

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CINTHYA LORENA BUENO DE SOUZA DULTRA

MILANNE DE CARVALHO MIRANDA

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS

ANÁPOLIS / GO

2017

**CINTHYA LORENA BUENO DE SOUZA DULTRA
MILANNE DE CARVALHO MIRANDA**

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADOR: ROGÉRIO SANTOS CARDOSO

ANÁPOLIS / GO: 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

DULTRA, CINTHYA LORENA BUENO DE SOUZA/ MIRANDA, MILANNE DE CARVALHO

Dimensionamento de Vigas Mistas.

89P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2017).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1. Estrutura metálica | 2. Estrutura mista |
| 3. Viga simples | 4. Viga mista |
| I. ENC/UNI | II. Título (Série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DULTRA, Cinthya Lorena Bueno de Souza/ MIRANDA, Milanne de Carvalho.

Dimensionamento de Vigas Mistas.TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 89p. 2017.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Cinthya Lorena Bueno de Souza Dultra

Milanne de Carvalho Miranda

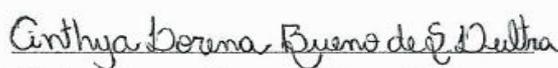
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Dimensionamento de Vigas Mistas.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

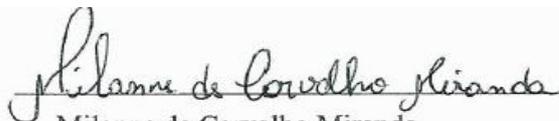
ANO: 2017

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Cinthya Lorena Bueno de Souza Dultra

E-mail:cinthyalorena_17@hotmail.com



Milanne de Carvalho Miranda

E-mail: milanne.clayton@hotmail.com

CINTHYA LORENA BUENO DE SOUZA DULTRA

MILANNE DE CARVALHO MIRANDA

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL

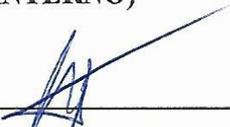
APROVADO POR:



ROGÉRIO SANTOS CARDOSO, Mestre (UniEvangélica)
(ORIENTADOR)



MOEMA PATRÍCIA BARROS DE CASTRO, Mestra (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)



LEANDRO DANIEL PORFIRO, Mestre (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: ANÁPOLIS/GO, 29 de NOVEMBRO de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois escutou o meu clamor e por muitas vezes quando pensei em desistir ele me deu força para prosseguir e realizar esse sonho e por colocar pessoas maravilhosas em meu caminho as quais não poderia deixar de citá-las.

Agradeço a minha filha Sophia, a oportunidade de experimentar a mais pura forma do amor, o melhor presente que eu poderia ganhar, mesmo tão pequena hoje, um dia irá entender a minha luta, a minha ausência.

Agradeço a minha mãe Adriana e meu padrasto Lourival, não há palavras que expressem o meu agradecimento por eles, que cuidaram da minha filha desde o seu nascimento com todo amor e carinho durante a minha ausência para estudar, trabalhar e ir para a faculdade.

Agradeço as minhas irmãs Caroline e Nadielle que sempre estiveram ao meu lado.

Agradeço ao Engenheiro Limirio que além de chefe, foi um grande amigo e me ensinou muito.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo destes 10 semestres.

Agradeço aos professores que desempenharam com dedicação as aulas ministradas e principalmente ao nosso orientador Rogério que com muita paciência nos transmitiu todo o seu conhecimento.

Valeu a pena toda distância, todo sofrimento, todas as renúncias... Valeu a pena esperar... Hoje estamos colhendo, juntos, os frutos do nosso empenho e dedicação!

Então, a todos que aqui citei, essa vitória é nossa!

Cinthya Lorena Bueno de Souza Dultra

AGRADECIMENTOS

Hoje comemoro o fim de uma etapa e o início de uma longa jornada, com a certeza que o caminho futuro reserva grandes surpresas e realizações. Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado e permitido que chegasse até aqui, pois é ele que cuida e protege fazendo tudo acontecer no seu devido tempo.

Sou imensamente grata aos meus pais, em especial a minha mãe, exemplo de mulher, determinação e perseverança por sempre me fazer acreditar nos meus sonhos e me encorajar a lutar por eles.

Ao meu filho, Clayton Yuri, o motivo maior de todo o meu esforço e determinação, meus objetivos são fortalecidos pela sua existência, te amo muito.

Minha irmã Lana e cunhada Natalia, pela disposição em me ajudar mesmo quando precisa deixar de fazer seus afazeres.

Meus amigos que estavam presentes durante essa formação e que continuarão presentes em minha vida muito obrigada pela paciência, carinho e palavras de conforto mesmo quando achei que não conseguiria continuar.

Ao engenheiro Marcelo Figueiredo, pela oportunidade de estágio, me permitiu ver na realidade o que aprendemos na teoria.

A engenheira Virginia Maria, que desde o início da faculdade me acolheu, sanou minhas dúvidas e sempre deixou as portas abertas, meu muito obrigado.

Anderson Buntrock, engenheiro civil, pessoa maravilhosa que tive o prazer de conhecer durante essa formação e que serei eternamente grata por tudo que já fez por mim.

Agradeço aos meus professores, pela partilha de conhecimento, pelos ensinamentos para a vida e em especial quero agradecer ao nosso orientador Rogério Cardoso, peça primordial para realização desse TCC, que sempre esteve a nossa disposição com muita paciência e apto a nos ajudar no que fosse preciso.

Não poderia deixar de agradecer a minha parceira e amiga Cinthya Lorena por acreditar na união das nossas capacidades, sem você este trabalho não teria o mesmo resultado.

Enfim agradeço a todos que contribuíram de forma direta e indireta para que esse sonho fosse realizado, essa vitória não é minha e sim nossa.

Milanne de Carvalho Miranda

RESUMO

O uso dos metais como matéria prima para estruturas originou-se com o ferro fundido, estrutura utilizada na Inglaterra para construção de um arco de 30 m de vão em 1777-1779. A utilização do ferro fundido também era empregue em anéis de correntes, pontes pênséis até perto de 1840. Em 1954 foi construído o primeiro edifício em aço produzido no Brasil o Garagem América, em São Paulo. Vários estudos realizados, especialmente, em Universidades Americanas e em Centros de Pesquisa espalhados pelo mundo, possibilitaram o emprego conjunto de aço e concreto. Isso se tornou conhecido como estruturas mistas e tais estruturas são, hoje, largamente utilizadas em todo o mundo. Este sistema visa explorar as vantagens de cada material, porém tornando-os em uma única estrutura. A NBR 8800 (ABNT, 2008) discorre sobre vários elementos mistos (aço/concreto), como laje, pilar e viga. As vigas mistas de aço e concreto são constituídas de um componente de aço, que pode ser um perfil I, um perfil caixão, um perfil tubular retangular ou uma treliça, com uma laje de concreto acima de sua face superior, submetidas à flexão em relação ao seu eixo de maior inércia. Deve haver ligação mecânica por meio de conectores de cisalhamento entre o componente de aço e a laje, de tal forma que ambos funcionem como um conjunto para resistir à flexão. Visando evitar trincas em alvenarias, quedas de revestimento e afundamento de piso ou quaisquer avarias futuras na estrutura é fundamental a realização de um dimensionamento preciso. Para as vigas à flexão, primeiro se verifica o dimensionamento para Flexão Simples e em seguida a Flexão Composta Normal. A flexão simples é utilizada quando não há grandes influências de esforços normais na estrutura. Tal caso é encontrado na maioria das vezes em edifícios de pequeno e médio porte que são projetados. Já o dimensionamento da viga mista consiste em determinar a resistência de barras prismáticas mistas (aço/concreto) para resistir os esforços cortantes e momento fletor e ainda, o estudo de seu comportamento em relação aos deslocamentos verticais. No exemplo numérico, foi averiguada a viga apresentada na biblioteca localizada na UniEvangélica, projeto que já se encontra executado tendo como objetivo dimensionar e comparar uma viga simples feita somente de aço com uma viga mista formada de aço e concreto.

PALAVRAS-CHAVE:

Aço. Estrutura mista. Dimensionamento viga simples. Dimensionamento viga mista. Comparação.

ABSTRACT

The use of metals as feedstock for structures originated with cast iron, a structure used in England for the construction of an arc of 30 m of span in 1777-1779. The use of cast iron was also employed in chain rings, pendulum bridges until about 1840. In 1954, the first steel building was built in Brazil, the Garagem América, in São Paulo. Several studies carried out, especially in American Universities and in Research Centers around the world, made possible the joint use of steel and concrete. This has become known as mixed structures and such structures are now widely used all over the world. This system aims to explore the advantages of each material, but making them into a single structure. NBR 8800 (ABNT, 2008) discusses several mixed elements (steel / concrete), such as slab, pillar and beam. The composite steel and concrete beams consist of a steel component, which may be an I-profile, a casing profile, a rectangular tubular profile or a lattice, with a concrete slab above its upper face, subjected to bending in relation to its axis of greater inertia. There must be mechanical connection by means of shear connectors between the steel component and the slab in such a way that both function as a set to withstand bending. In order to avoid cracks in masonry, falls of coating and sinking of floor or any future malfunctions in the structure it is fundamental to carry out a precise dimensioning. For the bending beams, the sizing for Simple Bending is first checked and then the Composite Bending Normal. Simple bending is used when, there is no great influence of normal stresses on the structure. Such a case is found most often in small and medium sized buildings that are designed. The dimensioning of the mixed beam consists in determining the resistance of mixed prismatic bars (steel / concrete) to resist the shear forces and bending moment and also the study of its behavior in relation to vertical displacements. In the case study, the beam presented in the library located in the UniEvangelica was studied, a project that has already been carried out with the purpose of designing and comparing a simple beam made of steel only with a mixed beam formed of steel and concrete.

KEYWORDS:

Steel. Mixed structure. Simple beam sizing. Mixed beam sizing. Comparison.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Torre Eiffel.....	22
Figura 2 - Seções mistas em vigas.....	25
Figura 3 - Estruturas mistas aço-concreto: (a) viga mista típica e seus elementos; (b) viga com perfil de aço embebido no concreto; (c) pilar misto; (d) viga mista com fôrma metálica (steel deck) com nervuras dispostas perpendicularmente ao eixo da viga.....	26
Figura 4 - Sistema misto – variação de deformação na viga.....	27
Figura 5 - Conector tipo pino com cabeça.....	28
Figura 6 - Conectores tipo U Fonte.....	29
Figura 7 - Diagrama tensão-deformação: (a) concreto em compressão (b) aço comum com patamar de escoamento.....	29
Figura 8 - Limite de resistência de viga com ligação total: (a) viga mista; (b) diagrama de deformações na seção; (c) diagramas de tensões na ruptura.....	30
Figura 9 - Comportamento de vigas construídas com e sem escoramento: (a) Viga mista; (b) diagrama de deformação na seção da viga escorada; (c) diagramas de deformação na seção da viga não escorada; (d) respostas das vigas em termos de deslocamentos verticais para ação de cargas crescentes.....	31
Figura 10 - Flambagem lateral por distorção.....	32
Figura 11 - Diagramas de tensões no estado limite de projeto de vigas sob momento positivo com ligação total.....	60
Figura 12 - Ilustração do valor a ser tomado para emh	64
Figura 13 - Viga.....	66
Figura 14 - Área de Influência.....	67
Figura 15 - Diagrama das forças gerais (para a combinação 1) em KN/cm.....	68
Figura 16 - Diagrama dos momentos, (para a combinação 1) em KN.cm.....	68
Figura 17 - Diagrama dos esforços cortantes, (para a combinação 1) em KN.....	69
Figura 18 - Diagrama das forças gerais (para a combinação 2) em KN/cm.....	69
Figura 19 - Diagrama dos momentos (para a combinação 2) em KN.cm.....	69
Figura 20 - Diagrama dos esforços cortantes (para a combinação 2) em KN.....	70
Figura 21 - VIGA perfil I.....	70
Figura 22 - Seção I viga mista.....	74
Figura 23 - Conectores de Cisalhamento.....	79
Figura 24 - Gráfico Deslocamento.....	80

Figura 25 - Gráfico Momento Fletor Resistente de Dimensionamento	81
Figura 26 - Esforço Cortante Solicitante de Dimensionamento	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Deslocamentos máximos.....	34
Quadro 2 - Esforço Cortante Viga Simples	72
Quadro 3 - Momento Fletor Viga Simples	74
Quadro 4 - Resultados Geométricos	76
Quadro 5- Propriedades geométricas $\alpha = 25,2$	76
Quadro 6 - Momento Fletor Viga Mista.....	79
Quadro 7 - Comparação dos resultados simples/mista.....	82

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Parâmetros referentes ao momento fletor resistente.....	38
Tabela 2 - Coeficiente C_{dist} para vigas contínuas com carregamento no comprimento L	55
Tabela 3 - Coeficiente C_{dist} para vigas contínuas e semicontínuas sem carregamento no comprimento L	55
Tabela 4 - Coeficiente C_{dist} para vigas semicontínuas submetidas a carregamentos uniformemente distribuído no comprimento L	55
Tabela 5 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONTEXTO HISTÓRICO	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	OBJETIVOS.....	17
1.3.1	Objetivo geral	17
1.3.2	Objetivos específicos	17
1.4	METODOLOGIA	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	ESTRUTURA DE CONCRETO.....	20
2.2	ESTRUTURA METÁLICA.....	21
2.3	ESTRUTURA MISTA	23
2.3.1	Vantagens do sistema misto	24
2.4	VIGAS MISTAS	24
2.4.1	Histórico	26
2.4.2	Conectores de cisalhamento e Funcionamento da seção mista	26
2.4.3	Ligação Total e Ligação Parcial a Cisalhamento Horizontal	28
2.4.4	Retração e Fluência do concreto	30
2.4.5	Construções escoradas e não escoradas	30
2.4.6	Vigas Mistas sob Ação de Momento Fletor Negativo	32
2.4.7	Critérios de Cálculo – NBR 8800 (ABNT, 2008)	32
2.4.7.1	Resistência a flexão	32
2.4.7.2	Resistência a cisalhamento	33
3	DIMENSIONAMENTO VIGA SIMPLES.....	34
3.1	DESLOCAMENTO	34
3.2	VERIFICAR A PEÇA QUANTO AO CISALHAMENTO SEGUNDO A NBR 8800 (ABNT, 2008).....	36
3.3	VERIFICAÇÃO QUANTO AO MOMENTO RESISTENTE	38
3.3.1	Flambagem lateral na mesa (FLM)	40
3.3.2	Flambagem lateral da alma (FLA)	42
3.3.3	Flambagem lateral com torção (FLT)	43
4	DIMENSIONAMENTO VIGA MISTA	47

4.1	LARGURA EFETIVA	47
4.2	MOMENTO DE INÉRCIA EFETIVO	48
4.3	VERIFICAÇÃO DO MOMENTO FLETOR	48
4.3.1	Momento fletor resistente de cálculo em regiões de momentos positivos	48
4.3.1.1	Para vigas mistas de alma cheia com $htw \leq 3,76Efy$ e treliças mistas:	48
4.3.1.2	Vigas mistas de alma cheia com $3,76Efy < htw \leq 5,70Efy$:	51
4.3.2	Momento fletor resistente de cálculo em regiões de momentos negativos	52
4.4	VERIFICAÇÃO DA FLAMBAGEM LATERAL COM DISTORÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL	53
4.4.1	Momento fletor resistente de cálculo na região de momentos negativos para flambagem lateral com torção da seção transversal	53
4.5	VERIFICAÇÃO DA FORÇA CORTANTE.....	58
4.6	LINHA NEUTRA	58
4.6.1	Se a linha neutra estiver situada na laje de concreto:	59
4.6.2	Se a linha neutra estiver situada na seção de aço:	60
4.7	CÁLCULO DA ARMADURA	61
4.8	CONECTORES DE CISALHAMENTO	62
4.8.1	Pinos com cabeça	62
4.8.1.1	Valores do coeficiente Rg	63
4.8.1.2	Valores do coeficiente Rp	63
4.8.2	Perfil U laminado ou formado a frio	64
4.8.3	Localização e espaçamento dos conectores	65
5	EXEMPLO NUMÉRICO.....	66
5.1	CARGAS.....	67
5.2	DIMENSIONAMENTO DA VIGA SIMPLES	70
5.2.1	Deslocamento Vertical ($\Delta m_{\acute{a}x}$)	71
5.2.2	Verificar a peça quanto ao cisalhamento	71
5.2.3	Verificação quanto ao momento resistente	72
5.2.3.1	Flambagem lateral na mesa (FLM)	72
5.2.3.2	Flambagem lateral da alma (FLA)	73
5.2.3.3	Flambagem lateral com torção (FLT).....	73
5.3	DIMENSIONAMENTO DA VIGA MISTA	74
5.3.1	Características geométricas da seção de aço W 410x46,1	75
5.3.2	Largura efetiva da laje	75

5.3.3	Relação entre módulos de elasticidade	75
5.3.4	Propriedades geométricas da seção homogeneizada para $\alpha_0 = 8,40$	75
5.3.5	Propriedades geométricas da seção homogeneizada para $\alpha = 25,2$	76
5.3.6	Classificação da seção	77
5.3.7	Deslocamentos	77
5.3.8	Posicionamento da linha neutra	77
5.3.9	Conector tipo pino com cabeça vão igual a $8m$	77
5.3.9.1	Para a linha neutra plástica na laje: $n \cdot Qn \geq Afy$	77
5.3.9.2	Diâmetro do conector	78
5.3.9.3	Área do conector	78
5.3.9.4	Resistência dos conectores de cisalhamento	78
5.3.9.5	Número de conectores	78
5.3.9.6	Espaçamento entre conectores	78
5.3.10	Momento resistente	79
5.3.11	Esforço cortante	79
6	ANÁLISE DE RESULTADOS	80
6.1	DESLOCAMENTOS	80
6.2	MOMENTO FLETOR	80
6.3	ESFORÇO CORTANTE	81
6.4	RESULTADO GERAL	82
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
	REFERÊNCIAS	85
	ANEXO A – CATÁLOGO TÉCNICO DE PERFIS LAMINADOS DA GERDAU	
	AÇOMINAS	88

1 INTRODUÇÃO

O projeto na construção civil concebe umas das primeiras etapas do processo de construção, portanto, tem um papel importante na obtenção da qualidade, pois é nessa etapa da obra que são estabelecidos os princípios de organização do espaço, bem como a tecnologia a ser adotada na fase de execução.

A escolha da estrutura é um dos elementos primordiais em uma construção, pois todos os demais elementos dependem desta decisão, desde a estabilidade até o acabamento final. Os diversos elementos como fundação, pilares, vigas, lajes e telhados compõe a estrutura e é pelo estudo criterioso, realizado durante o projeto, que problemas futuros são previstos, bem como soluções criativas, econômicas e inteligentes.

Para Santos (2010), dentre os sistemas estruturais existentes, estão os formados por elementos em aço que apresentam total padronização dos elementos que compõe a estrutura principal e também a estrutura de fechamento, acelerando o processo construtivo e tornando este sistema estrutural competitivo, pela sua elevada produtividade.

Já as estruturas mistas advêm da junção de perfis metálicos e concreto estrutural, originando pilares, vigas e lajes. Estes dois materiais distintos devem se comportar de maneira associada, para que proporcione uma adequada resistência estrutural. Para se obter isso, certas condições de aderência devem ser satisfeitas. Com o avanço das pesquisas em estruturas mistas, surgiram modelos de cálculo que estimam de forma satisfatória a resistência dos elementos mistos e, portanto, torna possível o seu dimensionamento.

A combinação desses materiais aço e concreto tem por objetivo proporcionar uma série de vantagens, tanto estruturais como construtivas. Entre as muitas vantagens, como rapidez construtiva, demanda menor de mão de obra, redução do peso total da edificação, dispensa parcialmente ou integralmente a utilização de formas e escoramento, permite a racionalização e a industrialização da etapa construtiva.

De modo geral, a evolução no uso de estruturas mistas é destinada a vários motivos, entre os quais a indispensabilidade cada vez maior de grandes áreas livres por pavimento, que resulta em grandes vãos para as vigas, aumento de força vertical nos pilares e um maior espaçamento entre eles. Os elementos mistos viabilizam a diminuição das dimensões da seção, estendendo as áreas livres e limitando as forças verticais que chegam às fundações. Outro fator relevante na escolha de uma estrutura mista é o aumento expressivo de propriedades importantes no dimensionamento, área, momento de inércia, especialmente nas vigas mistas.

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

O uso dos metais como matéria prima para estruturas originou-se com o ferro fundido, estrutura utilizada na Inglaterra para construção de um arco de 30 m de vão em 1777-1779. Entre 1780 e 1820 teve um grande aumento nas construções de pontes, habitualmente em arco, com vigas principais produzidas por peças de ferro fundido originando barras ou treliças. A utilização do ferro fundido também era empregue em anéis de correntes, pontes pênséis até perto de 1840.

Segundo Malite (1990), em 1914 na Inglaterra iniciou-se os estudos dos sistemas mistos de aço e concreto, através da empresa Redpath Brow and Company com uma série de ensaios sobre sistemas compostos para pisos.

Para Viest (1960, *apud* KOTINDA, 2006), a interação das primeiras vigas mistas constituídas por um perfil de aço embutido no concreto se dava, pela força de adesão natural entre os materiais. Pouco a pouco esse sistema foi substituído pela laje de concreto apoiada sobre a mesa superior da viga de aço. Em 1940 os estudos referentes ao comportamento da viga mista utilizavam os conectores mecânicos, conhecidos como conectores de cisalhamento.

No Brasil a atividade metalúrgica, no início da colonização era exercida pelos artífices ferreiros, caldeireiros, funileiros, sempre presentes nos grupos de portugueses que desembarcavam nas recém-fundadas capitânicas. A matéria prima sempre foi importada e cara. As primeiras obras em estruturas metálicas no Brasil têm sua origem, assim como nos demais países do mundo, a partir das estradas de ferro.

Em 1954 foi construído o primeiro edifício em aço produzido no Brasil o Garagem América, em São Paulo. Um dos principais desafios encontrados nesta construção era o fato do terreno ser irregular, devido às vantagens da estrutura em aço a construção foi realizada. Porém, foi a partir da construção do Edifício Avenida Central no Rio de Janeiro em 1961 com maior projeção, que este tipo de obra foi se tornando conhecida no Brasil.

Já na década de 60, do século passado, grandes edifícios constituídos de estruturas de aço eram comuns. Vários estudos realizados, especialmente, em Universidades Americanas e em Centros de Pesquisa espalhados pelo mundo, possibilitaram o emprego conjunto de aço e concreto, um tipo de estrutura que leva em consideração a cooperação estrutural dos dois materiais. Isso se tornou conhecido como estruturas mistas e tais estruturas são, hoje, largamente utilizadas em todo o mundo. Essas estruturas possibilitam o emprego racional e

econômico dos materiais (aço/concreto) tornando possíveis e viáveis a execução de importantes e grandes estruturas.

1.2 JUSTIFICATIVA

O aço possui inúmeras aplicabilidades, e na construção civil ele está presente, nos edifícios, residências, pontes, viadutos, passarelas, coberturas, torres, postes, escadas e mezaninos (PINHEIRO, 2001). Apesar de que, mesmo possuindo um enorme potencial seu uso ainda é relativamente pequeno.

A estrutura mista está cada vez mais sendo aderidas nas construções, devido seus abundantes benefícios tais como maior resistência e rigidez da mesma em comparação com os perfis equivalentes em aço, permitindo a redução da altura da seção dos elementos estruturais; em casos que a forma de aço é unificada pode-se optar pelo não escoramento da laje, aumentando assim a velocidade de construção.

Assim sendo, este trabalho visa mostrar um elemento estrutural misto, mais especificamente uma viga mista, desde o embasamento teórico para o seu dimensionamento, até a um exemplo numérico. Saliendo a importância desse eficiente processo construtivo em relação a uma viga simples.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Apresentar um estudo comparativo do comportamento estrutural entre viga mista, aço e concreto, com viga simples, apenas aço.

1.3.2 Objetivos específicos

Aprofundar o estudo da utilização e dimensionamento de vigas mistas (aço/concreto) e a importância desse eficiente sistema construtivo para a engenharia atual. Assim proporcionando aos engenheiros uma visão geral da metodologia de dimensionamento e do processo construtivo das vigas mistas.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada consiste em uma pesquisa bibliográfica sobre viga simples e viga mista, apresentando assim o embasamento teórico básico necessário para o dimensionamento e a utilização desta estrutura. O exemplo numérico pertinente a esse trabalho consiste em dimensionar e comparar uma viga simples feita somente de aço e uma viga mista feita de aço e concreto. Os cálculos de dimensionamento foram feitos para um projeto de um edifício contendo térreo e mais três pavimentos tipos, localizado na Avenida Universitária Km 3,5 bairro: Cidade Universitária, Anápolis-GO, realizado pela empresa RC Construções Metálicas- engenheiro responsável Rogério dos Santos Cardoso.

Inicialmente, foi denotado o método de cálculo empregado no dimensionamento da viga, conforme o procedimento proposto pela Norma Brasileira, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 8800 (ABNT, 2008) - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Posteriormente, foi apresentado o projeto arquitetônico do edifício do presente exemplo numérico. Efetuou-se o lançamento da estrutura no software “Ftool” para abordar os resultados dos esforços solicitantes.

Por último, realizou-se uma análise comparativa dos resultados obtidos no dimensionamento, a fim de determinar quais foram as possíveis vantagens entre um e outro.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A ordenação deste trabalho de conclusão de curso foi elaborado em sete capítulos. O primeiro capítulo abordará uma breve história do emprego do concreto e do aço em estruturas e da utilização em conjunto “estruturas mistas” destes materiais.

O segundo capítulo nomeado como “Embasamento Teórico”, retrata os sistemas estruturais mais utilizados na construção civil: aço, concreto e misto. Descreve sobre cada um deles e evidencia as vantagens da união do aço com o concreto originando os sistemas mistos com ênfase na Viga mista.

O terceiro capítulo descreve todas as etapas necessárias para dimensionar uma viga simples fundamentada na norma NBR 8800 (ABNT, 2008).

Já no quarto capítulo mostra os procedimentos primordiais para se dimensionar uma viga mista com um embasamento teórico feito com base na norma NBR 8800 (ABNT, 2008) e no livro Pfeil (2012).

O quinto capítulo contém o exemplo numérico, exibindo dois dimensionamentos sendo um de viga simples e o outro de viga mista, ambos do mesmo projeto estrutural, pertencente à biblioteca localizada na UniEvangélica.

No sexto capítulo, a análise dos resultados que foram obtidos no capítulo anterior são apresentados e discutidos.

Por fim, o sétimo capítulo apresenta as considerações finais onde serão ponderados os resultados adquiridos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Crescente aumento da população no Brasil fez o setor da construção civil expandir-se dando origem a novos sistemas construtivos a fim de atender as mais variadas e ousadas demandas do mercado, atentando-se a garantir eficiência, diminuição no período de obra e redução dos custos efetivos. Todos os sistemas construtivos apresentam suas peculiaridades e cabe ao proprietário, arquiteto ou engenheiro, avaliar qual atenderá a todos os requisitos, tanto visuais, estruturais e econômicos de acordo com a localidade da construção da edificação.

Porém, Albuquerque (1998) diz que, embora muitas vezes a escolha do sistema estrutural de um edifício seja influenciada por imposições arquitetônicas, por rotinas construtivas ou ainda pela infraestrutura da região, compete ao engenheiro de estruturas analisar, dentro das condições impostas, a alternativa estrutural que assegure maior economia.

Atualmente os sistemas estruturais que são mais utilizados na construção civil são em concreto, em aço e em elementos mistos formados da combinação entre o aço e concreto. Nos quais serão pautados nos tópicos a seguir.

2.1 ESTRUTURA DE CONCRETO

O concreto aplica-se a diversos tipos de estrutura, tais como: concreto armado, protendido, projetado e inúmeras outras. Vários tipos de melhorias têm sido desenvolvidas de acordo com a necessidade e as dificuldades encontradas na construção civil, como por exemplo, os novos aditivos que estão garantindo uma maior resistência ou um alto desempenho. Os novos produtos reforçam as construções tornando-as mais complexas e minuciosas visto que, o concreto convencional já possuía muitas qualidades.

De acordo com Fajersztajn (1987, *apud* SANTOS, 2010), o uso de concreto armado na construção das estruturas de edifícios está bastante difundido, já sendo considerado, na época, o sistema mais utilizado no Brasil. Pode-se evidenciar ainda, que a grande utilização de concreto não se dá apenas no Brasil, mas também em vários países do mundo.

Segundo Pedroso (2009), da Revista Concreto e Construções, na qual foi realizada pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), por ano calcula-se que são

consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, resultando em um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante/ano, conforme a Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP), valor inferior apenas ao consumo de água. No Brasil, as centrais dosadoras produzem em torno de 30 milhões de metros cúbicos de concreto.

Resumidamente, pode-se afirmar, conforme Pedroso (2009), que o concreto é uma pedra artificial que se molda à inventividade construtiva do homem, o qual foi capaz de desenvolver um material que, depois de endurecido, tem resistência similar às das rochas naturais e quando no estado fresco, é composto plástico que possibilita sua modelagem em formas e tamanhos variados.

Mesmo não sendo tão resistente e tenaz quanto o aço, o concreto é muito estimado devido algumas vantagens dentre elas: versatilidade, durabilidade, baixo custo devido os materiais que o compõe serem encontrados em quase todos os lugares, adaptabilidade e outras.

Em termos de sustentabilidade, o concreto armado consome muito menos energia do que o alumínio, o aço, o vidro, e também emite proporcionalmente menos gases e partículas poluentes, ressalta Battagin (2010), chefe dos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Devido à necessidade de modernização da construção civil e a busca constante do homem pela evolução, difundiu-se alguns outros sistemas construtivos como o de estruturas metálicas e estruturas mistas, os quais veremos nos tópicos a seguir.

2.2 ESTRUTURA METÁLICA

O tipo de sistema construtivo escolhido em uma construção deve satisfazer as condições que venha a influenciar o empreendimento, tais como as características da construção e os prazos de entrega. O sistema construtivo em aço apresenta características significativas se comparado com os sistemas convencionais.

Devido à alta resistência, permite estruturas com componentes mais leves que proporciona aumento do espaço útil, maiores vãos livres, precisão milimétrica e menor peso próprio facilitam o transporte e a montagem além de serem totalmente recicláveis. Garantem também uma melhor organização e limpeza do canteiro, graças à vantagem de serem totalmente pré-fabricadas, reduzindo assim, a geração de entulhos e assegurando mais segurança aos trabalhadores. Muitos transtornos são evitados, caso haja necessidade de algumas adaptações, reforços e/ou ampliações. A utilização de

estruturas de aço pode limitar em até 40% o tempo de execução quando comparado com os processos convencionais, devido ao fato de serem usadas peças pré-fabricadas, à possibilidade de se trabalhar em diversas frentes de serviço simultaneamente, à diminuição de fôrmas e escoramentos e a uma maior independência em relação aos fatores climáticos.

As estruturas em aço vêm cada vez mais conquistando seu espaço no mundo da construção civil com sua forma ousada de permitir a criação e execução das mais variadas obras. Devido à exposição do seu material, trouxe a ideia de modernização e inovação, renovando as expressões arquitetônicas vigentes.

Um exemplo de estrutura metálica que surpreendeu o mundo é a Torre Eiffel, construída em 1889 em Paris, sendo formada por 18.000 peças, totalizando 1.700 toneladas de aço em um ícone de 300 metros de altura, mais que um ponto turístico, a Torre Eiffel (ver Figura 1), é um monumento ao desenvolvimento tecnológico e ao nacionalismo que mostra toda a originalidade da engenharia.

Figura 1 – Torre Eiffel



Fonte: Barra, 2014.

Sendo reconhecidas as vantagens e desvantagens proporcionadas pelos materiais estruturais mais utilizados na construção civil aço e concreto, desenvolveu-se outro tipo de sistema estrutural, o formado por elementos mistos de aço e concreto objeto de destaque do próximo item.

2.3 ESTRUTURA MISTA

O concreto e o aço são considerados os materiais estruturais mais utilizados em todo o mundo, dando origens as novas oportunidades de construção civil, por meio de estruturas de concreto ou estruturas de aço. A união do concreto e barras de aços resulta no concreto armado, de uso eficaz e consagrado na maioria das aplicações estruturais.

Mesmo que a utilização de estruturas de concreto ainda seja predominante no Brasil, nos dias de hoje, observa-se o crescente aumento na utilização de estruturas de aço em estruturas de múltiplos pavimentos.

Entretanto, devido à tendência do setor construtivo em expandir o nível de industrialização, estudos verificaram a viabilidade do aço, bem como as vantagens que este material apresenta ao sistema como um todo.

Devido ao aço e o concreto apresentarem características diferentes, que por sua vez favorecem ao edifício em si, outro sistema estrutural surgiu, o sistema misto composto de aço e concreto. Este sistema visa explorar as vantagens de cada material, porém tornando-os em uma única estrutura.

Atualmente, denomina-se sistema misto aço-concreto aquele no qual um perfil de aço (laminado, dobrado ou soldado) 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, ressaltos, etc.), por atrito, ou em alguns casos, por simples aderência e repartição de cargas (como em pilares mistos sujeitos apenas a força normal de compressão). Uma estrutura mista é formada por um conjunto de sistemas mistos. Os sistemas mistos são normalmente empregados na construção de pontes e edificações. (QUEIROZ, 2001, p. 27).

Queiroz (2001) também pontua que, o uso de sistemas mistos aumenta significativamente o número de soluções em concreto armado e em aço. Além da diversidade de alternativas disponíveis que viabilizam a aquisição de benefícios arquitetônicos e econômicos, os sistemas mistos apresentam outras vantagens, listadas a seguir.

2.3.1 Vantagens do sistema misto

Concernentes às estruturas de concreto pode citar que o sistema misto: apresenta possibilidade de dispensa de fôrmas e escoramentos, redução no prazo de execução da obra, o volume da estrada e do peso próprio é reduzido, assim, obtém-se diminuição dos custos de fundação e aumento da precisão dimensional da estrutura.

Já relacionadas às estruturas metálicas: ressalva o aumento da rigidez da estrutura, tem se uma diminuição das proteções contra incêndio, devido à necessidade de grandes áreas livres por pavimento, o que determina em grandes vãos para vigas, aumento de força vertical nos pilares e maior espaçamento entre eles além da redução considerável do consumo de aço estrutural.

Vale enfatizar também que com uso dessa estrutura a geração de resíduos é bem menor se comparado com outras, tornando assim uma obra sustentável. Além de maior organização devido à maioria dos elementos serem produzidos fora do canteiro.

Para que sejam aproveitadas as vantagens de cada sistema estrutural aço-concreto os profissionais da área devem conhecer profundamente os dois materiais, tanto na fase de projeto quanto na execução.

Os sistemas estruturais mistos, devido ser compostos por materiais de divergentes propriedades mecânicas de elasticidade e de resistência, pode então ser exposto como uma solução alternativa às estruturas na construção civil, na medida em que se procure manter a segurança estrutural, de um lado, e por outro busque obter redução de custos de construção, com desempenho arquitetônico e ambiental vantajoso. (SILVA, 2010)

Portanto, pertinente a autenticidade das vantagens do sistema misto, identificam-se grandes oportunidades para o uso conjunto de estruturas de aço e de concreto em construções de edifícios.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) discorre sobre vários elementos mistos (aço/concreto), como laje, pilar e viga. Sendo este último elemento o foco deste trabalho.

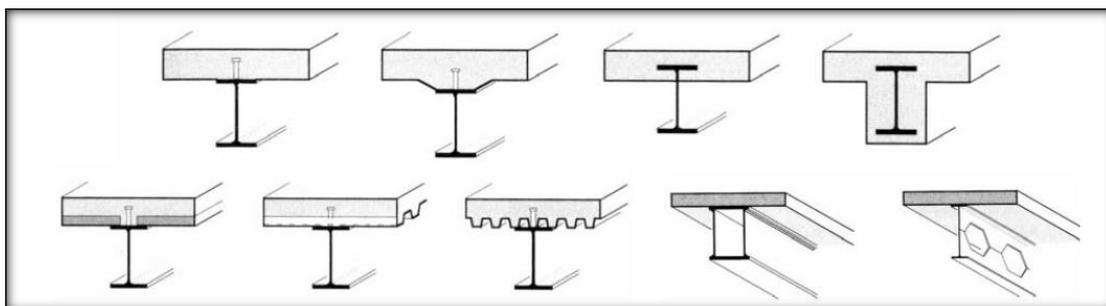
2.4 VIGAS MISTAS

De acordo com a NBR 8800 (ABNT, 2008) as vigas mistas de aço e concreto são constituídas de um componente de aço, que pode ser um perfil I, um perfil caixão,

um perfil tubular retangular ou uma treliça, com uma laje de concreto acima de sua face superior, submetidas à flexão em relação ao seu eixo de maior inércia, conforme apresentado na Figura 2. Deve haver ligação mecânica por meio de conectores de cisalhamento entre o componente de aço e a laje de tal forma que ambos funcionem como um conjunto para resistir à flexão. Em qualquer situação, a flexão ocorrerá no plano que passa pelos centros geométricos das mesas ou dos banzos superior e inferior do componente de aço.

Uma das vantagens apresentadas no uso de vigas mistas é o acréscimo de resistência e de rigidez da viga em comparação com os perfis equivalentes em aço, conforme apresentado na Figura 3, pode se observar a junção dos materiais aço/concreto, o que possibilita, por consequência, a redução da altura da seção dos elementos estruturais (DAVID, 2005 *apud* VIERA, 2010).

Figura 2 - Seções mistas em vigas



Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

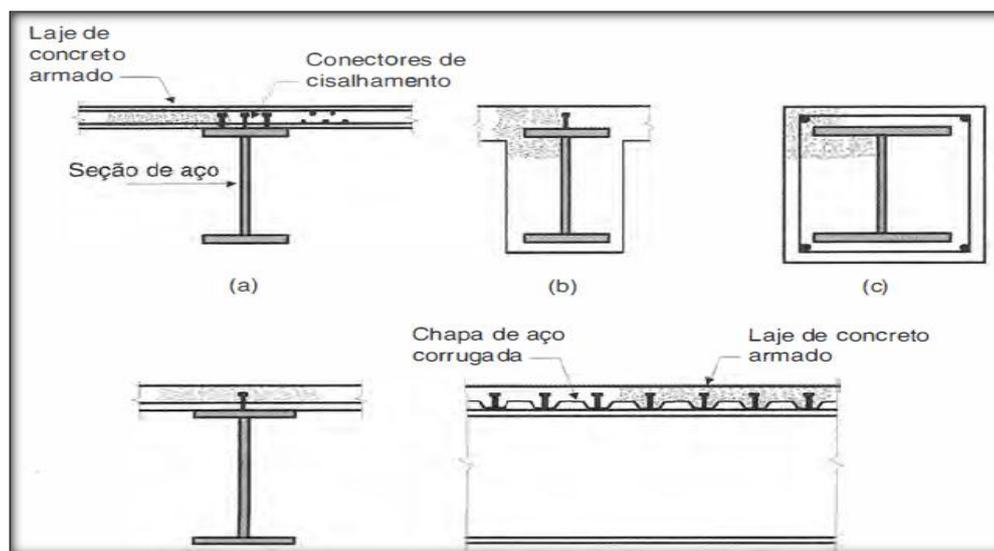
A norma NBR 8800 (ABNT, 2008) sugere o emprego de conectores de cisalhamento entre o componente de aço e a laje, de maneira que trabalhem em equipe para resistir à flexão. A NBR 8800 (ABNT, 2008) também classifica as vigas mistas em bi-apoiadas, contínuas e semi-contínuas e afirma que:

As vigas mistas de aço e concreto de alma cheia podem ser bi-apoiadas, contínuas ou semi-contínuas. As bi-apoiadas são aquelas em que as ligações nos apoios podem ser consideradas como rótulas. As contínuas são as que apresentam o perfil de aço e a armadura da laje têm continuidade total nos apoios internos. Já as semi-contínuas possui perfil de aço e não tem continuidade total nos apoios internos, ou seja, possuem ligação de resistência parcial. (NBR 8800, 2008, p.168)

Para Queiroz e Pimenta (2001), as vigas mistas bi-apoiadas são as que conferem maior simplicidade e economia nas ligações. Alva (2000), também assegura

uma maior eficiência da viga simplesmente apoiada no sistema misto, já que a viga de aço trabalha predominantemente à tração e a laje de concreto à compressão.

Figura 3 - Estruturas mistas aço-concreto: (a) viga mista típica e seus elementos; (b) viga com perfil de aço embebido no concreto; (c) pilar misto; (d) viga mista com fôrma metálica (steel deck) com nervuras dispostas perpendicularmente ao eixo da viga



Fonte

: Pfeil, 2012

2.4.1 Histórico

De acordo com Pfeil (2012), a carência de aço após a II Guerra Mundial, levou os engenheiros europeus a utilizar a laje de concreto como parte associada à viga considerando que, até então, utilizava-se a viga metálica com laje de concreto, mais a participação da laje não era considerada no cálculo.

Segundo Queiroz (2001), primordialmente as vigas mistas eram construídas com lajes planas moldadas “in loco” com fôrmas removíveis. Nos países industrializados, a partir dos anos 60 na América do Norte e no final dos anos 70, na Europa, ocorreu a substituição pela fôrma de aço incorporada ou laje mista e ganhou popularidade sendo atualmente o sistema de laje mais disseminado nesses países.

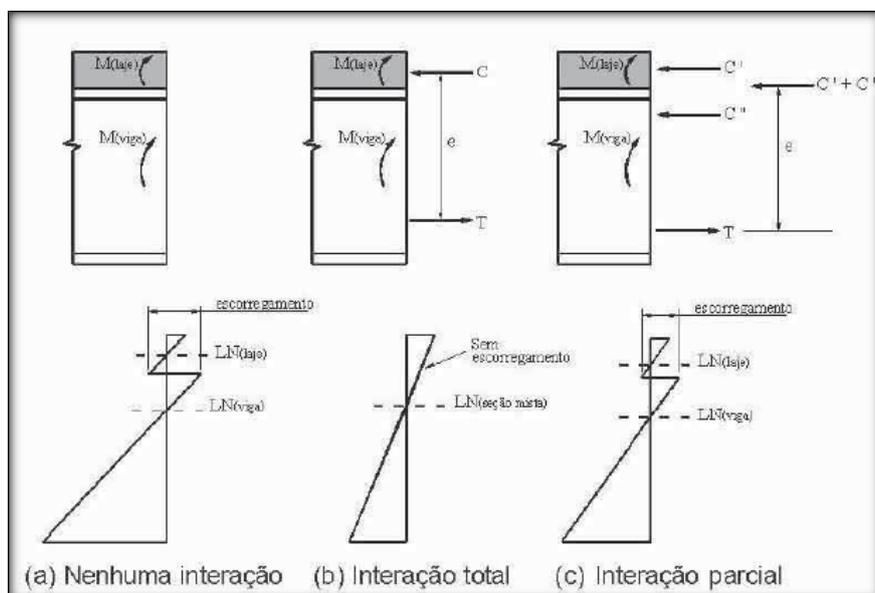
2.4.2 Conectores de cisalhamento e Funcionamento da seção mista

Conforme Pfeil (2012), o trabalho conjunto da seção de aço com a laje de concreto é assegurado através dos dispositivos mecânicos conhecido como conectores de cisalhamento. Isso se dá através da absorção dos esforços cisalhantes horizontais que se desenvolvem na direção longitudinal na interface da laje com a mesa superior da seção de aço, além de impedir a separação física desses componentes.

Para Queiroz (2001), caso a ligação entre os dois elementos não existisse, cada superfície da interface estaria submetida a diferentes tensões: a superfície superior da viga encurtaria, pois estaria submetida a tensões de compressão, enquanto a superfície inferior da laje se alongaria, pois as tensões submetidas seriam de tração. Ocorre então um deslizamento relativo entre as superfícies na região de contato e formam-se dois eixos neutros independentes, onde o momento total resistente é dado pela soma das resistências individuais da laje e da viga, conforme Figura 4 (a).

Quando existem conectores rígidos unindo a laje e a viga, forças horizontais tendem a encurtar a face inferior da laje e ao mesmo tempo alonga a face superior da viga, de tal forma que não haja deslizamento significativo entre aço e concreto, portanto eles deformam-se como um único elemento, existindo apenas uma linha neutra acontecendo à interação total, Figura 4 (b).

Figura 4 - Sistema misto – variação de deformação na viga



Fonte: Queiroz, 2001.

O caso mais utilizado em vigas mistas, por questões econômicas são as interações parciais, nas quais as ligações não são totalmente rígidas, surgindo duas

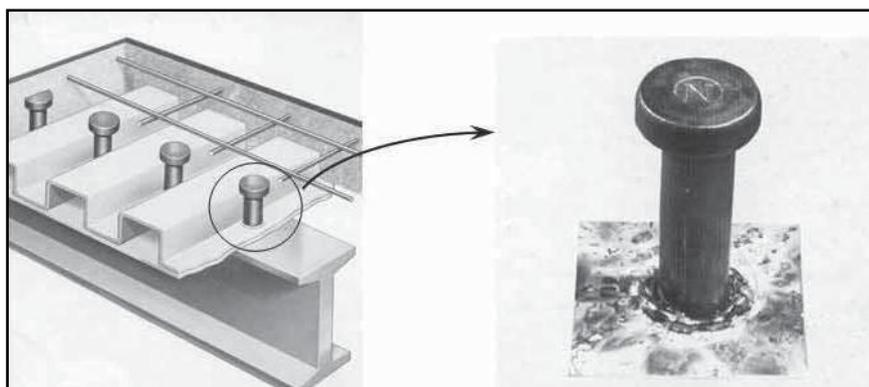
linhas neutras, porém nesse caso, não independentes, a posição delas dependerá do grau de interação entre os sistemas. Haverá um deslizamento relativo entre as superfícies, porém, menor que o ocorrido na situação não-mista, Figura 4 (c).

Segundo Pfeil (2012), os conectores podem ser classificados em dúcteis e não-dúcteis, de acordo com a capacidade de deformação de ruptura (δ), que permite que eles se deformem mantendo sua resistência e que os acréscimos de esforços sejam transferidos aos conectores menos solicitados. Com esse aumento de carregamento, as tensões normais inicialmente em regime elástico atingem o escoamento no aço e/ou a resistência do concreto e parte para a plastificação, contanto que não ocorra antecipadamente a flambagem local ou lateral. Define-se a resistência de uma viga mista pela plastificação de um de seus componentes:

- Concreto sob compressão;
- Aço sob tração (ou tração e compressão);
- Conectar sob cisalhamento horizontal.

Na NBR 8800 (ABNT, 2008) são citados os tipos usuais de conectores: pinos com cabeça (Figura 5) e os perfis U laminados ou formados a frio (Figura 6).

Figura 5 - Conector tipo pino com cabeça



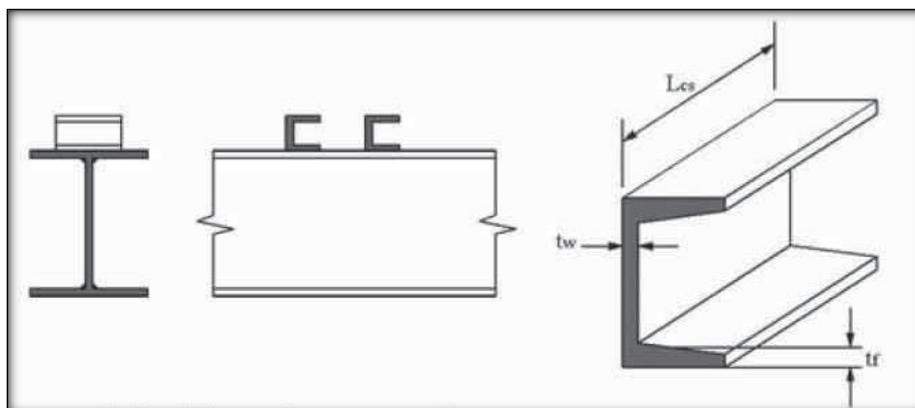
Fonte: Queiroz, 2001.

2.4.3 Ligação Total e Ligação Parcial a Cisalhamento Horizontal

De acordo com Pfeil (2012), a ligação total a cisalhamento ocorre quando o aumento do número de conectores não acarreta um acréscimo de resistência à flexão, já

que o momento fletor resistente de uma viga mista não é estabelecido pelo corte dos conectores. Ela atinge seu momento resistente com a plastificação da seção, caracterizada pela distribuição de tensões em linha cheia, Figura 8 (c).

Figura 6 - Conectores tipo U Fonte

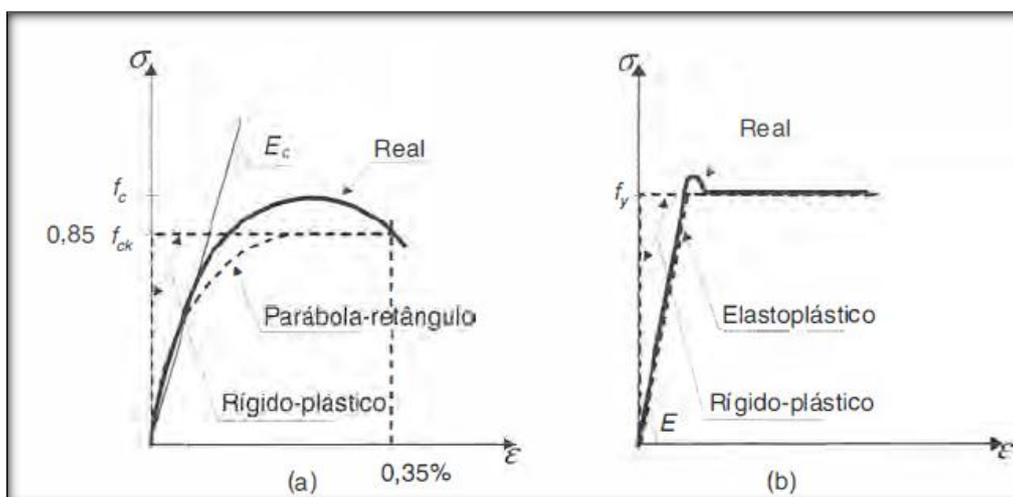


Fonte: Queiroz, 2001.

A ligação parcial a cisalhamento, geralmente mais utilizada por questões econômicas, ocorre, quando a viga mista possui menos conectores do que uma com ligação total e seu momento resistente é função da resistência ao cisalhamento horizontal dos conectores. Independentemente do tipo de ligação, no regime plástico é feita a determinação da resistência à flexão para seções de aço compactas.

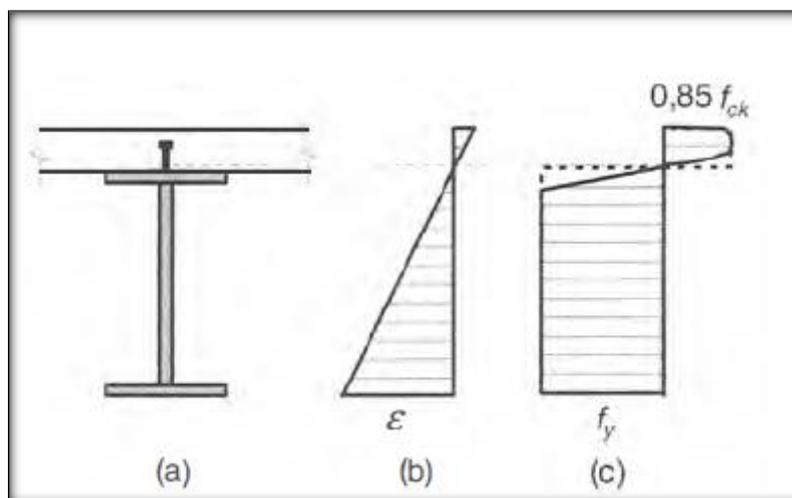
Os diagramas tensão-deformação do aço e do concreto são mostrados na Figura 7, juntamente com os diagramas simplificados utilizados no caso de viga mista.

Figura 7 - Diagrama tensão-deformação: (a) concreto em compressão (b) aço comum com patamar de escoamento



Fonte: Pfeil, 2012.

Figura 8 - Limite de resistência de viga com ligação total: (a) viga mista; (b) diagrama de deformações na seção; (c) diagramas de tensões na ruptura



Fonte: Pfeil, 2012.

2.4.4 Retração e Fluência do concreto

Um elemento de concreto quando exposto a um carregamento, reage de duas formas: uma imediata e outra em função do tempo. No caso de uma exposição a um carregamento prolongado, a resposta em função do tempo se dará com uma deformação gradual causada pela fluência e retração do concreto.

Segundo Pfeil (2012), a retração volumétrica que ocorre após o endurecimento do concreto depende das condições de cura e exposição, no entanto, nas vigas mistas esse fenômeno não ocorre por causa da seção metálica que permanece sob flexo-compressão enquanto a laje fica tracionada. Todavia, sob efeito da fluência o concreto deforma-se lentamente. Essa longa duração da deformação pode chegar a três vezes o valor da deformação elástica instantânea, e por isso deve ser considerada nas verificações no estado limite de utilização.

2.4.5 Construções escoradas e não escoradas

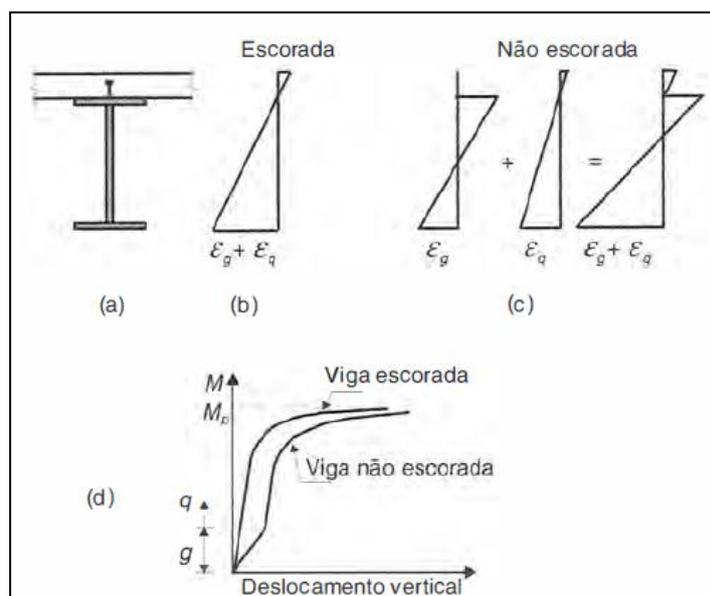
O método construtivo da laje influencia o comportamento estrutural da viga mista. Forças longitudinais são desenvolvidas na interface aço-concreto para que elas

colaborem umas com a outra. Quando o sistema é escorado, a seção de aço não é solicitada durante o endurecimento do concreto, a carga é suportada pelo escoramento da viga até o concreto atingir resistência suficiente para que a ação mista seja desenvolvida, ou seja, 75% da resistência característica do concreto a compressão. Logo após, o escoramento é retirado e as solicitações devidas ao peso próprio (g) e outras cargas (q) aplicadas posteriormente atuam sobre a seção mista, resultando no diagrama de deformações apresentado na Figura 9b.

Já no sistema não-escorado, a viga de aço é calculada isoladamente para suportar as cargas de construção e o peso próprio do concreto fresco, até que este adquira resistência adequada. Após o endurecimento do concreto, as cargas aplicadas refletem sobre a seção mista, resultando no diagrama de deformações na Figura 9 (c).

De acordo com Pfeil (2012), a carga g provoca deslocamentos verticais, os quais na viga escorada são bem menores do que na viga não escorada, uma vez que todo o carregamento ($g + q$) atua no sistema mais rígido da seção mista. A viga atinge o mesmo momento fletor resistente independente de ser escorada ou não, no estado limite último onde, as tensões de plastificação são as mesmas.

Figura 9 - Comportamento de vigas construídas com e sem escoramento: (a) Viga mista; (b) diagrama de deformação na seção da viga escorada; (c) diagramas de deformação na seção da viga não escorada; (d) respostas das vigas em termos de deslocamentos verticais para ação de cargas crescentes



Fonte: Pfeil, 2012.

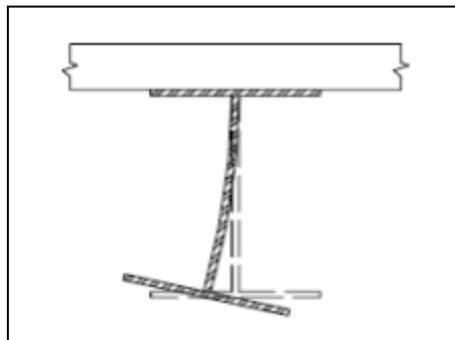
Segundo Vasconcelos (2006), a construção não-escorada traz vantagens frente à construção escorada, tais como agilidade no processo construtivo, etc. Em contraste, a construção escorada apresenta uma minimização dos esforços e deslocamentos verticais da laje e da viga de aço na fase construtiva.

2.4.6 Vigas Mistas sob Ação de Momento Fletor Negativo

Nas regiões dos apoios, as vigas mistas contínuas são submetidas a momentos fletores negativos, os quais ocasionam a tração da laje de concreto e conseqüentemente, a resistência à flexão diminui por causa da fissuração. Diferente da região de momento positivo, a mesa comprimida (inferior) da seção de aço está livre, sendo assim, fica sujeita à flambagem local.

Devido ao impedimento da torção da mesa superior por causa da laje de concreto, a viga mista também fica sujeita a flambagem lateral, nesse caso conhecida por flambagem lateral por distorção representada na Figura 10.

Figura 10 - Flambagem lateral por distorção



Fonte: Alva e Malite, 2005.

2.4.7 Critérios de Cálculo – NBR 8800 (ABNT, 2008)

2.4.7.1 Resistência a flexão

Segundo Pfeil (2012), a resistência à flexão de uma viga mista pode ser determinada por três fatores:

- Plastificação da seção;

- flambagem local da seção de aço;
- flambagem lateral.

Quanto à flambagem local, as vigas com seção de aço compacta têm o seu momento resistente determinado no regime plástico quando ele é totalmente atingido. Em seções semi compactas, o limite de resistência à flexão se dá no início do regime plástico.

A flambagem lateral não existirá em regiões de momento positivo, devido à contenção lateral que os conectores provocam, ligando a mesa comprimida da seção de aço com a laje de concreto.

Em regiões de momento negativo, o momento resistente é o mesmo da seção de aço, podendo até mesmo considerar a armadura longitudinal distribuída na largura efetiva da laje tracionada.

2.4.7.2 Resistência a cisalhamento

Segundo Fuzihara (2006), em vigas mistas uma parte do cisalhamento vertical é resistida pela laje de concreto. No entanto, a seção da laje não é levada em consideração nos procedimentos de cálculo das vigas mistas, pois ainda não há um método simples de cálculo reconhecido. Além do mais, a contribuição da laje para o cisalhamento vertical sofre influência de fatores como a continuidade dos apoios, a fissuração do concreto e do tipo de conexão de cisalhamento especificada. Por esses motivos, na prática, admite-se que o cisalhamento vertical seja absorvido exclusivamente pela viga de aço, desconsiderando-se o tratamento da peça como um conjunto misto.

Fuzihara (2006), ainda comenta que a maioria das vigas de aço possui uma espessura de mesa suficiente para evitar a flambagem por cisalhamento.

O próximo capítulo demonstra toda etapa necessária para realizar o dimensionamento de uma viga simples.

3 DIMENSIONAMENTO VIGA SIMPLES

Visando evitar trincas em alvenarias, quedas de revestimento e afundamento de piso ou quaisquer avarias futuras na estrutura, é fundamental a realização de um dimensionamento preciso, ou seja, as vigas, lajes e pilares deverão ser corretamente dimensionados para evitar as patologias da estrutura.

Para as vigas à flexão, primeiro se verifica o dimensionamento para Flexão Simples e em seguida a Flexão Composta Normal. A flexão simples, tratada neste tópico, é utilizada quando não há grandes influências de esforços normais na estrutura. Tal caso é encontrado na maioria das vezes em edifícios de pequeno e médio porte que são projetados.

Após o cálculo estrutural, todos os esforços, encontrados nos elementos estruturais, deverão ser dimensionados de tal maneira que resistam de forma satisfatória a estes esforços. Para tanto utilizamos as prescrições normativas da NBR 8800 (ABNT, 2008). Segue-se um roteiro prático para o dimensionamento de viga submetida à Flexão Simples – (vigas simples, ou seja, não mista):

3.1 DESLOCAMENTO

O primeiro passo consiste em garantir que o deslocamento vertical calculado seja menor que o máximo ($\Delta_{máx}$) permitido, conforme Quadro 1. Para as variadas situações, a NBR 8800 (ABNT, 2008) apresenta a respectiva formulação.

Quadro 1 - Deslocamentos máximos

(continua)

Descrição	δ^a
Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^{cd}$
Terças de cobertura ^g	$L/180^e$
	$L/180^f$
Vigas de cobertura ^g	$L/250^h$
Vigas de piso	$L/350^h$
Vigas que suportam pilares	$L/500^h$

Quadro 1 - Deslocamentos máximos

(conclusão)

Descrição	δ^a
Vigas de rolamento: ^j Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 KN; Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 KN, exceto pontes siderúrgicas; Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 KN; Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas; Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas.	$L/600^i$ $L/800^i$ $L/1000^i$ $L/400$ $L/600$
Galpões em geral e edifícios de um pavimento: Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base; Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base.	$H/300$ $H/400^{kl}$
Edifícios de dois ou mais pavimentos: Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base; Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos.	$H/400$ $h/500^m$
Lajes mistas	Ver anexo Q da norma NBR 8800 (ABNT 2008)
<p>^aL é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço, H é a altura total do pilar ou a distância do nível da viga de rolamento à base, h é a altura do andar.</p> <p>^bDeslocamento paralelo ao plano de fechamento.</p> <p>^cDeslocamento perpendicular ao plano de fechamento.</p> <p>^dConsiderar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento com seu valor característico.</p> <p>^e Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente.</p> <p>^f Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente com seu valor característico.</p> <p>^g Deve-se evitar também a ocorrência de empoçamento.</p> <p>^hCaso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm.</p> <p>ⁱ Valor não majorado pelo coeficiente de impacto.</p> <p>^j Considerar combinações raras de serviço.</p> <p>^k No caso de pontes rolantes siderúrgicas, o deslocamento também não pode ser superior a 50 mm.</p> <p>^l O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm.</p> <p>^mTomar apenas os deslocamentos provocados pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos do corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e das vigas.</p>	

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

3.2 VERIFICAR A PEÇA QUANTO AO CISALHAMENTO SEGUNDO A NBR 8800 (ABNT, 2008)

Para seções I, H e U fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma, a força cortante resistente de cálculo, V_{rd} , é dada para:

Perfil laminado:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{d'}{t_w} \quad (1)$$

Onde:

λ é o índice de esbeltez;

d' é a largura da alma (retirada do Catálogo Técnico de Perfis Laminados da Gerdau Açominas, conforme Anexo A);

t_w é a espessura da alma (retirada do Catálogo Técnico de Perfis Laminados da Gerdau Açominas, conforme Anexo A).

Perfil Soldado:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{h_0}{t_0} \quad (2)$$

Onde:

λ é o índice de esbeltez;

h_0 é a largura da alma (retirada do livro do Pfeil);

t_0 é a espessura da alma (retirada do livro do Pfeil).

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{K_V \cdot E}{f_Y}} \quad (3)$$

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{K_V \cdot E}{f_Y}} \quad (4)$$

Quando:

- $\lambda \leq \lambda_p$ (seção compacta):

$$V_{rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (5)$$

- $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ (seção semicompacta):

$$V_{rd} = \frac{\lambda_p V_{pl}}{\lambda \gamma_{a1}} \quad (6)$$

- $\lambda > \lambda_p$ (seção esbelta):

$$V_{rd} = 1,24 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda} \right)^2 \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (7)$$

A força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento é dada por:

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y \quad (8)$$

Nessa equação, A_w é área efetiva de cisalhamento, que deve ser tomada igual a:

$$A_w = d t_w \quad (9)$$

Após todas as verificações o valor do cortante solicitado tem que ser menor que o valor do cortante de cálculo.

$$V_{sd} \leq V_{rd} \quad (10)$$

Onde:

λ é o parâmetro de esbeltez;

λ_p é o parâmetro de esbeltez de plastificação;

λ_r é o parâmetro de esbeltez de ruptura;

k_ν é considerado como sendo um valor igual a 5,0 para almas sem enrijecedores transversais;

E é o módulo de elasticidade do aço;

f_y é a tensão de escoamento do aço (Mpa);

V_{sd} é a força cortante solicitante de cálculo;

V_{rd} é a força cortante resistente de cálculo, calculado das maneiras que se seguem;

V_{pl} é a força cortante correspondente à plastificação da alma por cisalhamento;

A_w é área efetiva de cisalhamento;

d é a altura total da seção transversal;

t_w é a espessura da alma;

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade.

3.3 VERIFICAÇÃO QUANTO AO MOMENTO RESISTENTE

As fórmulas necessárias para verificações de estados limites FLT, FLM e FLA são encontradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros referentes ao momento fletor resistente

(continua)						
Tipos de seção e eixo de flexão	Estados limites aplicáveis	M_r	M_{cr}	λ	λ_p	λ_r
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitasa momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver nota 5	Ver nota 1	$\frac{L_b}{r}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver nota 1
	FLM	$(f_y - \sigma_r)W$ Ver nota 5	Ver nota 6	$\frac{b}{t}$ Ver nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo C) ²	$\frac{h}{t_w}$	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de	FLT	$(f_y - \sigma_r)W_c$ $\leq f_y W_t$ Ver nota 5	Ver nota 2	$\frac{L_b}{r_{yc}}$	$1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver nota 2

Tabela 1 - Parâmetros referentes ao momento fletor resistente

Tipos de seção e eixo de flexão	Estados limites aplicáveis	M_r	M_{cr}	(conclusão)		
				λ	λ_p	λ_r
Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (Ver nota 9)	FLM	$(f_y - \sigma_r)W_c$ Ver nota 5	Ver nota 6	b/t Ver nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver nota 6
	FLA	$f_y W$	Viga de alma esbelta (Anexo C) ²	$\frac{h}{t_w}$	$\frac{h_c \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{(0,54 \frac{M_{pl}}{M_r} - 0,9)^2}$ $\leq \lambda_r$	$5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia	FLM Ver nota 3	$(f_y - \sigma_r)W$	Ver nota 6	b/t Ver nota 8	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Ver nota 6
	FLA Ver nota 3	$f_y W_{ef}$ Ver nota 4	$\frac{W_{ef}^2}{W} f_y$ Ver nota 4	$\frac{h_c}{t_w}$	$1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$
Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia	FLT	$f_y W$	$\frac{2,00 C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$	$\frac{L_b}{r_y}$	$\frac{0,13 E}{M_{pl}} \sqrt{JA}$	$\frac{2,00 E}{M_r} \sqrt{JA}$

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Onde:

r_{yc} é o raio de giração da seção T formada pela mesa comprimida e a parte comprimida da alma anexo, em regime elástico, em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma;

r_y é o raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão;

J é a constante de torção da seção transversal;

W_t é o módulo de resistência elástico do lado tracionado da seção, relativo ao eixo de flexão;

W é o módulo de resistência elástico mínimo da seção, relativo ao eixo de flexão;

W_c é o módulo de resistência elástico do lado comprimido da seção, relativo ao eixo de flexão;

h_c é duas vezes a distância do centro geométrico da seção transversal à face interna da mesa comprimida;

L_b é a distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado).

3.3.1 Flambagem lateral na mesa (FLM)

O momento fletor resistente de cálculo, para o estado-limite último de flambagem local da mesa comprimida (FLM), condição em que a mesa comprimida se torna instável dado por:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad (11)$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (12)$$

$$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{K_c E}{f_y}} \quad (13)$$

Onde:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} \quad (14)$$

- Para $\lambda \leq \lambda_p$ (comportamento compacto):

$$M_{rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (15)$$

- Para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ (semi compacto):

$$M_{rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_{cr}) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \quad (16)$$

- Para $\lambda > \lambda_r$ (comportamento esbelto):

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \quad (17)$$

$$M_{pl} = Z f_y \quad (18)$$

$$M_r = 0,7 f_y \quad (19)$$

Onde:

b_f é a largura da mesa;

t_f espessura da mesa;

λ é o parâmetro de esbeltez;

λ_p é o parâmetro de esbeltez de plastificação;

λ_r é o parâmetro de esbeltez de ruptura;

E é o módulo de elasticidade do aço;

f_y é a tensão de escoamento do aço (Mpa);

k_c é um coeficiente;

h é a altura da alma;

t_w é a espessura da alma;

M_{rd} é o momento fletor resistente de cálculo;

M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento;

M_{pl} é o momento fletor plástico;

M_{cr} é o momento fletor crítico;

Z é o módulo de resistência plástico (retirada do Catálogo Técnico de Perfis Laminados da Gerdau Açominas);

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade.

3.3.2 Flambagem lateral da alma (FLA)

O momento fletor resistente de cálculo, para o estado-limite último de flambagem lateral da alma comprimida (FLA), situação onde a alma de seção se torna instável é dado por:

$$\tilde{\lambda} = \frac{h}{t_w} \quad (20)$$

$$\tilde{\lambda}_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (21)$$

$$\tilde{\lambda}_r = 5,70 \sqrt{\frac{K_c E}{f_y}} \quad (22)$$

- Para: $\tilde{\lambda} \leq \tilde{\lambda}_p$ (comportamento compacto):

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (23)$$

- Para: $\tilde{\lambda}_p < \tilde{\lambda} \leq \tilde{\lambda}_r$ (semi compacto):

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\tilde{\lambda} - \tilde{\lambda}_p}{\tilde{\lambda}_r - \tilde{\lambda}_p} \right] \quad (24)$$

- Para: $\tilde{\lambda} > \tilde{\lambda}_r$ (comportamento esbelto):

$$M_{rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \quad (25)$$

$$M_{pl} = Z f_y \quad (26)$$

$$M_r = 0,7f_y \quad (27)$$

Onde:

h é a altura da alma;

t_w é a espessura da alma;

λ é o parâmetro de esbeltez;

Λ_p é o parâmetro de esbeltez de plastificação;

Λ_r é o parâmetro de esbeltez de ruptura;

E é o módulo de elasticidade do aço;

f_y é a tensão de escoamento do aço (Mpa);

k_c é um coeficiente;

h é a altura da alma;

t_w é a espessura da alma;

M_{rd} é o momento fletor resistente de cálculo;

M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento;

M_{pl} é o momento fletor plástico;

M_{cr} é o momento fletor crítico;

Z é o módulo de resistência plástico (retirada do Catálogo Técnico de Perfis Laminados da Gerdau Açominas);

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade.

3.3.3 Flambagem lateral com torção (FLT)

O momento fletor resistente de cálculo, para o estado-limite último de flambagem lateral com torção (FLT), instabilidade por flexo-torção, quando há uma combinação dos dois efeitos simultaneamente e a rotação da seção pela instabilidade é dado por:

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \quad (28)$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (29)$$

$$\lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_Y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w \beta_1^2}{I_Y}}} \quad (30)$$

Onde:

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{E J} \quad (31)$$

Para seções I:

$$C_w = \frac{I_Y (d - t_f)^2}{4} \quad (32)$$

Para seções U:

$$C_w = \frac{t_f (b_f - 0,5t_w)^3 (d - t_f)^2}{12} \left[\frac{3(b_f - 0,5t_w)t_f + 2(d - t_f)t_w}{6(b_f - 0,5t_w)t_f + (d - t_f)t_w} \right] \quad (33)$$

- Para: $\lambda \leq \lambda_p$ (comportamento compacto):

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (34)$$

- Para: $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ (semi compacto):

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (35)$$

- Para: $\lambda > \lambda_r$ (comportamento esbelto):

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (36)$$

$$M_{pl} = Z f_y \quad (37)$$

$$M_r = 0,7 f_y \quad (38)$$

Onde:

L_b é a distância entre duas seções contidas à flambagem lateral com torção (comprimento destravado);

r_y é o raio de giração da seção em relação ao eixo principal de inércia perpendicular ao eixo de flexão;

λ é o parâmetro de esbeltez;

Λ_p é o parâmetro de esbeltez de plastificação;

Λ_r é o parâmetro de esbeltez de ruptura;

E é o módulo de elasticidade do aço;

f_y é a tensão de escoamento do aço (Mpa);

β_1 é o coeficiente de dilatação térmica;

J é a constante de torção da seção transversal;

σ_r é a tensão residual;

W é o módulo de resistência elástico mínimo da seção, relativo ao eixo de flexão;

I_Y é o momento de inércia da seção em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma;

d é a altura externa da seção, medida perpendicularmente ao eixo de flexão;

t_f espessura da mesa;

C_w é a constante do empenamento da seção transversal;

b_f é a largura da mesa;

t_w é a espessura da alma;

M_{rd} é o momento fletor resistente de cálculo;

M_r é o momento fletor correspondente ao início do escoamento;

M_{pl} é o momento fletor plástico;

M_{cr} é o momento fletor crítico;

C_b é o fator de modificação para o diagrama de momento fletor não-uniforme cujo valor é 1,00;

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação relacionado ao escoamento, flambagem e instabilidade;

Z é o módulo de resistência plástico (retirada do Catálogo Técnico de Perfis Laminados da Gerdau Açominas).

4 DIMENSIONAMENTO VIGA MISTA

O dimensionamento da viga mista, listado neste tópico, se resume em determinar a resistência de barras prismáticas mistas (aço/concreto) para resistir os esforços cortantes e momento fletor e ainda, o estudo de seu comportamento em relação aos deslocamentos verticais.

Faz ainda parte deste capítulo a determinação do momento de inércia efetivo, verificação do momento fletor resistente de cálculo em regiões de momento positivo e negativo e a verificação da força cortante.

Todo dimensionamento baseia-se na norma NBR 8800 (ABNT, 2008). Considerando que há vasta literatura nesta área e que vários roteiros e metodologias de dimensionamento são propostos, neste trabalho utilizou-se alguns destes roteiros, mas especialmente o texto a seguir seguem as orientações do livro do Pfeil (2012) e de Nascimento (2017).

$$\frac{h}{t_w} \leq 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (39)$$

Onde:

h altura;

t_w espessura;

E módulo de elasticidade;

f_y tensão de escoamento do aço.

4.1 LARGURA EFETIVA

Para viga mista biapoiada a largura efetiva da mesa de concreto, de cada lado da linha de centro da viga, deve ser igual ao menor dos seguintes valores:

- $\frac{1}{8}$ 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.

4.2 MOMENTO DE INÉRCIA EFETIVO

O momento de inércia efetivo (I_{ef}) é dado por:

$$I_{ef} = I_a + \sqrt{\frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}}} (I_{tr} - I_a) \quad (40)$$

Onde:

I_{tr} é o momento de inércia da seção mista homogeneizada;

I_a é o momento de inércia da seção do perfil de aço isolado;

$\sum Q_{Rd}$ definido respectivamente pelo item 4.3.1.1;

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

4.3 VERIFICAÇÃO DO MOMENTO FLETOR

4.3.1 Momento fletor resistente de cálculo em regiões de momentos positivos

4.3.1.1 Para vigas mistas de alma cheia com $\frac{h}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ e treliças mistas:

- a. Viga mista de alma cheia com interação completa e linha neutra da seção plastificada na laje de concreto:

$$\sum Q_{Rd} \geq A_a f_{yd} \quad (41)$$

$$0,85 f_{cd} b t_c \geq A_a f_{yd} \quad (42)$$

Cumpridas essas condições:

$$C_{cd} = 0,85 f_{cd} b a \quad (43)$$

$$T_{ad} = A_a f_{yd} \quad (44)$$

$$a = \frac{T_{ad}}{0,85f_{cd}b} \leq t_c \quad (45)$$

$$M_{Rd} = \beta_{vm} T_{ad} \left(d_1 + h_F + t_c - \frac{a}{2} \right) \quad (46)$$

- b. Vigas mista de alma cheia com interação completa e linha neutra da seção plastificada no perfil de aço:

$$\sum Q_{Rd} \geq 0,85f_{cd}bt_c \quad (47)$$

$$A_a f_{yd} \geq 0,85f_{cd}bt_c \quad (48)$$

Cumprindo essas condições:

$$C_{cd} = 0,85f_{cd}bt_c \quad (49)$$

$$C_{ad} = \frac{1}{2}(A_a f_{yd} - C_{cd}) \quad (50)$$

$$T_{ad} = C_{cd} + C_{ad} \quad (51)$$

- c. Viga mista de alma cheia com interação parcial:

$$\sum Q_{Rd} < A_a f_{yd} \quad (52)$$

$$\sum Q_{Rd} < 0,85f_{cd}bt_c \quad (53)$$

Cumprindo essas condições:

$$M_{Rd} = \beta_{vm} \left[C_{ad}(d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(t_c - \frac{a}{2} + h_F + d - y_t \right) \right] \quad (54)$$

Com:

$$a = \frac{C_{cd}}{0,85f_{cd}b} \quad (55)$$

d. Treliça mista com interação completa e linha neutra da seção plastificada na laje de concreto:

$$\sum Q_{Rd} \geq (A_{bi}f_{yd}) \quad (56)$$

$$0,85f_{cd}bt_c \geq A_{bi}f_{yd} \quad (57)$$

Cumprida essas condições:

$$C_{cd} = 0,85f_{cd}ba \quad (58)$$

$$T_{ad} = A_{bi}f_{yd} \quad (59)$$

$$a = \frac{T_{ad}}{0,85f_{cd}b} \quad (60)$$

$$M_{Rd} = T_{ad}d_2 \quad (61)$$

Onde:

C_{cd} é a força resistente de cálculo da espessura comprimida da laje de concreto;

T_{ad} é a força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço;

C_{ad} é a força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço;

A_a é a área do perfil de aço;

A_{af} é a área da mesa superior do perfil de aço;

A_{aw} é a área da alma do perfil de aço, igual ao produto $h_w t_w$;

A_{bi} é a área do banzo inferior da treliça de aço;

b é a largura efetiva da laje de concreto;

t_c é a altura da laje de concreto;

a é a espessura da região comprimida da laje ou, para interação parcial, a espessura considerada efetiva;

$\sum Q_{Rd}$ é o somatório das forças resistentes de cálculo individuais Q_{Rd} dos conectores

de cisalhamento situados entre a relação de momento positivo máximo e a seção adjacente de momento nulo;

h_F é a espessura da pré-laje pré-moldada de concreto;

d é a altura total do perfil de aço;

h_w é a altura da alma, tomada como a distância das faces internas das mesas;

t_w é a espessura da alma;

d_1 é distância do centro geométrico do perfil de aço até a face superior desse perfil;

d_2 é a distância entre as forças de tração e compressão na treliça;

y_c é a distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a face superior desse perfil;

y_t é a distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face inferior desse perfil;

y_p é a distância da linha neutra da seção plastificada até a face superior do perfil de aço;

t_f é a espessura da mesa superior do perfil de aço;

f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço;

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

β_{vm} coeficiente igual a 1,00 para vigas biapoiadas;

M_{rd} é o momento fletor resistente de cálculo.

4.3.1.2 Vigas mistas de alma cheia com $3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$:

a. Interação completa ($\sum Q_{Rd}$ igual ou superior ao menor dos dois valores:

$A_a f_{yd}$ ou $0,85 f_{cd} b t_c$):

$$\sigma_{td} = \frac{M_{Sd}}{(W_{tr})_i} \quad (62)$$

$$\sigma_{cd} = \frac{M_{Sd}}{[\sigma_E (W_{tr})_s]} \quad (63)$$

b. Interação parcial:

$$W_{ef} = W_a + \sqrt{\frac{\sum Q_{Rd}}{F_{hd}}} [(W_{tr})_i - W_a] \quad (64)$$

Onde:

σ_{td} é a tensão de tração de cálculo na mesa inferior do perfil de aço;

σ_{cd} é a tensão de compressão de cálculo na face superior da laje de concreto;

$(W_{tr})_i$ é o módulo de resistência elástico inferior da seção mista;

$(W_{tr})_s$ é o módulo de resistência elástico superior da seção mista;

W_a é o módulo de resistência elástico inferior do perfil de aço.

M_{sd} momento fletor solicitante de cálculo;

W_{ef} é o módulo de resistência elástico efetivo;

σ_E é a tensão do aço;

$\sum Q_{Rd}$ é o somatório das forças resistentes de cálculo individuais Q_{Rd} dos conectores de cisalhamento situados entre a relação de momento positivo máximo e a seção adjacente de momento nulo;

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

4.3.2 Momento fletor resistente de cálculo em regiões de momentos negativos

Para o cálculo da força resistente de tração de cálculo (T_{ds}) nas barras da armadura longitudinal deve ser feita pela seguinte equação:

$$T_{ds} = A_{sl} f_{sd} \quad (65)$$

Onde:

A_{sl} é a área da armadura longitudinal dentro da largura efetiva da laje de concreto;

f_{sd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura.

Já o momento resistente de cálculo (M_{Rd}) para vigas compactas é dado pela seguinte equação:

$$M_{Rd} = T_{ds}d_3 + A_{at}f_{yd}d_4 + A_{ac}f_{yd}d_5 \quad (66)$$

Onde:

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

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

d_3 é a distância entre o centro geométrico da armadura longitudinal à linha neutra da seção plastificada;

d_4 é a distância da força de tração, situada no centro geométrico da área tracionada da seção do perfil de aço, à linha neutra da seção plastificada;

d_5 é a distância da força de compressão, situada no centro geométrico da área comprimida da seção do perfil de aço, à linha neutra da seção plastificada;

f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço;

T_{ds} é a força resistente de tração de cálculo.

4.4 VERIFICAÇÃO DA FLAMBAGEM LATERAL COM DISTORÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Em decorrência ao momento negativo da viga mista é necessário assegurar que não ocorra a flambagem lateral com distorção da seção transversal, para isso é necessário usar a seguinte condição:

$$M_{Sd}^- \leq M_{dist,Rd}^- \quad (67)$$

Onde:

M_{Sd}^- é o momento fletor solicitante de cálculo na região de momentos negativos;

$M_{dist,Rd}^-$ é o momento fletor resistente cálculo na região de momentos negativos, para o estado limite de flambagem lateral com distorção da seção transversal, determinado no subitem 4.4.1.

4.4.1 Momento fletor resistente de cálculo na região de momentos negativos para flambagem lateral com torção da seção transversal

Para vigas mistas e semicontínuas:

$$M_{dist,Rd}^- = X_{dist} M_{Rd}^- \quad (68)$$

Onde:

M_{Rd}^- é o momento fletor resistente de cálculo da seção transversal;

X_{dist} é o fator de redução para flambagem lateral com distorção da seção transversal, dado por:

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{M_{Rk}^-}{M_{cr}}} \quad (69)$$

Onde:

M_{Rk}^- é o momento fletor resistente característico na região de momentos negativos, tomando todos os coeficientes de ponderação da resistência iguais a 1,00;

M_{cr} é o momento crítico elástico na região de momentos negativos;

λ_{dist} parâmetro de esbeltez da seção transversal do perfil metálico;

Se λ_{dist} for inferior a 0,4 pode-se tomar X_{dist} igual a 1,00.

Caso exista duas ou mais vigas ligadas paralelas ligadas à mesma laje de concreto o momento crítico elástico (M_{cr}) é dado por:

$$M_{cr} = \alpha_g \frac{C_{dist}}{L} \sqrt{\left(GJ + \frac{K_r L^2}{\pi^2} \right) EI_{af,y}} \quad (70)$$

Onde:

G é o módulo de elasticidade transversal do aço;

L é o comprimento da viga entre dois apoios verticais;

J é a constante de torção do perfil de aço;

$I_{af,y}$ é o momento de inércia da mesa inferior do perfil de aço em relação ao eixo;

C_{dist} é o coeficiente que depende de distribuição de momentos fletores no comprimento L, dado nas Tabelas 2 e 3 para vigas contínuas e nas Tabelas 3 e 4 para vigas semicontínuas para alguns carregamentos;

K_r é a rigidez rotacional da viga mista;

α_g é um fator relacionado à geometria da seção transversal da viga mista.

Tabela 2 - Coeficiente C_{dist} para vigas contínuas com carregamento no comprimento L

Condições de carregamento e apoio	Diagrama de momento fletor ^a	Ψ								
		0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50
		41,5	30,2	24,5	21,1	19,0	17,5	16,5	15,7	15,2
		33,9	22,7	17,3	14,1	13,0	12,0	11,4	10,9	10,6
		28,2	18,0	13,7	11,7	10,6	10,0	9,5	9,1	8,9
		21,9	13,9	11,0	9,6	8,8	8,3	8,0	7,8	7,6
		28,4	21,8	18,6	16,7	15,6	14,8	14,2	13,8	13,5
		12,7	9,89	8,6	8,0	7,7	7,4	7,2	7,1	7,0

^a M_o é o momento máximo solicitante de cálculo, considerando o tramo analisado como biapoiado.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Tabela 3 - Coeficiente C_{dist} para vigas contínuas e semicontínuas sem carregamento no comprimento L

Condições de carregamento de apoio	Diagrama de momento fletor ^a	Ψ				
		0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
		11,1	9,5	8,2	7,1	6,2
		11,1	12,8	14,6	16,3	18,1

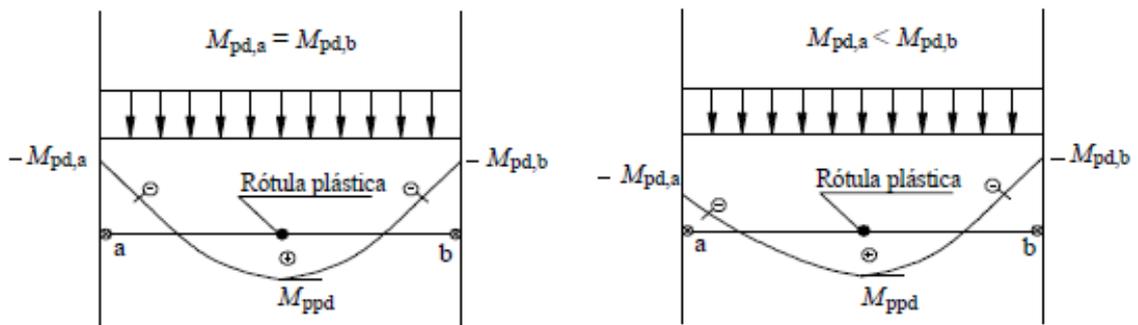
^a M é o maior momento negativo solicitante de cálculo, em módulo, no trecho analisado, sendo que valores de Ψ maiores que 1,00 devem ser considerados iguais a 1,00.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Tabela 4 - Coeficiente C_{dist} para vigas semicontínuas submetidas a carregamentos uniformemente distribuído

no comprimento L.

$\Psi_2 = M_{pd,a}/M_{pd,b}^a$	$\Psi_1 = M_{pd,b}/M_{ppd}^a$					
	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
1,00	21,9	24,0	26,7	29,5	32,7	34,2
0,75	26,5	29,0	32,0	35,0	38,0	39,8
0,50	30,5	33,9	37,0	40,4	44,3	45,7
0,00	32,4	36,5	42,6	47,6	51,8	53,5



^a M_{ppd} é o momento plástico resistente de cálculo da viga mista determinado conforme item 2.2.3.2.1. (igual a M_{Rd}), mas com o coeficiente β_{vm} igual a 1,00; $M_{pd,a}$ é o menor momento plástico resistente de cálculo, em módulo, nas extremidades do tramo considerado; $M_{pd,b}$ é o maior momento plástico resistente de cálculo, em módulo, nas extremidades do tramo considerado.

Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

A rigidez rotacional é dada pela seguinte fórmula:

$$K_r = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \quad (71)$$

Onde K_1 é a rigidez à flexão da laje, por unidade de comprimento da viga, dado por:

$$K_1 = \frac{\alpha(EI)_2}{a} \quad (72)$$

K_2 é a rigidez à flexão da alma do perfil de aço, por unidade de comprimento da viga, dado por:

$$K_2 = \frac{Et_w^3}{4h_0(1 - \nu_a^2)} \quad (73)$$

Onde:

α é igual a 2 para vigas de borda, com ou sem balanço, e 3 para vigas internas;

$(EI)_2$ é a rigidez à flexão da seção mista homogeneizada da laje, por unidade de comprimento da viga, tomada como o menor valor, considerando o meio do vão da laje, para momento positivo, e um apoio interno da laje, para momento negativo;

a é a distância entre as vigas;

t_w é a espessura da alma do perfil de aço;

h_0 é a distância entre os centros geométricos das mesas do perfil do aço;

ν_a é o coeficiente de Poisson do aço.

Quando o perfil de aço é duplamente simétrico, temos:

$$\alpha_g = \frac{\left(h_0 I_x / I_{ax} \right)}{\frac{\left[\frac{h_0^2}{4} + \frac{(I_{ax} + I_{ay})}{A_a} \right]}{e} + h_0} \quad (74)$$

E quando o perfil de aço é simétrico apenas em relação ao eixo situado no plano de flexão:

$$\alpha_g = \frac{\left(h_0 I_x / I_{ax} \right)}{\frac{(y_f - y_s)^2 + (I_{ax} + I_{ay}) / A_a}{e} + 2(y_f - y_j)} \quad (75)$$

Onde:

y_c é a distancia do centro geométrico do perfil de aço à metade da altura da laje de concreto;

I_x é o momento de inércia da seção mista na região do momento negativo com relação ao eixo x;

I_{ax} e I_{ay} são os momentos de inércia da seção de aço com relação aos seus eixos baricentros;

h_0 é a distância entre os centros geométricos das mesas do perfil do aço;

α_g é um fator relacionado à geometria da seção transversal da viga mista.

A_a é a área do perfil de aço;

A é a área da seção mista na região de momento negativo;

y_s é a distância do centro geométrico ao centro de cisalhamento do perfil de aço.

- $e = \frac{A I_{ax}}{A_a y_c (A - A_a)}$;
- $y_f = \frac{h_0 I_{afy}}{I_{ay}}$;
- $y_j = y_s - \int_{A_a}^0 \frac{y(x^2 + y^2) dA}{2 I_{ax}}$; quando $I_{af,y} > 0,5 I_{ay}$, pode-se tomar

$$y_j = 0,40 h_0 \left(2 \frac{I_{af,y}}{I_{ay}} - 1 \right).$$

4.5 VERIFICAÇÃO DA FORÇA CORTANTE

Deve-se considerar apenas a resistência do perfil de aço, portanto:

$$V_{sd} \leq V_{Rd} \quad (76)$$

Onde:

V_{sd} é a força cortante solicitante de cálculo;

V_{rd} é a força cortante resistente de cálculo.

4.6 LINHA NEUTRA

Agora para saber se a linha neutra está na laje de concreto ou na seção de aço deve-se calcular o valor máximo da resistência à compressão no concreto (R_{cd}) usando a fórmula 77.

$$R_{cd} = \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} b_e h_c \quad (77)$$

Para saber o valor máximo da resistência à tração (R_{td}) adotamos a fórmula 78.

$$R_{td} = \frac{f_y A}{\gamma_{a1}} \quad (78)$$

Como equilíbrio das forças na seção, conclui-se que:

- Se $R_{cd} > R_{td}$ a linha neutra plástica está na laje de concreto;
- Se $R_{cd} < R_{td}$ a linha neutra plástica está na seção de aço.

4.6.1 Se a linha neutra estiver situada na laje de concreto:

É preciso saber a profundidade da linha neutra utiliza-se a equação 79:

$$x = \frac{f_y A / \gamma_{a1}}{0,85 f_{ck} b_e / \gamma_c} < h_c \quad (79)$$

Onde:

f_y é a resistência ao cisalhamento do aço;

A é a área da seção de aço;

γ_{a1} é o coeficiente de ponderação de resistência, dado na Tabela 5;

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão;

b_e é a largura efetiva da laje;

γ_c é o coeficiente de ponderação de resistência, dado na Tabela 5;

h_c é a altura da laje.

Tabela 5 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m

Combinações	Aço estrutural ^a		Concreto γ_c	Aço das armaduras γ_s
	γ_a			
	Escoamento, flambagem e instabilidade γ_{a1}	Ruptura γ_{a2}		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,10	1,15	1,20	1,00

^a Inclui o aço de fôrma incorporada, usada nas lajes mistas de aço e concreto, de pinos e parafusos.

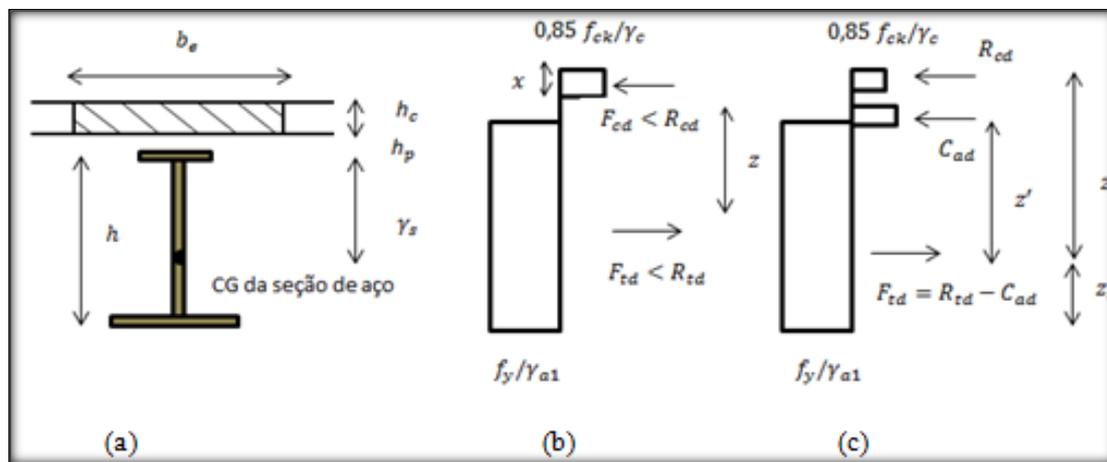
Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

Já o momento resistente é dado pela equação 80.

$$M_{dres} = R_{td}z = \frac{f_y A}{\gamma_{a1}} \left(y_s + h_p + h_c - \frac{x}{2} \right) \quad (80)$$

Onde as incógnitas são mostradas na figura 11:

Figura 11 - Diagramas de tensões no estado limite de projeto de vigas sob momento positivo com ligação total



(a) é a seção mista;

(b) é a linha neutra plástica na laje;

(c) é a linha neutra plástica na seção de aço.

Fonte: Pfeil, 2012.

4.6.2 Se a linha neutra estiver situada na seção de aço:

É preciso saber a força de compressão no aço (C_{ad}) através da equação 81:

$$C_{ad} = \frac{1}{2} (R_{td} - R_{cd}) \quad (81)$$

Após esta descoberta precisa-se achar o momento resistente (M_{dres}) pela seguinte expressão.

$$M_{dres} = R_{cd}z + C_{ad}z' = R_{cd} \left(h - y_t + h_p + \frac{h_c}{2} \right) + C_{ad}(h - y_t - y_c) \quad (82)$$

Onde as incógnitas são mostradas na Figura 11.

4.7 CÁLCULO DA ARMADURA

Para calcularmos a armadura necessária para o controle de fissuração usa-se a seguinte fórmula para calcular a área efetiva da laje de concreto (A_{ct}):

$$A_{ct} = b_e t_c \quad (83)$$

Onde:

b_e é a largura efetiva da laje;

t_c é a espessura da laje.

Para sabermos a máxima tensão de tração (σ_{st}) permitida na armadura usa-se a fórmula a seguir.

$$\sigma_{st} = 810 \sqrt{\frac{W_k^3 \sqrt{f_{ck}^2}}{\phi}} \leq f_{ys} \quad (84)$$

Onde:

W_k é a abertura máxima característica das fissuras;

f_{ys} é a resistência ao escoamento do aço da armadura;

ϕ é o diâmetro das barras da armadura;

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão.

Para calcular a armadura da seção deve-se usar a fórmula 85.

$$A_s = \frac{0,72 f_{ct,ef} A_{ct}}{\sigma_{st}} \quad (85)$$

Onde:

$f_{ct,ef}$ é a resistência média a tração efetiva do concreto no instante em que se formam as primeiras fissuras;
 A_{ct} área efetiva da laje de concreto.

4.8 CONECTORES DE CISALHAMENTO

Tendo como principais funções, transferir fluxo de cisalhamento na interface da viga mista e impedir a separação vertical entre laje de concreto e perfil de aço, os conectores de cisalhamento garantem a interação dos elementos obtendo um comportamento uniforme.

Os conectores, segundo Pfeil (2012), podem ser classificados em rígidos ou flexíveis, de acordo com sua capacidade de deformação no deslizamento quando sujeito a esforço cortante. O tipo de conector mais utilizado é o pino com cabeça.

De acordo com Queiroz (2001), na década de 40 foi desenvolvido pela Nelson Studdo Welding o conector tipo pino com cabeça, também conhecido como “Stud Bolt”, projetado para funcionar como um eletrodo de solda por arco elétrico e ao mesmo tempo, após a soldagem, como conector de cisalhamento.

Fundamentando-se na NBR 8800 (ABNT, 2008), apresenta-se a seguir, a maneira de dimensionar os conectores tipo pino com cabeça e em perfil U laminado ou formado a frio com espessura de chapa igual ou superior a 3 mm:

4.8.1 Pinos com cabeça

A força resistente de cálculo (Q_{Rd}) para conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça é dada pelo menor dos valores das equações abaixo:

$$Q_{Rd} = \frac{1}{2} \frac{A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (86)$$

$$Q_{Rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}} \quad (87)$$

Onde :

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

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

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

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

R_g é um coeficiente para consideração do efeito de atuação de grupos de conectores, mostrado no subitem 4.8.1.1;

R_p é um coeficiente para consideração da posição do conector, mostrado no subitem 4.8.1.2.

4.8.1.1 Valores do coeficiente R_g

Deve-se adotar 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 ou para qualquer número de conectores em uma linha soldados através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço com relação $\frac{b_F}{h_F}$ igual ou superior a 1,5;
- 0,85: para dois conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço ou para um conector soldado através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço e com relação $\frac{b_F}{h_F}$ inferior a 1,5;
- 0,70: para três ou mais conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço.

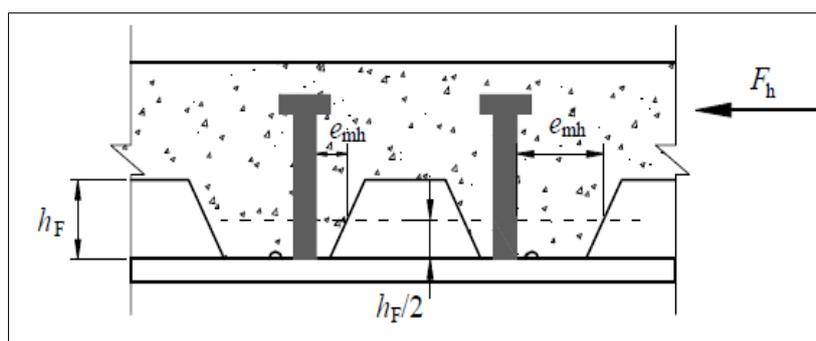
4.8.1.2 Valores do coeficiente R_p

Deve-se adotar os seguintes valores:

- 1,00: para conectores soldados diretamente no perfil de aço e, no caso de haver nervuras paralelas a essa 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 ou 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 entre a borda do fuste do conector até a alma da nervura da fôrma de aço, exemplificado na Figura 12.

Figura 12 - Ilustração do valor a ser tomado para e_{mh}



Fonte: NBR 8800 (ABNT, 2008).

4.8.2 Perfil U laminado ou formado a frio

Em perfil U laminado, com altura da seção transversal igual ou superior a 75 mm totalmente embutido na laje maciça de concreto com face inferior plana diretamente apoiada sobre a viga de aço, a força resistente de cálculo (Q_{Rd}) para conectores de cisalhamento, é dado pela equação abaixo:

$$Q_{Rd} = \frac{0,3(t_{fcs} + 0,5t_{wcs})L_{cs}\sqrt{f_{ck}E_c}}{\gamma_{cs}} \quad (88)$$

Onde:

t_{fcs} é a espessura da mesa do conector;

t_{wcs} é a espessura da alma do conector;

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão;

E_c é o módulo de elasticidade do concreto;

L_{cs} é o comprimento do perfil U;

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

4.8.3 Localização e espaçamento dos conectores

Em seções do momento fletor máximo, os conectores podem ser uniformemente espaçados entre cada lado da seção e as seções de adjacentes de momento nulo, no entanto em regiões de momento fletor positivo o número de conectores necessários não pode ser inferior a n_p , dado pela equação abaixo:

$$n_p = n \left(\frac{M_{P,Sd} - M_{a,Rd}}{M_{Sd} M_{a,Rd}} \right) \quad (89)$$

Onde:

$M_{P,Sd}$ é o momento fletor solicitante de cálculo na seção da carga concentrada;

$M_{a,Rd}$ é o momento fletor resistente de cálculo da viga de aço isolada, para o estado limite FLA;

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

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

O espaçamento máximo entre linhas de centro de conectores deve ser igual a oito vezes a espessura total da laje; esse espaçamento também não pode ser superior a 915 mm no caso de lajes com fôrmas de aço incorporadas, com nervuras perpendiculares ao perfil de aço (NBR8800, ABNT 2008).

No capítulo seguinte, será apresentado um exemplo numérico.

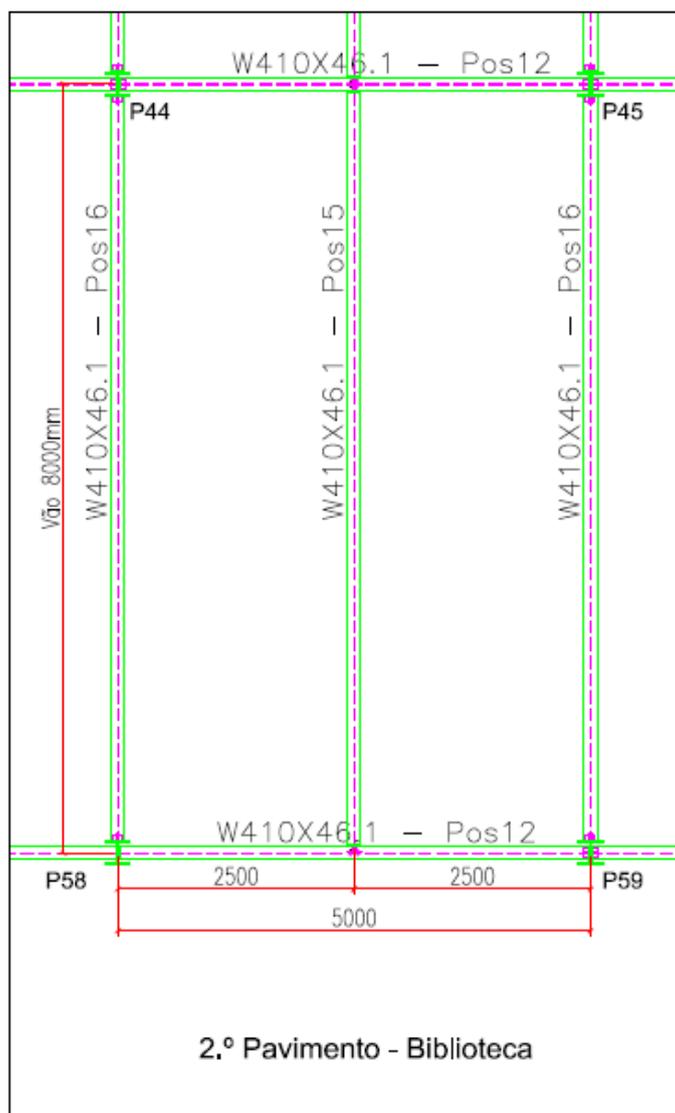
5 EXEMPLO NUMÉRICO

Foi averiguada a viga apresentada na biblioteca localizada na UniEvangélica, projeto que já se encontra executado.

O pé direito, ou a distância entre as faces superiores dos pisos é de 320cm. A escolha da viga Pos 15 se deu pelo fato de ser uma viga tipo, ou seja, que se repete em todo edifício. O vão livre entre apoios da viga é de 800 cm e a distância entre seu eixo longitudinal e os eixos das vigas paralelas à sua direita e esquerda é de 250cm. A viga Pos 15 em questão é biapoiada, conforme planta da estrutura (Figura 13).

Nestes painéis de laje a sobrecarga utilizada foi 250kgf/m².

Figura 13 - Viga



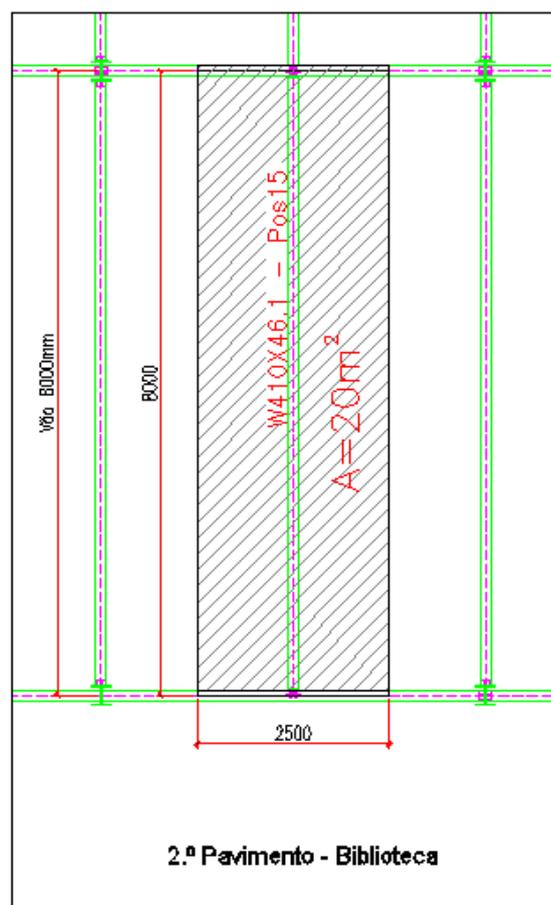
Fonte: RC Construções Metálicas, 2016.

5.1 CARGAS

Os dados calculados a seguir são utilizados tanto no dimensionamento da viga simples como no dimensionamento da viga mista, onde são especificados os valores das cargas em duas combinações, a primeira para ser utilizada na determinação da resistência da viga (momentos, cortante) e a segunda para derterminação do deslocamento (flecha). O resultado da área de influência esta demonstrado na figura 14.

$$A = 2,5 \times 8 = 20 \text{ m}^2$$

Figura 14 - Área de Influência



Fonte: RC Construções Metálicas, 2016.

- Peso próprio

$$P_p = 0,10 \times 2500 = 250 \text{ kgf/m}^2$$

- Revestimento

$$R_{ev} = 0,05 \times 2100 = 105 \text{ kgf/m}^2$$

- Sobrecarga

$$S_{ob} = 250 \text{ kgf/m}^2$$

- Carga (combinação 1) usada nos momentos e esforços cortantes.

$$C_{COB1} = 1,3P_p + 1,3R_{ev} + 1,4S_{ob}$$

$$C_{COB1} = 812 \text{ kgf/m}^2 \times 20 \div 8 = 2030 \text{ kgf/m}$$

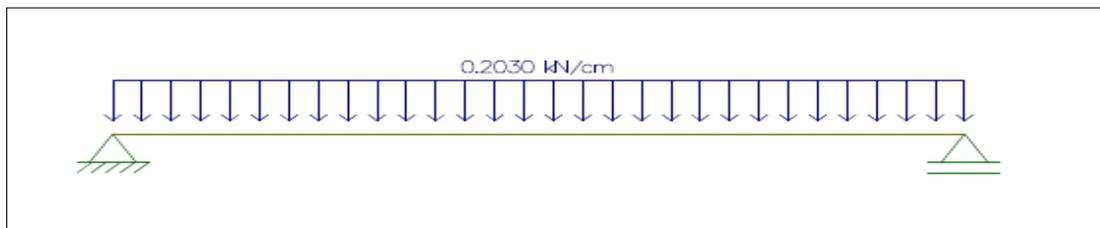
- Carga (combinação 2) utilizada nos deslocamentos.

$$C_{COB2} = 1P_p + 1R_{ev} + 1,0.S_{ob}$$

$$C_{COB2} = 605 \text{ kgf/m}^2 \times 20 \div 8 = 1512,5 \text{ kgf/m}$$

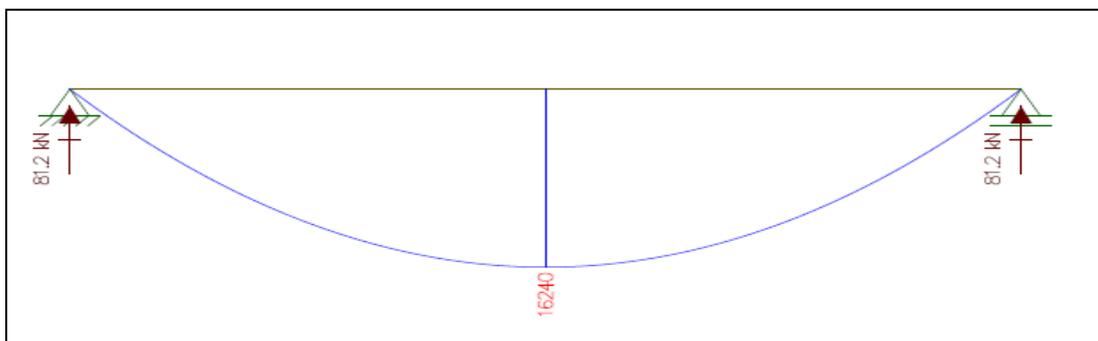
Após a determinação do carregamento na viga foi possível calcular através do software Ftool os diagramas gerais (Figuras 15 e 18), dos momentos (Figuras 16 e 19) e dos esforços cortantes (Figuras 17 e 20) da estrutura em análise.

Figura 15 - Diagrama das forças gerais (para a combinação 1) em KN/cm



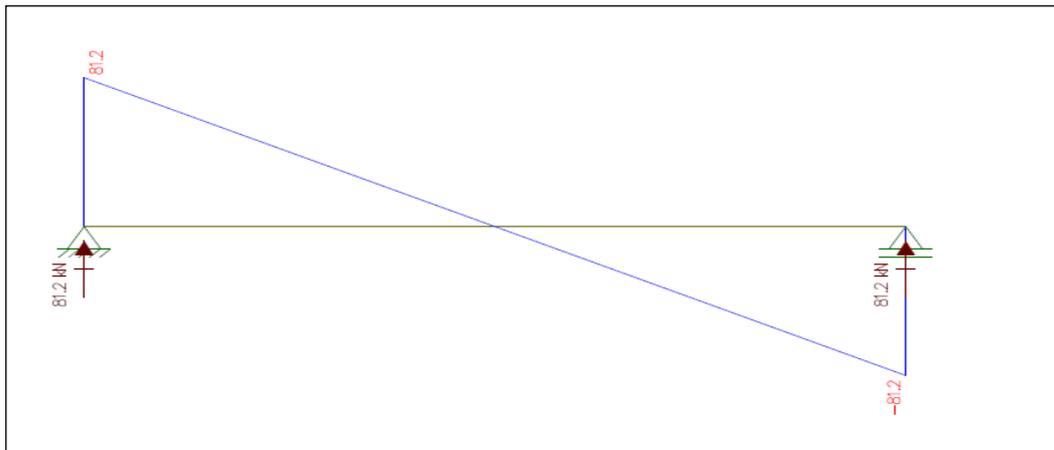
Fonte: Dos Autores, 2017.

Figura 16 - Diagrama dos momentos, (para a combinação 1) em KN.cm



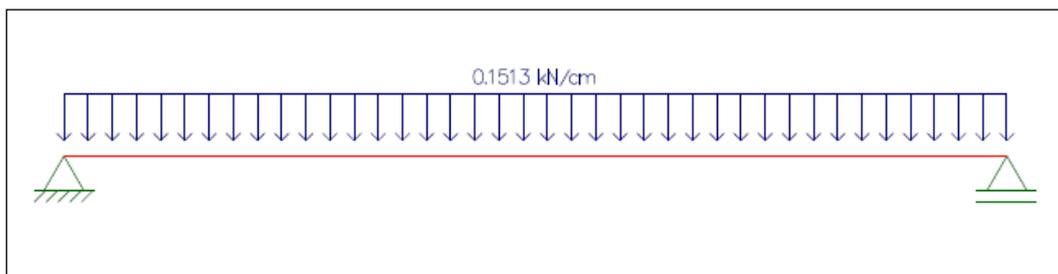
Fonte: Dos Autores, 2017.

Figura 17 - Diagrama dos esforços cortantes, (para a combinação 1) em KN



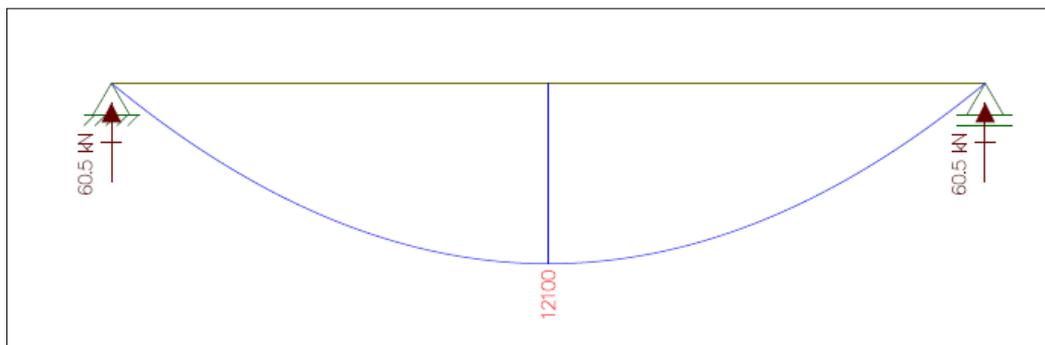
Fonte: Dos Autores, 2017.

Figura 18 - Diagrama das forças gerais (para a combinação 2) em KN/cm



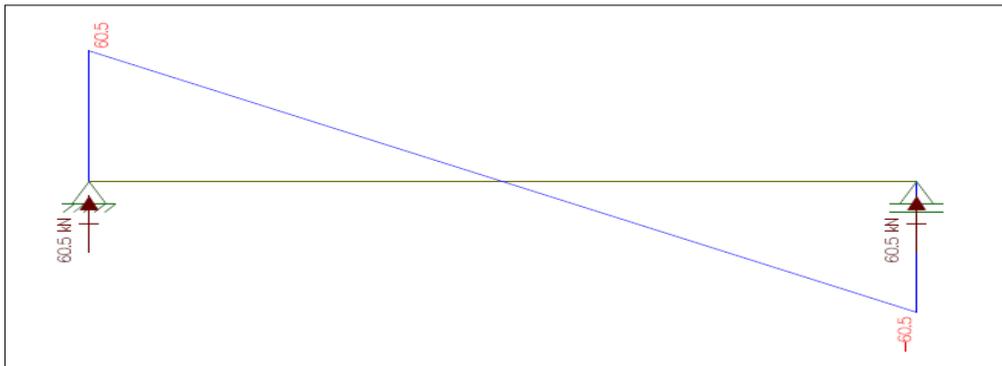
Fonte: Dos Autores, 2017.

Figura 19 - Diagrama dos momentos (para a combinação 2) em KN.cm



Fonte: Dos Autores, 2017.

Figura 20 - Diagrama dos esforços cortantes (para a combinação 2) em KN



Fonte: Dos Autores, 2017.

5.2 DIMENSIONAMENTO DA VIGA SIMPLES

Seguem os dados utilizados para o dimensionamento da viga, retirados do projeto estrutural e catálogos técnicos.

Perfil laminado $W 410X46,1$

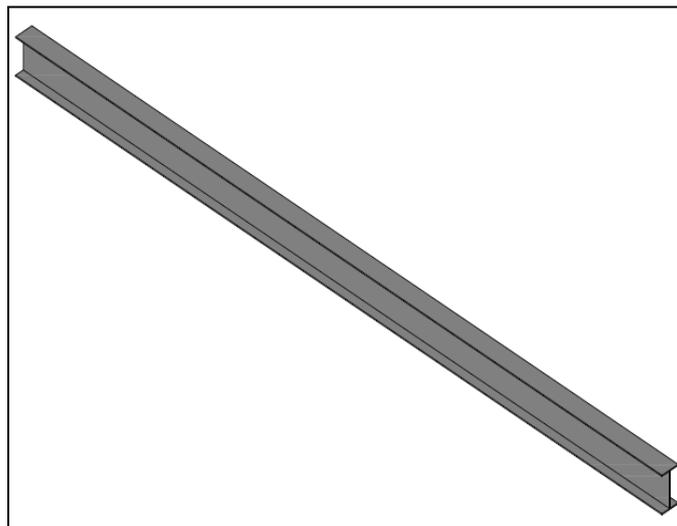
$$f_{ck} = 25MPa$$

$$vão = 8m$$

$$f_y = 35 \text{ kN/cm}^2$$

Exemplo de uma viga perfil I (Figura 21).

Figura 21 - VIGA perfil I



Fonte: Dos Autores, 2017.

5.2.1 Deslocamento Vertical ($\Delta_{m\acute{a}x}$)

Para verificação da viga, quanto ao deslocamento vertical,  necessário determinar o deslocamento máximo ($\Delta_{m\acute{a}x}$), através de uma das fórmulas que foi apresentada no Quadro 1.

$$\Delta_m = \frac{L}{350} = \frac{800}{350} = 2,28 \text{ cm}$$

$$\Delta = \frac{5Pl^4}{384EI}$$

$$\Delta_{Comb1} = \frac{5 \times 0,203 \times 800^4}{384 \times 20000 \times 15690} = 3,45 \text{ cm}$$

$$\Delta_{Comb2} = \frac{5 \times 0,15125 \times 800^4}{384 \times 20000 \times 15690} = 2,57 \text{ cm}$$

Como $\Delta > \Delta_{m\acute{a}x}$ a viga não passou na verificação do deslocamento vertical conforme o item 3.1.

5.2.2 Verificar a peça quanto ao cisalhamento

Os cculos feitos neste item são para estabelecer uma comparação da força cortante resistente de cáculo (V_{Rd}) com a força cortante solicitante de cáculo. Esses esforços estão apresentados no diagrama da figura 17 ($V_{sd,comb1}$) e figura 20 ($V_{sd,comb2}$).

Para perfil laminado:

$$\tilde{\lambda} = \frac{h}{t_w} = \frac{d'}{t_w} = \frac{357}{7} = 51,0$$

$$\tilde{\lambda}_p = 1,10 \sqrt{\frac{K_{VE}}{f_Y}} = 1,10 \sqrt{\frac{5 \times 20000}{35}} = 58,80$$

$$\tilde{\lambda}_r = 1,37 \sqrt{\frac{K_{VE}}{f_Y}} = 1,37 \sqrt{\frac{5 \times 20000}{35}} = 73,23$$

Como $\tilde{\lambda} \leq \tilde{\lambda}_p$:

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$A_w = dt_w = 40,3 \times 0,7 = 28,21 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl} = 0,60A_w f_y = 0,60 \times 28,21 \times 35 = 592,41 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \frac{592,41}{1,1} = 538,55 \text{ kN}$$

$$V_{sd,comb1} = 81,2 \text{ kN}$$

$$V_{sd,comb2} = 60,5 \text{ kN}$$

O quadro 2, exibi os resultados encontrados para a força cortante resistente de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo.

Quadro 2 - Esforço Cortante Viga Simples

Viga Simples	Esforço Solicitante (KN)	Esforço Resistente (KN)
Combinação 1	81,2	538,55
Combinação 2	60,5	

Fonte: Dos Autores, 2017.

Após todas as verificações o valor do cortante solicitado é menor que o valor do esforço cortante do qual o material resiste que está de acordo com o item 3.2 ($V_{sd} < V_{Rd}$).

5.2.3 Verificação quanto ao momento resistente

Para vigas de alma não-esbelta, as verificações de estados limites se resumem à verificação de flambagem local da mesa, flambagem local da alma e flambagem lateral com torção conforme apresentados a seguir.

5.2.3.1 Flambagem local da mesa (FLM)

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{140}{2 \times 11,2} = 6,3$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{20000}{35}} = 9,08$$

Como: $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{pl} = Z f_y = 891,1 \times 35 = 31188,5$$

$$M_{Rd} = \frac{31188,5}{1,1} = 28.353,18 \text{ kN.cm}$$

5.2.3.2 Flambagem local da alma (FLA)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{357}{7} = 51$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 89,88$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{K_c E}{f_y}} = 136,26$$

Como: $\lambda \leq \lambda_p$:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{Rd} = \frac{31188,5}{1,1} = 28353,18 \text{ kN.cm}$$

5.2.3.3 Flambagem lateral com torção (FLT)

Considerando que a viga simples está apoiando uma laje, a mesma também necessita de travamentos entre viga/laje. Sendo assim, será considerado para efeito de cálculo, o comprimento destravado de 150 cm.

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} = \frac{150}{2,95} = 50,85$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 42,07$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}}$$

$$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{514 \times 20,1}}{2,95 \times 20,1 \times 0,047} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 \times 197256,80 \times 0,047^2}{514}}} = 122,13$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W}{E J} = \frac{0,70 \times 35 \times 778,7}{20000 \times 20,1} = 0,047$$

Como: $\lambda < \lambda_r$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}}$$

$$M_{pl} = Z f_y = 891,1 \times 35 = 31188,5$$

$$M_{Rd} = \frac{31188,5}{1,1}$$

$$M_{Rd} = 28353,18 \text{ KN.cm}$$

O quadro 3, apresenta os resultados encontrados da flambagem local da mesa, flambagem local da alma e flambagem lateral por torção.

Quadro 3 - Momento Fletor Viga Simples

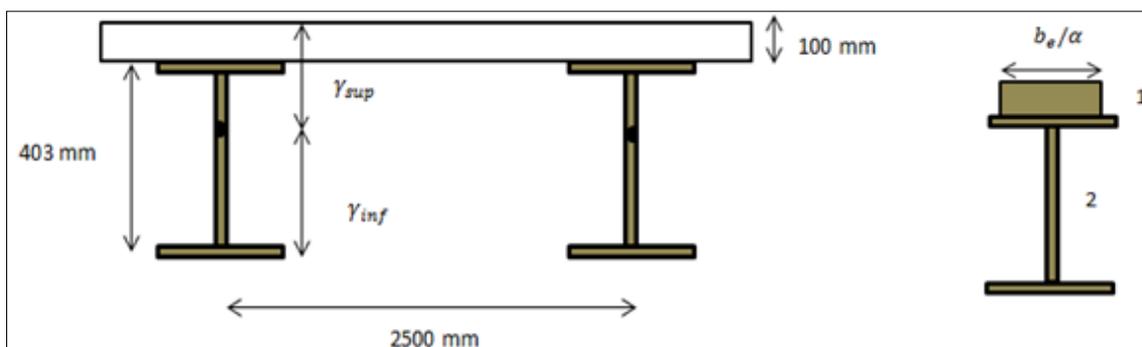
Viga Simples	Valores (KN.cm)	Momento Resultante
FLA	28353,18	28353,18
FLM	28353,18	
FLT	28353,18	

Fonte: Dos Autores, 2017.

5.3 DIMENSIONAMENTO DA VIGA MISTA

Segue-se o dimensionamento da viga mista, onde a mesma viga utilizada no item anterior é agora dimensionada levando-se em consideração a interação total entre ela e a laje de concreto (Figura 22).

Figura 22 - Seção I viga mista



Fonte: PFEIL, 2012.

Dados: $f_{ck} = 25 \text{ MPa} = 2,5 \text{ KN/cm}^2$

5.3.1 Características geométricas da seção de aço W 410x46,1

$$\text{Alma: } T_0 = 7 \text{ mm } h_0 = 381 \text{ mm}$$

$$\text{Mesa: } t_f = 11,2 \text{ mm } b_f = 140 \text{ mm}$$

$$\text{Área: } A = 59,2 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área: } I_x = 15690 \text{ cm}^4$$

5.3.2 Largura efetiva da laje

$$b_e \leq \frac{l}{4} = \frac{800 \text{ cm}}{4} = 200 \text{ cm}$$

$$b_e \leq 2a = 200 \text{ cm}$$

$$b_e = 200 \text{ cm}$$

5.3.3 Relação entre módulos de elasticidade

$$E_{\text{concreto}} = 0,85 \times 5600 \sqrt{f_{ck}} = 4760 \sqrt{25} = 23800 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{aço}} = 200.000 \text{ MPa}$$

Valor a ser utilizado em cálculos de tensões e deformações devidas a cargas de curta duração:

$$\alpha_0 = \frac{200000}{23800} = 8,40$$

Para cargas permanentes utiliza-se:

$$\alpha_{\infty} = 3 \times 8,40 = 25,2$$

5.3.4 Propriedades geométricas da seção homogeneizada para $\alpha_0 = 8,40$

Área equivalente do concreto

$$A_c = 200 \times \frac{10}{8,40} = 238,09 \text{ cm}^2 \cong 238 \text{ cm}^2$$

O Quadro 4, apresenta os resultados geométricos encontradas para a laje de concreto (1) e a viga de aço (2).

Quadro 4 - Resultados Geométricos

	A (cm ²)	γ' (cm)	A γ'	A γ'^2	I_0 (cm ⁴)
1	238	5	1190	5950	1984,13
2	59,2	30,15	1785	53818	15690
Total	297,2		2975	59768	17674,13

Fonte: Dos Autores, 2017.

$$\gamma_{sup} = \frac{2975}{297,2} = 10,01 \text{ cm}$$

$$\gamma_{inf} = 50,3 - 10,01 = 40,29 \text{ cm}$$

$$I = 17674,13 + 59768 - 297,2 \times 10,01^2 = 47662,66 \text{ cm}^4$$

$$W_{sup} = \frac{47662,66}{10,01} = 4761,50 \text{ cm}^3$$

$$W_{inf} = \frac{47662,66}{40,29} = 1182,98 \text{ cm}^3$$

5.3.5 Propriedades geométricas da seção homogeneizada para $\alpha = 25,2$

Área equivalente do concreto

$$A_c = 200 \times \frac{10}{25,2} = 79,36$$

O Quadro 5, apresenta os resultados geométricos encontradas para a laje de concreto (1) e a viga de aço (2)

Quadro 5- Propriedades geométricas $\alpha = 25,2$

	A (cm ²)	γ' (cm)	A γ'	A γ'^2	I_0 (cm ⁴)
1	79,36	5	397	1985	661,37
2	59,2	30,15	1785	53818	15690
Total	138,56		2182	55803	16351,37

Fonte: Dos Autores, 2017.

$$\gamma_{sup} = \frac{2182}{138,56} = 15,75 \text{ cm}$$

$$\gamma_{inf} = 50,3 - 15,75 = 34,55 \text{ cm}$$

$$I = 16351,37 + 55803 - 138,56 \times 15,75^2 = 37782,83 \text{ cm}^4$$

$$W_{sup} = 2398,91 \text{ cm}^3$$

$$W_{inf} = 1093,57 \text{ cm}^3$$

5.3.6 Classificação da seção

$$\frac{h_0}{t_0} = \frac{381}{7} = 54,43 < 91 \text{ (a seção é compacta)}$$

5.3.7 Deslocamentos

$$\Delta = \frac{5ql^2}{384EI}$$

$$\Delta_{Comb1} = \frac{5 \times 0,203 \times 800^4}{384 \times 20000 \times 47662,66} = 1,13 \text{ cm}$$

$$\Delta_{Comb2} = \frac{5 \times 0,15125 \times 800^4}{384 \times 20000 \times 47662,66} = 0,85 \text{ cm}$$

5.3.8 Posicionamento da linha neutra

$$R_{cd} = 0,85 \frac{f_{ck}}{1,4} b_e h_c = 0,85 \times \frac{2,5}{1,4} \times 200 \times 10 = 3035,71 \text{ kN}$$

$$R_{td} = A \frac{f_y}{1,10} = 35 \times \frac{59,2}{1,10} = 1883,6 \text{ kN}$$

Como $R_{cd} > R_{td}$ a linha neutra está na laje de concreto.

$$x = \frac{f_y A / \gamma_{a1}}{0,85 f_{ck} b_e / \gamma_c} < h_c \quad x = \frac{35 \times 59,2 / 1,1}{0,85 \times 2,5 \times 200 / 1,4} < 10$$

$$x = 6,2 < 10$$

5.3.9 Conector tipo pino com cabeça vão igual a 8m

5.3.9.1 Para a linha neutra plástica na laje: $n \cdot Q_n \geq A f_y$

$$n \cdot Q_n \geq 35 \times 59,2 = 2072 \text{ kN}$$

$$Q_n < \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot A_c \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_c} = 0,5 \times 2,89 \times \sqrt{2,5 \times 7526,22} = 198,21 \text{ kN} \\ R_g \cdot R_p \cdot A_{cs} \cdot f_u = 1 \times 1 \times 2,89 \times 45 = 130,05 \text{ kN} \end{array} \right\}$$

$$E_c = 4760 \sqrt{f_{ck}} = 4760 \sqrt{2,5} = 7526,22$$

5.3.9.2 Diâmetro do conector

$$h_{c0} > 4d_{c0}$$

$$h_{c0} = 100 - 15 = 85 \text{ mm}$$

$$d_{c0} < 21,2 \text{ mm}$$

$$\text{Adotado } d_{c0} = 19,2 \text{ mm} = 1,92 \text{ cm}$$

5.3.9.3 Área do conector

$$A_{c0} = 0,25 \pi d_{c0}^2 = \frac{\pi 1,92^2}{4} = 2,89$$

5.3.9.4 Resistência dos conectores de cisalhamento

$$Q_{RD} = \frac{Q_n}{\gamma_{cs}} = \frac{130,05}{1,25} = 104,04 \text{ kN}$$

5.3.9.5 Número de conectores

$$n = \frac{R_{cd}}{Q_{Rd}} = \frac{3035,71}{2 \times 104,04} = 14,58 \cong 16$$

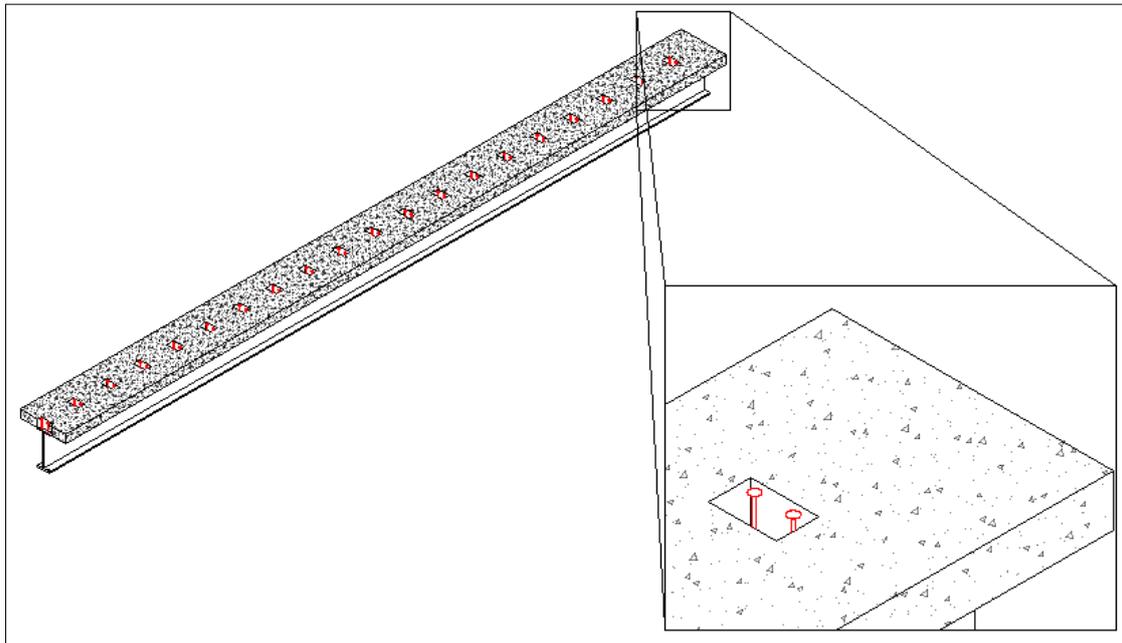
A Figura 23 ilustra a distribuição dos conectores na viga.

5.3.9.6 Espaçamento entre conectores

Limites construtivos

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

$$\frac{8000 \text{ mm}}{16} = 500 \text{ mm} < 800 \text{ mm}$$

Figura 23 - Conectores de Cisalhamento

Fonte: Dos Autores, 2017.

5.3.10 Momento resistente

$$M_{d\ res} = \frac{f_y A}{y_{a1}} \left(y_s + h_p + h_c - \frac{x}{2} \right)$$

$$M_{d\ res} = \frac{35 \times 59,2}{1,1} \left(10,01 + 0 + 10 - \frac{6,2}{2} \right) = 31.852,18 \text{ KN.cm}$$

O Quadro 6, apresenta o resultado final do momento resultante.

Quadro 6 - Momento Fletor Viga Mista

Viga Mista	Valores (KN.cm)	Momento Resultante
Momento (seção)	31852,18	31852,18

Fonte: Dos Autores, 2017.

5.3.11 Esforço cortante

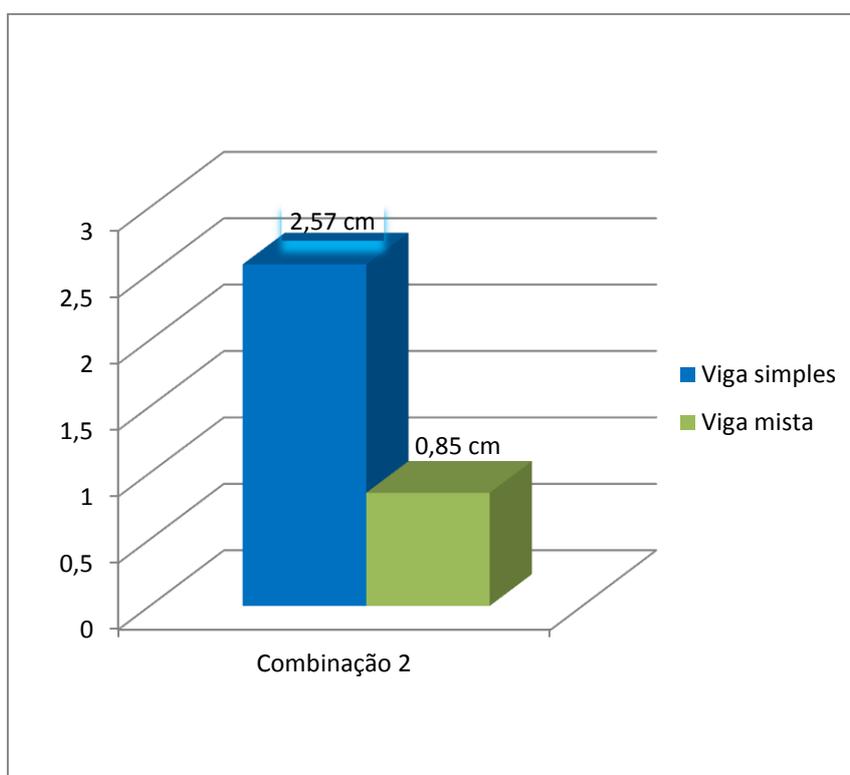
O esforço cortante solicitante da viga mista é igual ao da viga simples já calculado no item 5.2.2 , devido o concreto não ser considerado em ambos os tipos de estrutura.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Para melhor compreensão dos resultados obtidos no dimensionamento da viga simples e mista, a seguir, são apresentados gráficos ilustrativos, referentes aos deslocamentos (Figura 24), momento fletor (Figura 25) e esforço cortante (Figura 26).

6.1 DESLOCAMENTOS

Figura 24 - Gráfico Deslocamento



Fonte: Dos Autores, 2017.

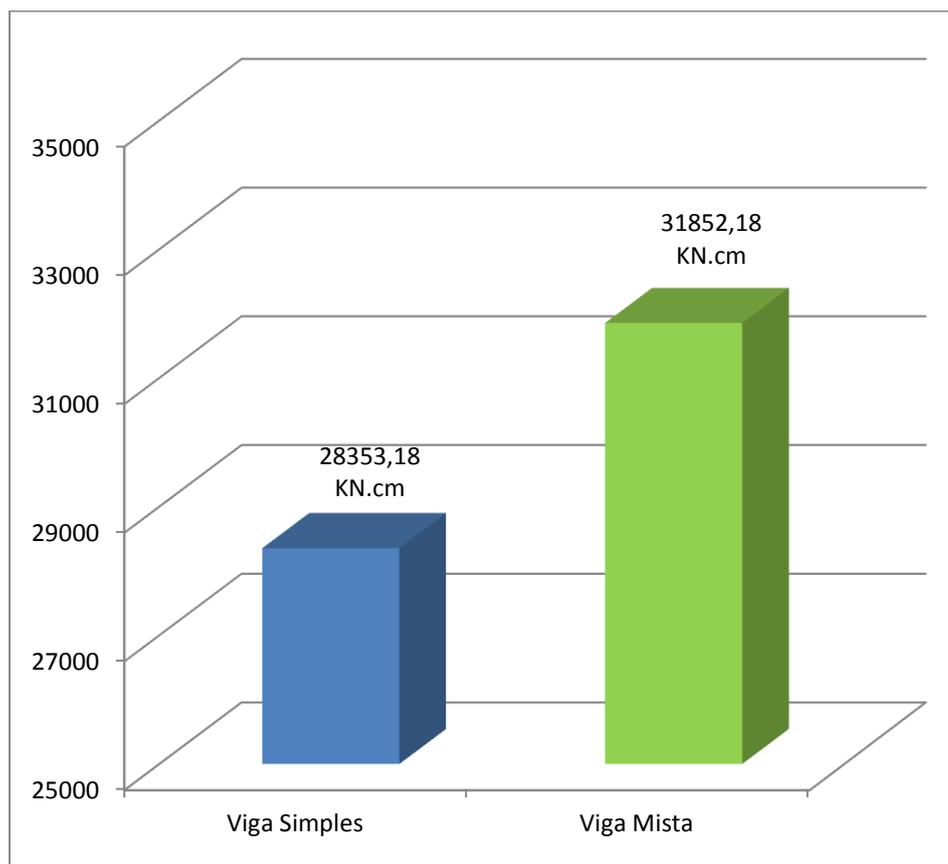
Em relação ao deslocamento (Figura 24), comparando os sistemas construtivos (simples vs misto) para a viga em questão, a viga simples não atende ao limite de deslocamento vertical na combinação 2 a qual refere-se ao deslocamento, considerando que o limite é 2,28 cm.

6.2 MOMENTO FLETOR

No momento fletor (Figura 25) houve um aumento considerável no momento da viga mista, devido a existência da laje de concreto, aumentando assim o momento de

inércia da peça em conjunto formado pelo aço e concreto. Os conectores foram calculados para ocasionar o travamento da laje, evitando assim a Flambagem Lateral com Torção (FLT). Neste caso, após a junção dos materiais pode-se verificar que, a junção dos materiais aço e concreto otimiza o sistema estrutural tornando assim a estrutura mais leve e economicamente viável.

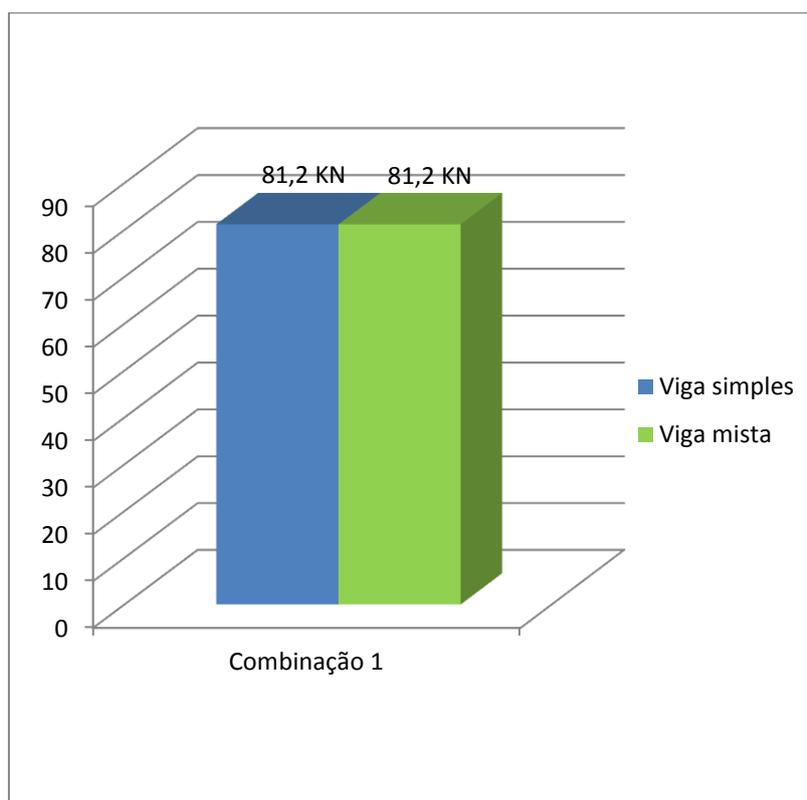
Figura 25 - Gráfico Momento Fletor Resistente de Dimensionamento



Fonte: Dos Autores, 2017.

6.3 ESFORÇO CORTANTE

Os esforços solicitantes (Figura 26) são iguais, devido em ambas as estruturas ser desconsiderado a laje de concreto.

Figura 26 - Esforço Cortante Solicitante de Dimensionamento

Fonte: Dos Autores, 2017.

6.4 RESULTADO GERAL

O quadro 7, apresenta uma análise de todos os resultados mostrados nos gráficos anteriormente (Figuras 24, 25 e 26).

Quadro 7 - Comparação dos resultados simples/mista

Tipo de viga	Δ (lim) Norma $\Delta = \frac{L}{350}$	Δ (cm)	Vr (KN)	Mr (KN.cm)
Viga simples	2,28 cm	3,57 cm	538,55 KN	28353,18 KN.cm
Viga mista	2,28 cm	0,85 cm	538,55 KN	31852,18 KN.cm

Fonte: Dos Autores, 2017.

Considerando a comparação dos sistemas construtivos (simples vs misto) percebemos que, quanto ao deslocamento vertical a viga mista atende ao limite estabelecido pela Norma NBR 8800 (ABNT, 2008) razão a qual, a sua inércia passa a ser composta (viga de aço e laje de concreto) e não mais simples (apenas do perfil de

aço). Quanto ao momento resistente , houve um aumento significativo no momento da viga mista, devido a junção dos materiais aço e concreto. O esforço resistente é igual devido o cisalhamento vertical, na prática, ser absorvido unicamente pela viga de aço.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar os resultados encontrados, no dimensionamento de viga simples (somente aço) e de viga mista (formada por aço e concreto) pode-se concluir que, a viga mista apresenta uma significativa melhora em termos de aumento de resistência (Momento) e diminuição do deslocamento vertical (Flecha).

A flambagem local da mesa (FLM) e flambagem local da alma (FLA) são minimizadas, por causa do conjunto aço/concreto. A flambagem lateral com torção (FLT) torna-se muito pequena, que é até desconsiderada diante do travamento da mesa superior de aço, travamento este, oriundo da laje de concreto em toda a extensão longitudinal da viga. Para garantir esta interação aço/concreto a fim de proporcionar as vantagens, já citadas anteriormente, deve-se colocar conectores, os quais garantirão a interação dos dois materiais tornando a seção da viga mista uma seção conjunta.

Pelas razões técnicas expostas, com a associação dos elementos aço e concreto obtêm-se peças com um aumento da resistência e rigidez, proporcionando diminuição das seções e do consumo de material, gerando economia.

O sistema construtivo misto é relevante para estruturas de vãos médios a elevados, destacando-se ainda, pela agilidade de execução e pela considerável diminuição do peso total da estrutura proporcionando peças mais esbeltas.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Augusto Teixeira. Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado. **Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**. São Carlos, 1998. 97p. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1999ME_AugustoTeixeiradeAlbuquerque.pdf>. Acesso em: 28 fev 2017 as 23:20.

ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. Sobre o projeto de edifícios em estrutura mista aço-concreto. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo)**. São Carlos, 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-18082006-143950/pt-br.php>>. Acesso em: 13 maio 2017 as 10:45.

ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas; MALITE, Maximiliano. Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto. **Cadernos de Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**. São Carlos, 2005. v.7. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova-versao/pdf/cee25_51.pdf>. Acesso em: 12 ago 2017 as 10:56.

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.

BARRA, Fernanda. A construção da Torre Eiffel. **Pet Engenharia Civil**. 28 fev 2014. Disponível em: <<https://blogdopetcivil.com/2014/02/28/a-construcao-da-torre-eiffel/>>. Acesso em: 25 fev 2017 as 20:00.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. **Cuidados ao construir em áreas litorâneas**. ABCP. 20 julho 2010. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/cuidados-ao-construir-em-areas-litoraneas/>>. Acesso em: 8 jun 2017 as 23:00.

CONSTRUÇÃO EM AÇO: VANTAGENS. CBCA. s.d. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-vantagens.php>>. Acesso em: 29 maio 2017 as 23:00.

ESTRUTURA EM AÇO. Civilização Engenharia. 07 set 2016. Disponível em: <<https://civilizacaoengenheira.wordpress.com/2016/09/07/estruturas-em-aco/>>. Acesso em: 21 out 2017 as 22:13.

FUZHARA, Marisa Aparecida Leonel da Silva. **Ligações e amaduras de lajes em vigas mistas de aço e concreto**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. São Paulo, 2006. 165p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-07082007-120045/pt-br.php>>. Acesso em: 23 set 2017 as 09:40.

GERDAU AÇOMINAS. **Perfis Gerdau Açominas**. Catálogo Comercial, 2014.

- GUERDAL AÇOMINAS **Perfis Guerdal Açominas**. Informações Técnicas, 2013.
- KOTINDA, Tatiane Iamin. Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga. **Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Engenharia de Estruturas**. São Carlos, 2006. Disponível em: <file:///C:/Users/Eva/Downloads/2006ME_TatianneIKotinda.pdf>. Acesso em: 8 jun 2017 as 00:15.
- MALITE, Maximiliano. Sobre o cálculo de vigas mistas aço-concreto: Ênfase em edifícios. **Universidade de São Paulo - Escola de engenharia de São Carlos – Departamento de Estruturas**. São Carlos, 3 de agosto de 1990. 152p. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1990ME_MaximilianoMalite.pdf>. Acesso em: 27 maio 2017 as 20:00.
- MÜLLER, Márcio Brecher. Vigas mistas aço-concreto: Comparação com vigas simples em um estudo de caso. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil**. Porto Alegre, junho 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127718/000970996.pdf?sequence=1>. Acesso em: 7 out 2017 as 15:20.
- NASCIMENTO, Isadora Cristina. Estudo de viga mista: Aço e Concreto. **TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica**. Anápolis, 2017. 106p.
- PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista IBRACON**. São Paulo: Ano XXXVII, n. 53. 80p. mar. 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf>. Acesso em: 28 maio 2017 as 11:50.
- PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de Aço: dimensionamento prático**. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 8.ed.
- PINHEIRO, Antonio Carlos da F. Bragança. **Estruturas Metálicas: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. São Paulo: Blucher, 2001. 1.ed.
- QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J. **Elementos das estruturas mistas aço-concreto**. Belo Horizonte: O Lutador, 2001. 332 p.
- QUEIROZ, Gilson. **Estruturas híbridas e mistas de concreto e aço**. CBCA - Centro Brasileiro de Construção em Aço, 19 set 2014. Disponível em: <http://www.cbca-acobrasil.org.br/noticias-detalhes.php?cod=6155>. Acesso em: 1 maio. 2017 as 23:30.
- SANTOS, Tiago José. Edifícios de múltiplos pavimentos estruturados em concreto, aço e elementos mistos de aço e concreto: análise comparativa. **Universidade de São Carlos. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil**. São Carlos, 2010. 122p. Disponível em: <http://www.deciv.ufscar.br/tcc/wa_files/TCC_TIAGO.pdf>. Acesso em: 8 mar 2017 as 15:00.

SILVA, Valdir Pignatta; PANNONI, Fabio Domingos. **Estruturas de aço para edifícios**. São Paulo: Blucher, 2010. 219 p.

VIEIRA, Gregório Sandro. Análise experimental de vigas de seção “I” compostas de perfis formados a frio com emendas soldadas, submetidas à flexão simples. **Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia Civil**. Goiânia, 2010. Disponível em:
<<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tde/648/1/Gregorio%20Sandro%20Vieira.pdf>>. Acesso em: 23 set 2017 as 11:40.

**ANEXO A – CATÁLOGO TÉCNICO DE PERFIS LAMINADOS DA GERDAU
AÇOMINAS**

Etiqueta (mm x kg/m)	Masa Linear (kg/m)	d (mm)	bf (mm)	tw (mm)	tf (mm)	h (mm)	d' (mm)	Area (cm ²)	Ix (cm ⁴)	Wx (cm ³)	rx (cm)	Zx (cm ²)	ly (cm ²)	Wy (cm ²)	ry (cm)	Zy (cm ²)	rt (cm)	It (cm ⁴)	Esbeltz		u (m ² /m)	
																			Mesa bf/2tf	Alma d'/tw		Cw (cm ⁶)
HP 310 x 125,0	125	312	312	17,4	17,4	277	245	159	27.076	1.735,60	13,05	1.983,30	8,23	565,6	7,45	870,6	8,38	177,98	8,97	14,09	1.911,029	1,81
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1	8.358	479	14,09	547,6	291	45,9	2,63	72	3,2	9,15	7,47	53,1	84,111	1,17
W 360 x 39,0	39	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2	10.331	585,3	14,35	667,7	375	58,6	2,73	91,9	3,27	15,83	5,98	47,32	109,551	1,18
W 360 x 44,6	44,6	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7	12.238	696,3	14,38	784,3	818	95,7	3,77	148	4,43	16,7	8,72	44,7	239,091	1,35
W 360 x 51,0	51	355	171	7,2	11,6	332	308	64,8	14.222	801,2	14,81	899,5	968	113,3	3,97	174,7	4,49	24,65	7,37	42,75	284,994	1,36
W 360 x 58,0	58	358	172	7,9	13,1	332	308	72,5	16.143	901,8	14,92	1.014,80	1.113	129,4	3,92	189,8	4,53	34,45	6,56	38,96	330,394	1,37
W 360 x 64,0	64	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7	17.890	1.031,10	14,8	1.145,50	1.885	185,7	4,8	284,5	5,44	44,57	7,52	37,4	523,362	1,46
W 360 x 72,0	72	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3	20.169	1.152,50	14,86	1.285,9	2.140	209,8	4,84	321,8	5,47	61,18	6,75	33,47	599,082	1,47
W 360 x 79,0	79	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2	22.713	1.283,20	14,98	1.437,00	2.416	235,7	4,89	361,9	5,51	82,41	6,1	30,68	685,701	1,48
W 360 x 91,0 (H)	91	353	254	9,5	16,4	320	288	115,9	26.755	1.515,90	15,19	1.680,10	4.483	353	6,22	538,1	6,9	92,61	7,74	30,34	1.268,709	1,68
W 360 x 101,0	101	357	255	10,5	18,3	320	286	129,5	30.279	1.696,50	15,29	1.888,90	5.063	397,1	6,25	606,1	6,93	128,47	6,97	27,28	1.450,410	1,68
W 360 x 110,0	110	360	256	11,4	19,9	320	288	140,6	33.155	1.841,90	15,36	2.059,30	5.570	435,2	6,29	664,5	6,96	161,93	6,43	23,28	1.609,070	1,69
W 360 x 122,0	122	363	257	13	21,7	320	288	155,3	36.599	2.016,50	15,35	2.269,80	6.147	478,4	6,29	732,4	6,98	212,7	5,92	22,12	1.787,806	1,7
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3	12.777	640,5	15,94	736,8	404	57,7	2,83	90,9	3,49	11,69	7,95	55,84	153,190	1,32
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7	11,2	381	357	59,2	15.690	788,7	16,37	891,1	514	73,4	2,95	115,2	3,55	20,06	6,25	50,94	196,571	1,33
W 410 x 53,0	53	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4	18.734	929,7	16,55	1.052,20	1.009	114	3,84	176,9	4,56	23,38	8,12	47,63	387,194	1,48
W 410 x 60,0	60	407	178	7,7	12,8	381	357	76,2	21.707	1.066,70	16,88	1.201,50	1.205	135,4	3,98	209,2	4,65	33,78	6,95	46,42	467,404	1,49
W 410 x 67,0	67	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3	24.678	1.202,80	16,91	1.362,70	1.379	154,1	4	239	4,67	48,11	6,22	40,59	538,546	1,5
W 410 x 75,0	75	413	180	9,7	16	381	357	95,8	27.616	1.337,30	16,98	1.518,60	1.559	173,2	4,03	269,1	4,7	65,21	5,63	36,8	612,784	1,51
W 410 x 85,0	85	417	181	10,9	18,2	381	357	108,6	31.658	1.518,40	17,07	1.731,70	1.804	199,3	4,08	310,4	4,74	94,48	4,97	32,72	715,165	1,52
W 460 x 60,0	60	455	152	7,6	10,8	428	404	66,6	21.370	949,8	17,91	1.095,90	634	83,5	3,09	131,7	3,79	21,79	7,04	53,21	304,837	1,47
W 460 x 68,0	68	459	154	9,1	15,4	428	404	87,6	29.851	1.300,70	18,46	1.495,40	941	122,2	3,28	197,4	3,93	52,29	5	44,42	461,163	1,5
W 460 x 74,0	74	457	190	9	14,5	428	404	94,9	33.415	1.462,40	18,77	1.657,40	1.661	174,8	4,18	271,3	4,93	52,97	6,55	44,89	811,417	1,64
W 460 x 82,0	82	460	191	9,9	16	428	404	104,7	37.157	1.615,50	18,84	1.836,40	1.862	195	4,22	303,3	4,96	70,62	5,97	40,81	915,745	1,64
W 460 x 89,0	89	463	192	10,5	17,7	428	404	114,1	41.105	1.775,60	18,98	2.019,40	2.093	218	4,28	339	5,01	92,49	5,42	38,44	1.035,073	1,65
W 460 x 97,0	97	466	193	11,4	19	428	404	123,4	44.638	1.916,70	19,03	2.187,40	2.283	236,6	4,3	368,8	5,03	115,05	5,08	35,44	1.137,180	1,66
W 460 x 106,0	106	469	194	12,6	20,6	428	404	135,1	48.978	2.088,60	19,04	2.394,60	2.515	259,3	4,32	405,7	5,05	148,19	4,71	33,05	1.260,063	1,67
W 530 x 66,0	66	525	165	8,9	11,4	502	478	83,6	34.971	1.332,20	20,46	1.558,00	857	103,9	3,2	166	4,02	31,52	7,24	53,73	562,854	1,67
W 530 x 72,0	72	524	207	9	10,9	502	478	91,6	39.969	1.525,50	20,89	1.755,90	1.615	156	4,2	244,6	5,16	33,41	9,5	53,13	1.060,548	1,84
W 530 x 74,0	74	529	166	9,7	13,6	502	478	95,1	40.969	1.549,90	20,76	1.804,90	1.041	125,5	3,31	200,1	4,1	47,39	6,1	49,26	688,558	1,68
W 530 x 82,0	82	528	209	9,5	13,3	501	477	104,5	47.569	1.801,80	21,34	2.058,50	2.028	194,1	4,41	300,7	5,31	51,23	7,86	50,25	1.340,255	1,85
W 530 x 85,0	85	535	166	10,3	16,5	502	478	107,7	48.453	1.813,30	21,31	2.099,80	1.263	152,2	3,42	241,6	4,17	72,93	5,03	46,41	845,463	1,69
W 530 x 92,0	92	533	209	10,2	15,6	502	478	117,6	55.157	2.069,70	21,65	2.359,80	2.379	227,6	4,5	354,7	5,36	75,5	6,7	46,84	1.588,565	1,86
W 530 x 101,0	101	537	210	10,9	17,4	502	470	130	62.198	2.316,50	21,87	2.640,40	2.693	250,5	4,55	400,6	5,4	106,04	6,03	43,14	1.812,734	1,86
W 530 x 109,0	109	539	211	11,6	18,8	501	469	139,7	67.226	2.494,50	21,94	2.847,00	2.952	279,8	4,6	437,4	5,44	131,38	5,61	40,47	1.991,291	1,87
W 610 x 101,0	101	603	228	10,5	14,9	573	541	130,3	73.003	2.554,00	24,31	3.922,70	2.951	253,8	4,76	405	5,76	81,68	7,65	51,54	2.544,966	2,07
W 610 x 113,0	113	608	228	11,2	17,3	573	541	145,3	88.196	2.901,20	24,64	3.312,90	3.426	300,5	4,86	469,7	5,82	116,5	6,59	48,34	2.981,078	2,08
W 610 x 125,0	125	612	229	11,9	19,6	573	541	160,1	99.184	3.241,30	24,89	3.697,30	3.933	343,5	4,96	536,3	5,89	159,5	5,84	45,45	3.441,766	2,09
W 610 x 140,0	140	617	230	13,1	22,2	573	541	179,3	112.619	3.650,50	25,06	4.173,10	4.515	392,6	5,02	614	5,94	225,01	5,18	41,27	3.981,687	2,1
W 610 x 155,0	155	611	324	12,7	19	573	541	198,1	129.583	4.241,70	25,58	4.749,10	10.783	665,6	7,38	1022,6	8,53	200,77	8,53	42,6	9.436,714	2,47