



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

SABRINA SARAIVA MENEZES MARQUES DE LIMA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL ENTRE
VIGAS DE AÇO E VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO SOB ASPECTOS DE
DEFORMAÇÕES E DE TENSÕES**

RUSSAS

2019

SABRINA SARAIVA MENEZES MARQUES DE LIMA

ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL ENTRE VIGAS DE
AÇO E VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO SOB ASPECTOS DE DEFORMAÇÕES
E DE TENSÕES

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Candido Jorge de Sousa Lobo.

RUSSAS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L71a Lima, Sabrina Saraiva Menezes Marques de.
Análise comparativa do comportamento estrutural entre vigas de aço e vigas mistas de aço e concreto sob aspectos de deformações e de tensões / Sabrina Saraiva Menezes Marques de Lima. – 2019.
95 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Candido Jorge de Sousa Lobo.

1. Vigas de aço. 2. Vigas mistas de aço e concreto. 3. Comparativos de deformações e tensões. 4. Simulação numérica. I. Título.

CDD 620

SABRINA SARAIVA MENEZES MARQUES DE LIMA

ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL ENTRE VIGAS DE
AÇO E VIGAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO SOB ASPECTOS DE DEFORMAÇÕES
E DE TENSÕES

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharela em Engenharia Civil.

Aprovada em: 20 /11/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Candido Jorge de Sousa Lobo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Otávio Rangel Cavalcante
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms. Camila Lima Maia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a todos os profissionais da área da construção civil que não são reconhecidos por sua importância para a sociedade, principalmente aos companheiros pedreiros que carregam consigo o maior tesouro e conhecimento da prática.

Além desses, dedico ainda aos familiares que perderam algum ente querido em alguma tragédia relacionada a minha futura profissão, e deixo ainda a promessa que enquanto nesta área eu permanecer, levarei comigo o compromisso da responsabilidade com o próximo, em memória a vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e principalmente, à Santíssima Trindade, em Pai, em Filho e em Espírito Santo que até aqui me guiou e sei que continuará a me guiar, pelo consolo dado em todos os momentos difíceis de minha trajetória e por todos os anjos da guarda que colocou a me proteger. Não esquecendo da minha Mãe Nossa Senhora de Fátima.

Agradeço aos meus pais que nunca mediram esforços para me ajudarem a chegar até aqui e até onde eu quisesse ir. Pela a presença em todos os meus dias mesmo a mais de 160,00 km.

A Nildene Saraiva, minha mãe, que foi exemplo não só de mulher e mãe, mas também de profissional e estudante que me entendeu em todos os momentos de angústia e fraqueza, sempre me dando forças para não desistir dos meus objetivos.

A Jeferson Marques, meu pai, que sempre me deu a liberdade para ser uma mulher que luta por seus sonhos. E estando sempre ao meu lado mesmo nos momentos de desacordos.

Agradeço a minha velha e fiel escudeira de Russas, Thayssa Vieira, que com sua presença, tornou essa viagem de 5 anos mais amena.

A Rilmar Farias, por seu apoio e companheirismo que me ajudou a chegar até o fim.

Por fim, ao meu orientador, Dr. Candido Lobo, por toda sua compreensão e fé na minha capacidade de concluir essa etapa.

RESUMO

Este estudo tem o objetivo de realizar uma análise comparativa entre os sistemas estruturais metálicos e os sistemas estruturais misto de aço e concreto, especificamente para os elementos vigas. A confrontação dos modelos se dará, principalmente, sob os aspectos comportamentais de deformações e dos critérios de falhas de tensões. A obtenção de dados, para realizar os comparativos, necessitou inicialmente da elaboração de uma situação hipotética em que os dois sistemas pudessem ser aplicados sem a interferência de outros fatores que exigissem a delimitação de uma situação real. O processo de aquisição dessas informações deu-se em duas etapas, primeiramente, através do método analítico, consultado na literatura, que possibilitou o pré-dimensionamento e a escolha dos perfis metálicos e mistos que atendiam as solicitações da conjuntura. Esses foram, posteriormente, modelados no *software* SOLIDWOKS que possibilitou a simulação de peças, que através do método numérico de Elementos Finitos fornece representações dos comportamentos de deformações e de tensões muito próximos ao de um protótipo físico. Em posse da tabulação dos dados fornecidos pelos relatórios apresentados pelo *software*, foi possível discorrer acerca do desempenho dos dois sistemas de vigas apresentados, buscando traçar linhas de roteirização para tomadas de decisões em projetos estruturais, considerando o comportamento mecânico do cenário solicitante.

Palavras-chave: Vigas de aço. Vigas mistas de aço e concreto. Comparativo de deformações e tensões. Simulação numérica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- 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 com nervuras dispostas perpendiculares ao eixo da viga.	24
Figura 2-Diagrama tensão x deformação dos aços com patamar de escoamento definido.	27
Figura 3- Diagrama convencional tensão x deformação de material sem patamar de escoamento.	27
Figura 4- Diferença da atuação das forças na interface aço-concreto para comportamento metálico e misto.....	28
Figura 5- Distribuição de tensões em vigas mistas de alma cheia sob momento positivo (vigas com conectores de cisalhamento e interação completa).	29
Figura 6-Vista tridimensional do modelo base.....	54
Figura 7 - Vista da elevação frontal.....	55
Figura 8- Vista da elevação lateral.	55
Figura 9- Distribuição do vigamento.....	56
Figura 10-Laje tipo de repetição.....	57
Figura 11- Área de influência das vigas	59
Figura 12- Cargas de Cálculo para viga metálica.....	60
Figura 13 - Perfil I (W410X46,1): em centímetros.	61
Figura 14 - Cargas de cálculo para a viga de aço isolada.....	64
Figura 15 - Carga de cálculo para a viga mista.	64
Figura 16- Viga após a cura.....	64
Figura 17- Perfil I (W310X28,3): em centímetros.	65
Figura 18- Perfil da Viga Mista com seção de concreto transformada: em centímetros.....	66
Figura 20- Vista Isométrica da Viga Metálica.....	69
Figura 21- Deslocamento Vertical para Comb1 (viga metálica).	70
Figura 22-Diagrama dos Esforços Cortantes e Momento Fletor (viga metálica).....	71
Figura 23- Deslocamento combinação 2 (viga metálica).	72
Figura 24- Tensões de Von Mises (viga metálica).	73
Figura 25- Vista Isométrica da Viga Mista antes da laje.....	74
Figura 26- Deslocamento Vertical (viga mista antes da cura).....	75
Figura 27- Vista Isométrica da Viga Mista com a seção de concreto transformada.	75
Figura 28-Deslocamento Vertical da Viga Mista (após a cura).	76
Figura 29-Diagrama dos Esforços Cortantes e Momento Fletor (viga mista).....	77

Figura 30- Deslocamento Vertical para cargas combinadas (viga mista).	77
Figura 31-Tensões de Von Mises (viga mista).	78
Figura 32- Plotagem do Fator de segurança (viga metálica).	84
Figura 33- Plotagem do fator de segurança (viga mista).	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Deslocamentos máximos	21
Tabela 2-Aços especificados por Normas Brasileiras para uso estrutural.....	25
Tabela 3- Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural.	26
Tabela 4-Valores dos coeficientes de ponderação das ações.	32
Tabela 5-Valores de combinação de ψ_0 e de redução de ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis.	33
Tabela 6-Tabela de especificações do aço ASTM A572 grau 50 e do concreto.....	39
Tabela 7- Nomenclatura e unidades do adotadas para seção transversal do perfil.....	39
Tabela 8- Nomenclatura e unidades do adotadas para seção transversal do perfil.....	48
Tabela 9- Propriedades geométricas para seção mista.	49
Tabela 10- Propriedades Mecânicas de Aços de Baixa Liga.....	57
Tabela 11- Propriedade do Aço e do Concreto.	58
Tabela 12- Cargas Solicitantes (viga metálica)	59
Tabela 13- Esforços Solicitantes (viga metálica)	60
Tabela 14- Perfil I laminado - abas paralelas - W410X46,1.	61
Tabela 15- Cargas Solicitantes (viga mista).	63
Tabela 16- Esforços Solicitantes.	63
Tabela 17-Perfil I laminado – Abas paralelas -W 310 X 28,3.	65
Tabela 18 - Característica do perfil misto aço e concreto.	66
Tabela 19- Propriedades da seção da face da Viga Metálica.	70
Tabela 20- Propriedades de seção da face da Viga Mistas antes da cura.	74
Tabela 21- Propriedade de seção da face da Viga Mista com seção de concreto transformada.	76
Tabela 22- Deslocamentos Verticais principais (viga metálica).	79
Tabela 23- Principais pontos de tensões (viga metálica).....	80
Tabela 24-Deslocamentos Verticais Principais (viga mista).	81
Tabela 25-Principais pontos de tensões (viga mista).....	82
Tabela 26- Comparativo de deslocamentos verticais.	83
Tabela 27- Comparativo de tensões.	84
Tabela 28- Comparativo dos perfis metálicos.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
LN	Linha Neutra
LNP	Linha Neutra Plástica
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍBOLOS

Letras romana minúsculas

a – distância

b – largura

b_f – largura da mesa

d – diâmetro; altura total da seção transversal; distância; dimensão

e – distância; excentricidade

f_{cd} – resistência de cálculo do concreto à compressão

f_{ck} – resistência característica do concreto à compressão

f_u – resistência à ruptura do aço à tração

f_{ucs} – resistência à ruptura do aço do conector

f_y – resistência ao escoamento

f_{yd} – resistência de cálculo ao escoamento do aço

h – altura

k – rigidez; parâmetro em geral

l – comprimento

n – número (quantidade)

r – raio; raio de giração

t – espessura

t_c – espessura da laje de concreto

t_f – espessura da mesa

t_w – espessura da alma

x – coordenada

y – coordenada; distância

Letras romanas maiúsculas

A – área

A_g – área bruta da seção transversal

E, E_a – módulo de elasticidade do aço

E_c, E_{cs} – módulo de elasticidade secante do concreto

F – força, valor de ação

F_G – valor característico das ações permanentes

F_Q – valor característico das ações variáveis

I – momento de inércia

L – vão; distância; comprimento

Q_{Rd} – força resistente de cálculo de um conector de cisalhamento

R_d – resistência de cálculo; solicitação resistente de cálculo

S_d – Solicitação de cálculo

V – força cortante

W – módulo de resistência elástico

Z – módulo de resistência plástico

Letras gregas minúsculas

α – coeficiente em geral

α_E : relação entre o módulo de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade do concreto

δ – fator de contribuição do aço; deslocamento; flecha

ε – deformação

γ – coeficiente de ponderação

λ – índice de esbeltez; parâmetro de esbeltez

λ_p – parâmetro de esbeltez limite para seções compactas

ν – coeficiente de Poisson

ψ – fator de redução de ações; fator de combinação de ações

ρ – massa específica

σ – tensão normal

τ – tensão de cisalhamento

Letras gregas maiúsculas

Σ – somatório

Letras romanas minúsculas (subscritas)

a – aço

br – contenção

c – concreto

cs – conector de cisalhamento

d – de cálculo

e – elástico; excentricidade

ef – efetivo

f – mesa

g – bruta; geométrico; ação permanente

i – número de ordem

k – característico; nominal

pl – plastificação

q – ação variável

u – ruptura

v – cisalhamento

w – alma

x – relativo ao eixo *x*

y – escoamento; relativo ao eixo *y*

Letras romanas maiúsculas (subscritas)

G – ação permanente

Q – ação variável

Rd – resistente de cálculo

Sd – solicitante de cálculo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo geral	18
1.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Justificativa	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Estruturas de Concreto.....	20
2.2 Estruturas Metálicas.....	20
2.3 Vigas Metálicas.....	21
2.3.1 <i>Deslocamentos verticais</i>	21
2.3.2 <i>Resistência ao cisalhamento de vigas com contenção lateral</i>	22
2.3.3 <i>Resistência à flexão de vigas com contenção lateral</i>	23
2.4 Estruturas Mistas	23
2.5 Vigas Mistas	23
2.5.1 <i>Funcionamento da seção mista</i>	24
2.5.2 <i>Interação entre perfil metálico e laje de concreto</i>	28
2.5.3 <i>Tipos construtivos</i>	29
2.5.4 <i>Critérios de cálculo</i>	29
2.6 Combinações de ações.....	30
2.6.1 <i>Classificação das combinações últimas</i>	30
2.6.2 <i>Classificação das combinações de serviço</i>	31
2.7 Critérios de falhas	33
2.7.1 <i>Materiais Frágeis</i>	34
2.7.2 <i>Materiais Dúcteis</i>	34
2.7.3 <i>Teoria das Falhas</i>	34
2.8 Roteiro de dimensionamento de viga.....	36
2.8.1 <i>Vigas Metálicas</i>	36

2.8.2 Vigas Mistas	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1 Concepção de modelo base	54
3.2 Descrição da estrutura	55
3.3 Materiais previstos	57
3.4 Levantamento das ações	58
3.5 Dimensionamento analítico da viga metálica.....	59
3.5.1 Cargas Solicitantes	59
3.5.2 Esforços Solicitantes.....	59
3.5.3 Diagramas	60
3.5.4 Geometria do perfil.....	60
3.5.5 Deslocamento Vertical.....	62
3.5.6 Resistência ao Momento Fletor	62
3.5.7 Resistência ao Cisalhamento.....	62
3.6 Dimensionamento analítico da viga mista de aço e concreto.....	63
3.6.1 Cargas Solicitantes	63
3.6.2 Esforços Solicitantes.....	63
3.6.3 Diagramas	63
3.6.4 Geometria do perfil.....	65
3.6.5 Interação mista completa	66
3.6.6 Resistência ao Momento Fletor	67
3.6.7 Resistência ao Cisalhamento.....	68
3.6.8 Deslocamento Vertical.....	68
3.6.9 Conectores de cisalhamento (studs).....	68
3.7 Modelagem numérica.....	69
3.7.1 Viga metálica	69
3.7.2 Viga mista	74

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1 Estrutura metálica	79
4.2 Estrutura mista	81
4.3 Análise comparativa	83
<i>4.3.1 Deslocamento Total</i>	83
<i>4.3.2 Tensões Principais e Tensões de Von Mises</i>	83
<i>4.3.3 Seção do Perfil Metálico</i>	84
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
REFERÊNCIAS	88
ANEXO A – TABELA DE TENSÕES E DEFORMAÇÃO RESULTANTE DA MALHA DA VIGA METÁLICA	90
ANEXO B – TABELA DE TENSÕES E DEFORMAÇÃO RESULTANTE DA MALHA DA VIGA MISTA DE AÇO E CONCRETO	93

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor que está presente na realidade da humanidade desde o princípio das civilizações. É capaz de modificar o cenário econômico e social de maneira expressiva, pois é composta por inúmeras e variadas atividades que movimentam outras esferas, como o de fornecimento de materiais e de mão-de-obra. A busca em atender, mais e melhor, as necessidades da sociedade, faz com que esteja sempre em processo de renovação de métodos e materiais construtivos que satisfaçam as exigências de segurança, econômicas, sociais, estéticas, ambientais, entre outras.

Frente a isso, o estágio inicial da construção é a concepção de seus projetos, que devem apresentar diretrizes e aspectos relacionados com a engenharia dos elementos, instalações da edificação, componentes construtivos e materiais. Embora cada empreendimento possua características e exigências singulares que podem demandar projetos mais específicos, os principais e em comum a maioria das obras são: Projeto Arquitetônico, Projeto Estrutural, Projeto Elétrico, Projeto Hidrossanitário e Projeto de Segurança Contra Incêndio e Pânico, sendo que cada um deles devem seguir uma série de normas técnicas que estabelecem parâmetros de qualidade, de segurança e normalidade.

Dentre os projetos acima citados, o Projeto Estrutural tem o objetivo de dimensionar os elementos de sustentação da edificação, devendo atender, de forma obrigatória, aos seguintes quesitos:

- a) Durabilidade: as diretrizes apresentadas em relação a materiais e técnicas construtivas devem estar de acordo com as características e necessidades ambientais e geográficas da obra, o que contempla previsões que evitem ou diminuam os riscos de deterioração da estrutura, para que essa permaneça segura e estável durante o tempo a que foi projetada para serviço e utilização;
- b) Eficiência econômica: o Projeto Estrutural confere à construção dimensionamento condizente com suas solicitações, o que evita desperdício financeiro em elementos superdimensionados, métodos construtivos adequados que agilizam a execução da obra, como também prever a utilização de sistemas apropriados que minimizem gastos com manutenções;
- c) Segurança: como já mencionado, todos os projetos devem seguir séries de normas que conferem confiabilidade à construção, pois sendo o projeto responsável por fornecer informações dos elementos de sustentação, problemas

de subdimensionamentos nesses representam instabilidade à estrutura e risco à vida dos que a utilizam.

Dentre os diversos tipos de elementos estruturais os principais e de maior conhecimento popular são as lajes, as vigas e os pilares. Um tipo de material para compor esses elementos deve apresentar resistência satisfatória quando tracionado e/ou comprimido, além de ainda possuir comportamento elástico e/ou plástico, ou seja, modo da variação de sua deformação ao passar por alterações nos seus esforços de tensão.

Existem diversos tipos de materiais estruturais utilizados na construção, entre eles destaca-se o uso da madeira, do concreto e do aço. Sendo a madeira um dos primeiros materiais utilizados para esse fim, atualmente tem uma baixa taxa de utilização, devido ser um material que apresenta uma composição complexa, heterogênea e anisotrópica.

Assim como a madeira, que era utilizada quase que na forma natural, a pedra foi largamente aplicada em estruturas que necessitavam resistir a grandes esforços, no entanto, demandava muita força para moldá-la. Frente a essa necessidade, começam a surgir materiais que precederam a criação do concreto, ou seja, material que apresenta dureza semelhante às pedras e facilidade de moldagem como o barro.

A necessidade que surgiu a seguir persiste até o presente, arquiteturas desafiadoras e complexas com grandes vão e estruturas verticais esbeltas. Neste cenário, surge a utilização do concreto armado e aço na construção civil. De acordo com Queiroz (2014), a construção em aço manifestou-se inicialmente na Inglaterra – há cerca de 200 anos- e desde então vem aprimorando sua tecnologia e contribuindo para o desenvolvimento do setor em todo o mundo. No Brasil, o consumo de produtos siderúrgicos na construção civil foi ofuscado pelo uso intensivo do concreto e da alvenaria e só se tornou expressivo a partir do ano de 2003.

Atualmente, os materiais que estão à frente de maior utilização é o concreto e o aço, principalmente de forma combinada, essa associação extrai de cada um suas melhores características, ou seja, o concreto trabalha a resistência dos elementos aos esforços de compressão, enquanto o aço resiste aos esforços de tração. A exemplo dessa combinação, além do concreto armado, temos estruturas híbridas e as estruturas mistas que se utiliza de perfis metálicos e concreto estrutural para gerar pilares, vigas e lajes.

As estruturas mistas de aço e concreto além de empregarem as melhores características de resistência desses materiais. Bellei (2008) defende que, essas estruturas ainda oferecem uma série de vantagens construtivas, como rapidez, menor demanda por mão de obra, redução do peso, industrialização de etapas construtivas, entre outras.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo a análise comparativa de vigas de aço em perfis laminados em I e de vigas mista de aço e concreto, tendo como parâmetros de análise o comportamento estrutural quanto as tensões e deformações.

1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo acima, os objetivos específicos delimitados estão a seguir:

- a) Concepção de um modelo hipotético do vigamento de uma laje de piso;
- b) Detalhamento das ações atuantes no modelo;
- c) Dimensionamento analítico do sistema metálico de vigas;
- d) Dimensionamento analítico do sistema misto de vigas;
- e) Análise numérica dos perfis obtidos no dimensionamento;
- f) Comparação dos níveis de deformações e deslocamentos máximos entre as estruturas;
- g) Levantamento dos pontos críticos de cada modelagem, através da análise das tensões principais e das tensões de Von Mises.

1.3 Justificativa

O aço possui um largo campo de utilização, na construção civil, pode ser observado nos edifícios, residências, pontes, viadutos, passarelas, coberturas, torres, postes, escadas e mezaninos (PINHEIRO, 2001). Mesmo assim seu uso ainda é considerado pequeno, comparado ao concreto e à alvenaria estrutural. No entanto, já é de conhecimento do setor da construção civil seu enorme potencial de aplicabilidade, e a busca por torna-lo cada vez mais presente na realidade das construções já é efetiva.

Além do seu uso isolado, sua associação com outro material nobre da construção, o concreto, resulta em estruturas mistas com o desempenho bastante satisfatório, com maior resistência e rigidez, possibilitando a utilização de perfis metálicos mais esbeltos, significando menor consumo de aço, comparada a estruturas metálicas equivalentes. Além de diversos outros fatores, como rapidez de construção, economia com escoramento e aproveitamento de área útil.

O projeto do sistema estrutural de uma edificação depende de uma variedade enorme de fatores que devem ser relevados em conjunto para uma situação real bem delimitada,

tendo-se ciência dos métodos construtivos disponíveis, dos prazos de conclusão, das limitações arquitetônicas e financeiras, entre outros. Sendo assim, não é possível afirmar de forma geral o sistema estrutural mais adequado para todas as edificações.

Diante de tudo descrito, o presente trabalho apresentará os elementos estruturais vigas, através do sistema metálico e do sistema misto de aço e concreto. Colocando-os em comparação quanto aos seus desempenhos e suas falhas a partir do seu comportamento estrutural quando solicitados a uma mesma situação hipotética, mas com embasamento para ser aplicada em diversas situações reais. Comparativos desses fatores auxiliam no momento de roteirizar as decisões de projetos estruturais, tendo em vista que no meio acadêmico é mais comum a análise e estudo dos sistemas de forma isolada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Como anteriormente mencionado, diversos são os materiais utilizados para compor o sistema estrutural das edificações. Sendo avaliado no processo de escolha diversos fatores, principalmente, durabilidade, eficiência econômica e segurança, estando eles correlacionados com condições sociais, ambientais e novamente econômicas do meio.

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.

2.1 Estruturas de Concreto

Lima et al. (2014) define de maneira sucinta que o concreto é uma pedra artificial que emolda a inventividade construtiva do homem, onde este foi capaz de desenvolver um material que depois de endurecido, tem resistência similar às das rochas naturais, e no estado fresco é um composto plástico que possibilita sua modelagem em formas e tamanhos dos mais variados.

A constante evolução das necessidades dos seres humanos, não permite que os estudos e as tecnologias relacionadas ao concreto fiquem estagnadas. Com isso, para as mais diversas exigências podem-se citar o: concreto armado, concreto protendido, concreto magro, concreto bombeável, concreto auto adensável, entre outros.

Dentre as vantagens acerca da utilização do concreto, têm-se o vasto campo de conhecimento do homem sobre o material como aliado, o que permite ciência aguçada quanto ao seu comportamento. Além disso, como afirma Battagin (2010), o concreto acompanha a tendência da humanidade quanto a sustentabilidade, pois não gera emissões, não necessita de conservantes tóxicos, como também consome menos energia no seu processo de produção quando comparado a outros materiais estruturais, como o aço.

2.2 Estruturas Metálicas

O método construtivo escolhido para um empreendimento é determinante para o projeto, para o orçamento e para o cronograma. O sistema de estruturas metálicas é capaz de atingir essas três esferas de modo positivo.

Segundo Bellei (2008), os projetos em estruturas metálicas contam com maior liberdade arquitetônica com maiores vãos e espaço útil, maior leveza de elementos estruturais, alívio de cargas em fundações, precisão de montagem, entre outros. Diversos desses fatores mencionados, também são positivos na diminuição do orçamento, que conta ainda com a agilidade de montagem e com a economia com limpeza e organização do canteiro. O cronograma, por conseguinte, também é afetado, pois torna-se bastante reduzido devido a rapidez de construção e a otimização do *grid* canteiro.

2.3 Vigas Metálicas

As diretrizes apresentadas na ABNT NBR 8800:2008 para dimensionamento indicam que as vigas metálicas são estudadas de modo que as suas seções críticas, desenvolvam momento e esforço cortante resistente de projeto superiores aos esforços solicitantes de projeto, devendo-se ainda analisar os deslocamentos verticais desenvolvido.

De acordo com Pfeil (2014), a resistência a flexão das vigas metálicas sofre interferências dos fenômenos de flambagem lateral e local. Para efeito de estudo, só será apresentada a flambagem local, tendo em vista que dispositivos de contenção lateral poderão ser previstos sem nenhuma interferência, considerando a utilização de vigas piso.

2.3.1 Deslocamentos verticais

O Anexo O da ABNT NBR 8800:2008 apresenta valores de deslocamentos máximos de acordo com o elemento estrutural, seu uso e localização. O critério para posicionamento quanto os deslocamentos de cálculo, desenvolvidos pelo modelo, é de decisão do projetista, que deve analisar minuciosamente as cargas em combinação e atuação.

Tabela 1- Deslocamentos máximos

(continua)

Descrição	δ_a
-Travessas de fechamento	L/180 ^b
- Terças de cobertura ^{g)}	L/120 ^{cd}
- Vigas de cobertura ^{g)}	L/180 ^e
-Vigas de piso	L/120 ^f
Vigas que suportam pilares	L/250 ^h
Vigas de rolamento: ^{j)}	
- Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal inferior a 200 KN	L/600 ⁱ
-Deslocamento vertical para pontes rolantes com capacidade nominal igual ou superior a 200 KN, exceto pontes siderúrgicas	L/800 ⁱ

-Deslocamento vertical para pontes rolantes siderúrgicas com capacidade nominal igual ou superior a 200 KN	L/1000 ⁱ
-Deslocamento horizontal, exceto para pontes rolantes siderúrgicas	L/400
-Deslocamento horizontal para pontes rolantes siderúrgicas	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
<p>^a L é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço, H é a altura total do pilar (distância do topo à base) ou a distância do nível da viga de rolamento à base, h é altura do andar(distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos ou entre centros das vigas e a base no caso do primeiro andar).</p> <p>^b Deslocamento paralelo ao plano do fechamento (entre linhas de tirantes, caso estes existam).</p> <p>^c Deslocamento perpendicular ao plano do fechamento.</p> <p>^d Considerar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento(vento fechamento) com seu valor característico.</p> <p>^e Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as 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 (vento de sucção) com seu valor característico.</p> <p>^g Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamentos, com atenção especial aos telhados de pequena declividade.</p> <p>^h Caso 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>^m Tomar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.</p>	

Fonte: ABNT (2008)

2.3.2 Resistência ao cisalhamento de vigas com contenção lateral

A força cortante de cálculo correspondente a plastificação da alma por cisalhamento, deverá ser superior à cortante solicitante. Bellei (2008) direciona para que essa cortante de cálculo seja obtida é necessário que haja a análise da esbelteza da alma da viga, para

que a seção da viga possa ser estudada na região correta do efeito da flambagem. Essas regiões são: seção compacta, semicompacta e esbelta.

2.3.3 Resistência à flexão de vigas com contenção lateral

O momento resistente de cálculo, correspondente ao momento de plastificação das seções da viga, mais especificamente a mesa, deve ser superior ao momento solicitante de projeto. Para isso, deve-se determinar também a esbeltez da mesa da viga, para que a seção da viga possa ser estudada na região correta do efeito da flambagem. Essas regiões são: seção compacta, semicompacta e esbelta.

2.4 Estruturas Mistas

A associação dos materiais aço e concreto para compor elementos estruturais, já não é singularidade desde o início do uso do concreto armado e protendido. Esses tipos de estruturas que associam aço e concreto faz com que os elementos trabalhem juntos para resistir aos esforços. Enquanto as estruturas mistas de aço e concreto tornam possíveis explorar as vantagens de cada material ao torna-lo um único elemento, que dirigem suas melhores propriedades para solicitações específicas.

De acordo Queiroz e Pimenta (2001), o sistema é considerado misto quando o perfil de aço trabalha em conjunto com o concreto por meios mecânicos, por atrito ou por simples aderência e repartição de cargas, formando um elemento estrutural único.

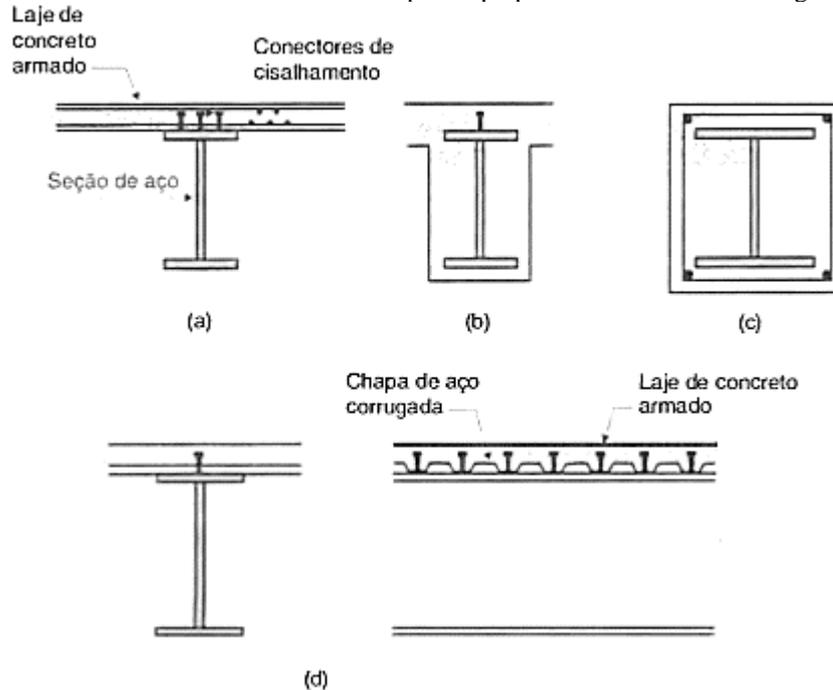
Por entre as vantagens do sistema estrutural misto, confere-se a variedade de soluções de projetos ao setor da construção, permitindo que além de sistemas isolados, possam ainda fazer a associação de componentes de mais de um tipo de sistema construtivo.

É viável ressaltar algumas vantagens das estruturas mistas em relação às de concreto armado e às de aço. Como observa Queiroz (2014), os elementos mistos permitem a possibilidade de dispensa de fôrmas e escoras para as lajes, economia no consumo de aço estrutural em relação aos pilares e viga de aço e, no caso dos pilares, a redução das proteções contra incêndio e corrosão.

2.5 Vigas Mistas

De modo conciso e direto Pfeil (2014) define viga mista aço-concreto como a viga formada pela associação de um perfil metálico com uma laje de concreto, sendo os dois elementos ligados por conectores mecânicos (Figura 1).

Figura 1- 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 com nervuras dispostas perpendiculares ao eixo da viga.



Fonte: Pfeil (2014).

Um das vantagens mais aparentes podem ser observadas na Figura 1, sendo elas a rigidez conferida ao elemento em relação a apenas o perfil metálico, como também a possibilidade de redução da altura dos elementos estruturais, devido ao embutimento do perfil metálico na laje, em alguns casos, e a redução dimensional da seção.

As vigas mistas utilizam perfis metálicos do tipo I, em caixão, tubular retangular ou em treliça, sob uma laje de concreto que exerce a função tanto de laje estrutural como de parte do vigamento, após seu processo de cura.

A NBR 8800 (ABNT, 2008) discorre dos tipos de apoios que as vigas mistas podem ter, de acordo o seguinte:

As vigas mistas de aço e concreto de alma cheia podem ser biapoiadas, 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)

2.5.1 Funcionamento da seção mista

Nos elementos mistos, o aço está presente nas armaduras, nos conectores de cisalhamento e nos perfis metálicos.

O Anexo A da ABNT NBR 8800:2008 traz informações e especificações correspondentes ao uso de aços estruturais e para materiais de ligação (Tabela 2 e Tabela 3). Assegura ainda o uso de normatização estrangeira desde que disponham de uma resistência de escoamento máxima de 450 MPa e relação entre resistência à ruptura (f_u) e ao escoamento (f_y) não inferior a 1,18.

Tabela 2-Aços especificados por Normas Brasileiras para uso estrutural.
(continua)

ABNT NBR 7007			ABNT NBR 6648			ABNT NBR 6649/ABNT NBR 6650		
Aços-carbonos e microligados para uso estrutural e geral			Chapas grossas de aço-carbono para uso estrutural			Chapas grossas finas (a frio/a quente) de aço-carbono para uso estrutural		
Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)
MR 250	250	400	CG-26	255	410	CF-26	260	400
AR 350	350	450	CG-28	275	440	CF-28	280	440
AR 350	350	485				CF-30	300	490
COR	415	520						
AR 415								

ABNT NBR 5000			ABNT NBR 5004			ABNT NBR 5008		
Chapas grossas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica			Chapas grossas e bobinas de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural		
Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)
G-30	300	415	F-32/Q-32	310	410	CGR 400	250	380
G-35	345	450	F-35/Q-35	340	450	CGR500 e CGR	370	490
G-42	415	520	Q-40	380	480	500A		
G-45	450	550	Q-42	410	520			
			Q-45	450	550			

ABNT NBR 5920/ ABNT NBR 5921			ABNT NBR 8261				
Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural			Perfil tubular, de aço-carbono, formado a frio, com e sem costura, de seção circular ou retangular para usos estruturais				
Denominação	f_y (MPa)	f_u (MPa)	Denominação	Seção circular		Seção retangular	
				f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
CFR 400	250	370	B	290	400	317	400
CFR 500	380	490	C	317	427	345	427

NOTAS: 1) Para limitações de espessura, ver norma correspondente.

Fonte: ABNT (2008).

Tabela 3- Aços de uso frequente especificados pela ASTM para uso estrutural.

Classificação	Denominação	Produto	Grupo ¹⁾²⁾	Grau	Classe	fy (MPa)	fu (MPa)		
Aços-carbonos	A36	Perfis	1 e 2	-	-	250	400 a 550		
		Chapas	t ≤ 200 mm						
		Barras	t ≤ 100 mm						
	A500	Perfis		3	A	-	230	310	
					B	-	290	400	
		A1011	Chapas	-		36	-	250	365
						40	-	275	380
						45	2	310	380
						45	1	310	410
						50	-	345	410
						50	2	345	410
						50	1	345	450
						55	2	380	450
						55	1	380	480
						60	-	410	408
						60	2	410	480
						60	1	410	520
65	2	450	520						
65	1	450	550						
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica	A572	Perfis	1 e 2	42	-	290	415		
				50	-	345	450		
			1	60	-	415	520		
		65	-	450	550				
		Chapas e barras ³⁾	t ≤ 150 mm	42	-	290	415		
			t ≤ 100 mm	50	-	345	450		
	55		-	380	485				
	t ≤ 32 mm	60	-	415	520				
	65	-	450	550					
	A992 ⁴⁾	Perfis	1 e 2	-	-	345 a 450	450		
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica resistentes à corrosão atmosférica	A242	Perfis	1	-	-	345	480		
			2	-	-	315	460		
		Chapas e barras ³⁾	t ≤ 19 mm	-	-	345	480		
			18 < t ≤ 38 mm	-	-	315	460		
	38 < t ≤ 100 mm	-	-	290	435				
	A588	Perfis	1 e 2	-	-	345	485		
Chapas e barras ³⁾		t ≤ 100 mm	-	-	345	485			
Aços de baixa liga temperado e autorevenido	A913	Perfis	1 e 2	50	-	345	450		
				60	-	415	520		
				65	-	450	550		

NOTAS:

¹⁾ Grupos de perfis laminados para efeito de propriedades mecânicas:

-Grupo 1: Perfis I e U em geral e cantoneiras com espessura de até 19 mm;

-Grupo 2: Cantoneiras com espessura superior a 19 mm;

-Grupo 3: Perfis tubulares.

²⁾ t corresponde à menor dimensão ou ao diâmetro da seção transversal da barra.

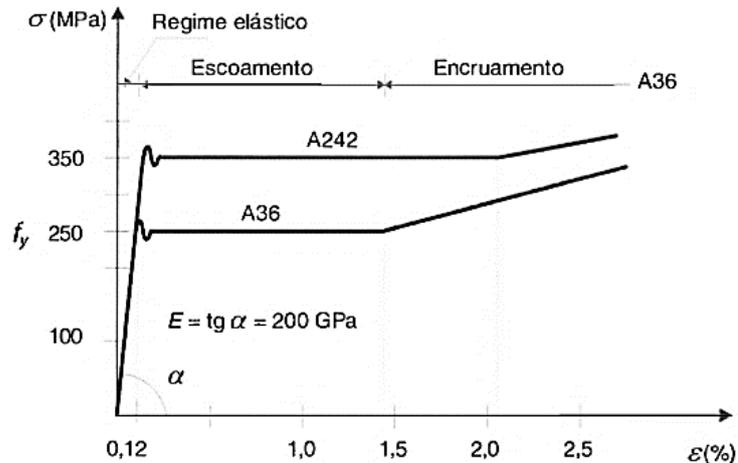
³⁾ Barras redondas, quadradas e chatas.

⁴⁾ A relação fu/fy no pode ser inferior a 1,18.

Fonte: ABNT (2008).

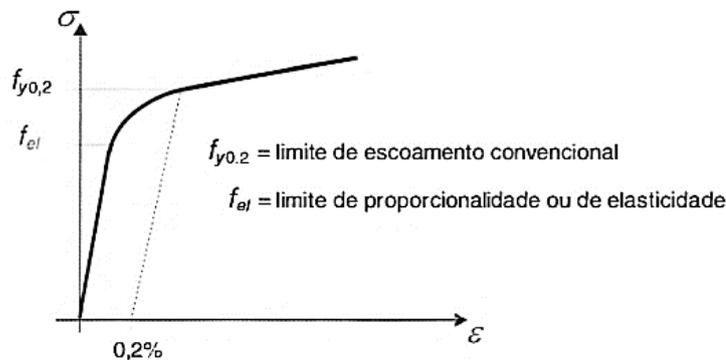
O aço utilizado nos perfis metálicos, geralmente, apresenta patamar de escoamento definido (Figura 2), ou seja, a região em que o material trabalha em regime elástico (obedecendo à Lei de Hooke) é bem definido, e a inclinação desse trecho é o módulo de elasticidade. O mesmo não ocorre para os aços de armaduras, neste caso é estabelecido o limite de escoamento convencional (Figura 3).

Figura 2-Diagrama tensão x deformação dos aços com patamar de escoamento definido.



Fonte: Pfeil (2014).

Figura 3- Diagrama convencional tensão x deformação de material sem patamar de escoamento.



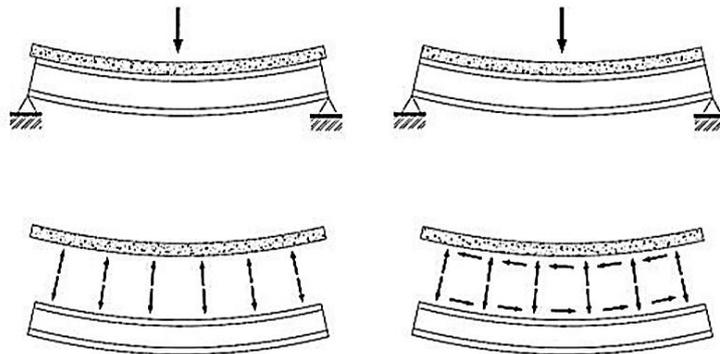
Fonte: Pfeil (2014)

Como disserta Oliveira (2018), contrário ao aço dos perfis metálicos, o concreto não apresenta comportamento tensão x deformação bem definido. No entanto o estudo acerca do módulo de elasticidade é relevante para as análises e é obtido de acordo com o ensaio descrito na ABNT NBR 8522:2008, em que é possível a obtenção do módulo de deformação secante (E_{cs}) e do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangencial inicial (E_{ci}).

O concreto apresenta elevado desempenho quando solicitado à compressão, com isso, nos elementos mistos ele é projetado para trabalhar predominantemente a esse esforço, assim como o aço para esforços de tração. (PFEIL, 2014)

Na Figura 4 observa-se que para o comportamento metálico a compressão na mesa superior do perfil colabora para o afastamento entre os materiais, já para o comportamento misto, forças no plano horizontal surgem de forma que a interface resista ao afastamento, essas forças são cisalhantes, devido a isso, é indispensável o emprego de mecanismo que atuam revertendo essas tensões.

Figura 4- Diferença da atuação das forças na interface aço-concreto para comportamento metálico e misto.



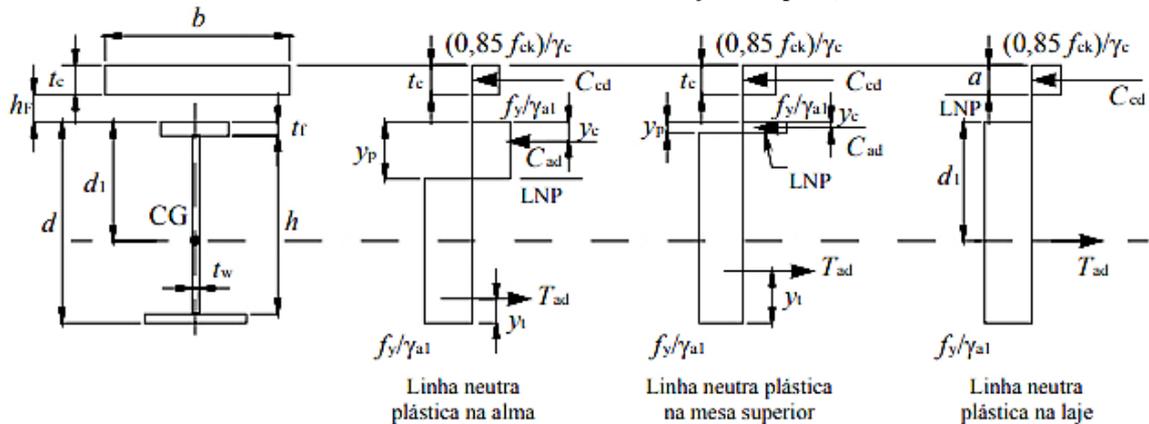
Fonte: Salmon (1996).

2.5.2 Interação entre perfil metálico e laje de concreto

De acordo com Bellei (2008), na interação completa os conectores de cisalhamento são colocados em número suficiente para desenvolver a resistência máxima à flexão da viga mista. Para distribuição elástica de tensões é suposto que não existe escorregamento entre a laje e a viga. Já na interação incompleta a resistência ao cisalhamento dos conectores de cisalhamento comanda a resistência a flexão da viga mista. Cálculos elásticos, tais como deformações, fadiga e vibrações devem incluir o efeito de escorregamento entre a laje e a viga. A interação entre o perfil e a laje irão determinar a distribuição de tensão que a seção mista irá apresentar.

Na Figura 5, estão representadas as 3 possíveis localizações da linha neutra da seção. No primeiro caso em que a L.N. está na alma do perfil, a seção em aço trabalhará esforços de tração e compressão, e concreto o apenas à compressão, como é desejado. O segundo caso é semelhante ao primeiro quanto aos esforços em cada material, no entanto a região à compressão no aço será bem menor. No terceiro e último caso, a L.N. está na laje de concreto o perfil metálico não será solicitado à compressão enquanto a laje de concreto terá uma parcela à compressão e outra a tração. A distribuição desses esforços assim como a espessura de atuação de cada um, é de fundamental importância para a o cálculo do momento resistente de projeto.

Figura 5- Distribuição de tensões em vigas mistas de alma cheia sob momento positivo (vigas com conectores de cisalhamento e interação completa).



Fonte: ABNT (2008).

2.5.3 Tipos construtivos

De acordo com a ABNT NBR 8800:2008, a construção das vigas mistas pode ser realizada de forma escorada e não escorada, a diferença entre os dois métodos é a consideração de cargas antes da cura e após a cura do concreto. Dessa forma, na construção escorada a viga permanece sem solicitação até que o concreto atinja 75 % da sua resistência características, já as não escoradas, na fase anterior a cura deve-se considera que a viga de aço isolada suporta todas as solicitações de cargas, incluindo sobrecarga de montagem.

2.5.4 Critérios de cálculo

2.5.4.1 Resistencia a flexão das vigas mistas

Pfeil (2014) disserta acerca dos critérios de análise de flambagem de vigas, essas considerações são mostradas abaixo:

a) flambagem Local:

- em vigas mistas sujeitas a momento fletor positivo, a mesa não sofre flambagem local, já que esta está ligada a laje de concreto, logo a classificação da seção se é calculada e determinada por a esbelteza da alma;
- as seções poderão ser compactas, em que não há flambagem local antes da plastificação total da seção, situação em que a NBR 8800:2008 normatiza a utilizar os diagramas de tensões em regime plástico. Semicompactas, em que a flambagem local da alma ocorre antes da plastificação total da seção, devendo ser

utilizado o diagrama de tensões em regime elástico para obtenção do momento resistente da viga mista.

b) flambagem Lateral:

- não haverá flambagem lateral tendo em vista que nas regiões de momentos positivos a mesa comprimida da seção de aço está ligada com conectores, proporcionando uma contenção lateral contínua.

2.5.4.2 Resistência ao cisalhamento

Assim como a viga mista é testada à flexão também deve ser testada quanto a resistência ao cisalhamento, no entanto, os esforços resistentes são considerados da mesma forma que na viga metálica que está na Seção 2.3.2.

2.6 Combinações de ações

De acordo com ABNT NBR 8800:2008, o carregamento de um modelo é definido através das combinações das ações que têm probabilidade não desprezível de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período estabelecido. Isso é realizado com objetivo de prever os efeitos mais desfavoráveis; para tanto trata-se de combinações últimas para verificação dos estados-limites últimos e combinações de serviços para verificação dos estados-limites de serviço.

2.6.1 Classificação das combinações últimas

A equação abaixo da força concentrada de carga considera as caras permanentes, as variáveis principais e as variáveis que podem ser reduzidas.

$$F_d = \sum \gamma_{gi} \cdot G_i + \gamma_{qi} \cdot Q_1 + \sum \gamma_{qj} \cdot \psi_{0j} \cdot Q_j \quad (1)$$

F_d : é a ação variável de base (ou principal) para a combinação estudada

G : valor característico de ações permanentes;

Q : valor característico de ações variáveis;

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

Q_j : representa as ações variáveis que atuam simultaneamente a Q_1 e que têm efeito desfavorável;

γ_g, γ_q : são coeficientes de segurança parciais aplicados às cargas (Tabela 4);

ψ_0 : é o fator de combinação que reduz as ações variáveis para considerar a baixa probabilidade ocorrência simultânea de ações de distintas naturezas com seus valores característicos. (Tabela 5)

- a) combinações últimas normais que advém do uso previsto para a edificação;
- b) combinações últimas especiais decorrentes de ações variáveis de natureza ou intensidade especial, que superam os efeitos das combinações normais;
- c) combinações últimas de construção considera que alguma ação promoveu algum estado limite último na fase de construção da estrutura;
- d) combinações últimas excepcionais contam com a ocorrência de ações excepcionais que podem produzir efeitos catastróficos, como explosões, choques, incêndios, entre outros.

2.6.2 Classificação das combinações de serviço

- a) Combinações quase permanentes de serviço são as que atuam durante grande parte da vida útil dessa estrutura;

$$F = \sum G_i + \psi_2 \cdot Q_1 + \sum \psi_{2j} \cdot Q_j \quad (2)$$

- b) Combinações frequentes de serviço ocorrem muitas vezes durante o período de vida da estrutura, da ordem de 100.000 vezes em 50 anos;

$$F = \sum G_i + \psi_1 \cdot Q_1 + \sum \psi_{1j} \cdot Q_j \quad (3)$$

- c) Combinações raras de serviço atuam por no máximo algumas horas durante o período de vida da estrutura, esses efeitos são levados em consideração quando provocam danos permanentes à estrutura ou a outro componente da construção.

$$F = \sum G_i + Q_1 + \sum \psi_{1j} \cdot Q_j \quad (4)$$

Onde :

ψ_1 e ψ_2 : fatores de redução de ações variáveis.

G : valor característico de ações permanentes;

Q_1 : é a ação variável de base (ou principal) para a combinação estudada

Tabela 4-Valores dos coeficientes de ponderação das ações.

Combinações	Ações permanentes (γ_g) ¹⁾³⁾					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (1,00)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,4 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
Ações variáveis (γ_q) ¹⁾⁴⁾						
	Efeito da temperatura ²⁾	Ação do vento		Demais ações variáveis incluindo as decorrentes do uso e ocupação		
Normais	1,20	1,40		1,50		
Especiais ou de construção	1,00	1,20		1,30		
Excepcionais	1,00	1,00		1,00		

NOTAS:

¹⁾ Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança devem ser incluídas nas combinações.

²⁾ Efeito da temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado como ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

³⁾ Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem iguais ou superiores a 5KN/m², ou 1,40 quando isto não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

Fonte: ABNT (2008).

Tabela 5-Valores de combinação de ψ_0 e de redução de ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis.

Ações		γ_{12}		
		ψ_0	ψ_1 ⁵⁾	ψ_2 ³⁾⁴⁾
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ¹⁾	0,5	0,4	0,3
	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecarga em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamentos de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
NOTAS:				
¹⁾ Edificações residenciais de acesso restrito.				
²⁾ Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.				
³⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.				
⁴⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução ψ_2 pode ser reduzido, multiplicando-o por (ver anexo L), usar ψ_1 igual a 1,0.				

Fonte: ABNT (2008).

2.7 Critérios de falhas

Para a realização de análise de falhas de um modelo estrutural ou de uma composição de uma estrutura, é necessário que os materiais que compõe o objeto de estudo sejam especificados, para que assim as tensões atuantes possam ser examinadas. Mas para ser estabelecido um critério de falha, é necessário que seja imposto um limite superior do estado de tensão do material. Pfeil (2014) declara que os materiais de uso mais comum na engenharia são, geralmente, divididos em grupos de acordo com a capacidade de absorção de deformações: Materiais Frágeis e Materiais Dúcteis.

2.7.1 Materiais Frágeis

De acordo com Pfeil (2014), os materiais frágeis apresentam comportamento de rompimento brusco, sem aviso prévio e é analisado em duas fases. A primeira fase corresponde ao início da fratura que ocorre devido uma tensão ou deformação unitária em um ponto onde o material perdeu a ductilidade. Já na segunda fase ocorre a propagação da fratura, em que após seu início mesmo com a redução das tensões aplicadas, a fratura do material se propaga pelo corpo. A característica frágil do material pode estar associada a diversos fatores, como baixa temperatura, estado triaxial de tensões, efeito de encruamento, entre outros.

2.7.2 Materiais Dúcteis

Contrário ao comportamento frágil, materiais dúcteis apresentam a capacidade de deformação sob ações de cargas. Pfeil (2014) afirma que este comportamento permite que o material redistribua as tensões locais aplicadas, através da deformação plástica do seu corpo.

Embora cada material apresente tendência de características para um desses grupos, essa delimitação não é totalmente estabelecida, pois como exposto por Pfeil (2014), há fatores que interferem no nível de ductibilidade do material, como é o caso do concreto que muda sua característica de acordo com tipo de esforço solicitante, ora apresentando-se dúctil quando comprimido, ora apresentando-se frágil quando tracionado.

2.7.3 Teoria das Falhas

Há diversas teorias que auxiliam a prever a falha em de um material , mas como afirma Hibbeler (2010), não existe nenhuma teoria de falha única que possa ser aplicada sempre como verdade em todas as ocasiões, pois um material pode comporta-se como dúctil ou como frágil dependendo da temperatura, taxa de carregamento, ambiente químico ou processo de fabricação e moldagem.

Como o presente estudo é acerca de vigas que possuem perfis metálicos, como já mencionado anteriormente, o material utilizado para esses elementos costumam ter características dúcteis, com isso as Teorias que mais se adequam a esse estudo são a de Tresca também chamada de teoria da máxima tensão cisalhante e a Teoria de Von Mises, conhecida como teoria da máxima energia de distorção.

2.7.3.1 Tensões Principais

Para a obtenção dos resultados acerca dos critérios de falhas, é necessário obter-se as tensões principais de um plano de tensão, que são as tensões normais máximas e mínima do plano de tensão em estudo.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \frac{\sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\tau_{xy}^2}}{2}$$

Onde:

$\sigma_{1,2}$: tensões normais máxima e mínima;

σ_{xx} : tensão normal a x no plano de tensão;

σ_{yy} : tensão normal a y no plano de tensão;

τ_{xy} : tensão de cisalhamento no plano de tensão.

2.7.3.2 Critérios de Tresca

A teoria da tensão de cisalhamento máxima afirma que o escoamento do material começa quando a tensão de cisalhamento máxima absoluta no material atinge a tensão de cisalhamento que provoca o escoamento desse mesmo material quando sujeito somente a tensão axial. Portanto, para evitar falha, a teoria da tensão de cisalhamento máxima exige que $\tau_{max,abs}$ no material seja menor ou igual a $\sigma_e/2$ onde σ_e é determinado por ensaio de tração simples. (HIBBELER, 2010, p.388)

$$|\sigma_1 - \sigma_2| = \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\tau_{xy}^2 \leq \sigma_e^2$$

Onde:

$\sigma_{1,2}$: tensões normais máxima e mínima;

σ_{xx} : tensão normal a x no plano de tensão;

σ_{yy} : tensão normal a y no plano de tensão;

τ_{xy} : tensão de cisalhamento no plano de tensão;

σ_e : tensão normal de escoamento.

2.7.3.3 Critérios de Von Mises

Escoamento em um material dúctil ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume do material é igual ou ultrapassa a energia de distorção por unidade de volume do mesmo material quando submetido a escoamento em um ensaio de tração simples. (HIBBELER, 2010, p.388)

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 \leq \sigma_e^2$$

$$\sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \leq \sigma_e$$

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_e$$

Onde:

$\sigma_{1,2}$: tensões normais máxima e mínima;

σ_{xx} : tensão normal a x no plano de tensão;

σ_{yy} : tensão normal a y no plano de tensão;

τ_{xy} : tensão de cisalhamento no plano de tensão;

σ_e : tensão normal de escoamento.

2.8 Roteiro de dimensionamento de viga

2.8.1. Vigas Metálicas

Na presente seção será apresentado apenas o modelo do roteiro de dimensionamento da viga metálica, estando o dimensionamento completo do estudo na Seção 3.5.

2.8.1.1 Detalhamento das cargas atuantes

No presente estudo as vigas dimensionadas serão de piso, sendo considerada uma construção de uso e ocupação de escritórios. Para isso as cargas atuantes consideradas foram devido aos seguintes elementos:

- a) Estrutura metálica (estimativa) = 0,15 KN/m²;
- b) Laje de concreto (0,09m x 25 KN/m³) = 2,25 KN/m²;
- c) Revestimento = 0,70 KN/m²;
- d) Divisória = 1,00 KN/m²;
- e) Forro = 0,30 KN/m²;
- f) Carga acidental = 2KN/m² (escritórios).

2.8.1.2 Áreas de influência da viga

A cargas são fornecidas na norma com dimensão de força por área (KN/m²), com isso é necessário saber a área que influencia em cada viga. As equações a serem utilizadas para o calculo da área efetiva estão a seguir.

$$B = \frac{B_E}{2} + \frac{B_D}{2}$$

B – largura da área de influência da viga (m)

B_e – distância à viga da esquerda (m)

B_d – distância à viga da direita (m)

2.8.1.3 Cálculo dos esforços solicitantes de cálculo

Para o cálculo dos esforços solicitantes é necessário que seja feita as combinações de cargas, para isso é preciso separar as cargas permanentes e as cargas acidentais.

a) Ações permanentes: $Q_{CP} \left(\frac{KN}{cm^2} \right)$

As ações permanentes são advindas da estrutura metálica, laje, revestimento e forro, como deseja-se o carregamento por unidade de comprimento da viga, deve-se realizar o procedimento mostrado abaixo.

$$Q_{CP} = \frac{(estrutura + laje + revestimento + divisória + forro) \left(\frac{KN}{m^2} \right) * B(m) * L(m)}{L(cm)}$$

b) Ações variáveis: $Q_{CA} \left(\frac{KN}{cm^2} \right)$

Para as ações variáveis será considerado apenas a carga acidental de uso e ocupação, que para o presente estudo, foi considerada as de escritórios.

$$Q_{CA} = \frac{(acidental) \left(\frac{KN}{m^2} \right) * B(m) * L(m)}{L(cm)}$$

Onde:

Q_{CP} : Cargas das ações permanentes $\left(\frac{KN}{m^2} \right)$;

Q_{CA} : Cargas das ações variáveis $\left(\frac{KN}{m^2} \right)$;

B : largura da área de influência da viga (m);

L : vão da viga .

Em posse das cargas permanentes e variáveis, deve-se realizar os cálculos das cargas solicitantes de acordo com cada combinação de cargas consideradas. No presente estudo

foram supostas suas combinações de cargas: combinações últimas normais e combinações raras de serviço.

a) Combinações raras de serviço:

Para a combinação abaixo não fora introduzido nenhum coeficiente de redução das ações variáveis, consideração feita a favor da segurança.

$$Q_{Sd(Comb.1)} = Q_{CA} + Q_{CP}$$

$Q_{Sd(Comb.1)}$: carga solicitante para combinação 1(combinação rara de serviço)

b) Combinações últimas normais:

Para a segunda combinação foram adotados os critérios combinações últimas normais, os coeficientes de ponderação utilizados estão de acordo com as notas da Tabela 3, para quando as cargas variáveis não excedem 5 KN/m².

$$Q_{Sd(Comb.2)} = \gamma_q * Q_{CA} + \gamma_g * Q_{CP}$$

γ_q : coeficiente de ponderação das ação variáveis (1,40)

γ_g : coeficiente de ponderação das ação permanentes (1,40)

$Q_{Sd(Comb.2)}$: carga solicitante para combinação 2(combinação última normal)

2.8.1.4 Esforços máximos

Para o cálculo dos esforços máximos solicitantes, momento e cortante, será necessário apenas utilizar a maior combinação de carga, no caso, a de combinações últimas normais.

a) Momento fletor solicitante de cálculo:

$$M_{Sd} = \frac{Q_{sd(comb.2)} * L^2}{8}$$

M_{Sd} : Momento fletor solicitante

b) Esforço cortante solicitante de cálculo:

$$V_{sd} = \frac{Q_{sd(comb.2)} * L}{2}$$

V_{sd} : cortante solicitante

2.8.1.5 Propriedades dos Materiais:

A Tabela 6 mostra as especificações dos materiais que serão utilizados para a realização do estudo, das vigas metálicas e das vigas mistas.

Tabela 6-Tabela de especificações do aço ASTM A572 grau 50 e do concreto.

PROPRIEDADES DO AÇO	VALOR	UNIDADE
Resistência de escoamento (fy)	34,50	KN/cm ²
Resistência à ruptura por tração: (fu)	45,00	KN/cm ²
Módulo de elasticidade (E)	20000,00	KN/cm ²
PROPRIEDADES DO CONCRETO	VALOR	UNIDADE
Resistência característica (fck)	2,00	KN/cm ²
Módulo de elasticidade (Ec)	2503,16	KN/cm ²

Fonte: Autoria própria (2019).

2.8.1.6 Propriedades geométricas da seção de aço

A Tabela 7 mostra a nomenclatura utilizada para a geométrica e propriedades do perfil metálico que será adotado.

Tabela 7- Nomenclatura e unidades do adotadas para seção transversal do perfil.

d	cm	Distância entre as faces externas das mesas
bf	cm	Largura da mesa
tf	cm	Espessura da mesa
tw	cm	Espessura da alma
h	cm	Altura da alma
Ag	cm²	Área da seção transversal do perfil
Ix	cm⁴	Momento de inércia em relação ao eixo X-X
Wx	cm³	Módulo de resistência elástico em relação ao eixo X-X
Zx	cm³	Módulo de resistência plástico em relação ao eixo X-X
rx	cm	Raio de giração em relação ao eixo X-X
Iy	cm⁴	Momento de inércia em relação ao eixo Y-Y
Wy	cm³	Módulo de resistência elástico em relação ao eixo Y-Y
Zy	cm³	Módulo de resistência plástico em relação ao eixo Y-Y
ry	cm	Raio de giração em relação ao eixo Y-Y

Fonte: Autoria própria (2019).

2.8.1.7 Deslocamento máximo

Para o cálculo de deslocamento máximo ou deflexão máxima, é necessário utilizar a equação abaixo, específica para vigas em situações em que estão biapoeadas. O deslocamento encontrado deve estar de acordo com as especificações da ABNT NBR 8800:2008 que se encontra na Tabela 1.

$$\delta_{ser} = \frac{5 * (Q_{sd(Comb.1)}) * L^4}{384 * E * I_x}$$

$$\delta_{ser} < \delta_{lim} = \frac{L}{350}$$

Onde:

δ_{ser} : deslocamento vertical devido as cargas de combinações raras de serviço (cm)

δ_{lim} : deslocamento vertical devido as cargas de combinações raras de serviço (cm)

I_x momento de inércia em relação ao eixo X – X (cm⁴)

E : módulo de elasticidade ($\frac{KN}{cm^2}$)

L : vão da viga (cm)

2.8.1.8 Deslocamento máximo para a combinações últimas normais

As equações seguinte são utilizadas para calcular a deflexão máxima da viga para situação em que é considerada as combinação últimas normais. O deslocamento encontrado deve estar de acordo com as especificações da ABNT NBR 8800:2008 que se encontra na Tabela 1.

$$\delta_{nor} = \frac{5 * Q_{Sd(Comb.2)} * L^4}{384 * E * I_x}$$

$$\delta_{nor} < \delta_{lim} = \frac{L}{350}$$

Onde:

δ_{nor} : deslocamento vertical devido as cargas de combinações últimas normais (cm)

δ_{lim} : deslocamento vertical devido as cargas de combinações raras de serviço (cm)

I_x momento de inércia em relação ao eixo X – X (cm⁴)

E : módulo de elasticidade ($\frac{KN}{cm^2}$)

L : vão da viga (cm)

2.8.1.9 Resistência ao cisalhamento

O elemento resistente a força cortante solicitante é a alma, em seções I fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma (eixo de maior inércia). Para calcular a força resistente de cálculo será definidos o parâmetro de esbeltez da seção e os limites estabelecidos para seções compactas, semicompactas e esbeltas.

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

$$\lambda_p = 1,10 * \sqrt{\frac{5 * E}{f_y}}$$

$$\lambda_r = 1,37 * \sqrt{\frac{5 * E}{f_y}}$$

Se:

$\lambda \leq \lambda_p$: seção compacta

$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$: seção semicompacta

$\lambda > \lambda_r$: seção esbelta

Onde:

h : altura da alma (cm)

t_w : espessura da alma (cm)

λ : parâmetro de esbeltez

λ_p : parâmetro de esbeltez limite para seções compactas

λ_r : parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas

f_y : resistência ao escoamento ($\frac{KN}{cm^2}$)

E : módulo de elasticidade do aço ($\frac{KN}{cm^2}$)

Tendo posse da classificação da seção é possível calcular a força cortante correspondente a plastificação da alma, abaixo serão apresentadas as equações para as três situações citadas.

$$V_{pl1} = 0,6 * f_y * d * t_w$$

$$V_{pl2} = 0,6 * f_y * d * t_w * \frac{1,10 * \sqrt{\frac{5 * E}{f_y}}}{\frac{h}{t_w}}$$

$$V_{pl3} = 0,6 * f_y * d * t_w * 1,24 * \left(\frac{1,10 * \sqrt{\frac{5 * E}{f_y}}}{\frac{h}{t_w}} \right)^2$$

Onde:

V_{pl1} : força cortante corespondente à plastificação da alma por cisalhamento para seção compacta (KN)

V_{pl2} : força cortante corespondente à plastificação da alma por cisalhamento para seção semicompacta (KN)

V_{pl1} : força cortante corespondente à plastificação da alma por cisalhamento para seção esbelta (KN)

h : altura da alma (cm)

t_w : espessura da alma (cm)

d : distância entre as faces externas das mesas (cm)

f_y : resistência ao escoamento ($\frac{KN}{cm^2}$)

E : módulo de elasticidade do aço ($\frac{KN}{cm^2}$)

A seguir é possível calcular a força cortante resistente de cálculo que deverá ser menor que o esforço cortante máximo solicitante.

$$V_{Rd} = \frac{V_{pl}}{1,10}$$

$$V_{Rd} > V_{Sd}$$

Onde:

V_{Rd} : força cortante resistente de cálculo (KN)

V_{pl} : força cortante corespondente à plastificação da alma por cisalhamento de acordo com a seção (KN)

V_{Sd} : cortante solicitante (KN)

2.8.1.10 Comparação entre momentos fletor resistente e solicitante

Como a viga possui contenção lateral, por ser uma viga de piso, o estado limite que deverá ser analisado será a flambagem local por compressão do flange e compressão da alma da seção da viga. Assim como o cálculo da cortante resistente depende do parâmetro de esbeltez, o momento resistente de cálculo também dependerá desse parâmetro, assim como seus parâmetros limites para cada tipo de seção.

2.8.1.10.1 Flambagem Local da Mesa

Abaixo estão as equações para obtenção do parâmetro de esbeltez da mesa, seguido dos limites para cada uma das seções.

$$\lambda = \frac{b_f}{2 * t_f}$$

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

$$\lambda_r = 0,83 * \sqrt{\frac{E}{0,7 * f_y}}$$

Se:

$\lambda \leq \lambda_p$: seção compacta

$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$: seção semicompacta

$\lambda > \lambda_r$: seção esbelta

Onde:

h : altura da alma (cm)

t_w : espessura da alma (cm)

λ : parâmetro de esbeltez

λ_p : parâmetro de esbeltez limite para seções compactas

λ_r : parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas

f_y : resistência ao escoamento ($\frac{KN}{cm^2}$)

E : módulo de elasticidade do aço ($\frac{KN}{cm^2}$)

Sabendo-se o tipo de seção em trabalho, pode-se calcular o momento fletor correspondente à plastificação da mesa, a equação está apresentada abaixo para as seções compactas e para semicompactas.

a) Seção compacta:

$$M_{pl} = Z_x * f_y$$

b) Seção semicompacta:

$$M_{pl} = \left[Z_x * f_y - (Z_x * f_y - 0,7 * W_x * f_y) * \frac{\lambda - \lambda_r}{\lambda_r - \lambda_p} \right]$$

Onde:

M_{pl} : Momento fletor correspondente à plastificação da mesa (KN.cm)

Z_x : Módulo de resistência plástico em relação ao eixo X – X (cm³)

f_y : resistência ao escoamento ($\frac{KN}{cm^2}$)

W_x : Módulo de resistência elástico em relação ao eixo X-X (cm³)

A seguir é possível calcular o momento fletor resistente de cálculo que deverá ser menor que o momento fletor máximo solicitante.

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{1,10}$$

$$M_{Rd} > M_{Sd}$$

Onde:

M_{pl} : Momento fletor correspondente à plastificação da mesa (KN.cm)

M_{Rd} : Momento fletor resistente de cálculo (KN.cm)

M_{Sd} : Momento fletor máximo solicitante (KN.cm)

2.8.1.10.2 Flambagem Local da Alma

Abaixo estão as equações para obtenção do parâmetro de esbeltez da alma, seguido dos limites para cada uma das seções.

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

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

$$\lambda_r = 5,70 * \sqrt{\frac{E}{0,7 * f_y}}$$

Se:

$\lambda \leq \lambda_p$: seção compacta

$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$: seção semicompacta

$\lambda > \lambda_r$: seção esbelta

Onde:

h : altura da alma (cm)

t_w : espessura da alma (cm)

λ : parâmetro de esbeltez

λ_p : parâmetro de esbeltez limite para seções compactas

λ_r : parâmetro de esbeltez limite para seções semicompactas

f_y : resistência ao escoamento ($\frac{KN}{cm^2}$)

E : módulo de elasticidade do aço ($\frac{KN}{cm^2}$)

O restante dos cálculos para obtenção do momento fletor resistente de cálculo (M_{Rd}) é igual aos considerados para flambagem local da mesa.

2.8.2 Vigas Mistas

No presente estudo as vigas dimensionadas serão de piso, sendo considerada uma construção de uso e ocupação de escritórios. Para isso as cargas atuantes consideradas foram devido aos seguintes elementos:

- g) Estrutura metálica (estimativa) = 0,15 KN/m²;
- h) Laje de concreto (0,09m x 25 KN/m³) = 2,25 KN/m²;
- i) Revestimento = 0,70 KN/m²;
- j) Divisória= 1,00 KN/m²;
- k) Forro = 0,30 KN/m²;
- l) Carga acidental = 2KN/m² (escritórios).

2.8.2.1 Detalhamento das cargas atuantes;

No presente as vigas dimensionadas serão de piso, sendo considerada uma construção de uso residencial.

Cargas atuantes:

- a) estrutura (estimativa) = 0,15 KN/m²;
- b) laje de concreto (0,09m x 25 KN/m³) = 2,25 KN/m²;
- c) revestimento = 0,70 KN/m²;
- d) divisória= 1,00 KN/m²;
- e) forro = 0,30 KN/m²;
- f) carga acidental = 2KN/m² (uso residencial).

2.8.2.2 Áreas de influência da viga

A cargas são fornecidas na norma com dimensão de força por área (KN/m²), com isso é necessário saber a área que influencia em cada viga. As equações a serem utilizadas para o cálculo da área efetiva estão a seguir.

$$B = \frac{B_E}{2} + \frac{B_D}{2}$$

B : largura da área de influência da viga (m)

B_e : distância à viga da esquerda (m)

B_d : distância à viga da direita (m)

2.8.2.3 Cálculo dos esforços solicitantes de cálculo

As cargas das vigas mistas devem ser consideradas em dois momentos, antes da cura do concreto da laje e após a cura. Antes da cura do concreto apenas algumas cargas solicitarão a viga, que até este ponto deve ser considerada apenas como uma viga de aço isolada. Após a cura do concreto, parcela da laje fará parte da geometria da viga, assim como outras cargas solicitarão o elemento estrutural.

a) Antes da cura do concreto:

Neste primeiro momento apenas haverá atuação da estrutura e do peso da laje de concreto, até que a laje atinja sua resistência, nenhum outro carregamento deverá solicitar as viga.

$$Q_1 = (estrutura + laje) \left(\frac{KN}{m^2} \right) * B(m) * \frac{L(m)}{L(cm)}$$

b) Após a cura:

Após o concreto atingir sua resistência, a laje passará a exercer papel de viga, em parcela, e outras cargas passarão a atuar, essas serão advindas do revestimento, do forro, das divisórias e das cargas devido ao uso e ocupação da estrutura.

$$Q_2 = (revestimento + forro + divisórias + acidental) \left(\frac{KN}{m^2} \right) * B(m) * \frac{L(m)}{L(cm)}$$

Onde:

Q_{CP} : Cargas das ações permanentes $\left(\frac{KN}{m^2} \right)$;

Q_{CP} : Cargas das ações variáveis $\left(\frac{KN}{m^2} \right)$;

B : largura da área de influência da viga (m);

L : vão da viga .

Em posse das cargas atuantes, deve-se realizar os cálculos das cargas solicitantes de acordo com cada combinação de cargas consideradas. No presente estudo foram supostas suas combinações de cargas: combinações últimas normais e combinações raras de serviço.

a) Combinações raras de serviço:

Para a combinação abaixo não foi introduzido nenhum coeficiente de redução das ações variáveis, consideração feita a favor da segurança.

$$Q_{Sd(Comb.1)} = Q_1 + Q_2$$

$Q_{sd(Comb.1)}$: carga solicitante para combinação 1 (combinação rara de serviço)

Q_1 : carga solicitante antes da cura do concreto

Q_2 : carga solicitante após da cura do concreto

b) Combinações últimas normais:

Para a segunda combinação foram adotados os critérios combinações últimas normais, os coeficientes de ponderação utilizados estão de acordo com as notas da Tabela 3, para quando as cargas variáveis não excedem 5 KN/m².

$$Q_{sd1} = \gamma_g * Q_1$$

$$Q_{sd2} = \gamma_g * (\text{revestimento} + \text{forro} + \text{divisória}) + \gamma_q * (\text{acidental})$$

$$Q_{sd(Comb.2)} = Q_{sd1} + Q_{sd2}$$

γ_q : coeficiente de ponderação das ação variáveis (1,40)

γ_g : coeficiente de ponderação das ação permanentes (1,40)

$Q_{sd(Comb.2)}$: carga solicitante para combinação 2 (combinação última normal)

Q_1 : carga solicitante antes da cura do concreto

2.8.2.4 Esforços máximos

Momento fletor solicitante de cálculo – viga de aço

$$M_{sd1} = \frac{Q_{sd1} * L^2}{8}$$

Momento fletor solicitante de cálculo – viga mista

$$M_{sd2} = \frac{Q_{sd2} * L^2}{8}$$

Onde:

M_{sd1} : Momento fletor solicitante de cálculo para viga de aço isolada;

M_{sd2} : Momento fletor solicitante de cálculo para viga mista;

Esforço cortante solicitante de cálculo

$$V_{sd} = \frac{(Q_{sd1} + Q_{sd2}) * L}{2}$$

2.8.2.5 Propriedades dos Materiais

Observar Tabela 1 com as especificações do concreto e do aço ASTM A572 grau 50.

2.8.2.6 Propriedades geométricas da seção de aço

A Tabela 8 mostra a nomenclatura utilizada para a geométrica e propriedades do perfil metálico que será adotado.

Tabela 8- Nomenclatura e unidades do adotadas para seção transversal do perfil.

d	cm	Distância entre as faces externas das mesas
bf	cm	Largura da mesa
tf	cm	Espessura da mesa
tw	cm	Espessura da alma
h	cm	Altura da alma
Ag	cm²	Área da seção transversal do perfil
Ix	cm⁴	Momento de inércia em relação ao eixo X-X
Wx	cm³	Módulo de resistência elástico em relação ao eixo X-X
Zx	cm³	Módulo de resistência plástico em relação ao eixo X-X
rx	cm	Raio de giração em relação ao eixo X-X
Iy	cm⁴	Momento de inércia em relação ao eixo Y-Y
Wy	cm³	Módulo de resistência elástico em relação ao eixo Y-Y
Zy	cm³	Módulo de resistência plástico em relação ao eixo Y-Y
ry	cm	Raio de giração em relação ao eixo Y-Y

Fonte: Autoria própria (2019).

2.8.2.7 Propriedades da seção mista para interação completa

a) Cálculo da largura efetiva da laje:

- A largura efetiva da laje de concreto é a soma das larguras efetivas para cada lado da linha de centro da viga, devendo ser menor ou igual aos seguintes valores:

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

$$b_{ef} \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{L/8}{2} + \frac{B_D}{2} \\ B_{balanço} + \frac{B_c}{2} \end{array} \right\}$$

$$b_c = b_{ef.esq.} + b_{ef.dir.}$$

b_{ef} : largura efetiva (cm)

$b_{ef.esq}$: largura efetiva à esquerda (cm)

$b_{ef.dir}$: largura efetiva à direita (cm)

b) Espessura da laje:

A espessura da laje no presente estudo fora admitido de forma arbitrária, optando-se por um valor usual.

t_c : normalmente 9 cm

c) Razão Modular:

A razão modular é o fator que possibilita a homogeneização teórica da seção formada pelo perfil de aço e pela a laje de concreto com sua largura efetiva, de acordo com a ABNT NBR 8800:2008.

$$\alpha_E: \text{razão modular} = \frac{E}{E_c} = \frac{20000}{1770 * \sqrt{f_{ck}}} \rightarrow E, f_{ck} \text{ em KN/cm}^2$$

d) Propriedades geométricas para seção mista:

A Tabela 9 mostra as características básica da nova seção da viga, que possui parcela da laje para contribui na resistência aos esforços.

Tabela 9- Propriedades geométricas para seção mista.

	Área transformada A_t (cm ²)	Distância @CG Y (cm)	$A_t.y$ (cm ²)	$A_t.y^2$ (cm ⁴)	I_0 (cm ⁴)
Laje de concreto	$\left(\frac{b_c}{\alpha_E}\right) * t_c$	$\frac{d}{2} + e_c$			$\frac{b_c * t_c^3}{\alpha_E * 12}$
Perfil metálico	A_g				I_x
Somatório					

Fonte: Autoria própria (2019).

$$I_{xp} = \sum(I_0 + A_t.y^2) \text{ (cm}^4\text{)}$$

$$d_{cg} = \frac{A_t.y}{A_t} \text{ (cm) (acima do CG do perfil)}$$

$$d_m = \frac{d}{2} + d_{cg} \text{ (cm)}$$

A partir dessa informação pode-se localizar onde a linha neutra estará, dessa forma poderá analisar qual o tipo de interação haverá.

$$I_{mx} = I_{xp} - A_t.d_{cg}^2 = \text{cm}^4$$

2.8.2.8 Regime de dimensionamento a partir do parâmetro de esbeltez

$$\frac{h}{t_w} \leq 3,76 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} : \text{regime plástico (seções compactas)}$$

$$3,76 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 5,70 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} : \text{regime plástico (seções semcompactas)}$$

2.8.2.9 Localização da Linha Neutra para Interação completa e cálculo resistente

$$T_{ad} = \frac{A_{aço} \cdot f_y}{1,10}$$

$$C_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot t_c}{1,40}$$

T_{ad} : força resistente de cálculo da região tracionada do perfil de aço

C_{cd} : força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço

a.) Se $C_{cd} \geq T_{ad}$ linha neutra plástica na laje de concreto:

$$a = \frac{T_{ad}}{0,60 * f_{ck} * b} \leq t_c$$

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

b) Se $C_{cd} < T_{ad}$ linha neutra plástica no perfil de aço:

$$C_{ad} = \frac{1}{2} * \left(\frac{A_g * f_y}{1,10} - C_{cd} \right)$$

$$M_{Rd} = C_{ad} * (d - y_t - y_c) + C_{cd} \left(d + h_F - y_t + \frac{t_c}{2} \right)$$

Quando $C_{ad} \leq \frac{A_{af} * f_y}{1,10} \rightarrow$ linha neutra na mesa superior

$$\rightarrow y_p = \frac{C_{ad} * 1,10 * t_f}{A_f * f_y} \text{ (espessura comprimida);}$$

Quando $C_{ad} > \frac{A_{af} * f_y}{1,10} \rightarrow$ linha neutra na alma

$$\rightarrow y_p = t_f + h_w * \left(\frac{C_{ad} - A_{af} * \left(\frac{f_y}{1,10} \right)}{A_{aw} * \left(\frac{f_y}{1,10} \right)} \right)$$

Onde:

C_{cd} : força resistente de cálculo da região comprimida do perfil de aço;

A_a : área do perfil de aço;

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

- A_{aw} : área da alma do perfil de aço, igual ao produto de $h_w * t_w$;
- T_c : espessura da laje de concreto (se houver forma de aço incorporada, é a espessura acima das nervuras);
- A : é a espessura da região comprimida da laje ou, para interação parcial, a espessura considerada efetiva;
- h_f : espessura da pré laje pré moldada de concreto com altura das nervuras da laje com forma de aço incorporada;
- d_1 : distância do centro geométrico do perfil de aço até a face superior desse perfil;
- y_c : distância do centro geométrico da parte comprimida do perfil de aço até a face superior desse perfil;
- y_t : distância do centro geométrico da parte tracionada do perfil de aço até a face inferior desse perfil;
- y_p : distância da linha neutra da seção plastificada até a face superior do perfil de aço.

2.8.2.10 Comparação entre momentos fletor resistente e solicitante

- a) cálculo do momento fletor resistente de cálculo para as cargas antes da cura do concreto (viga de aço):

$$M_{Rd} > M_{sd1} + M_{sd2}$$

Onde:

M_{Rd} : Momento fletor resistente de cálculo(KN.cm)

M_{sd1} : Momento fletor solicitante da viga de aço isolada(KN.cm)

M_{sd2} : Momento fletor solicitante da viga de aço mista(KN.cm)

- b) cálculo do momento fletor resistente de cálculo para as cargas depois da cura do concreto, para seções compactas;

- FLA →

$$\lambda = \frac{h}{t_w} < \lambda_p = 3,76 * \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

- FLM →

$$\lambda = \frac{b_f}{2 * t_f} < \lambda_p = 0,38 * \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\text{Como, } \lambda < \lambda_p \rightarrow M_{Rd,x} = \frac{Z_x * f_y}{1,10} > M_{sd1}$$

2.8.2.11 Resistência ao cisalhamento

a) Parâmetro de esbeltez da alma:

$$\frac{h}{t_w} \leq 1,10 * \sqrt{\frac{k_v * E}{f_y}}$$

b) Esforço cortante de cálculo:

$$V_{Rd} = \frac{0,6 * f_y * A_w}{1,10} > V_{sd}$$

2.8.2.12 Deslocamento máximo para a combinação rara de serviço (CP+CA);

Devido a cargas em combinações últimas normais

$$\delta_{nor} = \frac{5 * (Q_{sd1} + Q_{sd2}) * L^4}{384 * E * I_{mx}}$$

Devido a cargas atuantes antes da cura →

$$\delta_1 = \frac{5 * Q_1 * L^4}{384 * E * I_x}$$

Devido a cargas atuantes após a cura →

$$\delta_2 = \frac{5 * Q_2 * L^4}{384 * E * I_{mx}}$$

$$\delta_{ser} = \delta_1 + \delta_2 < \delta_{lim} = \frac{L}{350}$$

2.8.2.13 Deslocamento máximo para a combinações últimas normais

$$\delta_{nor} = \frac{5 * (Q_{sd1} + Q_{sd2}) * L^4}{384 * E * I_{mx}}$$

$$\delta_{nor} < \delta_{lim} = \frac{L}{350}$$

2.8.2.14 Conectores de cisalhamento (studs)

Cisalhamento horizontal:

$$Q_{sd} = \min (T_{ad}, C_{ad})$$

$$A_{cs} = \frac{\pi * d^2}{4} \text{ (área da seção transversal do conector)}$$

f_{ucd} : (resistência a ruptura do aço do conector)

a) Resistência de um conector tipo stud:

$$Q_{Rd} = 0,4 * A_{sc} * \sqrt{f_{ck} * E_c} < 0,8 * A_{sc} * f_{ucs}$$

b) Número de conectores necessários para toda a viga:

$$N_s = 2 * \frac{Q_{sd}}{Q_{Rd}}$$

c) Espaçamentos entre os conectores:

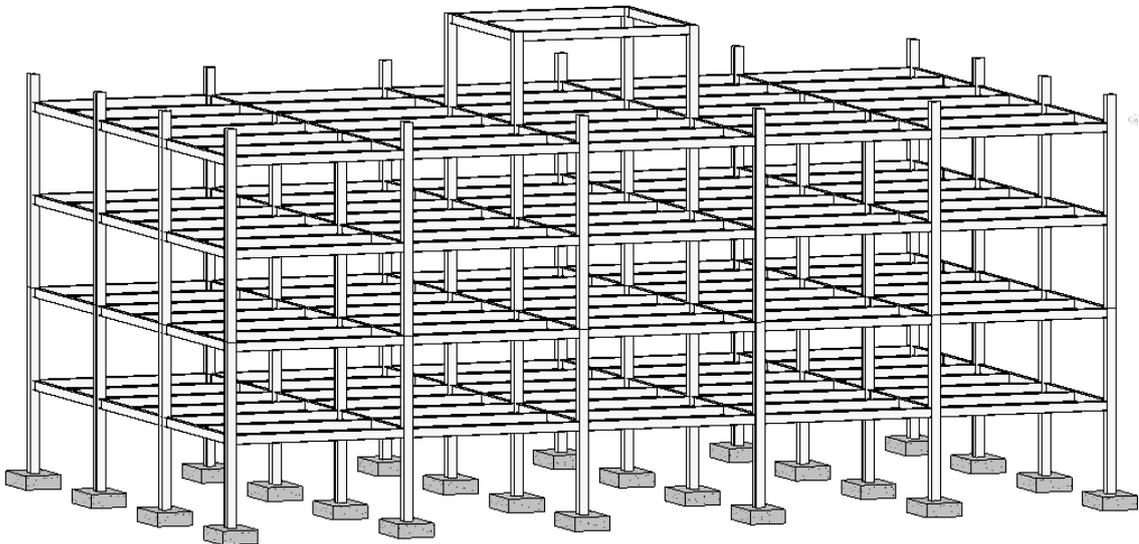
$$L/N_s$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Concepção de modelo base

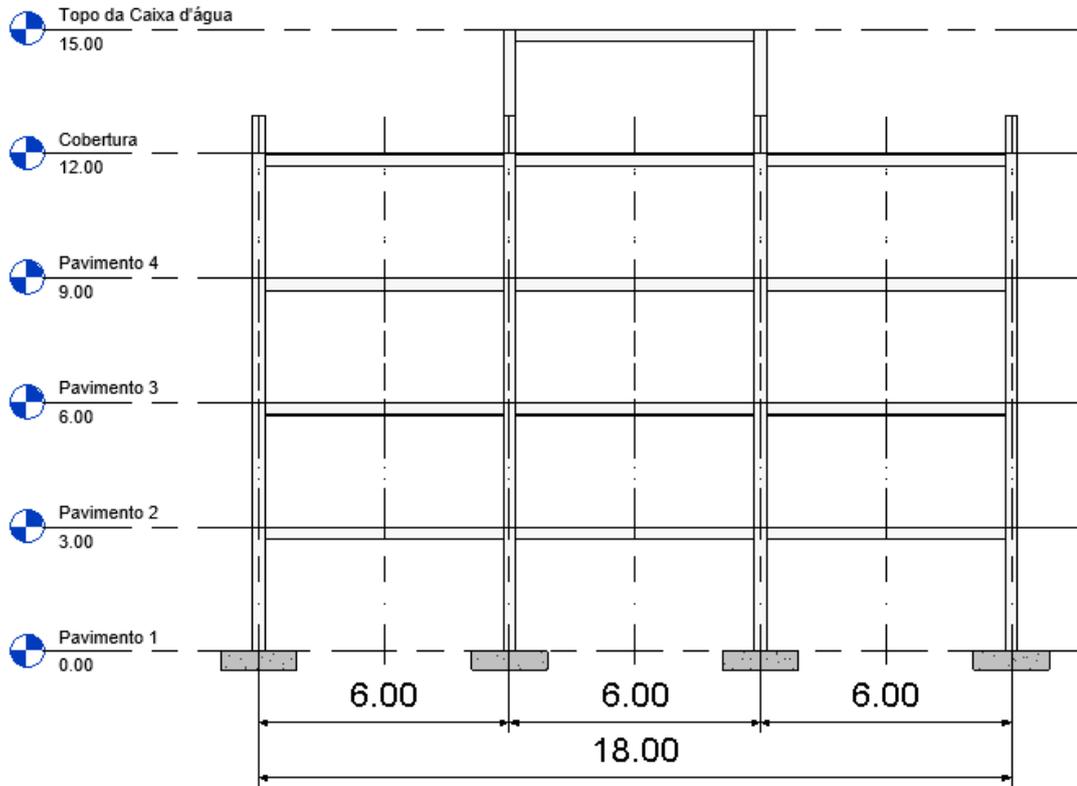
Para ser realizado o estudo comparativo deste trabalho, foi necessário a elaboração de uma situação base para que os dois sistemas estruturais de vigas fossem analisados. O modelo escolhido consiste no vigamento de uma laje de piso para uso e ocupação de escritórios, em que os elementos estruturais permitem grandes vãos livres, que facilitam a mobilidade arquitetônica. Embora o modelo esteja representado de forma completa nas Figuras 6 a 8, apenas as composições padrões do vigamento serão abordadas.

Figura 6-Vista tridimensional do modelo base.



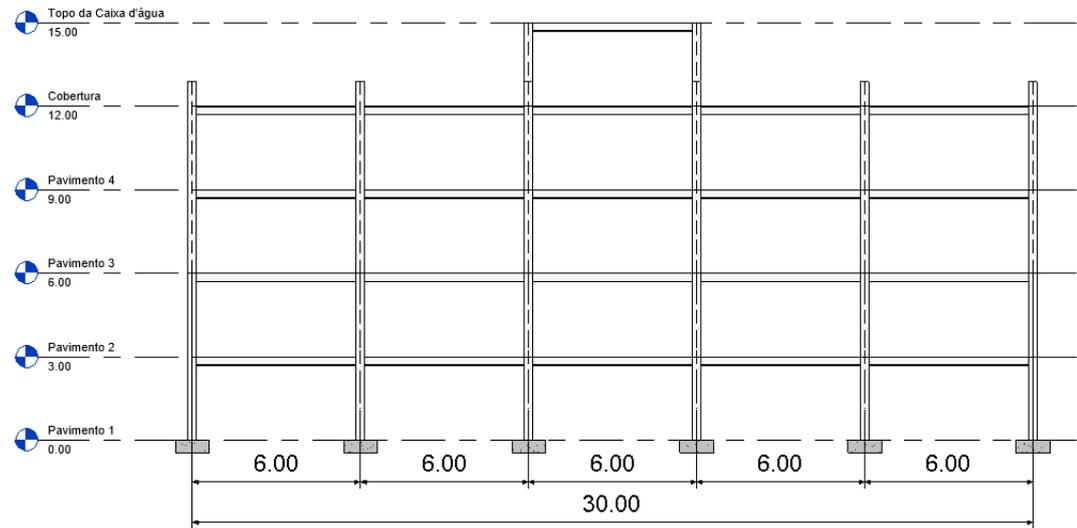
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 7 - Vista da elevação frontal.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 8- Vista da elevação lateral.

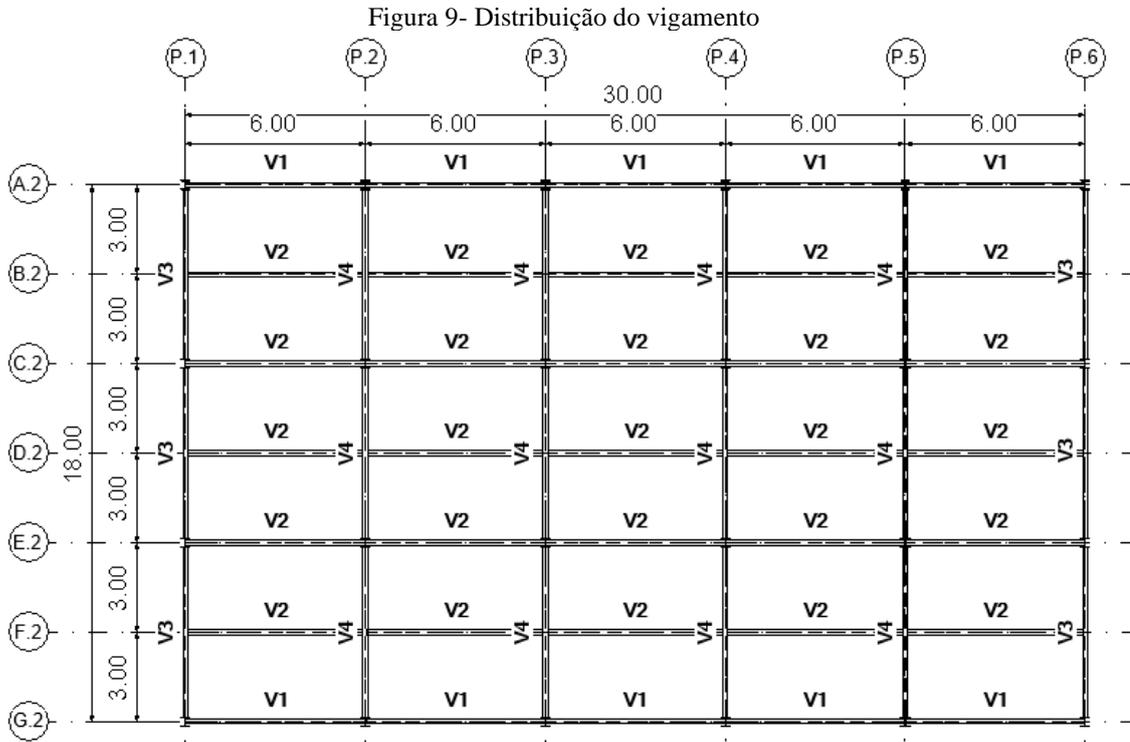


Fonte: Autoria própria (2019).

3.2 Descrição da estrutura

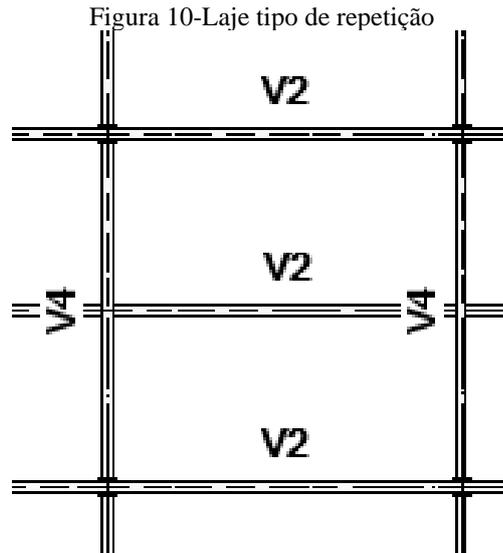
A estrutura consiste em um edifício de quatro pavimentos, com pé direito de 3,00 metros cada, mas que totaliza uma altura de 15,00 metros devido o topo de sua caixa d'água (Figura 7 e 8). Suas dimensões em planta baixa são 18,00 x 30,00 m, o que corresponde a uma

área de 540,00 m² por andar. A Figura 9 mostra a forma em que o vigamento foi estabelecido nos pavimentos tipos (2, 3 e 4), a direção de maior dimensão fora dividida em 5 vãos de 6,00 m com vigas secundária biapoiadas, já na direção perpendicular há uma divisão de 3 vãos de 6,00 m com vigas principais também biapoiadas e que recebem cargas das vigas secundárias no centro do seu vão, ou seja, a 3,00 m de um de seus apoios.



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 10 apresenta os detalhes das lajes tipo de repetição em que as vigas V4 são as principais biapoiadas em pilares, e as vigas V2 são as secundárias biapoiadas nas vigas principais.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.3 Materiais previstos

Os aços estruturais são divididos em duas categorias:

- Aços-carbono que em função da sua porcentagem de carbono eleva a resistência do aço e diminui sua ductilidade.
- Aços de Baixa liga que são aços-carbonos adicionados de elementos de liga, que aumentam ainda mais a resistência do aço, possibilitando que ele passe pelo processo de soldagem sem atenções especiais, como é o caso dos que são apenas aço-carbono.

Na Tabela 10 estão alguns dos aços estruturais utilizados em perfis de acordo com a ASTM e que seguem o padrão ABNT, juntamente com suas respectivas propriedades.

Tabela 10- Propriedades Mecânicas de Aços de Baixa Liga

Especificações	Principais elementos de liga	Limite de escoamento f_y (Mpa)	Resistência à ruptura f_u (Mpa)
	C<0,23%		
ASTM A572 Gr. 50	Mn<1,35%	345	450
	C<0,17%		
ASTM A588	Mn<1,2% Cu<0,5%	345	485
	C<0,23%		
ASTM A992	Mn1,5%	345	450

Fonte: PFEIL (2009, p. 10)

O material utilizado para os perfis das vigas no modelo apresentado foi o ASTM A572-Gr. 50, com as propriedades de resistência ao escoamento e à ruptura expostos acima. Além dessas características, na Tabela 11 estão listados outros atributos do aço e do concreto que serão relevantes para cálculo.

Tabela 11- Propriedade do Aço e do Concreto.

Aço dos perfis	
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E)	200 GPa
Coeficiente de Poison (u)	0,3
Concreto das Lajes	
Resistência à Compressão (fck)	20 MPa
Módulo de Elasticidade Tangente Inicial (Eci)	25 GPa
Módulo de Elasticidade Secante (Ecs)	21 GPa
Peso específico	25 KN/m ³

Fonte: Aatoria própria (2019)

3.4 Levantamento das ações

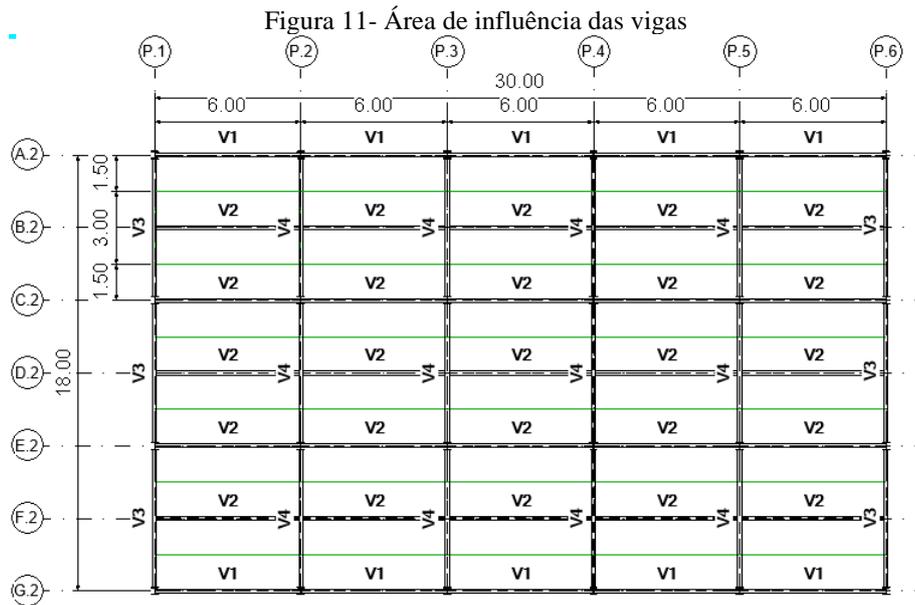
As cargas descritas serão utilizadas como dados de dimensionamento para o sistema metálico e para o sistema misto de aço e concreto de vigas secundárias, sendo elas as V2 (Figura 10) sendo também consideradas as vigas tipo do estudo.

a) Cargas Atuantes;

- Estrutura (estimativa) = 0,15 KN/m²
- Laje de concreto (0,09m x 25 KN/m³) = 2,25 KN/m²
- Revestimento = 0,70 KN/m²
- Divisória= 1,00 KN/m²
- Forro = 0,30 KN/m²
- Carga acidental = 2 KN/m² (uso para escritórios)

b) Área de influência nas vigas secundárias V2

A área que influenciará em cada viga será a meio vão da direita e a meio vão da esquerda, isso pode ser observado na Figura 12.



Fonte: Autoria própria (2019).

$$B = \frac{3}{2} + \frac{3}{2} = 3,00 \text{ m} \quad (1)$$

$$A = 3,0 * 6,0 = 18,00 \text{ m}^2$$

(2)

3.5 Dimensionamento analítico da viga metálica

3.5.1 Cargas Solicitantes

Tabela 12- Cargas Solicitantes (viga metálica)

VIGA METÁLICA		UNID.
Q _{Cp}	13,20	KN/m
Q _{CA}	6,00	KN/m
COMBINAÇÕES RARAS DE SERVIÇO		UNID.
Q _{Sd(comb1)}	19,20	KN/m
COMBINAÇÕES ÚLTIMAS NORMAIS		UNID.
Q _{Sd(comb2)}	26,82	KN/m

Fonte: Autoria própria (2019).

3.5.2 Esforços Solicitantes

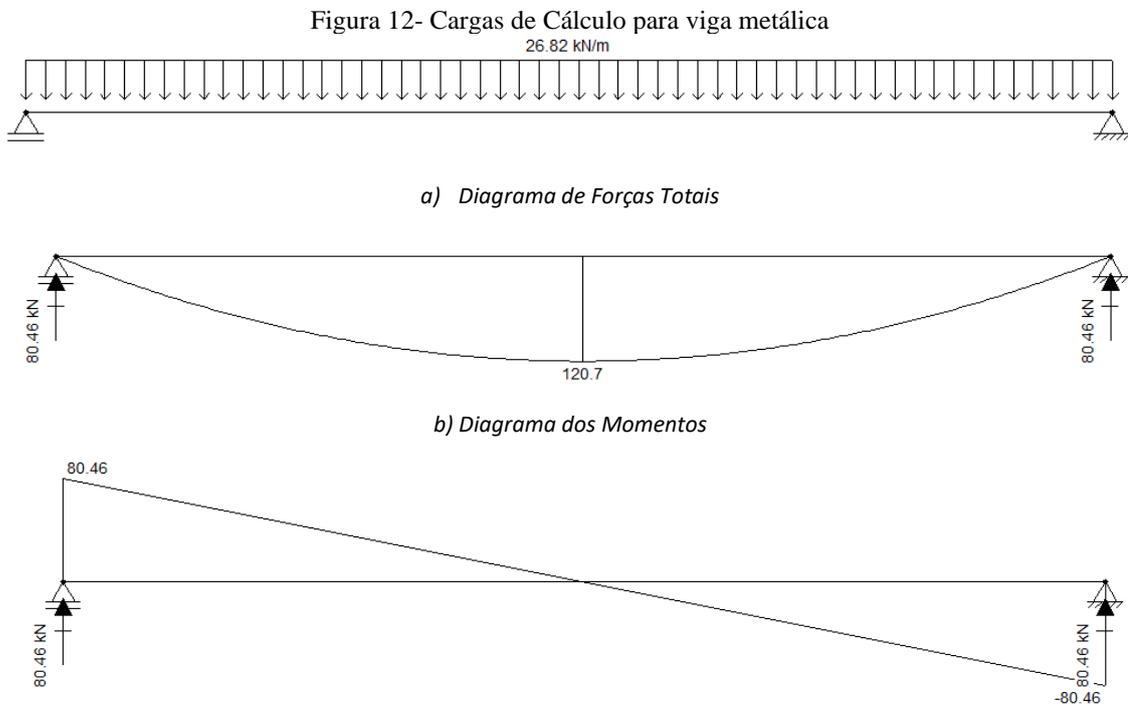
Tabela 13- Esforços Solicitantes (viga metálica)

MOM. FLETOR SOLICITANTE		
M _{Sd}	120,69	KN.m
ESFORÇO CORTANTE SOLICITANTE		
V _{Sd}	80,46	KN

Fonte: Aatoria própria (2019).

3.5.3 Diagramas

Os diagramas a seguir (Figura 12) foram elaborados pelo programa FTOOL que faz o estudo do comportamento estrutural de forma plana. Tendo sido executado apenas para a combinação de carga que exigiu maior sollicitação.

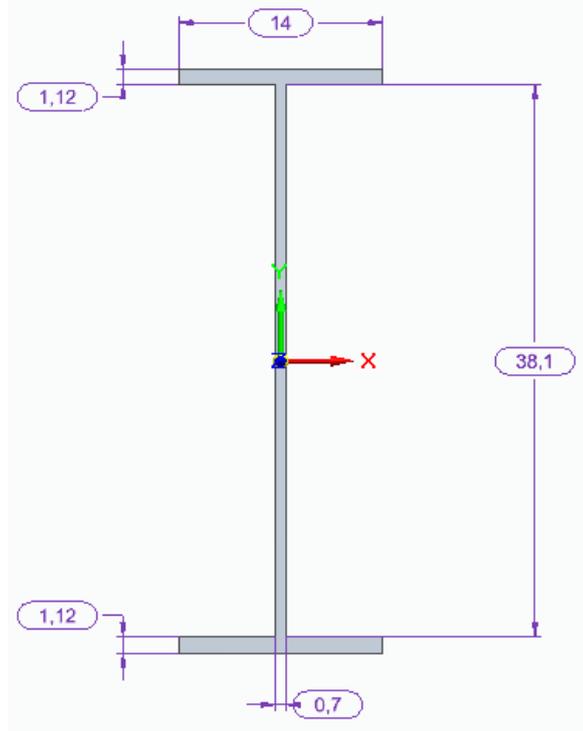


Fonte: Aatoria própria (2019).

3.5.4 Geometria do perfil

De acordo com os valores encontrado para os carregamentos solicitantes, encontrou-se o perfil abaixo (Figura 13) como adequado.

Figura 13 - Perfil I (W410X46,1): em centímetros.



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 14- Perfil I laminado - abas paralelas - W410X46,1.

	W 410X46,1	UNID.
d	40,3	cm
bf	14	cm
tf	1,12	cm
tw	0,7	cm
h	38,1	cm
Ag	59,2	cm ²
Ix	15690	cm ⁴
Wx	778,7	cm ³
Zx	891,1	cm ³
rx	16,27	cm
Iy	514	cm ⁴
Wy	73	cm ³
Zy	115,2	cm ³
ry	2,95	cm
It	20,06	cm ⁴
Cw	196571	cm ⁶

Fonte: BELLEI (2008, p.415)

3.5.5 Deslocamento Vertical

δ_{lim}	1,71	cm		
δ_{ser}	1,03	cm	→	OK

3.5.6 Resistência ao Momento Fletor

FLAMBAGEM LOCAL DA MESA- FLM

λ	6,25	
λ_p	9,15	
M_{pl}	30742,95	KN.CM
M_{Rd}	27948,14	KN.CM
M_{Sd}	12069,00	KN.CM

→

OK

FLAMBAGEM LATERAL DA ALMA- FLA

λ	54,43	
λ_p	90,53	
λ_r	137,24	
M_{pl}	30742,95	KN.CM
M_r	18805,61	KN.CM
M_{Rd}	30742,95	KN.CM
M_{Sd}	12069,00	KN.CM

→

OK!

3.5.7 Resistência ao Cisalhamento

λ	54,43	
λ_p	59,22	
λ_r	73,76	
V_{pl1}	583,95	KN
V_{pl2}	635,37	KN
V_{pl3}	755,31	KN
V_{pl}	583,95	KN
V_{Rd}	530,86	KN
V_{Sd}	80,46	KN

→

OK!

3.6 Dimensionamento analítico da viga mista de aço e concreto

3.6.1 Cargas Solicitantes

Em conformidade com a NBR 8800:2008 para combinações de cargas na viga mista, tendo em vista que a carga acidental considerada é de 2,00 KN/m², pode-se, opcionalmente, fazer o agrupamento de cargas permanentes e das cargas acidentais majorando-as com o coeficiente de 1,40. Dessa forma obteve-se a Tabela 15 com as cargas e as cargas solicitantes.

Tabela 15- Cargas Solicitantes (viga mista).

VIGA DE AÇO ISOLADA (ANTES DA CURA)		UNID.
Q1	7,20	KN/m
Q _{Sd1}	10,08	KN/m
VIGA MISTA (APÓS A CURA)		UNID.
Q2	12,00	KN/m
Q _{Sd2}	16,80	KN/m

Fonte: Aatoria própria (2019).

3.6.2 Esforços Solicitantes

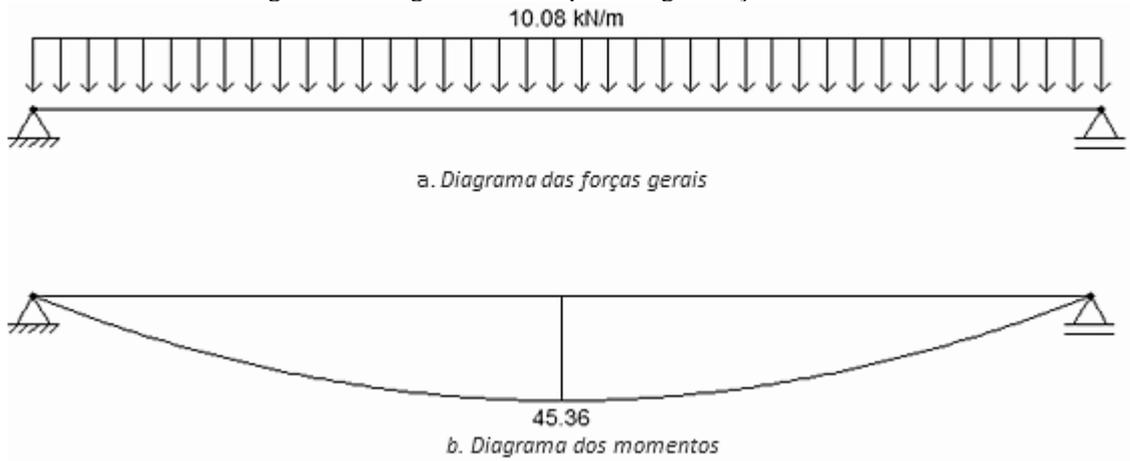
Tabela 16- Esforços Solicitantes.

MOM. FLETOR SOLICITANTES (VIGA DE AÇO)		
M _{Sd1}	45,36	KN.m
MOM. FLETOR SOLICITANTES (VIGA MISTA)		
M _{Sd2}	75,6	KN.m
ESFORÇO CORTANTE SOLICITANTE (VIGA MISTA)		
V _{Sd}	80,64	KN

Fonte: Aatoria própria (2019)

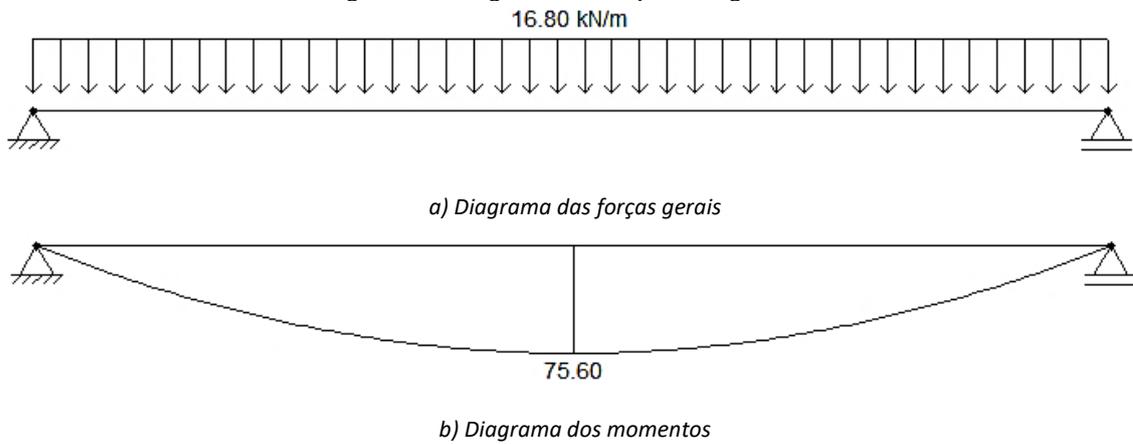
3.6.3 Diagramas

Figura 14 - Cargas de cálculo para a viga de aço isolada.



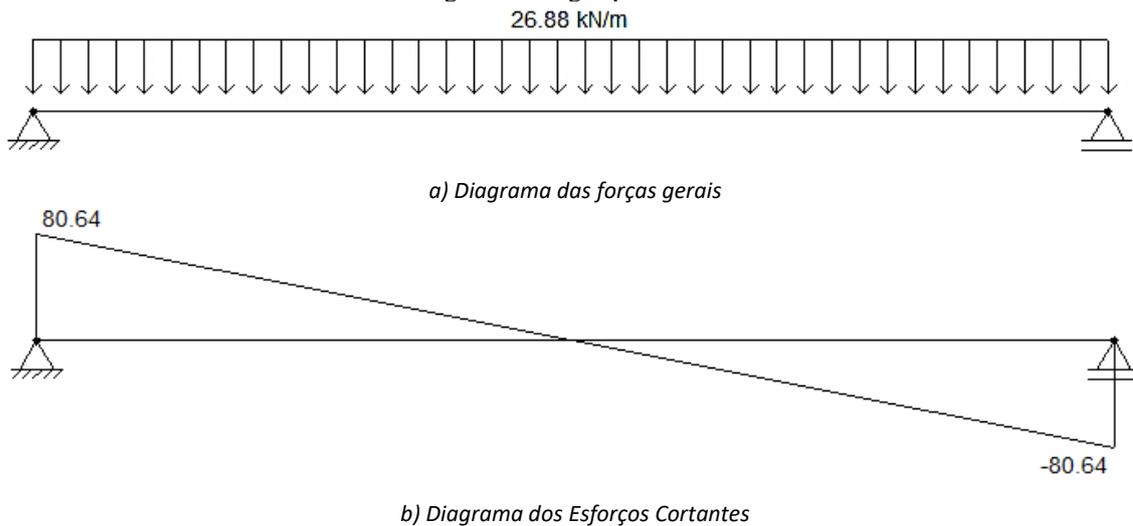
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 15 - Carga de cálculo para a viga mista.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 16- Viga após a cura.

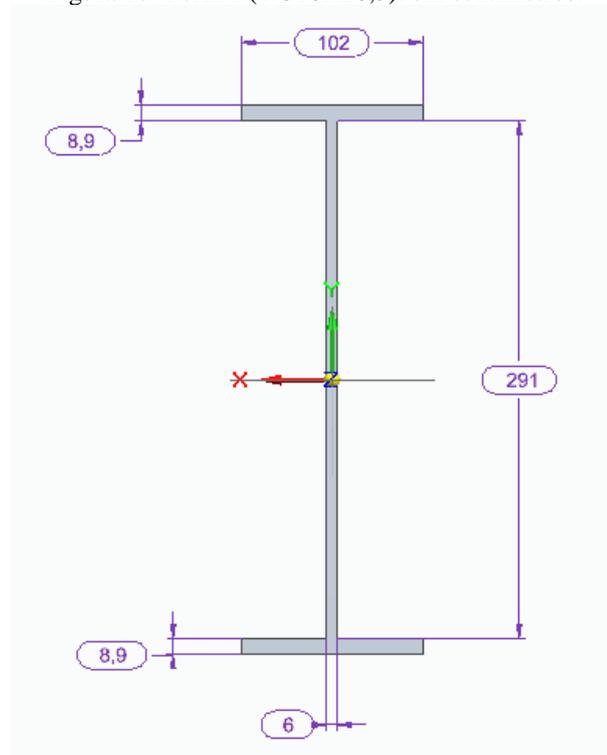


Fonte: Autoria própria (2019).

3.6.4 Geometria do perfil

De acordo com os valores encontrado para os carregamentos solicitantes, encontrou-se o perfil abaixo (Figura 13) como adequado.

Figura 17- Perfil I (W310X28,3): em centímetros.



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 17-Perfil I laminado – Abas paralelas -W 310 X 28,3.

W 310X28,3		UNID.
d	30,9	cm
bf	10,2	cm
tf	0,89	cm
tw	0,6	cm
h	29,1	cm
Ag	36,5	cm ²
Ix	5500	cm ⁴
Wx	356	cm ³
Zx	412	cm ³
rx	12,28	cm
Iy	158	cm ⁴
Wy	31	cm ³
Zy	49,4	cm ³
ry	2,08	cm

Fonte: BELLEI (2008, p.415).

3.6.5 Interação mista completa

CÁL. DA LARGURA EFETIVA DA LAJE		UNID.
$V\tilde{A}O/8 = L/8$	75	cm
dist. das linhas de centro adj. (direita)	150	cm
dist. das linhas de centro adj. (esquerda)	150	cm
bc	150	cm
ESPESSURA DA LAJE		UNID.
tc	9	cm
RAZÃO MODULAR (αE)		
αE	8	

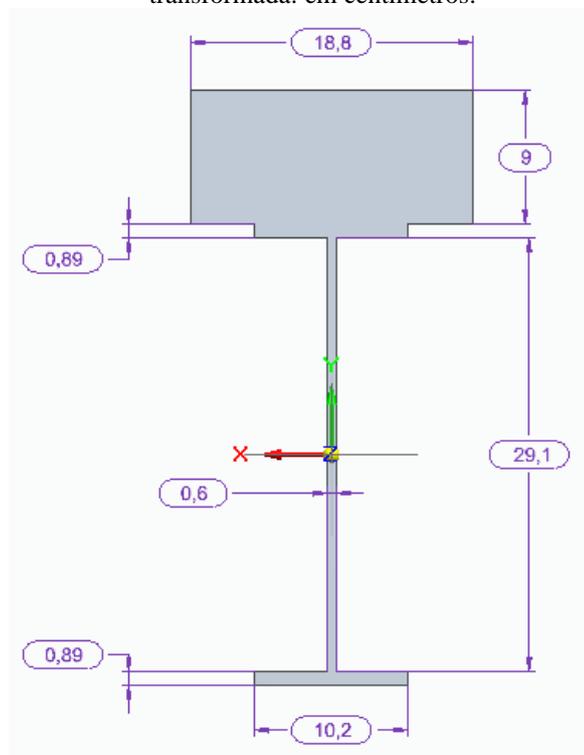
Tabela 18 - Característica do perfil misto aço e concreto.

	área transf.- At (cm ²)	dist. @ CG- y (cm)	At.y (cm ³)	At.y ² (cm ⁴)	I _o (cm ⁴)
laje de concreto	169,00	19,95	3370,82	67247,76	1140,50
W 310X28,3	36,50	0	0	0	5500,00
Σ	205,50		3370,80	67247,80	6640,50

Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 18 mostra o perfil homogeneizado do perfil de aço com a laje de concreto.

Figura 18- Perfil da Viga Mista com seção de concreto transformada: em centímetros.



Fonte: Autoria própria (2019).

I_{xp}	73888,3	cm ⁴
d_{cg}	16,4	cm
d_m	31,9	cm
I_{mx}	18586,9	cm ⁴
W_{mXS}	-19443,7	cm ³
W_{mXi}	583,5	cm ³
W_c	18461,8	cm ³

→ linha neutra acima do CG do perfil

→ linha neutra na laje

$$h/t_w = 48,50$$

$$3,76 * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 90,53$$

→ Dimensionamento em regime plástico

T_{ad}	1144,77	KN
C_{cd}	1639,29	KN

→ Linha neutra plástica na laje de concreto

3.6.6 Resistência ao Momento Fletor

3.6.6.1 Antes da cura do concreto

FLAMBAGEM LATERAL DA ALMA – FLA

λ_p	90,53
λ	48,50

→ SEÇÃO COMPACTA $\lambda < \lambda_p$

FLAMBAGEM LATERAL DA MESA – FLM

λ_p	9,15
λ	5,73

→ SEÇÃO COMPACTA $\lambda < \lambda_p$

MOMENTO FLETOR RESISTENTE DE CÁLCULO

$M_{Rd,x}$	12921,82	KN.CM
M_{Sd1}	4536,00	KN.CM

→ OK!

3.6.6.2 Após a cura do concreto

Linha Neutra plástica na laje de concreto

a	6,36	cm
d_1	21,27	cm
M_{Rd}	24349,40	KN.cm
$M_{Sd1} + M_{Sd2}$	12096,00	KN.cm

→ OK

→ OK

3.6.7 Resistência ao Cisalhamento

h/t_w	48,50	
V_{Rd}	348,89	KN
V_{Sd}	80,64	KN

→

OK!

3.6.8 Deslocamento Vertical

3.6.8.1 Combinação rara de serviço (CP+CA)

DEVIDO A C1

δ_1	1,10	CM
------------	------	----

DEVIDO A C2

δ_2	0,54	CM
δ_{ser}	1,65	CM
δ_{lim}	1,71	CM

→

OK!

3.6.9 Conectores de cisalhamento (studs)

FORÇA DE CISALHAMENTO HORIZONTAL (de projeto)

T_{ad}	1144,77	KN
C_{cd}	1639,29	KN
Q_{Sd}	1144,77	KN

FORÇA DE CISALHAMENTO HORIZONTAL DE CÁLCULO

Tipo de studs	16	
diâmetro	1,6	cm
comprimento	6,4	cm
A_{sc}	2,0	cm ²
γ_{sc} (combinações normais)	1,25	
f_{ucs}	40	KN/CM ²
R_p	1	
R_g	1	

Q_{Rd1}	56,90	KN
Q_{Rd2}	64,34	KN
Q_{Rd}	56,90	KN

NÚMERO DE CONECTORES PARA VIGA

N_s cálculo	40,23	
N_s	40	UNID.

ESPAÇAMENTOS 15,00 CM

3.7 Modelagem numérica

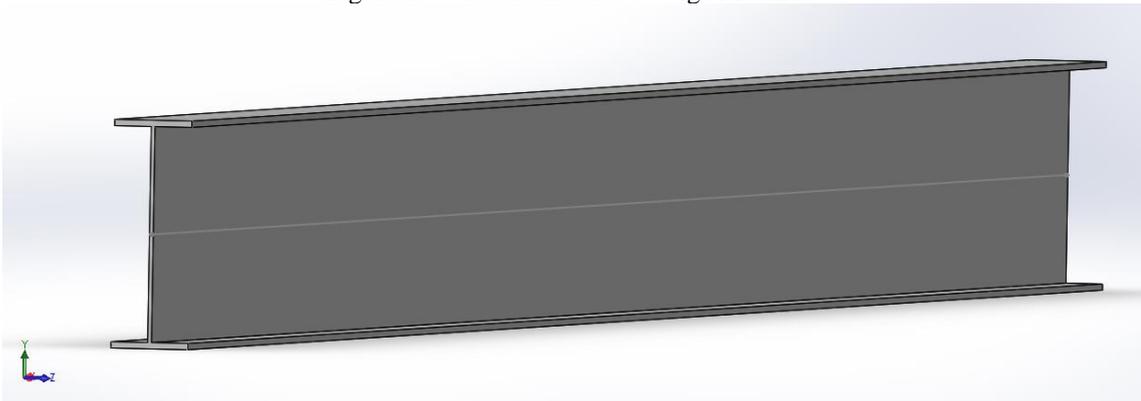
Para a análise numérica das vigas anteriormente dimensionadas e testadas pelo método analítico, criou-se dois protótipos virtuais pelo programa SOLIDWORKS que faz o estudo do comportamento estrutural mediante sistemas de equação fundamentadas no princípio matemático dos Métodos dos Elementos Finitos (MEF).

Dentre os tipos de simulações oferecidas pelo SOLIDWORKS têm-se: Análise Estática, Frequência, Térmico, Flambagem, Fadiga, Não linear e Dinâmico Linear. Para a definição do estudo as entradas de interesse foi a obtenção da análise quanto a deformações e tensões, propondo-se assim, um estudo de Análise Estática.

Os esboços do dimensionamento analítico foram definidos como vigas, atribuindo-lhes assim características de corpos rígidos e imóveis (sem translação) nas extremidades de sua linha neutra, simulando a condição de biapoimadas. As propriedades características do material do corpo dão idênticas às já citadas no método analítico para o Aço ASTM A572 grau 50 (Tabela 11).

3.7.1 Viga metálica

Figura 19- Vista Isométrica da Viga Metálica.



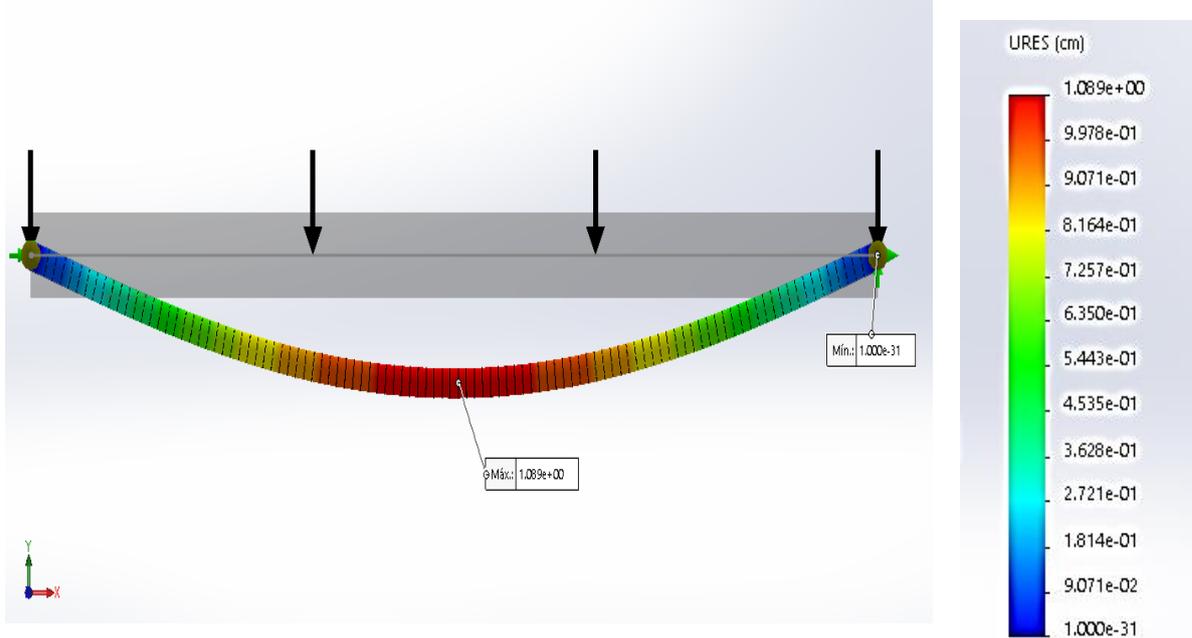
Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 19- Propriedades da seção da face da Viga Metálica.		
Área = 58.03 cm ²		
Centroide relativo à origem do sistema de coordenadas de saída: (centímetros)		
X = 600.00		
Y = 0.00		
Z = 0.00		
Momentos de inércia da área, no centroide: (cm ⁴)		
Lxx = 15802.34	Lxy = 0.00	Lxz = 0.00
Lyx = 0.00	Lyy = 513.30	Lyz = 0.00
Lzx = 0.00	Lzy = 0.00	Lzz = 15289.04
Momento polar de inércia da área, no centroide = 15802.34 cm ⁴		
Ângulo entre os eixos principais e os eixos da peça= -0.00 graus		
Momentos principais de inércia da área, no centroide: (cm ⁴)		
Ix = 513.30		
Iy = 15289.04		
Momentos de inércia da área, no sistema de coordenadas de saída: (cm ⁴)		
LXX = 15802.34	LXY = 0.00	LXZ = 0.00
LYX = 0.00	LYY = 20891313.30	LYZ = 0.00
LZX = 0.00	LZY = 0.00	LZZ = 20906089.04

Fonte: Relatório de Simulação SOLIDWORKS.

Para as cargas de 19,20 KN/m para combinação 1, obteve-se diagramas o seguinte modelo deformado que apresentou deflexão máxima de 1,089 centímetros na coordenada x=3,00 metros, no meio do seu vão (Figura 20).

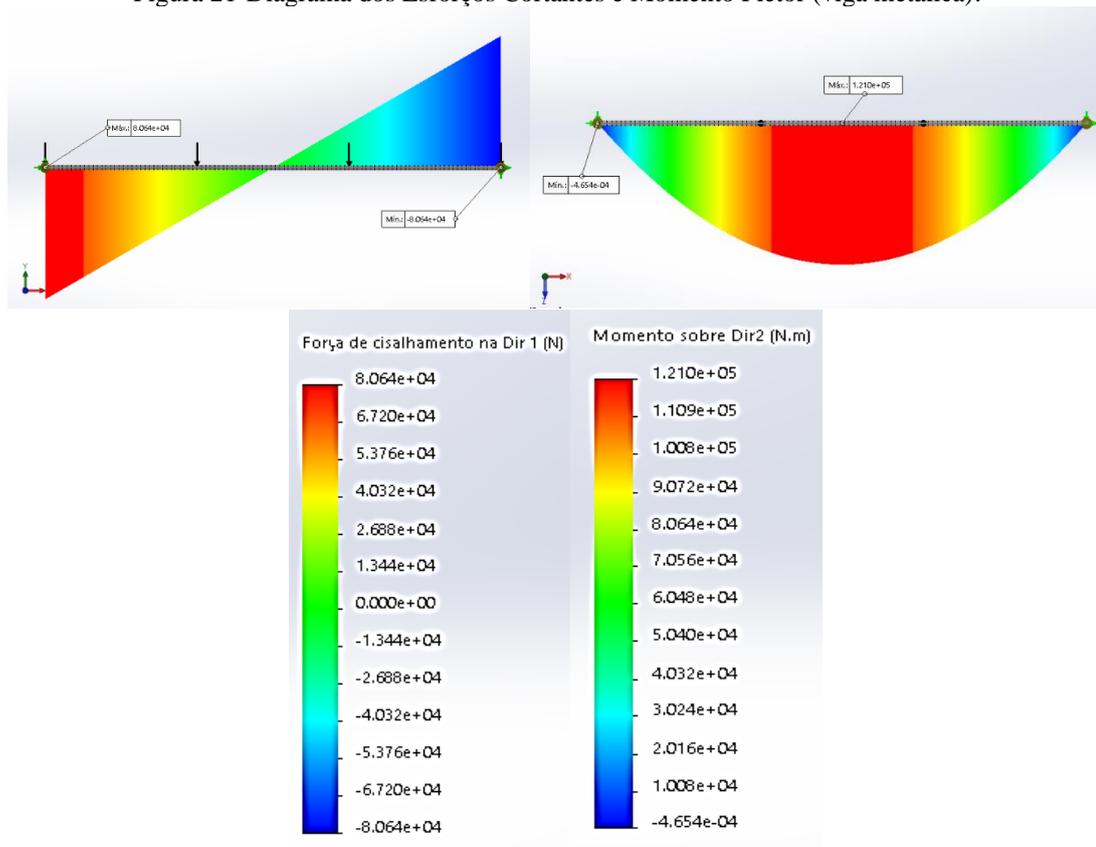
Figura 20- Deslocamento Vertical para Comb1 (viga metálica).



Fonte: Autoria própria (2019).

Para a combinação 2 com carga de maior sollicitação, 26,82 KN/m plotou-se também os diagramas de momento fletor e de esforços cisalhantes (Figura 21), o que mostrou concordância entre os valores utilizados para o estudo analítico de dimensionamento e para o estudo numérico dos deslocamentos e tensões realizados pelo SOLIDWORKS.

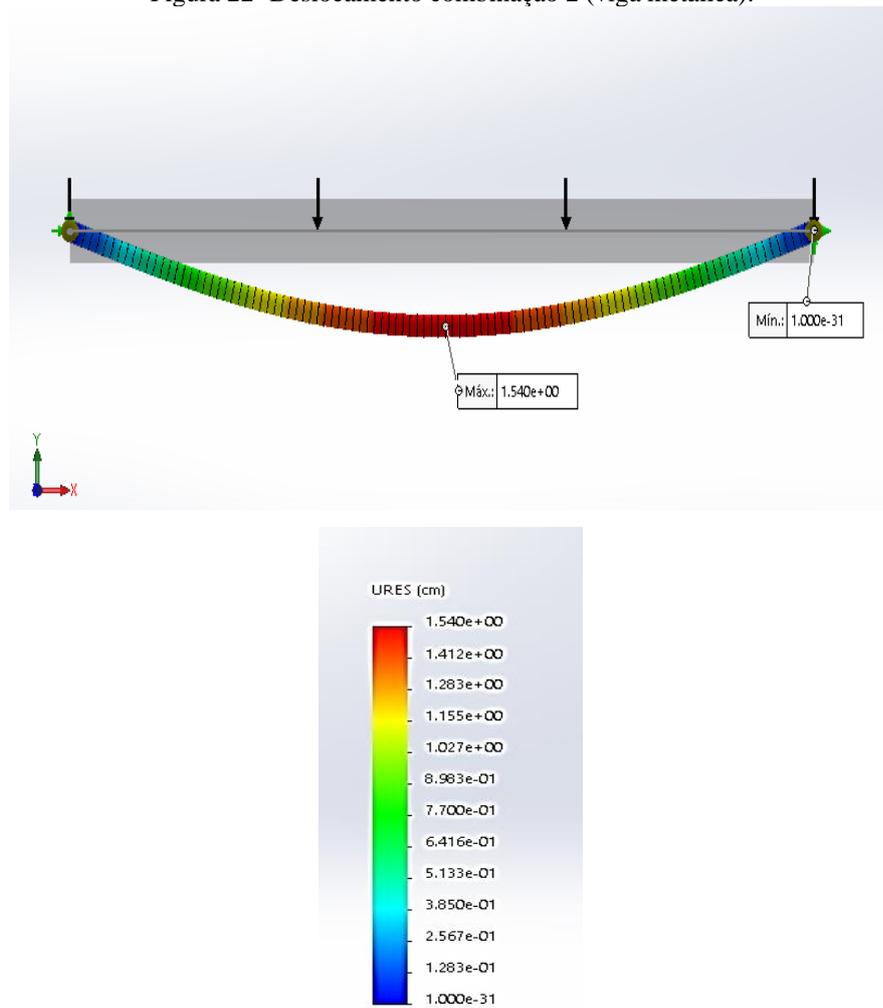
Figura 21-Diagrama dos Esforços Cortantes e Momento Fletor (viga metálica).



Fonte: Autoria própria (2019).

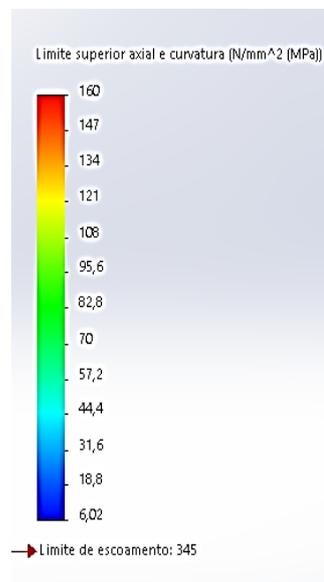
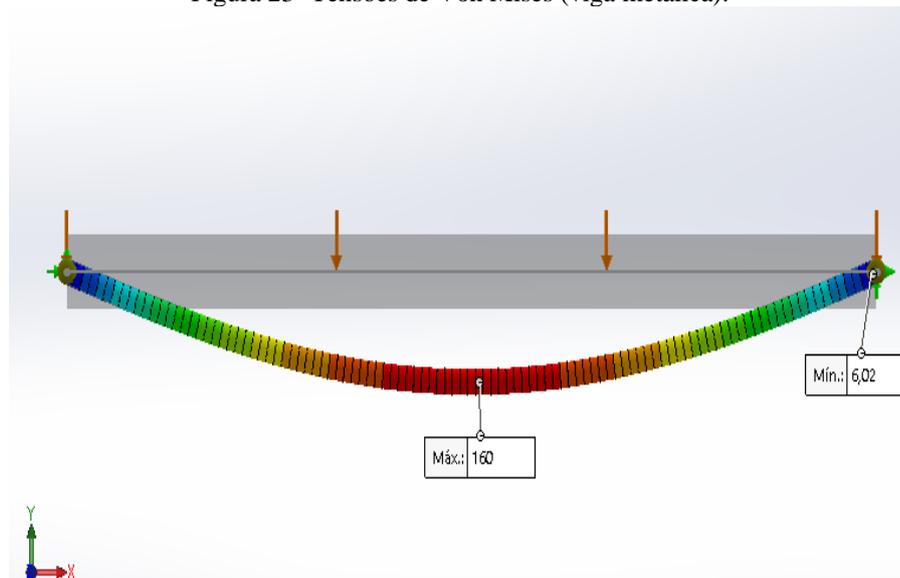
Ainda na Combinação 2 plotou-se as malhas para análise de deslocamento (Figura 22) e para as tensões de Von Mises (Figura 23).

Figura 22- Deslocamento combinação 2 (viga metálica).



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 23- Tensões de Von Mises (viga metálica).

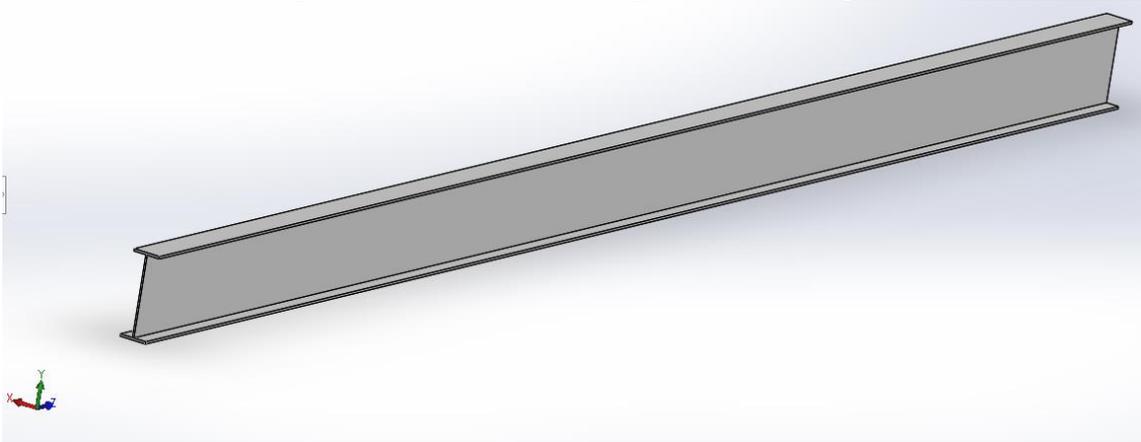


Fonte: Autoria própria (2019).

3.7.2 Viga mista

3.7.2.1 Antes da Cura

Figura 24- Vista Isométrica da Viga Mista antes da laje.



Fonte: Autoria própria (2019).

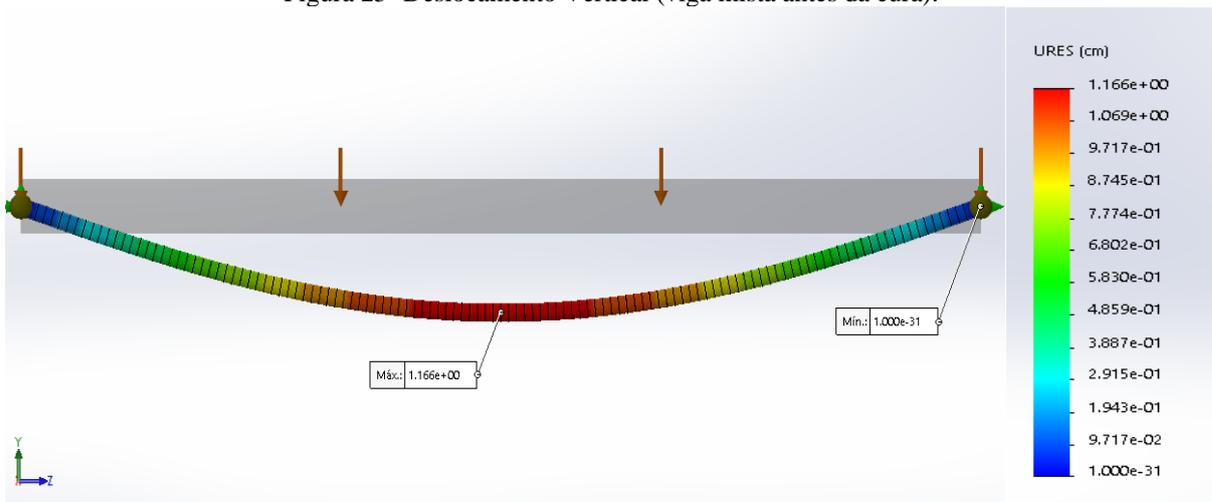
Tabela 20- Propriedades de seção da face da Viga Mistadas antes da cura.

Área = 35.62 cm ²		
Centroide relativo à origem do sistema de coordenadas de saída: (centímetro)		
X = 0.30		
Y = 14.55		
Z = 0.00		
Momentos de inércia da área, no centroide: (cm ⁴)		
Lxx = 5315.68	Lxy = 0.00	Lxz = 0.00
Lyx = 0.00	Lyy = 157.94	Lyz = 0.00
Lzx = 0.00	Lzy = 0.00	Lzz = 5473.62
Momento polar de inércia da área, no centroide = 5473.62 cm ⁴		
Ângulo entre os eixos principais e os eixos da peça= 90.00 graus		
Momentos principais de inércia da área, no centroide: (cm ⁴)		
lx = 157.94		
ly = 5315.68		
Momentos de inércia da área, no sistema de coordenadas de saída: (cm ⁴)		
LXX = 12855.68	LXY = 155.46	LXZ = 0.00
LYX = 155.46	LYY = 161.14	LYZ = 0.00
LZX = 0.00	LZY = 0.00	LZZ = 13016.82

Fonte: Relatório de Simulação SOLIDWORKS.

Para o teste de deslocamento vertical gerou-se a simulação do perfil com carregamento apenas de 7,20KN/m correspondente as forças atuantes antes que a laje de concreto passasse a interagir como parte do elemento estrutural. O modelo teve uma deformação máxima de 1,17 centímetros, também na coordenada correspondente a metade do seu vão de 6,00 metros.

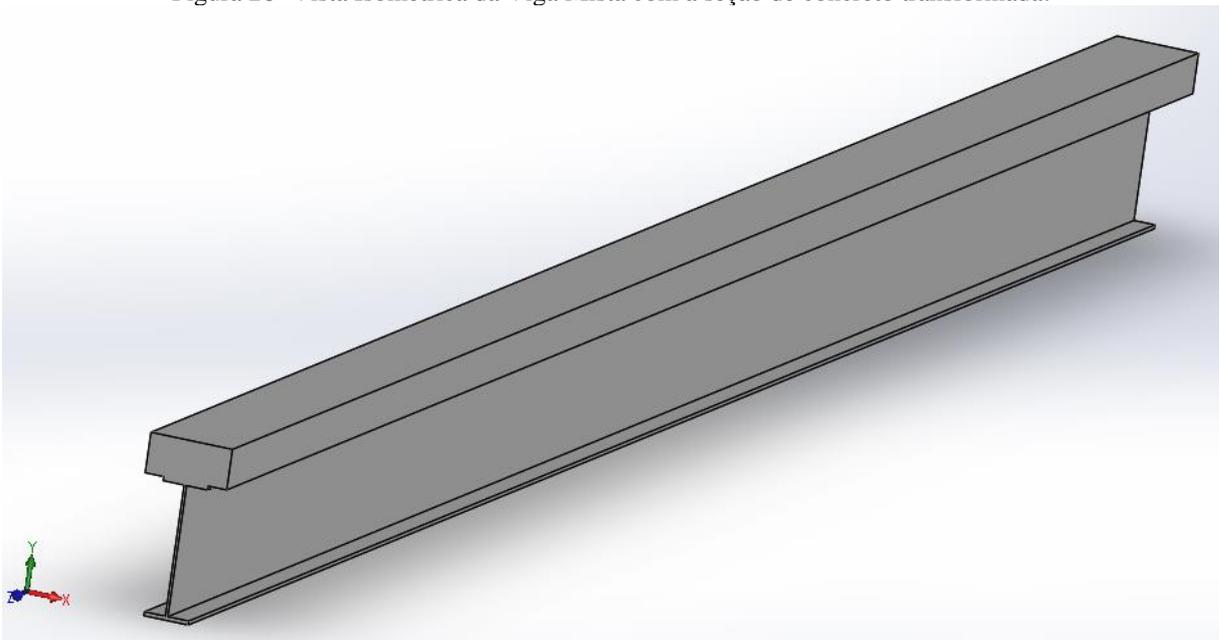
Figura 25- Deslocamento Vertical (viga mista antes da cura).



Fonte: Autoria própria (2019).

3.7.2.2 Após a Cura

Figura 26- Vista Isométrica da Viga Mista com a seção de concreto transformada.



Fonte: Autoria própria (2019).

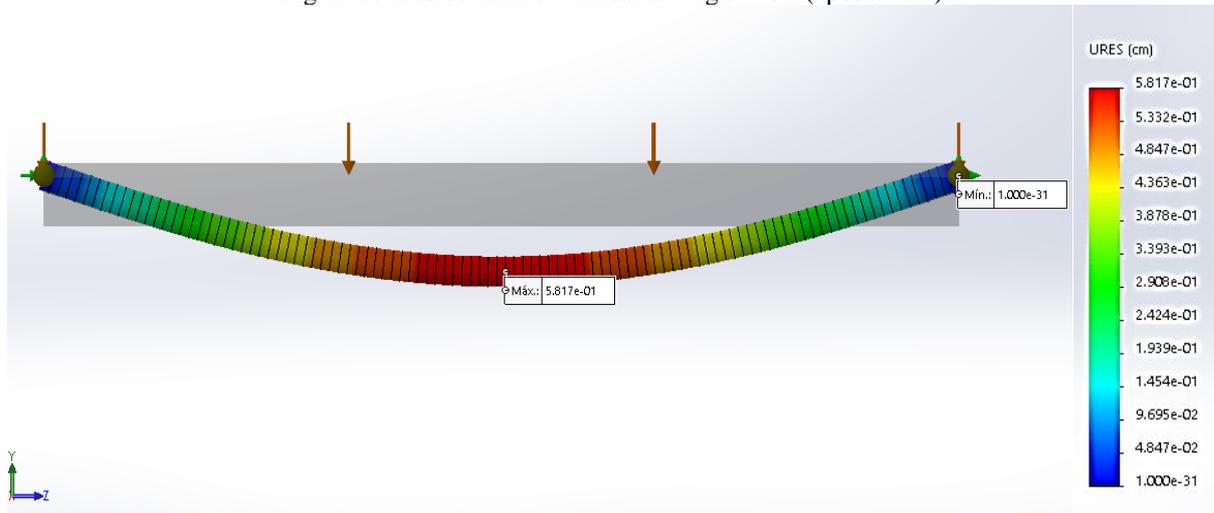
Tabela 21- Propriedade de seção da face da Viga Mista com seção de concreto transformada.

Área = 204.816 centímetros ²		
Centroide relativo à origem do sistema de coordenadas de saída: (centímetros)		
X = 0.300		
Y = 31.023		
Z = 0.000		
Momentos de inércia da área, no centroide: (cm ⁴)		
Lxx = 18156.331	Lxy = 0.000	Lxz = 0.000
Lyx = 0.000	Lyy = 5141.440	Lyz = 0.000
Lzx = 0.000	Lzy = 0.000	Lzz = 23297.772
Momento polar de inércia da área, no centroide = 23297.772 cm ⁴		
Ângulo entre os eixos principais e os eixos da peça= 90.000 graus		
Momentos principais de inércia da área, no centroide: (cm ⁴)		
lx = 5141.440		
ly = 18156.331		
Momentos de inércia da área, no sistema de coordenadas de saída: (cm ⁴)		
LXX = 215271.349	LXY = 1906.176	LXZ = 0.000
LYX = 1906.176	LYY = 5159.874	LYZ = 0.000
LZX = 0.000	LZY = 0.000	LZZ = 220431.223

Fonte: Relatório de Simulação SOLIDWORKS.

Para poder ser analisada a deflexão total a análise voltou a ser repetida para o carregamento que considera todas as atuações de quando a laje de concreto já passou por seu processo de cura, e o perfil estrutural agora analisado soma-se com uma segunda mesa de concreto que teve suas propriedades transformadas para o mesmo material do perfil metálico (Figura 27), com isso foi imposto ao modelo uma carga distribuída de 12,00 KN/m. Esse estudo revelou que a viga sofre uma deflexão máxima de 0,58 centímetros, ainda no meio do vão.

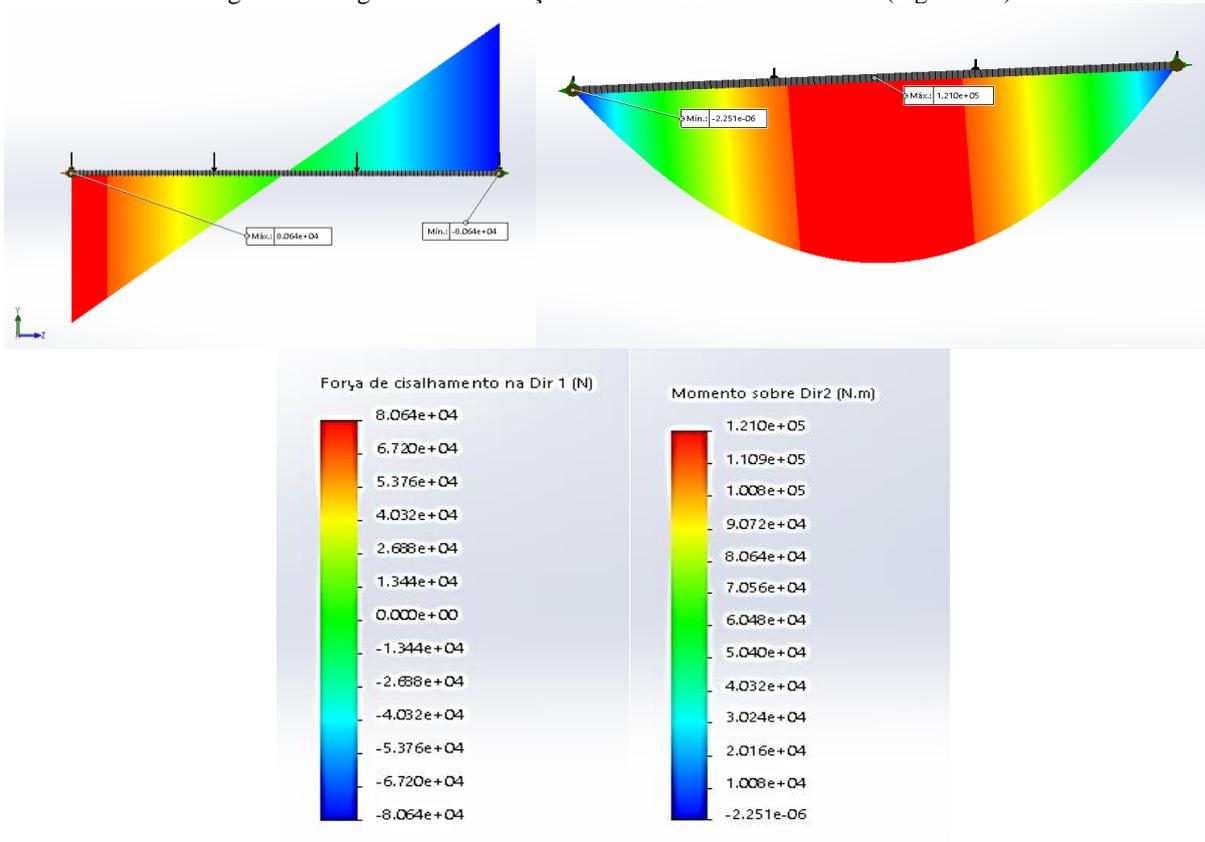
Figura 27-Deslocamento Vertical da Viga Mista (após a cura).



Fonte: Autoria própria (2019).

A terceira análise a ser realizada na viga mista emprega o carregamento em combinações normais com carga distribuída de 26,88 KN/m. Para este caso também foram elaborados os diagramas de momento fletor e de esforços cortantes que também apresentaram valores condizentes aos aplicados para o dimensionamento analítico.

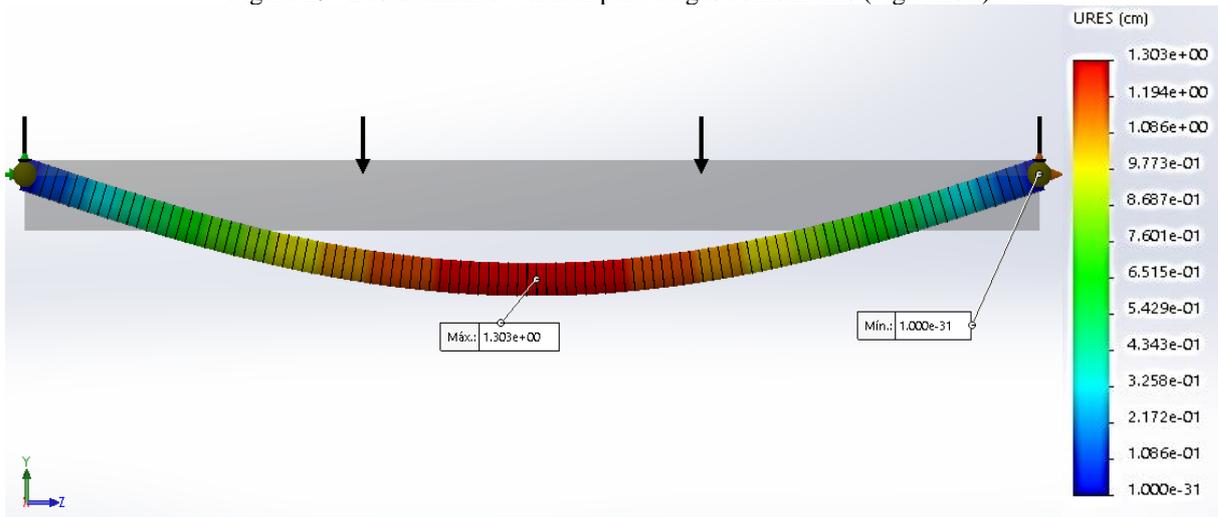
Figura 28-Diagrama dos Esforços Cortantes e Momento Fletor (viga mista).



Fonte: Autoria própria (2019).

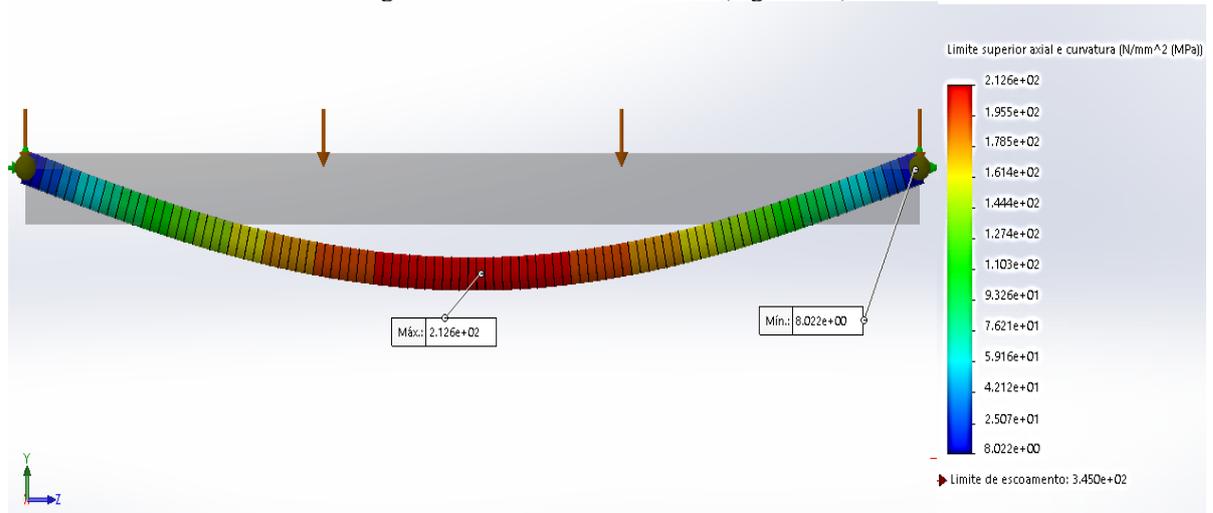
As malhas seguintes apresentam a verificação dos deslocamentos (Figura 29) para o esforço combinado e para as Tensões de Von Mises (Figura 30).

Figura 29- Deslocamento Vertical para cargas combinadas (viga mista).



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 30-Tensões de Von Mises (viga mista).



Fonte: Autoria própria (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estrutura metálica

A Tabela 22 reúne as principais informações adquiridas acerca da viga metálica no decorrer do estudo. Em seguida é comentado acerca de cada informação fornecida na tabela.

Tabela 22- Deslocamentos Verticais principais (viga metálica).

LINHA	PROPRIEDADE	ESTUDO	ESTUDO	UNID.
		ANALÍTICO	NUMÉRICO	
01	INÉRCIA	15690	15289	cm ⁴
02	M _{sd}	120,96	120,96	KN.m
03	V _{sd}	80,64	80,64	KN
04	δ _{lim}	1,71	1,71	cm
05	δ _{ser}	1,03	1,09	cm
06	δ _{nor}	1,45	1,54	cm

Fonte: Autoria própria (2019).

LINHA 01 – INÉRCIA: A propriedade de inércia apresenta disparidade entre os dois estudos. Isso ocorre devido ao analítico ser um valor de catálogo, não tendo sido calculado ou comprovado antes do uso, já o valor da inércia no estudo numérico leva em consideração exatamente a geometria do perfil inserido no programa.

LINHA 02 – Momento Fletor Solicitante de Cálculo: O valor utilizado para o dimensionamento analítico como parâmetro máximo de flexão, foi o mesmo utilizado pelo estudo numérico do SOLIDWORKS, essa comprovação se dá na Figura 21.

LINHA 03 – Força Cortante Solicitante de Cálculo: O valor utilizado para o dimensionamento analítico como parâmetro máximo de cortante, foi o mesmo utilizado pelo estudo numérico do SOLIDWORKS, essa comprovação se dá na Figura 21.

LINHA 04 – Deslocamento Vertical Limite: O valor do deslocamento limite máximo segue as recomendações do Anexo C da ABNT NBR 8800:2008.

LINHA 05 – Deslocamento de Serviço: A diferença dos deslocamentos calculados é de 0,6 milímetros, além da distinção entre os estudos aplicados, essa disparidade também advém do fato de que as inércias empregadas sofrem alterações, o que se torna condizente devido a relação de inversão de proporcionalidade entre essas duas propriedades.

LINHA 06 – Deslocamento devido à combinação de cargas: a diferença entre os dois estudos foi de 0,9 milímetros. Ainda sendo maior que os deslocamentos de serviço, não atinge os valores máximos especificados em norma.

A malha executada pelo SOLIDWORKS gerou 107 nós, que estão descritos detalhadamente no Anexo A, com as tensões determinadas em cada um dos planos x, y e z, tensões principais, Tensões de Von Mises e o deslocamento resultante.

Nesta seção serão apresentados alguns nós que nos mostram maior interesse de análise que são exatamente os que ocorrem próximos ao meio do vão, que apresentaram maior deflexão resultante, assim como as maiores tensões.

Analisando os dados presentes na Tabela 23, percebe-se também a simetria que ocorre nos centro do vão, o que já havia sido observado em diagramas anteriormente apresentados.

Tabela 23- Principais pontos de tensões (viga metálica).

Nó	σ_x (MPa)	σ_z (MPa)	τ_{xy} (MPa)	σ_1 (MPa)	<i>Von Mises</i> (MPa)	URES (cm)
51	-5,7E-20	159,214	1,34E-41	159,214	159,214	1,53595
52	-5,7E-20	159,446	2,07E-41	159,446	159,446	1,53861
53	-5,7E-20	159,562	3,96E-41	159,562	159,562	1,53994
54	-5,7E-20	159,562	1,01E-40	159,562	159,562	1,53994
55	-5,7E-20	159,446	1,03E-40	159,446	159,446	1,53861
56	-5,7E-20	159,214	4,44E-41	159,214	159,214	1,53595

Fonte: Autoria própria (2019).

4.2 Estrutura mista

A Tabela 24 reúne as principais informações adquiridas acerca da viga mista de aço e concreto no decorrer do estudo. Em seguida é comentado acerca de cada informação fornecida na tabela.

Tabela 24-Deslocamentos Verticais Principais (viga mista).

ANTES DA CURA				
LINHA	PROPRIEDADE	ESTUDO ANALÍTICO	ESTUDO NUMÉRICO	UNID.
01	INÉRCIA	5500	5315	cm ⁴
02	M _{Sd1}	45,36	45,36	KN.m
03	δ ₁	1,1	1,17	cm
DEPOIS DA CURA				
LINHA	PROPRIEDADE	ESTUDO ANALÍTICO	ESTUDO NUMÉRICO	UNID.
04	INÉRCIA	18586	18156	cm ⁴
05	M _{Sd2}	75,6	75,6	KN.m
06	δ ₂	0,54	0,58	cm
TOTAL				
LINHA	PROPRIEDADE	ESTUDO ANALÍTICO	ESTUDO NUMÉRICO	UNID.
07	δ _{lim}	1,71	1,71	cm
08	δ _{ser}	1,64	1,75	cm
COMBINAÇÃO DE CARGAS				
LINHA	PROPRIEDADE	ESTUDO ANALÍTICO	ESTUDO NUMÉRICO	UNID.
09	M _{Sd}	120,96	120,96	KN.m
10	V _{Sd}	80,64	80,64	KN
11	δ _{nor}	1,22	1,3	cm

Fonte: Autoria própria (2019).

LINHA 01 e LINHA 04 – INÉRCIA: A propriedade de inércia apresenta disparidade entre os dois estudos. Isso ocorre devido ao analítico ser um valor de catálogo, não tendo sido calculado ou comprovado antes do uso, já o valor da inércia no estudo numérico leva em consideração exatamente a geometria do perfil inserido no programa.

LINHA 02, LINHA 05 e LINHA 09 – Momento Fletor Solicitante de Cálculo: O valor utilizado para o dimensionamento analítico como parâmetro máximo de flexão fatorado para cargas suportadas apenas pelo perfil metálico (LINHA 02), pelo perfil com a seção da laje de concreto transformada (LINHA 05) e pelo perfil misto solicitado por as combinações normais (LINHA 09), foi o mesmo utilizado pelo estudo numérico do SOLIDWORKS.

LINHA 03 e LINHA 06 – Deslocamento de Serviço: A diferença dos deslocamentos calculados é de 0,7 milímetros (antes da cura) e de 0,4 milímetros (após a cura), além da distinção entre os estudos aplicados, essa disparidade também advém do fato de que as

inércias empregadas sofrem alterações, o que se torna condizente devido a relação de inversão de proporcionalidade entre essas duas propriedades.

LINHA 07 – Deslocamento Vertical Limite: O valor do deslocamento limite máximo segue as recomendações do Anexo C da ABNT NBR 8800:2008.

LINHA 08 – Deslocamento de Serviço: Aqui os deslocamentos de serviço são somados (LINHA 03 e LINHA 06). A diferença dos deslocamentos obtidos nos dois métodos é de 1,1 milímetros. Além disso a soma dos deslocamentos pela a análise numérica apresentou o valor de 1,75 centímetros ultrapassando em 0,4 milímetros o estabelecido em norma.

LINHA 10 – Força Cortante Solicitante de Cálculo: O valor utilizado para o dimensionamento analítico como parâmetro máximo de cortante, foi o mesmo utilizado pelo estudo numérico do SOLIDWORKS, essa comprovação se dá na Figura 28.

LINHA 11 – Deslocamento devido à combinação de cargas: a diferença entre os dois estudos foi de 0,8 milímetros. Interessante ressaltar ainda que com a combinação de cargas as deflexões na viga mista apresentaram-se bem menores do que quando somadas nas de serviço (LINHA 08), não apresentando aqui nenhuma desconformidade com o valor estabelecido em norma (LINHA 07).

Como expresso anteriormente para a viga metálica, também fora pormenorizado cada um dos 107 nós gerados para malha da viga mista de aço e concreto em que parte da laje exerce função estrutural de viga, as informações de tensões nos planos x, y e z, tensões principais, Tensões de Von Mises e deslocamento resultante constam no Anexo B. No entanto, nesta seção também serão apresentados os nós centrais do vão como realizado para o estudo da viga metálica. A análise acerca desses pontos (Tabela 25) também revela maiores deflexões resultantes e maiores tensões.

Tabela 25-Principais pontos de tensões (viga mista).

Nó	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)	σ_1 (MPa)	Von Mises (MPa)	URES (cm)
51	-7,3E-16	212,124	2,65E-08	212,124	212,124	1,29963
52	-7,0E-16	212,432	7,06E-08	212,432	212,432	1,30188
53	-7,1E-16	212,587	5,19E-08	212,587	212,587	1,30301
54	-7,5E-16	212,587	4,25E-08	212,587	212,587	1,30301
55	-7,3E-16	212,432	2,65E-08	212,432	212,432	1,30188
56	-7,3E-16	212,124	3,42E-08	212,124	212,124	1,29963

Fonte: Autoria própria (2019).

4.3 Análise comparativa

Na presente seção serão tratados os dados obtidos através da modelagem numérica, tendo em vista que essa fora validada ao ser comparada com o dimensionamento analítico realizado nas seções 3.5 e 3.6.

4.3.1 Deslocamento Total

A Tabela 26 apresenta os deslocamentos para as combinações raras de serviço (δ_{ser}) e para as combinações últimas normais (δ_{nor}), assim como a relação entre esses resultados.

Para as combinações raras de serviço a viga mista apresentou deflexão de 60,6% a mais que a viga metálica, como também excedeu em 2,3% o deslocamento máximo recomendado na ABNT NBR 8800:2008. Em contrapartida, para as combinações normais a viga mista apresentou deflexão 15,6% menor que a viga metálica.

Tabela 26- Comparativo de deslocamentos verticais.

DESLOCAMENTO	METÁLICA	MISTA
δ_{lim}	1,71	1,71
δ_{ser}	1,09	1,75
δ_{nor}	1,54	1,30
(MISTA/METÁLICA)		
SERVIÇO		1,606
NORMAIS		0,844

Fonte: Aatoria própria (2019).

4.3.2 Tensões Principais e Tensões de Von Mises

A seguir na Tabela 27 estão dispostos os nós 53 dos dois modelos estruturais, pontos que foram escolhidos por apresentarem as maiores tensões tanto principais quanto tensões de Von Mises, tendo a viga mista apresentado uma tensão maior em 33,2%, para os dois tipos de tensão.

Ainda considerando a Tabela 27, observa-se que o plano de tensão desenvolvido nesses nós, para os dois modelos, expressam tensões em dois dos planos, sendo que em um deles apresenta tensão de compressão, mas com valores muito baixos próximos a zero, ou seja, a tensão desenvolvida no plano Y será determinante das tensões principais, assim como das tensões de Von Mises.

Tabela 27- Comparativo de tensões.

	Nó	σ_x (MPa)	σ_z (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)	τ_{xz} (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)	Von Mises (MPa)
METÁLICA	53	-5,7E-20	0	159,562	3,96E-41	0	159,562	0	0	159,562
MISTA	53	-7,10E-16	0	212,587	5,19E-08	0	212,587	0	0	212,587

Fonte: Autoria própria (2019).

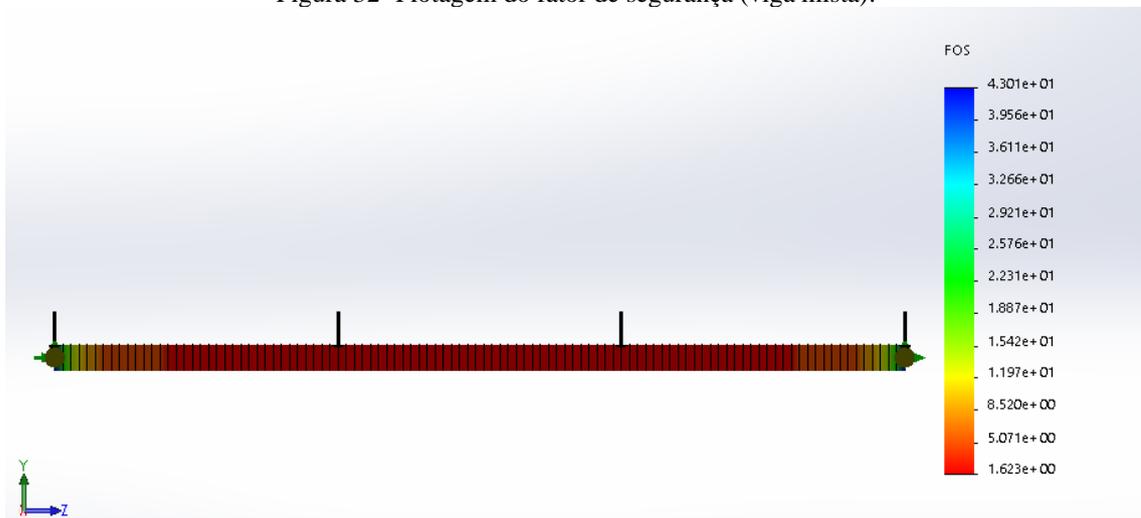
Em relação a tensão de escoamento de 345,00 MPa o elemento metálico apresenta um fator de segurança de 2,16 (Figura 31) e o misto 1,62 (Figura 32). Ainda é possível observar que a viga mista possui suas tensões, aproximadamente, 25% mais elevada.

Figura 31- Plotagem do Fator de segurança (viga metálica).



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 32- Plotagem do fator de segurança (viga mista).



Fonte: Autoria própria (2019).

4.3.3 Seção do Perfil Metálico

Para comparar o consumo de aço entre os dois modelos, será tomado como base os dados catalogados para os perfis escolhidos no dimensionamento analítico (Tabela 28).

Percebe-se uma redução de 23,3% na altura do perfil e de 38,6% na massa linear da viga mista, esses fatores, isoladamente, refletem de forma positiva na arquitetura e nos custos.

Tabela 28- Comparativo dos perfis metálicos.

	Perfil	área (cm²)	D (cm)	Massa (kg/m)
METÁLICA	W 410X46,1	59,2	40,3	46,1
MISTA	W 310X28,3	36,5	30,9	28,3

Fonte: BELLEI (2008, p.415,416)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho desenvolveu o estudo de dois sistemas de vigamentos secundários diferentes: metálico e misto de aço e concreto; de um modelo base concebido para atender ao uso e ocupação de escritórios.

Os dois sistemas foram dimensionados e detalhados pelo método analítico, os quais permitiram a obtenção de perfis laminados em I de abas paralelas. Para os elementos metálicos o mais adequado fora o perfil W 410 X 46,1 e para o misto W 310 x 23,8. Tais geometrias foram submetidas a modelagem numérica no SOLIDWORKS onde puderam apresentar minuciosamente seu comportamento estrutural, tornando possível o levantamento de dados para a orientação acerca do sistema mais adequado.

Quanto aos deslocamentos totais, observou-se que o modelo misto excede em 0,6 milímetros o limite estabelecido na norma para as combinações raras de serviços, apresentando-se ainda 60,6% maior que a deflexão do modelo metálico para esta situação de combinação. No entanto, para as combinações últimas normais o protótipo virtual misto mostrou-se satisfatório e com deflexão de 15,6% a menos que o metálico.

Para a análise de tensões, foram estudados o comportamento dos nós mais centrais do vão, nos quais desenvolveu-se as tensões máximas, o modelo que apresentou maiores resultados foi o misto, portando 25% a mais que a metálica. O que originou fatores de segurança menores no desenvolver da viga mista.

Por último, quanto ao comparativo de consumo de material metálico, o perfil misto de aço e concreto reduz a massa linear do elemento em 38,6%, ou seja, 17,8 Kg de aço a menos para cada metro de viga secundária.

A partir dos resultados obtidos foi possível identificar que o elemento misto, embora apresente diversas vantagens, na situação de combinação rara de serviço tornou-se incompatível com o recomendado por norma, o que o tornaria inviável, sendo o sistema metálico o mais adequado.

Contudo, algumas ressalvas acerca dessa falha devem ser expressas. No dimensionamento analítico foram empregados dados catalogados dos perfis metálico, que apresentam todas as características necessárias para o dimensionamento, entre elas inércia, distância entre as faces externas da mesa, espessuras, entre outros. Ao ser modelado no SOLIDWORKS a geometria sofre algumas distorções nessas características, colaborando para que ocorresse esse transpasse.

É importante evidenciar, novamente, que não há o sistema ideal para sempre ser aplicado. E é indispensável que para toda concepção de projeto os fatores que neste trabalho foram considerados sejam analisados e adaptados, em conjunto com todas as outras diversas condições que o universo único de cada obra apresenta.

Por fim, como recomendação para estudos futuros, sugere-se a análise da interação do vigamento secundário com o principal, para os dois tipos de sistemas apresentados, assim como o comportamento da transmissão de cargas para os elementos estruturais verticais, pilares, e por conseguinte as fundações.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Augusto Teixeira. **Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado**. 97p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998. Disponível em: <http://web.set.eesc.usp.br/static/data/producao/1999ME_AugustoTeixeiradeAlbuquerque.pdf> Acesso em: 30 out 2019 às 02:40.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2 ed. Rio de Janeiro, 2008.
- BATTAGIN, Arnaldo Forti. **Cuidados ao construir em áreas litorâneas**. ABCP. 20 julho 2010. Disponível em: <<https://abcp.org.br/imprensa/noticias/cuidados-ao-construir-em-areas-litoraneas/>>. Acesso em: 30 out 2019 às 03:00.
- BELLEI, Ildony H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Mauro O.. **EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS ANDARES EM AÇO**. 2. ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 2008
- DULTRA, Cinthya Lorena Bueno de Souza; MIRANDA, Milanne de Carvalho. **DIMENSIONAMENTO DE VIGAS MISTAS**. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unievangélica, Anápolis, 2017.
- HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- INABARE COELHO, Roberto e Cátia; **A evolução da Construção em Aço no Brasil**. CBCA- Centro Brasileiro da Construção do Aço.2015. Disponível em:<<https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/noticias-detalhes.php?cod=7074> > Acesso em: 19 out 2019 as 14:10.
- LIMA, Caio Ivson Vasconcelos et al. **CONCRETO E SUAS INOVAÇÕES**. **Cadernos de Graduação**, Maceió, v. 1, n. 1, p.31-40, maio 2014
- OLIVEIRA, Letícia Cardoso de. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ESTRUTURAS DE AÇO E ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO APLICADAS A EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS ANDARES**. 155 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- PFEIL, Michele; PFEIL, Walter. **Estruturas de Aço – Dimensionamento prático – Dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800**; 2008. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- PINHEIRO, Antonio C. da F. Bragança. **Estruturas metálicas: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos**. 2.ed. São Paulo: Saraiva, 2005.

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: 01 nov 2019 às 10:00.

SANTOS, Tiago José. **Edifícios de múltiplos pavimentos estruturados em concreto, aço e elementos mistos de aço e concreto: análise comparativa**. 122p. TCC (Graduação). Engenharia Civil.. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. São Carlos,. Universidade de São Carlos. 2010. Disponível em: < <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11562>>. Acesso em: 19 out 2019 as 15:00.

**ANEXO A – TABELA DE TENSÕES E DEFORMAÇÃO RESULTANTE DA MALHA
DA VIGA METÁLICA**

(continua)

Nó	σ_x	σ_z	Σ_y	τ_{xy}	τ_{xz}	σ_1	σ_2	σ_3	Von Mises	URES
1	-8,30E-20	0,00E+00	3,90E-07	5,90E-42	0,00E+00	3,90E-07	0,00E+00	-8,30E-20	3,90E-07	1,00E-31
2	-6,90E-20	0,00E+00	6,00E+00	6,70E-42	0,00E+00	6,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,00E+00	4,70E-02
3	-5,70E-20	0,00E+00	1,20E+01	2,50E-41	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+01	9,50E-02
4	-5,70E-20	0,00E+00	1,80E+01	9,30E-43	0,00E+00	1,80E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,80E+01	1,40E-01
5	-5,70E-20	0,00E+00	2,30E+01	4,50E-41	0,00E+00	2,30E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,90E+01	1,90E-01
6	-5,70E-20	0,00E+00	2,90E+01	5,90E-41	0,00E+00	2,90E+01	0,00E+00	0,00E+00	3,40E+01	2,40E-01
7	-5,70E-20	0,00E+00	3,40E+01	4,80E-41	0,00E+00	3,40E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,00E+01	2,80E-01
8	-5,70E-20	0,00E+00	4,00E+01	2,50E-41	0,00E+00	4,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,50E+01	3,30E-01
9	-5,70E-20	0,00E+00	4,50E+01	1,70E-41	0,00E+00	4,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,00E+01	3,70E-01
10	-4,60E-20	0,00E+00	5,00E+01	4,10E-41	0,00E+00	5,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,50E+01	4,20E-01
11	-4,60E-20	0,00E+00	5,50E+01	2,40E-41	0,00E+00	5,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,00E+01	4,60E-01
12	-6,70E-20	0,00E+00	6,00E+01	7,30E-42	0,00E+00	6,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,50E+01	5,10E-01
13	-6,70E-20	0,00E+00	6,50E+01	3,60E-42	0,00E+00	6,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,90E+01	5,50E-01
14	-5,70E-20	0,00E+00	6,90E+01	9,80E-42	0,00E+00	6,90E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,40E+01	6,00E-01
15	-5,70E-20	0,00E+00	7,40E+01	1,10E-41	0,00E+00	7,40E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,80E+01	6,40E-01
16	-5,70E-20	0,00E+00	7,80E+01	2,40E-41	0,00E+00	7,80E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,20E+01	6,80E-01
17	-5,70E-20	0,00E+00	8,20E+01	8,10E-42	0,00E+00	8,20E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,70E+01	7,20E-01
18	-5,70E-20	0,00E+00	8,70E+01	3,50E-41	0,00E+00	8,70E+01	0,00E+00	0,00E+00	9,10E+01	7,60E-01
19	-5,70E-20	0,00E+00	9,10E+01	3,00E-42	0,00E+00	9,10E+01	0,00E+00	0,00E+00	9,50E+01	8,00E-01
20	-5,70E-20	0,00E+00	9,50E+01	6,90E-41	0,00E+00	9,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	9,80E+01	8,40E-01
21	-5,70E-20	0,00E+00	9,80E+01	1,40E-40	0,00E+00	9,80E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+02	8,80E-01
22	-5,70E-20	0,00E+00	1,00E+02	1,40E-40	0,00E+00	1,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,10E+02	9,20E-01
23	-5,70E-20	0,00E+00	1,10E+02	4,80E-41	0,00E+00	1,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,10E+02	9,50E-01
24	-5,70E-20	0,00E+00	1,10E+02	6,70E-41	0,00E+00	1,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,10E+02	9,90E-01
25	-5,70E-20	0,00E+00	1,10E+02	9,30E-41	0,00E+00	1,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	1,00E+00
26	-5,70E-20	0,00E+00	1,20E+02	1,90E-41	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	1,10E+00
27	-5,70E-20	0,00E+00	1,20E+02	4,00E-41	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	1,10E+00
28	-5,70E-20	0,00E+00	1,20E+02	4,50E-41	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	1,10E+00
29	-5,70E-20	0,00E+00	1,20E+02	1,40E-41	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,30E+02	1,20E+00
30	-5,70E-20	0,00E+00	1,30E+02	1,40E-41	0,00E+00	1,30E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,30E+02	1,20E+00
31	-5,70E-20	0,00E+00	1,30E+02	1,30E-41	0,00E+00	1,30E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,30E+02	1,20E+00
32	-5,70E-20	0,00E+00	1,30E+02	3,30E-42	0,00E+00	1,30E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	1,20E+00
33	-5,70E-20	0,00E+00	1,40E+02	1,40E-41	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	1,30E+00
34	-5,70E-20	0,00E+00	1,40E+02	1,40E-42	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	1,30E+00
35	-5,70E-20	0,00E+00	1,40E+02	2,50E-41	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	1,30E+00
36	-5,70E-20	0,00E+00	1,40E+02	4,40E-41	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	1,30E+00

(continuação)

Nó	σ_x	σ_z	Σ_y	τ_{xy}	τ_{xz}	σ_1	σ_2	σ_3	Von Mises	URES
37	-5,70E-20	0,00E+00	1,40E+02	2,70E-41	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,40E+00
38	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	2,20E-41	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,40E+00
39	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	1,10E-40	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,40E+00
40	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	1,10E-40	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,40E+00
41	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	1,90E-41	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,40E+00
42	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	5,80E-41	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,50E+00
43	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	4,50E-41	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,50E+00
44	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	3,90E-41	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
45	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	1,30E-40	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
46	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	1,30E-40	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
47	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	6,50E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
48	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	2,50E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
49	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	3,40E-42	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
50	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	3,50E-42	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
51	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	1,30E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
52	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	2,10E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
53	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	4,00E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
54	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	1,00E-40	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
55	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	1,00E-40	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
56	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	4,40E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
57	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	1,80E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
58	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	1,10E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
59	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	2,70E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
60	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	6,30E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
61	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	5,80E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	1,50E+00
62	-5,70E-20	0,00E+00	1,60E+02	1,90E-41	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,50E+00
63	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	2,20E-42	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,50E+00
64	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	2,90E-43	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,50E+00
65	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	3,10E-42	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,50E+00
66	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	1,10E-41	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,40E+00
67	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	2,20E-41	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,40E+00
68	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	2,60E-41	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	1,40E+00
69	-5,70E-20	0,00E+00	1,50E+02	3,30E-41	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	1,40E+00
70	-5,70E-20	0,00E+00	1,40E+02	2,10E-41	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	1,40E+00
71	-5,70E-20	0,00E+00	1,40E+02	4,80E-42	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	1,30E+00
72	-5,70E-20	0,00E+00	1,40E+02	3,60E-41	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	1,30E+00
73	-5,70E-20	0,00E+00	1,40E+02	4,30E-41	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	1,30E+00
74	-5,70E-20	0,00E+00	1,40E+02	8,50E-43	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,30E+02	1,30E+00
75	-5,70E-20	0,00E+00	1,30E+02	6,80E-41	0,00E+00	1,30E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,30E+02	1,20E+00

(conclusão)

Nó	σ_x	σ_z	Σ_y	τ_{xy}	τ_{xz}	σ_1	σ_2	σ_3	Von Mises	URES
76	-5,70E-20	0,00E+00	1,30E+02	6,50E-41	0,00E+00	1,30E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,30E+02	1,20E+00
77	-5,70E-20	0,00E+00	1,30E+02	4,80E-42	0,00E+00	1,30E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	1,20E+00
78	-5,70E-20	0,00E+00	1,20E+02	9,40E-42	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	1,20E+00
79	-5,70E-20	0,00E+00	1,20E+02	8,40E-42	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	1,10E+00
80	-5,70E-20	0,00E+00	1,20E+02	9,80E-42	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	1,10E+00
81	-5,70E-20	0,00E+00	1,20E+02	1,10E-41	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,10E+02	1,10E+00
82	-5,70E-20	0,00E+00	1,10E+02	2,80E-41	0,00E+00	1,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,10E+02	1,00E+00
83	-5,70E-20	0,00E+00	1,10E+02	1,30E-41	0,00E+00	1,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,10E+02	9,90E-01
84	-5,70E-20	0,00E+00	1,10E+02	3,20E-42	0,00E+00	1,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+02	9,50E-01
85	-5,70E-20	0,00E+00	1,00E+02	5,20E-42	0,00E+00	1,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	9,80E+01	9,20E-01
86	-5,70E-20	0,00E+00	9,80E+01	1,00E-42	0,00E+00	9,80E+01	0,00E+00	0,00E+00	9,50E+01	8,80E-01
87	-5,70E-20	0,00E+00	9,50E+01	1,00E-41	0,00E+00	9,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	9,10E+01	8,40E-01
88	-5,70E-20	0,00E+00	9,10E+01	2,50E-42	0,00E+00	9,10E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,70E+01	8,00E-01
89	-5,70E-20	0,00E+00	8,70E+01	3,70E-41	0,00E+00	8,70E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,20E+01	7,60E-01
90	-5,70E-20	0,00E+00	8,20E+01	9,20E-41	0,00E+00	8,20E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,80E+01	7,20E-01
91	-5,70E-20	0,00E+00	7,80E+01	8,90E-41	0,00E+00	7,80E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,40E+01	6,80E-01
92	-5,70E-20	0,00E+00	7,40E+01	3,10E-41	0,00E+00	7,40E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,90E+01	6,40E-01
93	-5,70E-20	0,00E+00	6,90E+01	1,30E-41	0,00E+00	6,90E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,50E+01	6,00E-01
94	-6,70E-20	0,00E+00	6,50E+01	1,50E-41	0,00E+00	6,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,00E+01	5,50E-01
95	-6,70E-20	0,00E+00	6,00E+01	2,60E-41	0,00E+00	6,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,50E+01	5,10E-01
96	-4,60E-20	0,00E+00	5,50E+01	8,30E-41	0,00E+00	5,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,00E+01	4,60E-01
97	-4,60E-20	0,00E+00	5,00E+01	7,10E-41	0,00E+00	5,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,50E+01	4,20E-01
98	-5,70E-20	0,00E+00	4,50E+01	1,50E-41	0,00E+00	4,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,00E+01	3,70E-01
99	-5,70E-20	0,00E+00	4,00E+01	1,00E-40	0,00E+00	4,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	3,40E+01	3,30E-01
100	-5,70E-20	0,00E+00	3,40E+01	1,10E-40	0,00E+00	3,40E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,90E+01	2,80E-01
101	-5,70E-20	0,00E+00	2,90E+01	4,20E-41	0,00E+00	2,90E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,30E+01	2,40E-01
102	-5,70E-20	0,00E+00	2,30E+01	2,40E-41	0,00E+00	2,30E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,80E+01	1,90E-01
103	-5,70E-20	0,00E+00	1,80E+01	3,30E-41	0,00E+00	1,80E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+01	1,40E-01
104	-5,70E-20	0,00E+00	1,20E+01	4,10E-42	0,00E+00	1,20E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,00E+00	9,50E-02
105	-6,90E-20	0,00E+00	6,00E+00	7,20E-42	0,00E+00	6,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,70E-07	4,70E-02
106	-8,30E-20	0,00E+00	-1,70E-07	1,60E-41	0,00E+00	-8,30E-20	0,00E+00	-1,70E-07	0,00E+00	1,00E-31
107	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00		1,00E-31

**ANEXO B – TABELA DE TENSÕES E DEFORMAÇÃO RESULTANTE DA MALHA
DA VIGA MISTA DE AÇO E CONCRETO**

Nó	σ_x	σ_z	σ_y	τ_{xy}	τ_{xz}	σ_1	σ_2	σ_3	Von Mises	URES
1	-6,80E-16	0,00E+00	-4,00E-09	2,10E-06	0,00E+00	2,10E-06	0,00E+00	-2,10E-06	3,60E-06	1,00E-31
2	-7,20E-16	0,00E+00	8,00E+00	1,00E-06	0,00E+00	8,00E+00	0,00E+00	-1,30E-13	8,00E+00	4,00E-02
3	-8,90E-16	0,00E+00	1,60E+01	1,30E-07	0,00E+00	1,60E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+01	8,00E-02
4	-8,10E-16	0,00E+00	2,40E+01	2,40E-07	0,00E+00	2,40E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,40E+01	1,20E-01
5	-7,50E-16	0,00E+00	3,10E+01	1,60E-07	0,00E+00	3,10E+01	0,00E+00	0,00E+00	3,10E+01	1,60E-01
6	-8,60E-16	0,00E+00	3,90E+01	1,40E-07	0,00E+00	3,90E+01	0,00E+00	0,00E+00	3,90E+01	2,00E-01
7	-7,20E-16	0,00E+00	4,60E+01	1,70E-08	0,00E+00	4,60E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,60E+01	2,40E-01
8	-7,20E-16	0,00E+00	5,30E+01	4,50E-08	0,00E+00	5,30E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,30E+01	2,80E-01
9	-7,70E-16	0,00E+00	6,00E+01	2,20E-08	0,00E+00	6,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,00E+01	3,20E-01
10	-7,00E-16	0,00E+00	6,70E+01	1,40E-07	0,00E+00	6,70E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,70E+01	3,50E-01
11	-6,80E-16	0,00E+00	7,30E+01	6,60E-08	0,00E+00	7,30E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,30E+01	3,90E-01
12	-7,00E-16	0,00E+00	8,00E+01	5,50E-10	0,00E+00	8,00E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,00E+01	4,30E-01
13	-6,80E-16	0,00E+00	8,60E+01	1,60E-07	0,00E+00	8,60E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,60E+01	4,70E-01
14	-7,20E-16	0,00E+00	9,20E+01	5,90E-08	0,00E+00	9,20E+01	0,00E+00	0,00E+00	9,20E+01	5,00E-01
15	-7,70E-16	0,00E+00	9,80E+01	1,30E-07	0,00E+00	9,80E+01	0,00E+00	0,00E+00	9,80E+01	5,40E-01
16	-8,00E-16	0,00E+00	1,00E+02	4,60E-08	0,00E+00	1,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+02	5,80E-01
17	-8,30E-16	0,00E+00	1,10E+02	2,20E-08	0,00E+00	1,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,10E+02	6,10E-01
18	-8,20E-16	0,00E+00	1,20E+02	2,00E-08	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	6,50E-01
19	-8,00E-16	0,00E+00	1,20E+02	1,00E-07	0,00E+00	1,20E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+02	6,80E-01
20	-8,10E-16	0,00E+00	1,30E+02	8,60E-08	0,00E+00	1,30E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,30E+02	7,10E-01
21	-7,70E-16	0,00E+00	1,30E+02	1,50E-07	0,00E+00	1,30E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,30E+02	7,40E-01
22	-7,50E-16	0,00E+00	1,40E+02	8,20E-08	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	7,80E-01
23	-7,50E-16	0,00E+00	1,40E+02	5,70E-08	0,00E+00	1,40E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,40E+02	8,10E-01
24	-7,40E-16	0,00E+00	1,50E+02	1,60E-07	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	8,40E-01
25	-7,40E-16	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	8,70E-01
26	-7,50E-16	0,00E+00	1,50E+02	1,00E-08	0,00E+00	1,50E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,50E+02	9,00E-01
27	-7,40E-16	0,00E+00	1,60E+02	5,80E-08	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	9,20E-01
28	-7,60E-16	0,00E+00	1,60E+02	1,20E-07	0,00E+00	1,60E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,60E+02	9,50E-01
29	-7,60E-16	0,00E+00	1,70E+02	1,50E-07	0,00E+00	1,70E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,70E+02	9,80E-01
30	-7,50E-16	0,00E+00	1,70E+02	1,10E-07	0,00E+00	1,70E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,70E+02	1,00E+00
31	-7,60E-16	0,00E+00	1,70E+02	7,20E-08	0,00E+00	1,70E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,70E+02	1,00E+00
32	-7,70E-16	0,00E+00	1,80E+02	4,50E-08	0,00E+00	1,80E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,80E+02	1,00E+00
33	-7,60E-16	0,00E+00	1,80E+02	8,80E-09	0,00E+00	1,80E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,80E+02	1,10E+00
34	-7,60E-16	0,00E+00	1,80E+02	1,60E-07	0,00E+00	1,80E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,80E+02	1,10E+00
35	-7,60E-16	0,00E+00	1,90E+02	6,20E-08	0,00E+00	1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,90E+02	1,10E+00
36	-7,60E-16	0,00E+00	1,90E+02	1,20E-07	0,00E+00	1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,90E+02	1,10E+00
37	-7,60E-16	0,00E+00	1,90E+02	8,20E-08	0,00E+00	1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,90E+02	1,20E+00

(continuação)

Nó	σ_x	σ_z	Σy	τ_{xy}	τ_{xz}	σ_1	σ_2	σ_3	Von Mises	URES
38	-7,60E-16	0,00E+00	1,90E+02	1,50E-08	0,00E+00	1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,90E+02	1,20E+00
39	-7,50E-16	0,00E+00	2,00E+02	2,80E-09	0,00E+00	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+02	1,20E+00
40	-7,40E-16	0,00E+00	2,00E+02	2,60E-08	0,00E+00	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+02	1,20E+00
41	-7,40E-16	0,00E+00	2,00E+02	3,60E-08	0,00E+00	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+02	1,20E+00
42	-7,40E-16	0,00E+00	2,00E+02	2,20E-08	0,00E+00	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+02	1,20E+00
43	-7,20E-16	0,00E+00	2,00E+02	1,70E-09	0,00E+00	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+02	1,20E+00
44	-7,20E-16	0,00E+00	2,10E+02	2,00E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
45	-7,30E-16	0,00E+00	2,10E+02	7,30E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
46	-7,00E-16	0,00E+00	2,10E+02	1,40E-07	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
47	-7,00E-16	0,00E+00	2,10E+02	1,10E-07	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
48	-6,90E-16	0,00E+00	2,10E+02	2,10E-06	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
49	-6,80E-16	0,00E+00	2,10E+02	2,10E-06	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
50	-7,30E-16	0,00E+00	2,10E+02	5,10E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
51	-7,30E-16	0,00E+00	2,10E+02	2,60E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
52	-7,00E-16	0,00E+00	2,10E+02	7,10E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
53	-7,10E-16	0,00E+00	2,10E+02	5,20E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
54	-7,50E-16	0,00E+00	2,10E+02	4,20E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
55	-7,30E-16	0,00E+00	2,10E+02	2,60E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
56	-7,30E-16	0,00E+00	2,10E+02	3,40E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
57	-7,50E-16	0,00E+00	2,10E+02	1,20E-07	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
58	-7,20E-16	0,00E+00	2,10E+02	2,30E-06	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
59	-7,00E-16	0,00E+00	2,10E+02	2,20E-06	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
60	-7,30E-16	0,00E+00	2,10E+02	2,80E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
61	-7,50E-16	0,00E+00	2,10E+02	2,20E-09	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
62	-7,50E-16	0,00E+00	2,10E+02	9,40E-09	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
63	-7,60E-16	0,00E+00	2,10E+02	3,40E-08	0,00E+00	2,10E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,10E+02	1,30E+00
64	-7,80E-16	0,00E+00	2,00E+02	1,10E-08	0,00E+00	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+02	1,20E+00
65	-7,80E-16	0,00E+00	2,00E+02	9,90E-09	0,00E+00	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+02	1,20E+00
66	-7,70E-16	0,00E+00	2,00E+02	2,00E-08	0,00E+00	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+02	1,20E+00
67	-7,80E-16	0,00E+00	2,00E+02	1,20E-08	0,00E+00	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+02	1,20E+00
68	-7,90E-16	0,00E+00	2,00E+02	2,30E-08	0,00E+00	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	2,00E+02	1,20E+00
69	-7,80E-16	0,00E+00	1,90E+02	1,00E-08	0,00E+00	1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,90E+02	1,20E+00
70	-7,70E-16	0,00E+00	1,90E+02	2,60E-08	0,00E+00	1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,90E+02	1,20E+00
71	-7,70E-16	0,00E+00	1,90E+02	1,80E-08	0,00E+00	1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,90E+02	1,10E+00
72	-7,50E-16	0,00E+00	1,90E+02	2,10E-08	0,00E+00	1,90E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,90E+02	1,10E+00
73	-7,50E-16	0,00E+00	1,80E+02	2,40E-08	0,00E+00	1,80E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,80E+02	1,10E+00
74	-7,50E-16	0,00E+00	1,80E+02	3,30E-08	0,00E+00	1,80E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,80E+02	1,10E+00
75	-7,50E-16	0,00E+00	1,80E+02	2,90E-08	0,00E+00	1,80E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,80E+02	1,00E+00
76	-7,50E-16	0,00E+00	1,70E+02	1,50E-08	0,00E+00	1,70E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,70E+02	1,00E+00

