdot t_{fs}$$

$$P_f = 578,79 \text{ KN}$$

Obs.: Como $C_1 > P_f$ - LNP na alma:

Distância da LNP ao topo do perfil:

$$y_s = \frac{C_1 - P_f}{t_w \cdot f_y}$$

$$y_s = 23,99 \text{ mm}$$

De terminação da posição do CG da parte tracionada e da parte comprimida do perfil metálico:

Altura da parte comprimida da alma:

$$h_c = y_s - t_{fs}$$

$$h_c = 13,09 \text{ mm}$$

Área da parte comprimida da alma:

$$A_c = b_f \cdot y_s + t_w h_c$$

$$A_c = 20,27 \text{ cm}^2$$

Distância do CG da parte comprimida ao topo do perfil metálico:

$$y_c = \frac{\frac{b_f \cdot t_{fs}^2}{2} + h_c \cdot t_w \cdot (\frac{h_c}{2} + t_{fs})}{A_c}$$

$$y_c = 6,03 \text{ mm}$$

Altura da parte tracionada:

$$h_t = h - h_c$$

$$h_t = 367,91 \text{ mm}$$

Área da parte tracionada do perfil:

$$A_c = b_f \cdot t_{fi} + t_w h_f$$

$$A_c = 46,89 \text{ cm}^2$$

Distância do CG da parte comprimida ao topo do perfil metálico:

$$y_t = \frac{\frac{b_f \cdot t_{fi}^2}{2} + h_t \cdot t_w \cdot (\frac{h_t}{2} + t_{fi})}{A_t}$$

$$y_t = 116,92 \text{ mm}$$

Resistência nominal à flexão:

$$M_n = c_1(d - y_t - y_c) + C \cdot (t_c - \frac{a}{2} + d - y_t + h_f)$$

$$M_n = 481,16 \text{ KN.m}$$

Resistência de cálculo à flexão:

$$\beta M_n = 1,0 M_n$$

$$\beta M_n = 481,16 \text{ KN.m}$$

Verificação do momento fletor:

$$Ver_M(M_d \cdot \beta M_n) = "381,2 \text{ KNm} < 481,2 \text{ KNm} - ok"$$

Verificação da tensão de tração na mesa inferior:

Esforço cortante horizontal:

$$V_h = \min(A_a \cdot f_y \cdot 0,85 f_{ck} \cdot t_c \cdot b)$$

$$V_h = 2,05 \times 10^3 \text{ KN}$$

Módulo resistente inferior da seção mista (interação parcial):

$$W_{ef} = W_{ai} + \sqrt{\frac{n_{adotado} \cdot q_n}{V_h}} \cdot (W_{tri} - W_{ai})$$

$$W_{ef} = 1,18 \times 10^3 \text{ cm}^3$$

Tensão de tração na mesa inferior:

$$f_{ni} = \frac{M_g}{W_{ai}} + \frac{M_L}{W_{ef}}$$

$$f_{ni} = 246,8 \text{ MPa}$$

Limite para tensão de serviço:

$$f_{ts} = 0,9 f_y$$

$$f_{ts} = 270 \text{ MPa}$$

Verificação da tensão de serviço:

$$Ver_M(f_{ni} \cdot F_{ts}) = "246,8 \text{ MPa} < 270 \text{ MPa} - ok"$$

Verificação dos deslocamentos:

Momento de inércia da seção transformada (reduzido pela interação parcial):

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\frac{n_{adotado} \cdot q_n}{V_h}} \cdot (I_{tr} - I_a)$$

$$I_{ef} = 3,41 \times 10^4 \text{ cm}^4$$

Flecha causada pelas cargas atuantes da cura do concreto:

$$\Delta_{ac} = \frac{5 \cdot M_g \cdot L_v^2}{48 \cdot E \cdot I_a}$$

$$\Delta_{ac} = 13,41 \text{ mm}$$

Flecha causada pelas cargas atuantes depois da cura do concreto:

$$\Delta_{dc} = \frac{5 \cdot M_L \cdot L_v^2}{48 \cdot E \cdot I_{ef}}$$

$$\Delta_{dc} = 22,02 \text{ mm}$$

Flecha total da viga:

$$\Delta_{total} = \Delta_{ac} + \Delta_{dc}$$

$$\Delta_{total} = 35,43 \text{ mm}$$

Verificação da flecha total:

$$ver \left(\Delta_{total} \cdot \frac{L_v}{240} \right) = "35,4 \text{ mm} < 37,5 \text{ mm} - OK"$$

ANEXO 02

As cargas nominais atuantes numa viga intermediária são:

Antes de o concreto atingir $75\%f_{ck}$

Carga permanente:

$$g_1 = 7,6 \frac{KN}{m}$$

Carga de construção

$$q_1 = 1,5 \frac{KN}{m}$$

Após a cura do concreto:

Carga permanente:

$$g_2 = 5,0 \frac{KN}{m}$$

Carga variável de utilização:

$$q_2 = 8,4 \frac{KN}{m}$$

Os materiais a serem utilizados são aço MR 250; concreto $f_{ck} = 20 MPa$. A viga intermediária será dimensionada com ligação total, sendo a seção de aço um perfil W. Empregando-se conectores do tipo pino com cabeça.

Para pré-dimensionamento será feito no estado limite último, admitindo-se a seção de aço compacta e linha neutra na interface concreto aço.

-carga distribuída de projeto:

$$1,4 (7,6+5,0)+1,5 \times 8,4=30,2 \text{ KN/m}$$

Momento solicitante de projeto:

$$M_d = 30,2 \times \frac{98^2}{8} = 306 \text{ KNm}$$

Considerando-se inicialmente um perfil com $h = 450 \text{ mm}$, a área da seção de aço necessária:

$$A = \frac{M_d}{\frac{f_y}{\gamma_{a1}} \left(\frac{h}{2} + h_c - \frac{x}{2} \right)} = \frac{30.600}{\frac{25}{1,10} (22,5 + 10 - 5)} = 49,0 \text{ cm}^2$$

De acordo com a tabela A 6.8, anexo A, do livro Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008, 2009. O perfil correspondente é o W 460 x 52,0, o qual atende à condição de área necessária.

-Largura efetiva da laje para viga intermediária:

$$b_e = \text{mínimo} \left(\frac{1}{4} 900; 280 \right) = 225 \text{ cm}$$

-Classificação da seção quanto à flambagem local da alma:

$$\frac{h_w}{t_0} = \frac{404}{7,6} = 53,1 < 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 106.: \text{ seção compacta}$$

-Momento resistente da viga mista

$$R_{cd} = 0,85 \frac{f_{ck}}{Y_c} b_e \cdot h_c = 0,85 \times \frac{2,0}{1,4} \times 225 \times 10 = 2732 \text{ KN}$$

$$R_{cd} = \frac{A f_y}{Y_{a1}} = \frac{66,6 \times 25}{1,10} = 1513 \text{ KN}$$

Como $R_{cd} > R_{td}$, alinha neutra plástica está na laje de concreto na profundidade:

$$x = \frac{1513 \times 1,4}{0,85 \times 2,0 \times 225} = 5,5 \text{ cm}$$

Momento resistente:

$$x = 1513 \left(\frac{45}{2} + 10 - 2,77 \right) = 45000 \text{ KNcm} > M_d = 306 \text{ KNm}$$

-Momento resistente da seção de aço – Etapa construtiva

A seção de aço deve ter resistência à flexão para suportar as cargas atuantes antes de o concreto atingir $0,75 f_{ck}$.

Momento solicitante de projeto:

$$M_d = \frac{1,4 \times (7,6 + 1,5) \times 9,0^2}{8} = 129,0 \text{ KNm}$$

Considerando-se que perfil de aço está contido lateralmente pelo sistema de apoio das formas, não há flambagem lateral.

Classificação da seção quanto à flambagem local.

Mesa:

$$\frac{b}{t} = \frac{165}{2 \times 11,4} = 7,2 < \lambda_p = 11$$

Alma:

$$\frac{h_w}{t_0} = 53,1 < 106$$

O perfil é compacto.

$$M_p = Z f_y = 1096 \times 25 = 27400 \text{ Kncm} = 274 \text{ KNm}$$

$$M_{d\ res} = \frac{1}{\gamma_{a1}} M_p = \frac{1}{1,10} 274$$

$$M_{d\ res} = 249\text{ KNm} > M_d = 129\text{ KNm}$$

Resistência ao cisalhamento:

Esforço cortante solicitante de projeto:

$$V_{ct} = [1,4(7,6 + 5,0) + 1,5 \times 8,4] \times \left(\frac{9,0}{2}\right) = 136,1\text{ KN}$$

Esforço cortante resistente:

$$2,46 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 69,9 > \frac{h_w}{t_o} = 53,1$$

$$V_{d\ res} = \frac{A_w(0,6f_y)C_y}{\gamma_{a1}} = \frac{45,0 \times 0,76 \times 0,6 \times 25 \times 1,0}{1,10} = 466\text{ KN}$$

-Cálculo do número de conectores para ligação total:

Resistência do conjunto de conectores dispostos entre o meio do vão e o apoio. Como $R_d > R_{td}$, tem-se:

$$nQ_{nl} \geq R_{td} = 1513\text{ KN}$$

Resistência de um conector $\Phi 15,9$

$$Q_n \leq 0,5 \times 1,98 \sqrt{2,0 \times 2129} = 64,6\text{ KN}$$

$$Q_n \leq 1,98 \times 41,5 = 82,2$$

$$Q_{rd} = \frac{64,6}{1,25} = 51,7\text{ KN}$$

Número de conectores:

$$n = \frac{1513}{51,7} = 29,3$$

Adotam-se 30 conectores espaçados de 150 mm, de cada lado da seção no meio do vão.

$$Q_{rd} = \frac{64,6}{1,25} = 51,7\text{ KN}$$

$$a = 150 < 8 \times 100 = 800\text{ mm}$$

$$a = 150 > 6d = 6 \times 15,9 = 95,4 \text{ mm}$$

-Verificação no estado limite de utilização (ou de serviço)

Deslocamento no meio do vão na etapa de construção (seção de aço portante)

$$\delta g_1 = \frac{5}{584} \frac{g_1}{EI} = \frac{5}{584} \frac{0,076 \times 900^4}{20000 \times 21370} = 1,52 \text{ cm}$$

Deslocamento no meio do vão da viga mista devido à combinação frequente, sem considerar o efeito de fluência do concreto.

$$\delta g_1 + q_2 = \frac{5}{584} \frac{(g_2 + \psi_1 q_2) l^2}{EI} = \frac{5}{584} \frac{(0,05 + 0,6 \times 0,084) \times 900^4}{20000 \times 21370} = 0,68 \text{ cm}$$

Deslocamento total (combinação frequente de serviço)

$$\delta = 1,52 + 0,62 = 2,20 \text{ cm} < \frac{l}{350} = 2,57 \text{ cm (ver tabela 1.8, Pfeil)}$$

Deslocamento no meio do vão devido à combinação quase-permanente na viga mista, considerando o efeito de fluência do concreto.

$$\delta g_2 + q_2 = \frac{5}{584} \frac{(g_2 + \psi_2 q_2) l^2}{EI_a} = \frac{5}{584} \frac{(0,05 + 0,4 \times 0,84) \times 900^4}{20000 \times 49487} = 0,72 \text{ cm}$$

Deslocamento total (combinação quase permanente de serviço)

$$\delta = 1,52 + 0,72 \cong 2,24 \text{ cm} < \frac{l}{350} = 2,57 \text{ cm}$$

Um piso de edificação composto dessas vigas mistas deve ainda ser verificado quanto à vibração excessiva devido a ações humanas (Wyatt, 1989).

Admitir que a viga mista do problema anterior tenha ligação parcial, com grau de conexão igual a 80%, ou seja, adotam-se 24 conectores entre o meio do vão e a seção do apoio. Calcular o momento resistente de projeto e a flecha para combinação quase permanente de ações.

Solução

a) Verificação do limite do grau de conexão η

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

$$\eta_{lim} = 1 - \frac{20000}{578 \times 250} (0,75 - 0,03 \times 9) = 0,34$$

$$\eta = 0,80 > \eta_{lim} = 0,40$$

b) Momento resistente de projeto com ligação parcial resultante de compressão no concreto

$$F_{cd} = 0,80 \times \text{mínimo}(R_{cd}, R_{td}) = 0,80 \times 1513 = 1211 \text{ kN}$$

Profundidade x da linha neutra no concreto

$$x = \frac{1211 \times 1,4}{0,85 \times 2,0 \times 225} = 4,43 \text{ cm}$$

Resultante de compressão no aço

$$C_{ad} = \frac{1}{2} (1513 - 1211) = 151 \text{ kN} < \frac{f_y b_f t_f}{\gamma_{a1}} = \frac{25 \times 15,2 \times 1,08}{1,10} = 373 \text{ kN}$$

$$y = \frac{151 \times 1,10}{15,2 \times 25} = 0,44 \text{ cm}$$

$$y_1 = 45 - \frac{\frac{66,6 \times 45}{2} - \frac{15,2 \times 0,44^2}{2}}{(66,6 - 15,2 \times 0,44)} = 20,0 \text{ cm}$$

Momento resistente

$$\begin{aligned} M_{d \text{ res}} &= 1211(45 + 10 - 2,2 - 20,0) + 151 \times (45 - 20,0 - 0,22) \\ &= 43416 \text{ kNcm} = 434 > M_d = 306 \text{ kN} \end{aligned}$$

e) Cálculo da flecha

Momento de inércia efetivo

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\eta}(I - I_a)$$

$$I_{ef\infty} = 21370 + \sqrt{0,80}(49487 - 21370) = 46518 \text{ cm}^4$$

Deslocamento na viga mista para combinação quase permanente de ações

$$\gamma_{g1+q2} = \frac{5}{384} \frac{(0,05 + 0,4 \times 0,084) \times 900^4}{20000 \times 46518} = 0,77 \text{ cm}$$