



Centro Universitário de Brasília – UniCEUB

Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS

Renata Lino Bomfim Fialkoski

**ANÁLISE DE DIFERENTES SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA A EXECUÇÃO DA
COBERTURA DA PLATAFORMA SUPERIOR DA RODOVIÁRIA DE BRASÍLIA**

Brasília

2016

Renata Lino Bomfim Fialkoski

**ANÁLISE DE DIFERENTES SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA A EXECUÇÃO DA
COBERTURA DA PLATAFORMA SUPERIOR DA RODOVIÁRIA DE BRASÍLIA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como requisito obrigatório para a
conclusão de Bacharel em Engenharia Civil no
UniCEUB – Centro Universitário de Brasília.

Orientador: Prof. Me. Marco Aurélio Souza
Bessa

Brasília

2016

Renata Lino Bomfim Fialkoski

**ANÁLISE DE DIFERENTES SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA A EXECUÇÃO DA
COBERTURA DA PLATAFORMA SUPERIOR DA RODOVIÁRIA DE BRASÍLIA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como requisito obrigatório para a
conclusão de Bacharel em Engenharia Civil no
UniCEUB – Centro Universitário de Brasília.

Brasília, 17 de agosto de 2016.

Banca Examinadora:

Prof. Me. Marco Aurélio Souza Bessa

Orientador

Prof. Me. Jocinez Nogueira Lima

Examinador Interno

Arquiteto Me. Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa

Examinador Externo

Dedico este trabalho de conclusão de curso à Deus, aos meus pais, Lúcia e Vicente, às minhas irmãs, Alexandra e Fabianne. E em memória de uma grande guerreira, Fátima Giacomini Sophia.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar sempre me iluminando e me guiando por seus caminhos de luz, paz e amor.

Agradeço imensamente à minha mãe, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos me ajudando em tudo. Ao meu pai, Vicente Fialkoski, que sempre acreditou em mim, mesmo quando nem eu acreditei, e sempre incentivou as suas filhas. Às minhas duas irmãs pela paciência e ajuda em todos os momentos difíceis.

Ao professor Paulo Ramos, do ensino fundamental, que fez com que eu me apaixonasse pela matemática. Motivo pelo qual eu ingressei no curso de Engenharia.

Ao professor João Marcos Souza Costa, por me passar o seu conhecimento de forma tão maravilhosa me inspirando a estudar Cálculo mais a fundo, e por ter feito eu me interessar realmente pela Engenharia. Ao professor Jorge Antônio da Cunha Oliveira, por ser um grande exemplo como profissional e pelos conhecimentos compartilhados.

À Pró-Reitora Acadêmica, Elizabeth Regina Lopes Manzur pela ajuda em momentos difíceis.

Às Faculdades, Mackenzie em São Paulo e Uniceub. A todos os professores com os quais tive a honra de estudar. À Diana Benedito pela amizade e apoio. E ao Fies, programa de financiamento estudantil.

Ao Arquivo Público de Brasília, à Novacap e à Administração da Rodoviária de Brasília.

À família Giacomini Sophia por todo apoio, confiança e amor. Especialmente, ao Valdemir, Fátima, Luís, Fernando e Daiane.

À Maria Alice Fialkoski Molenda e ao José Molenda, por toda ajuda e confiança, que foram imprescindíveis para mim.

À família Miranda Nogueira, por toda ajuda, força, paciência e amor. Principalmente a Maria Alvina e o João Paulo. Ao meu amigo de infância e agora amigo de profissão, Felipe Ribeiro, por toda a ajuda, força, conselhos e amizade. À minha grande amiga, Ananda Streit, por sempre estar ao meu lado. Às minhas amigas, Maria Luiza Braga e Viviane Pedroso Pazinni, por toda a ajuda e força.

Aos meus amigos e mentores, Jocinez Nogueira Lima e Marco Aurélio Souza Bessa por toda a ajuda, paciência, compreensão e conhecimentos compartilhados. Inclusive quando tive um problema de saúde durante o período em que concluía a monografia.

RESUMO

Nesse trabalho é realizada uma análise de diferentes sistemas estruturais para a execução da Cobertura da Plataforma Rodoviária de Brasília, inaugurada em 12 de setembro de 1960 e projetada pelo arquiteto Lúcio Costa. A motivação desse estudo é a atual situação da estrutura, que após 56 anos de existência apresenta várias manifestações patológicas, deformações excessivas, e ainda um grande desconforto visual causando uma intensa sensação de insegurança aos seus usuários. Para essa análise, são propostos seis modelos estruturais com três topologias distintas, sendo que os três modelos são subdivididos em rotulado parcialmente e sem rótulas. Estes modelos são dimensionados com o auxílio dos softwares Ftool, Viga Mista, Visual Metal e SAP2000 V17. Além disso, são realizadas inspeções visuais e verificações “in loco” a fim de analisar a necessidade de novos reparos e intervenções ou a possível demolição da Cobertura. Os resultados obtidos após o dimensionamento estrutural indicam que o modelo mais leve e com o menor consumo de aço é o Modelo 3 sem rótulas (M3SR), pois o seu peso total é de 102.362,54 Kgf. E se a estrutura não for demolida, é preciso reparar a edificação de forma que esta não possua mais manifestações patológicas e ainda atenda aos aspectos de segurança estrutural e do estado limite de deformações.

Palavras-chave: Rodoviária de Brasília. Estrutura Metálica. Sistemas Estruturais.

ABSTRACT

This work is an analysis of different structural systems for the implementation of coverage Road Platform Brasilia, inaugurated on September 12, 1960 and designed by architect Lucio Costa. The motivation of this study is the current situation of the structure, which after 56 years of existence has several pathological manifestations, excessive deformation, and also a great visual discomfort causing an intense sense of insecurity to the users. For this analysis, we propose six structural models with three different topologies, and the three models are subdivided into labeled part and without kneecaps. These models are designed with the help of Ftool software, Viga Mista, Visual Metal and SAP2000 V17. In addition, visual inspections and checks are carried out "in loco" in order to examine the need for further repairs and interventions or the possible demolition of coverage. The results obtained after the structural design indicate that the lighter model with the lowest consumption of steel is the Model 3 without kneecaps (M3SR) because its total weight is 102.362,54 kgf. And if the structure is not demolished, we need to repair the building so that it does not have more pathological manifestations and yet meets the structural safety aspects and the state of deformation limit.

Keywords: Bus Brasilia. Metal Structure. Structural Systems.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 METODOLOGIA.....	12
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1 RODOVIÁRIA DE BRASÍLIA	13
4.1.1 História	13
4.1.2 A estrutura da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária	17
4.2 A HISTÓRIA DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	25
4.2.1 Extração.....	26
4.2.2 Produção.....	26
4.3 ELEMENTOS ESTRUTURAIS	28
4.3.1 Lajes Maciças.....	29
<i>4.3.1.1 Sistema estrutural</i>	<i>29</i>
<i>4.3.1.2 Dimensionamento</i>	<i>29</i>
<i>4.3.1.2.1 Dimensionamento das lajes no Estado Limite Último (ELU)</i>	<i>31</i>
<i>4.3.1.2.1.1 Verificação da espessura da laje</i>	<i>32</i>
<i>4.3.1.2.1.2 Cálculo das armaduras</i>	<i>33</i>
4.3.2 Steel Deck	40
<i>4.3.2.1 Sistema estrutural</i>	<i>40</i>
<i>4.3.2.2 Dimensionamento</i>	<i>43</i>
<i>4.3.2.2.1 Resistência dos conectores de rigidez do tipo pino com cabeça (stud bolt)</i>	<i>43</i>
<i>4.3.2.2.1.1 Determinação da resistência de cálculo dos conectores</i>	<i>44</i>

4.3.2.2.2 Resistência longitudinal ao cisalhamento de lajes maciças ou mistas.....	46
4.3.2.2.2.1 Determinação da resistência longitudinal ao cisalhamento	48
4.3.3 Vigas Mistas	49
4.3.3.1 Sistema estrutural	49
4.3.3.2 Dimensionamento	49
4.3.3.2.1 Pré-dimensionamento	50
4.3.3.2.2 Resistência à flexão	50
4.3.3.2.3 Resistência ao esforço cortante.....	52
4.3.3.2.4 Resistência dos conectores de cisalhamento	53
4.4 DIMENSIONAMENTO DE PERFIS	54
4.4.1 Vigas de Alma Cheia	54
4.4.1.1 Sistema estrutural	54
4.4.1.2 Dimensionamento	55
4.4.1.2.1 Resistência à flexão	56
4.4.1.2.2 Resistência ao esforço cortante.....	56
4.5 MODELOS DE CÁLCULO.....	57
4.5.1 Estados Limites de Desempenho	57
4.5.2 Ações	58
4.5.3 Combinações	59
4.6 SOFTWARE SAP2000	61
5 ANÁLISE ESTRUTURAL	61
5.1 TOPOLOGIA	63
5.1.1 Modelo 1	63
5.1.2 Modelo 2	65
5.1.3 Modelo 3	66

5.2 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA	68
6 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	70
6.1 ANÁLISE DO MODELO 1	70
6.2 ANÁLISE DO MODELO 2	72
6.3 ANÁLISE DO MODELO 3	74
6.4 ANÁLISE DAS VIGAS LONGITUDINAIS	76
6.5 ANÁLISE DAS VIGAS TRANSVERSAIS	81
6.6 ANÁLISE DOS PESOS TOTAIS.....	83
7 CONCLUSÃO.....	88
REFERÊNCIAS	90
ANEXO A.....	93
ANEXO B	128

1 INTRODUÇÃO

Brasília começou a ser construída em 1956 e há 29 anos foi reconhecida pela Unesco como Patrimônio Cultural da Humanidade. A Plataforma Rodoviária configura-se como a essência do Plano Piloto, sua implantação no ponto ideal do cruzamento de dois eixos, é um dos grandes marcos da capital do Brasil, projetada magnificamente pelo arquiteto Lúcio Costa.

A Rodoviária foi fundamental para a consolidação da infraestrutura do Plano Piloto por exercer diversas funções, estar localizada entre as principais vias de acesso e articular os fluxos urbanos das cidades satélites. Diariamente, cerca de 700 mil pessoas transitam pela Rodoviária, reforçando cada vez mais a sua enorme importância.

Inserida na paisagem urbana de Brasília, a Plataforma está implantada numa acomodação topográfica em que o edifício se funde com o terreno, acentuando ainda mais a horizontalidade, que consiste em uma das características mais marcantes do projeto urbanístico da capital.

O objeto de estudo deste trabalho é a Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária de Brasília. Por esta estrutura existir há 56 anos possui, nos dias atuais, diversas manifestações patológicas, deformações excessivas, além de imenso desconforto visual, ocasionando uma intensa sensação de insegurança aos seus usuários.

Tendo em vista a situação atual da Cobertura, esse trabalho tem como finalidade analisar a sua estrutura, bem como identificar a necessidade de novos reparos, intervenções ou a possível demolição da edificação. Para isto, são realizadas inspeções visuais e verificações “in loco”. Além disso, após um estudo detalhado sobre quais seriam as melhores soluções estruturais a serem utilizadas, são propostos modelos de diferentes sistemas estruturais. Estes modelos são dimensionados com o auxílio dos softwares Viga Mista, Ftool, Visual Metal e SAP2000 V17.

Além desta Introdução, esse texto está organizado em mais cinco capítulos, e os Apêndices/Anexos. O Capítulo 2 descreve os Objetivos Geral e Específicos desse trabalho. Em seguida, no Capítulo 3 apresenta-se a Metodologia utilizada para o alcance dos objetivos apresentados. O Capítulo 4, por sua vez, trata de uma revisão bibliográfica sobre o tema proposto e tem como finalidade fundamentar o entendimento do assunto em estudo. No

Capítulo 5, apresenta-se a Análise Estrutural, bem como a topologia dos modelos aqui propostos para a estrutura da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária e a Análise Estrutural. No Capítulo 6 são analisados os resultados obtidos a partir de cada modelo desenvolvido através do dimensionamento do software SAP2000 V17. No Capítulo 7, realiza-se a Conclusão desse estudo. Neste capítulo mencionam-se também as sugestões e os direcionamentos para os trabalhos futuros. Por fim, os Anexos, referentes ao modelo com o menor consumo de aço. No Anexo A, apresentam-se os resultados gerados pelo software SAP2000 V17, como também as verificações dos softwares Viga Mista e Visual Metal. No Anexo B expõe-se as Imagens referentes aos resultados obtidos no software SAP2000 V17.

OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Esse trabalho tem como objetivo fazer uma análise comparativa entre algumas soluções estruturais em aço para o dimensionamento da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária de Brasília.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a realização dos objetivos gerais têm-se os seguintes objetivos específicos:

- levantar o estado real da estrutura com inspeções visuais e verificações “in loco”;
- identificar e descrever as manifestações patológicas observadas;
- analisar a necessidade de novas intervenções na estrutura ou a demolição desta;
- avaliar se será possível utilizar os seguintes elementos estruturais: Lajes Maciças, Steel Deck e Vigas Mistas.
- especificar a taxa de consumo do aço nos modelos propostos.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada é composta pelas seguintes etapas:

- elaboração da fundamentação teórica e revisão bibliográfica;
- inspeções visuais e verificações “in loco”;
- desenho da estrutura segundo a arquitetura do projeto original pelo AutoCad 3D;
- análise da estrutura;
- pré-dimensionamento dos elementos estruturais com o auxílio dos softwares Viga Mista, Ftool e Visual Metal;
- elaboração de diferentes modelos estruturais;
- análise do dimensionamento proposto, por meio do software SAP2000 V17;
- comparação dos resultados e conclusão do trabalho.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este Capítulo é dividido em seis seções. A Seção 4.1 descreve a história da Rodoviária de Brasília, bem como a estrutura da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária. No final dessa seção são apresentados dois importantes relatórios que analisam a estrutura da Cobertura. Na Seção 4.2 realiza-se um resumo detalhado sobre a história do aço na construção civil. A Seção 4.3, por outro lado, traz o sistema estrutural e o dimensionamento dos elementos estruturais abordados neste estudo. Na Seção 4.4 são expostos o sistema estrutural e o dimensionamento dos perfis de viga de alma cheia. Os Modelos de Cálculo são explicados na Seção 4.5 e, por último, o software SAP2000 V17 utilizado para o dimensionamento e análise da estrutura é apresentado na Seção 4.6.

4.1 RODOVIÁRIA DE BRASÍLIA

4.1.1 História

Brasília nasceu de forma primária, com o cruzamento de dois eixos resultando em um ângulo reto entre eles. Neste cruzamento, existe uma estrutura articuladora entre o eixo rodoviário, que passa na cota inferior, e o eixo monumental, que atravessa a cota superior. Trata-se da Plataforma da Rodoviária de Brasília, projetada pelo arquiteto Lúcio Costa como parte do plano urbanístico da capital federal (ROSSETTI, 2012). A Imagem 1 foi tirada durante a construção da Rodoviária de Brasília.

Imagem 1 – Construção da Rodoviária de Brasília



Fonte: Fontenelli [1957-1960]

A Plataforma Superior da Rodoviária está localizada entre duas travessias com semáforos, sendo a via de acesso entre os lados Leste, onde está situado o Conjunto Nacional, e o setor de diversões, à Oeste. Estas são as coordenadas onde está situada a Plataforma Superior: latitude $15^{\circ}47'35.89''\text{S}$ e longitude $47^{\circ}52'57.45''\text{O}$ (GOOGLE EARTH, 2016). Para facilitar, a Imagem 2 ilustra os limites da Plataforma Superior da Rodoviária.

Imagem 2 – Localização da Plataforma Superior da Rodoviária de Brasília



Fonte: Google Earth, 2016

Ocupando uma área de aproximadamente 800,0 m de extensão por 170,0 m de largura, com vãos de 28,5 m e altura total de 22,5 m, a Plataforma Rodoviária é dividida em quatro níveis. A Plataforma Superior, situada no nível 0,0 m, configura-se como o principal acesso de pedestres à Rodoviária de Brasília. É composta por áreas de estacionamento e diversos serviços para atender a população como bilheterias, alimentação, informações e comércios, além de dois conjuntos de escadas e elevadores (CORULLON, 2013).

De acordo com Rossetti (2012), a Rodoviária constituiu-se como uma infraestrutura urbana fundamental para que a consolidação da urbanização fosse possível no Plano Piloto. Sendo o marco zero de Brasília, foi a partir de sua demarcação que vários setores surgiram ao seu redor, como por exemplo, os setores hoteleiro, bancário, comercial e o centro de diversões. Como exerce diversas funções, articula os fluxos urbanos entre as cidades satélites, o Plano

Piloto e as suas áreas centrais, ligando vias de acesso fundamentais e realizando conexões entre vários ambientes, a Plataforma consegue integrar a escala monumental e a escala gregária. E, dessa forma, instaura um caráter metropolitano à capital. Segundo Lúcio Costa (1967 apud LIMA; COSTA, 1985, p.14), “... urbanizar consiste em criar condições para que a cidade aconteça, com o tempo e o elemento surpresa intervindo ...”.

A Plataforma da Rodoviária está implantada em um arranjo topográfico, em que o edifício se funde com o terreno, fazendo com que a sua presença se dissolva na paisagem. Essa característica confunde sobre o que realmente faz parte da edificação e, assim, acentua ainda mais a horizontalidade presente em Brasília. Na Imagem 3, pode-se notar que a Torre de Televisão, localizada no centro da imagem, se destaca por ser o maior elemento vertical de Brasília e a Plataforma da Rodoviária se torna quase imperceptível vista deste ângulo, na Esplanada dos Ministérios (ROSSETTI, 2010).

Imagem 3 – Plataforma da Rodoviária praticamente imperceptível vista pela Esplanada dos Ministérios



Fonte: Cavalcanti, 2004

Atualmente, estima-se que mais de 700 mil pessoas transitem pela Rodoviária todos os dias, reforçando a amplitude de sua importância para Brasília. São muitas as funções desempenhadas por ela, servindo a uma imensa diversidade de pessoas e funcionando por 24 horas por dia, tem a capacidade de afunilar os fluxos de milhares de pessoas e veículos sem causar grandes transtornos ao trânsito (ROSSETTI, 2012). Imagine se a Rodoviária parasse por um dia: os pedestres perderiam o acesso à Rodoviária e às suas imediações, e os eixos

monumental e rodoviário estariam interditados ao seu redor. Com certeza a cidade se tornaria um caos, pois a conexão desses eixos é fundamental para o funcionamento urbanístico da cidade. Além de existirem poucas vias de acesso conectando as cidades satélites ao centro de Brasília, estas dependem diretamente do eixo monumental (N1 e S1) e do eixo rodoviário (DF-002).

De acordo com Matos (2009), a Plataforma da Rodoviária de Brasília foi uma obra pioneira no Brasil e no mundo. Devido ao uso em larga escala e com uma estrutura extremamente arrojada com grandes vãos, de aproximadamente 30 m, de tecnologias recentes e inovadoras para a época, como o concreto protendido e a pré-moldagem. Conforme Rossetti (2010), em suas superfícies encontram-se asfalto, granilite, cerâmica “Grassit” branca, além de mármore brancos idênticos aos dos palácios governamentais.

Com a recente instauração de dois modais de transportes à Rodoviária, que são o transporte rápido por ônibus (BRT) e o metrô, tanto a quantidade de pessoas como o fluxo de carros aumentaram consideravelmente. Com o enorme incremento na frota de veículos nas últimas décadas, assim como o tráfego contínuo e intenso na plataforma, ocasionou-se um considerável aumento nos movimentos de frenagem e aceleração, provocando sobrecargas dinâmicas bem maiores que antigamente. Esta sobrecarga não estava prevista no projeto, assim como o acréscimo de CO₂ (gás carbônico) proveniente principalmente dos ônibus, podendo aumentar a possibilidade de ataques prejudiciais ao concreto estrutural. Dessa forma, torna-se necessário um reforço estrutural e manutenção periódica, a fim de evitar manifestações patológicas e para garantir um bom funcionamento (MATOS, 2009).

Desde a implantação da rede de metrô, a Rodoviária transformou-se em estação intermodal de transportes em escala metropolitana. Isto só foi possível devido às enormes dimensões de seus espaços, o que proporciona condições para absorver um grande volume de linhas e passageiros. Assim, conclui-se que o edifício tem um ótimo desempenho, tanto em sua função técnica, como em infraestrutura de transporte ou como espaço de integração urbana (CORULLON, 2013).

Eu sempre repeti que esta Plataforma Rodoviária era o traço de união da metrópole, da capital, com as cidades satélites improvisadas da periferia. É um ponto forçado, em que toda essa população que mora fora entra em contato com a cidade. Então eu senti esse movimento, essa vida intensa dos verdadeiros brasilienses, esse milhão que vive fora e converge para a Rodoviária (COSTA, 1984 apud LIMA; COSTA, 1985, p.66).

4.1.2 A estrutura da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária

Devido ao curto limite de tempo da transferência da capital federal do Rio de Janeiro para o Planalto Central, a construção de Brasília foi realizada em apenas três anos. Como vários monumentos e estruturas foram executados rapidamente, os profissionais responsáveis pela concepção e execução da Plataforma Rodoviária, bem como aqueles responsáveis pela sua utilização e manutenção, não registraram e nem preservaram os importantes documentos a respeito de sua estrutura, instalações e procedimentos técnicos. Dessa forma, as manutenções e intervenções estruturais enfrentam enormes dificuldades (MATOS, 2009).

E o resultado aí está: feita por processos errados, eivados de falhas, desobediências aos procedimentos tradicionais e regulamentações técnicas sacramentadas no Brasil e no exterior, gastando-se muito mais do que era realmente necessário, Brasília venceu! E não poderia ter sido realizada de outro modo: foi necessário infringir tudo o que era correto. (VASCONCELOS, 1992)

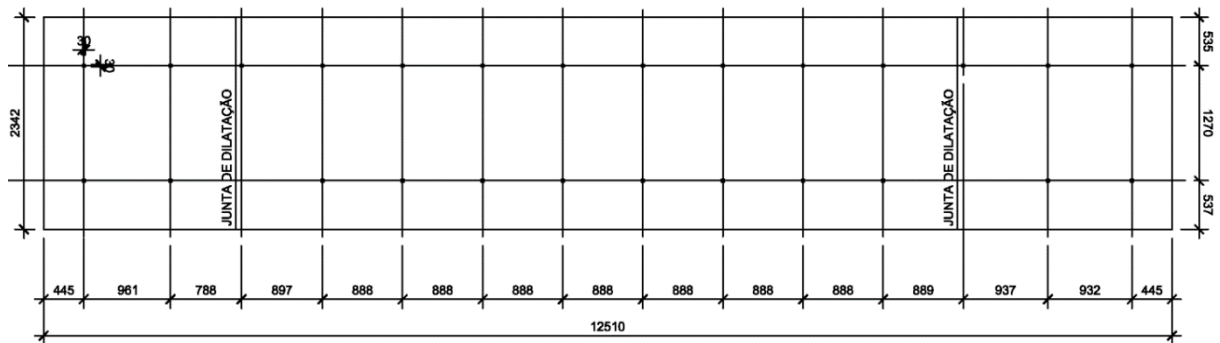
Segundo Matos (2009), apesar da Plataforma Rodoviária ter apresentado várias manifestações patológicas desde a sua construção, somente em 1981, ou seja, 21 anos depois da conclusão da obra que começaram a ser realizadas vistorias técnicas para a sua manutenção. Desde então, a Rodoviária já passou por muitas intervenções.

Recentemente dois relatórios técnicos foram feitos pela Companhia Urbanizadora da Capital do Brasil (Novacap) sobre a estrutura da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária. Um desses relatórios realizou uma análise computacional com o Software TQS, em fevereiro de 2014, que é chamado neste trabalho como Relatório Novacap 2014 (FEIJÃO, 2014). E o outro relatório monitorou as vibrações da estrutura da Cobertura da Plataforma Superior, e ainda, avaliou o seu comportamento a partir de um modelo numérico desenvolvido no software SAP2000, em maio de 2016, que neste trabalho será identificado como Relatório Novacap 2016 (ALMEIDA, 2016).

Segundo o Relatório Novacap 2016, a estrutura da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária de Brasília é formada por lajes nervuradas pré-moldadas apoiadas em dentes

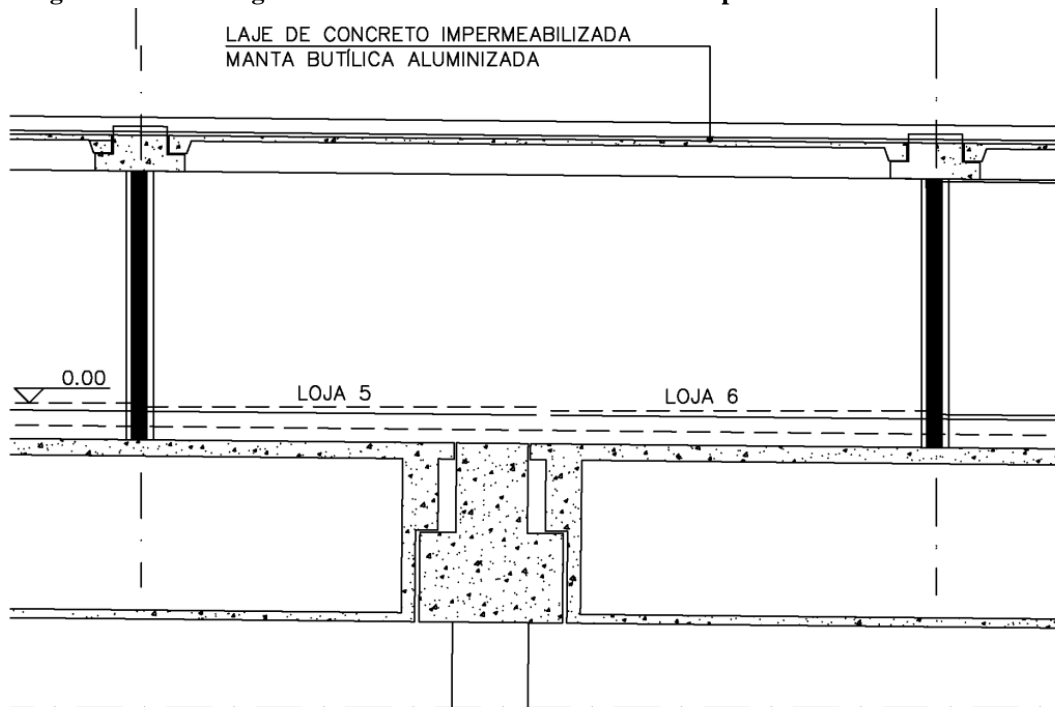
Gerber, em 14 linhas de dois pilares metálicos. Ao todo são 28 pilares, com seção 30x30cm e altura de três metros. Os pilares estão apoiados sobre a laje principal da Plataforma Rodoviária composta por segmentos celulares (caixão) apoiados sobre dentes Gerber e pilares. Nas Imagens 4 e 5 podemos visualizar a planta baixa e o corte longitudinal, respectivamente.

Imagem 4 – Planta baixa da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto



Fonte: Almeida (2016)

Imagem 5 – Corte longitudinal da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto



Fonte: Almeida (2016)

De acordo com o Relatório Novacap 2014, a laje da Cobertura foi projetada em concreto protendido, e as suas características são as seguintes:

- vão central entre os pilares: 12,7 m;
- balanços longitudinais: 5,26 m;

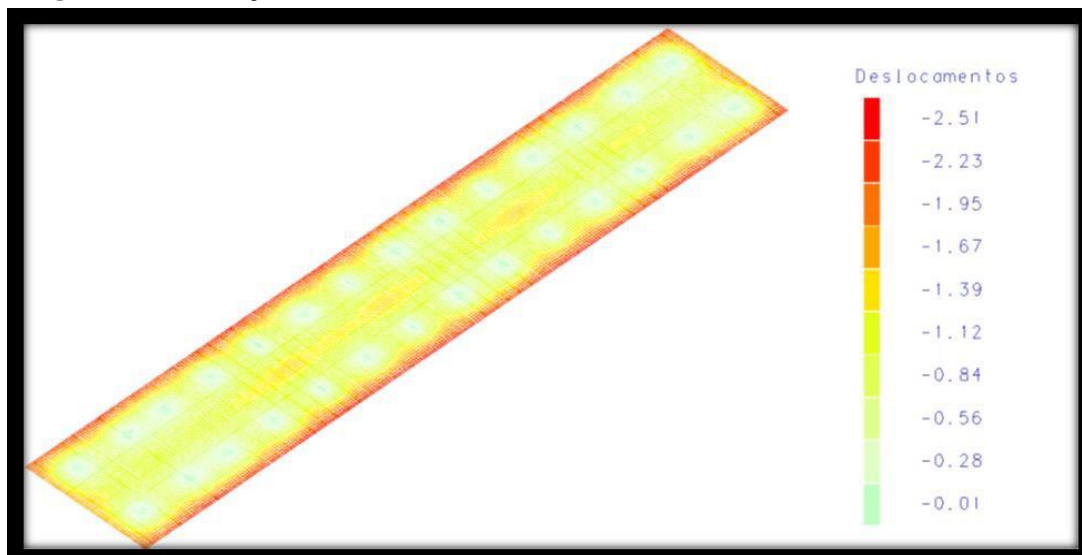
- balanços extremos: 4,49 m;
- distância entre linhas de pilares: em média 9 m;
- altura da estrutura da laje: 50 cm.

O Relatório Novacap 2014 afirma que a troca da estrutura da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária de Brasília é necessária. Um dos principais motivos apontados é a falência do sistema estrutural adotado na última reforma, resultando em deformações excessivas e conseqüentemente ao acúmulo de água na face superior, o que ao longo do tempo leva ao aparecimento de manifestações patológicas.

Além disso, esse mesmo relatório aponta que a altura disponível no projeto arquitetônico para a estrutura é incompatível com os vãos devido ao uso de concreto protendido, não no aspecto de segurança estrutural, mas no aspecto de estado limite de deformações.

O Relatório Novacap 2014 obteve através da análise do modelo estrutural no software TQS, em que foi utilizado perfis GERDAU W460x68 e laje em concreto armado com espessura de 7 cm, as deformações mostradas na Imagem 6.

Imagem 6 – Deformações obtidas no software TQS



Fonte: Feijão (2014)

Por sua vez, no Relatório Novacap 2016, foram realizadas monitorações na Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária durante dois dias, utilizando quatro acelerômetros, dois inclinômetros e um medidor de temperatura. Para isso foram definidos seis arranjos de instrumentação em diferentes localidades da Cobertura.

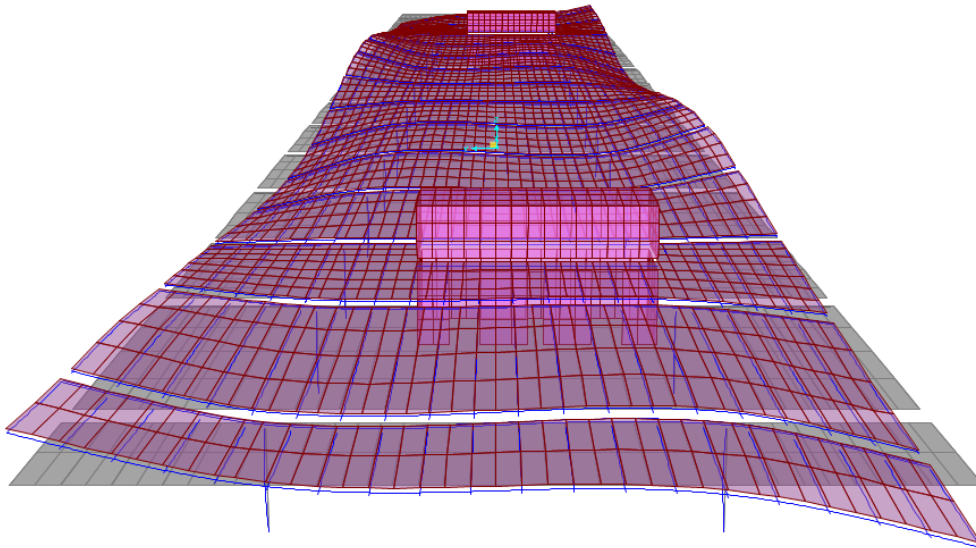
O Relatório Novacap 2016 utilizou o programa computacional SAP2000, para calcular as principais frequências naturais de resposta e os respectivos modos de vibração da estrutura da Cobertura, mostrados nas Imagens 7 e 8. Através do modelo numérico espacial da estrutura da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária realizada pelo software SAP2000.

Imagem 7 – Principais frequências naturais de resposta calculadas pelo modelo numérico espacial da estrutura da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária

Found mode	1 of	12:	EV= 3.3935247E+02, f=	2.931876, T=	0.341079
Found mode	2 of	12:	EV= 3.6276804E+02, f=	3.031340, T=	0.329887
Found mode	3 of	12:	EV= 3.6341936E+02, f=	3.034060, T=	0.329591
Found mode	4 of	12:	EV= 3.6830997E+02, f=	3.054407, T=	0.327396
Found mode	5 of	12:	EV= 4.2789646E+02, f=	3.292225, T=	0.303746
Found mode	6 of	12:	EV= 4.9462835E+02, f=	3.539644, T=	0.282514
Found mode	7 of	12:	EV= 5.2463770E+02, f=	3.645439, T=	0.274315
Found mode	8 of	12:	EV= 5.4852343E+02, f=	3.727501, T=	0.268276
Found mode	9 of	12:	EV= 5.5428967E+02, f=	3.747042, T=	0.266877
Found mode	10 of	12:	EV= 5.6155874E+02, f=	3.771531, T=	0.265144
Found mode	11 of	12:	EV= 6.0225970E+02, f=	3.905818, T=	0.256028
Found mode	12 of	12:	EV= 6.2678345E+02, f=	3.984546, T=	0.250970

Fonte: Almeida (2016)

Imagem 8 – O 10º modo de vibração do modelo numérico espacial da estrutura da Cobertura, $f = 3,77\text{Hz}$, flexão da laje no plano YZ



Fonte: Almeida (2016)

Nesse relatório verificou-se que as frequências de resposta da estrutura obtidas de forma experimental estão favoráveis as que foram calculadas pelo modelo numérico espacial criado através do software SAP2000.

Após inspeções visuais e verificações “in loco”, é possível identificar diversas manifestações patológicas como o deslocamento das placas de mármore que revestiam as

fachadas da laje; deflexões nos balanços da laje, intensificado pelo acúmulo de água no topo da Cobertura, gerando imenso desconforto visual e insegurança a todos; a ligação do Pilar metálico com a laje sofre processo de corrosão; o forro da laje possui buracos enormes em vários pontos deixando visível a estrutura; o dente Gerber com as armaduras expostas podendo causar corrosão e carbonatação do concreto. Sendo que em um dos reforços da Cobertura, substituíram as vigas em concreto armado por treliças metálicas.

Nas imagens 9 a 16 são mostrados os principais aspectos encontrados na Plataforma Superior da Rodoviária, assim como os elementos estruturais que a compõem.

Imagem 9: Detalhe de um dos vértices da Cobertura da Plataforma de Rodoviária de Brasília



Fonte: Elaboração própria

Imagem 10: Fachada lateral da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária de Brasília



Fonte: Elaboração própria

Imagem 11: Acúmulo de água em um dos vértices com maior deflexão no topo da Cobertura



Fonte: Elaboração própria

Imagem 12: Detalhe das instalações e da impermeabilização da laje de concreto com manta asfáltica aluminizada



Fonte: Elaboração própria

Imagem 13: Detalhe da ligação do Pilar metálico com a laje da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária de Brasília



Fonte: Elaboração própria

Imagem 14: Detalhe do forro destruído e da estrutura aparente



Fonte: Elaboração própria

Imagem 15: Detalhe do dente Gerber com as armaduras expostas



Fonte: Elaboração própria

Imagem 16: Detalhe de um reparo feito na Cobertura da Plataforma da Rodoviária do Plano Piloto com a substituição das vigas em concreto por treliças metálicas



Fonte: Elaboração própria

4.2 A HISTÓRIA DO AÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo Bauer (2013), o nome siderurgia origina-se do grego, “sideros” (ferro) e “ergo” (trabalho), por essa razão os produtos feitos com ferro e suas ligas são chamados siderúrgicos. O ferro é o metal de maior aplicação na indústria da construção civil e existem registros de grande utilização do ferro e suas ligas entre os egípcios, assírios e babilônios na Pré-história.

As primeiras obras construídas em aço surgiram aproximadamente no século XVIII, período em que o aço passou a ser produzido em escala industrial. Na França, foram construídos em aço o Teatro Palais Royal e a escadaria do Louvre, na Inglaterra foi construída a Ponte Coalbrookdale de ferro fundido, sendo que no século XIX o aço passou a ser empregado estruturalmente na construção de edifícios (BELLEI, 2010).

O aço passou a ser mais utilizado no século XIX, quando o processo foi aperfeiçoado pelo inglês Henry Bessemer, em 1856, com a criação de um forno que permitiu a produção em larga escala, e dessa forma, tornou o preço do aço mais acessível. Na sequência, os irmãos Martin desenvolveram um forno de maior capacidade, para logo em seguida surgir o processo chamado Siemens-Martim e os laminadores para barras (PFEIL; PFEIL, 2009).

Ainda de acordo com Bellei (2010), no Brasil o aço passou a ser produzido no século XX, no ano de 1921 com a implantação da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, produzindo fio máquina, arame farpado e perfis leves, dentre outros. E em 1941, foi fundada a Companhia Siderúrgica Nacional, que entrou em operação em 12 de outubro de 1946, para produzir chapas, trilhos e perfis nas bitolas americanas.

Conforme Pfeil e Pfeil (2009), relatam que o parque industrial brasileiro dispõe atualmente de diversas usinas siderúrgicas com capacidade para fabricar produtos para estruturas de grande porte. E ainda cita um exemplo histórico, como o Edifício Avenida Central, de vários pavimentos, construído em estrutura metálica no Rio de Janeiro, em 1961.

4.2.1 Extração

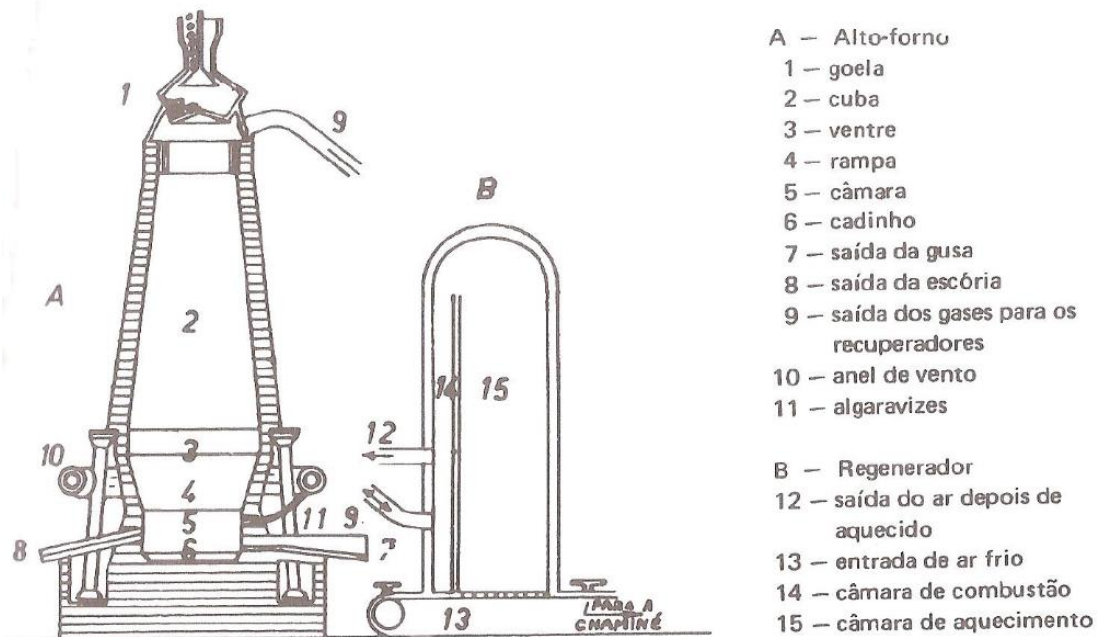
O minério de ferro apresenta-se sob a forma de carbonatos, como siderita ou siderose (CO_3Fe), óxidos como magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3) e limonita ($2\text{Fe}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$) e sulfetos como pirritas (SFe) (BAUER, 2013).

A extração normalmente é feita a céu aberto por meio de britadeira, seguida de classificação pelo tamanho do minério que deve entrar no alto-forno com granulometria entre 12 e 25 mm (BAUER, 2013).

4.2.2 Produção

O alto-forno é composto por dois troncos de cone, o cone superior (cuba), unido ao inferior (rampa) pela base (ventre), conforme esquema ilustrado na Imagem 17. A entrada do minério é feita pela goela, onde o minério perde umidade e inicia-se a calcinação dos carbonetos e redução do Fe_2O_3 para FeO . Na cuba o óxido de carbono proveniente da combustão reduz o minério a metal $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2\text{FeO} + \text{CO}_2$ e no início da rampa completa-se a reação $\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$, conhecida como reação de Baudouard. A escória é retirada pela abertura superior do cadinho e já o ferro é extraído pela abertura inferior do cadinho, este é conhecido como ferro gusa que apresenta impurezas e alto teor de carbono (BAUER, 2013).

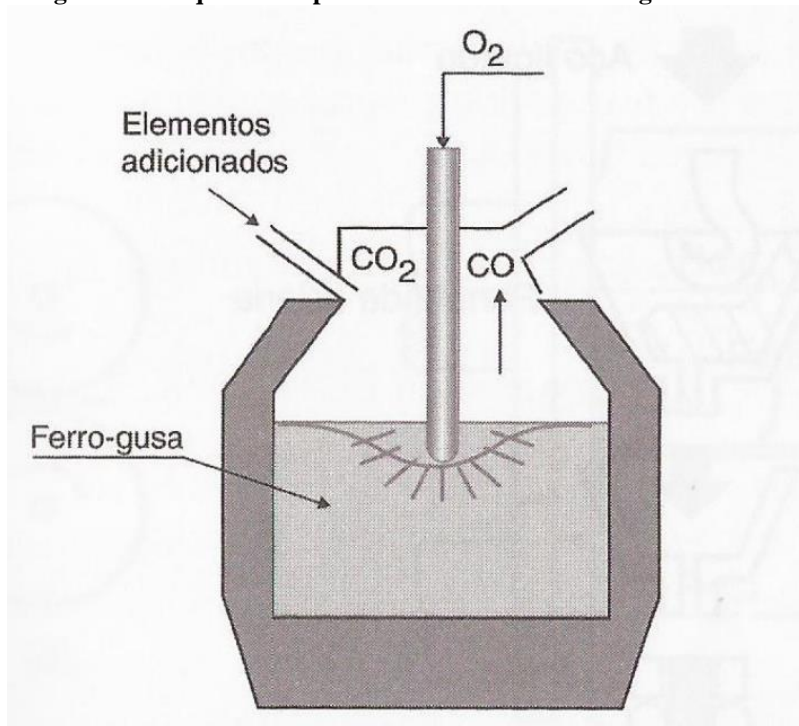
Imagem 17 – Esquema simplificado de alto-forno



Fonte: Bauer (2013)

O refinamento do ferro fundido em aço é feito no conversor de oxigênio que consiste em remover o excesso de carbono e reduzir a quantidade de impurezas a limites prefixados, conforme a Imagem 18. O conversor de oxigênio injeta oxigênio dentro da massa líquida de ferro gusa que queima o carbono na forma de monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂), em um processo com duração aproximada de 15 a 20 minutos. Outros elementos como manganês, silício e fósforo são oxidados e combinados com cal e óxido de ferro, formando a escória que fica na superfície do aço líquido. O aço fica reagindo até a obtenção da qualidade desejada e na sequência é despejado em uma panela (PFEIL; PFEIL, 2009).

Imagem 18 – Esquema simplificado de conversor de oxigênio



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

O tratamento do aço na panela é feito com a reabsorção dos gases que são expelidos no processo de resfriamento da massa líquida, por meio da adição de alumínio e silício em um processo conhecido como degaseificação. Após a degaseificação, grande parte dos óxidos formados são removidos em um processo conhecido como refinamento. Na sequência, o aço é descarregado nas lingoteiras que são fôrmas metálicas especiais para a confecção de blocos de fôrma troncocônica, conhecidos por lingotes. Das lingoteiras são transportados para fornos de regularização de temperatura, preparatórios para a laminação onde o aço é transformado nos principais produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de construção, como chapas e perfis laminados (PFEIL; PFEIL, 2009).

4.3 ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Dentre as possíveis soluções existentes, foram escolhidos os seguintes elementos para compor os sistemas estruturais em aço que são propostos por este trabalho: Lajes Maciças, Steel Deck e Vigas Mistas. O sistema estrutural e o dimensionamento de cada um desses elementos são discutidos nesta Seção.

4.3.1 Lajes Maciças

O Sistema Estrutural e o Dimensionamento de Lajes Maciças, apresentados nas Subseções 4.3.1.1 e 4.3.1.2, são baseados nas informações de Clímaco (2015).

4.3.1.1 Sistema Estrutural

As lajes são elementos estruturais laminares, submetidos a cargas predominantemente normais à sua superfície média, que têm a função de resistir às cargas de utilização atuantes na estrutura. São classificadas em elementos integrantes da estrutura terciária da superestrutura de uma edificação, com a finalidade de suportar a aplicação direta das cargas distribuídas em superfície. As lajes podem ser classificadas em:

- lajes apoiadas sobre vigas;
- lajes nervuradas;
- lajes lisas e cogumelo.

4.3.1.2 Dimensionamento

O método demonstrado neste trabalho é o elástico misto, um dos mais utilizados no Brasil, também conhecido como Método de Marcus. Os procedimentos para o cálculo de lajes maciças retangulares apoiadas continuamente em vigas de bordo fornecem valores satisfatórios para os momentos da laje nos estados limites de serviço, conforme as hipóteses simplificadoras de cálculo a seguir:

- o peso próprio da laje é considerado uma carga uniformemente distribuída em toda a área da laje;
- a sobrecarga de utilização ou carga acidental é suposta como uniformemente distribuída na área da laje;
- as lajes são calculadas como peças laminares isoladas, através de uma decomposição virtual que as separa de suas vigas de bordo, de modo que se possa utilizar as teorias de cálculo próprias para as lajes, conhecidas como teoria das placas;

- as vigas de bordo das lajes são consideradas apoios indeslocáveis;
- as cargas que são transmitidas pelas lajes às vigas são admitidas como uniformemente distribuídas por unidade de comprimento das vigas.

Neste método, podemos classificar as lajes retangulares em:

- lajes maciças armadas em cruz, quando a relação entre os vãos teóricos é menor ou igual a 2 e os momentos fletores são calculados nas duas direções, sendo necessário o cálculo do λ ;
- lajes armadas em uma direção, quando a relação entre os vãos efetivos for superior a 2 e os momentos fletores são calculados apenas na direção paralela ao menor vão.

A obtenção do parâmetro λ vem da relação entre os lados l_y e l_x . Sendo que l_x é o vão na direção perpendicular ao maior número de bordos engastados, e havendo igualdade nesta condição, l_x será o menor vão.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a NBR 6118:2014, de acordo com o item 13.2.4.1, alínea c, a espessura mínima deve ser de 10 cm para laje em balanço. Esta espessura deve ser determinada no pré-dimensionamento para obtenção do peso próprio da laje.

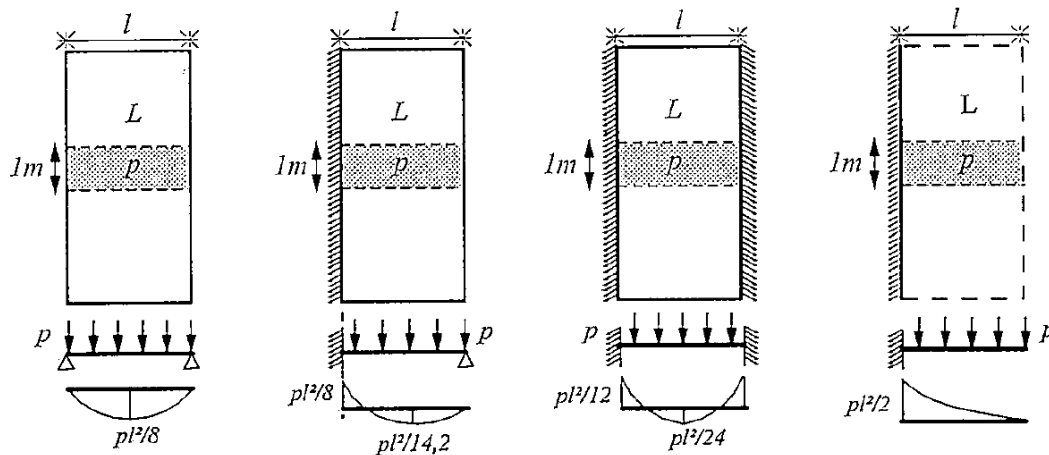
Na sequência, as lajes retangulares maciças são classificadas como engastadas, quando a relação entre o trecho engastado e o trecho total for maior ou igual a 0,666 e como apoiadas quando esta relação for menor que 0,666.

Para a determinação dos carregamentos das lajes precisamos avaliar as cargas permanentes que abrangem o peso próprio dos materiais que compõem a laje, o peso dos revestimentos superior e inferior, o peso das instalações, o peso da impermeabilização e as cargas acidentais.

A obtenção do momento característico para a laje armada em cruz, origina-se da relação entre a constante, adquirida por meio da multiplicação do carregamento pelo l_x ao quadrado, e o coeficiente obtido através do λ que depende do tipo de caso, conforme tabelas especificadas

peelo Método de Marcus. E o cálculo do momento característico para a laje armada em uma direção depende do tipo de apoio conforme a imagem 19, sendo que o l é sempre o menor dos lados.

Imagem 19 – Momento Característico para laje armada em uma direção



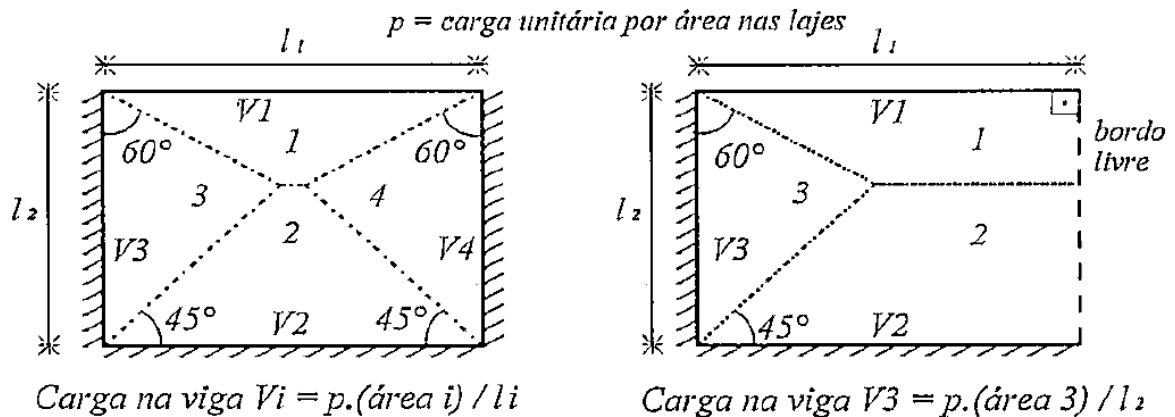
Fonte: Clímaco (2015)

4.3.1.2.1. Dimensionamento das lajes no Estado Limite Último (ELU)

De acordo com Clímaco (2015), para avaliar as reações de apoio nas vigas de bordo de lajes retangulares com carga uniforme, a ABNT NBR 8800:2008 adota um processo baseado numa análise rígido-plástica, segundo a qual, a laje no Estado Limite Último se divide em painéis rígidos que giram em torno de linhas de ruptura. Este processo admite que toda a carga referente a cada um desses painéis é transmitida uniformemente distribuída por unidade de comprimento à viga de bordo. Desta forma procede-se, conforme imagem 20, dividindo a laje em áreas de influência a partir dos vértices, por retas inclinadas com os seguintes ângulos:

- Entre dois apoios do mesmo tipo: ângulo de 45° ;
- Entre apoio engastado e simplesmente apoiado: ângulo de 60° ;
- Entre apoio e bordo vizinho livre: ângulo de 90° .

Imagem 20 – Cargas nas vigas de bordo de lajes retangulares (Método ABNT NBR 6118:2014)



Fonte: Clímaco (2015)

4.3.1.2.1.1 Verificação da espessura da laje

As lajes maciças apoiadas em vigas no contorno são armadas com armadura simples, em camada única, respeitando o limite imposto à profundidade da linha neutra x/d , para melhorar a ductilidade nas regiões de apoio sobre as vigas. A espessura das lajes de um painel deve ser verificada no início do cálculo para a condição de ductilidade adequada aos momentos negativos ($k_{md} \leq 0,272$ ou $0,228$) e para momentos positivos com armadura simples ($k_{md} \leq k_{mdlim}$) (CLÍMACO, 2015).

Para faixas de laje de largura unitária $b_w = 1\text{m}$, o cálculo baseia-se nas fórmulas, para momentos fletores negativos nos apoios:

$$\text{Se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}, \quad M_{Sd,máx} = \gamma_f M_{máx}^- \leq 0,272 d^2 f_{cd}$$

$$\text{Se } f_{ck} > 50 \text{ MPa}, \quad M_{Sd,máx} = \gamma_f M_{máx}^- \leq 0,228 d^2 f_{cd}$$

Para faixas de laje de largura unitária $b_w = 1\text{m}$, o cálculo baseia-se nas fórmulas, para momentos fletores positivos:

$$M_{Sd,máx} = \gamma_f M_{máx}^+ \leq k_{mdlim} d^2 f_{cd}$$

4.3.1.2.1.2. Cálculo das armaduras

O cálculo das armaduras é obtido por meio das seguintes equações:

$$k_{md} = \frac{M_{sd}}{d^2 f_{cd}}$$

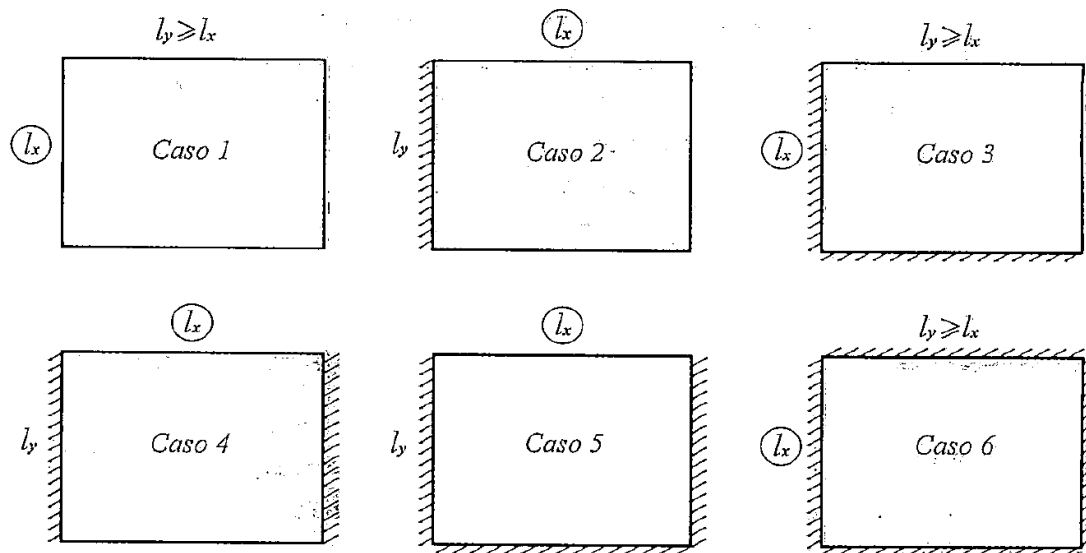
$$k_x = 1,25 - 1,917 \sqrt{0,425 - k_{md}}$$

$$k_z = 1 - 0,4 k_x$$

$$A_s = \frac{M_{sd}}{k_z d f_{yd}}$$

Tabelas utilizadas no método de Marcus, considerado neste trabalho, conforme as imagens 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28.

Imagem 21 – Definição dos seis casos de lajes retangulares em cruz



Fonte: Clímaco (2015)

Imagem 22 – Tabela relativa ao caso 1

$l_x \quad \boxed{l}$
 $l_y \geq l_x$

$$M_x = pl_x^2/m_x; M_y = pl_x^2/m_y; p_x = k_x p$$

$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	m_y	$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	m_y
1,00	0,50	27,4	27,4	-	-	-	-
1,01	0,51	26,9	27,4	1,51	0,84	13,8	31,4
1,02	0,52	26,4	27,4	1,52	0,84	13,6	31,5
1,03	0,53	25,9	27,4	1,53	0,85	13,5	31,7
1,04	0,54	25,4	27,5	1,54	0,85	13,4	31,9
1,05	0,55	24,9	27,5	1,55	0,85	13,3	32,0
1,06	0,56	24,5	27,5	1,56	0,86	13,2	32,2
1,07	0,57	24,0	27,5	1,57	0,86	13,1	32,4
1,08	0,58	23,6	27,5	1,58	0,86	13,0	32,5
1,09	0,59	23,2	27,6	1,59	0,87	12,9	32,7
1,10	0,59	22,8	27,6	1,60	0,87	12,9	32,9
1,11	0,60	22,4	27,6	1,61	0,87	12,8	33,1
1,12	0,61	22,0	27,6	1,62	0,87	12,7	33,3
1,13	0,62	21,7	27,7	1,63	0,88	12,6	33,5
1,14	0,63	21,3	27,7	1,64	0,88	12,5	33,7
1,15	0,64	21,0	27,8	1,65	0,88	12,4	33,9
1,16	0,64	20,7	27,8	1,66	0,88	12,4	34,1
1,17	0,65	20,3	27,9	1,67	0,89	12,3	34,3
1,18	0,66	20,0	27,9	1,68	0,89	12,2	34,5
1,19	0,67	19,7	28,0	1,69	0,89	12,1	34,7
1,20	0,68	19,5	28,0	1,70	0,89	12,1	34,9
1,21	0,68	19,2	28,1	1,71	0,90	12,0	35,1
1,22	0,69	18,9	28,1	1,72	0,90	11,9	35,3
1,23	0,70	18,6	28,2	1,73	0,90	11,9	35,5
1,24	0,70	18,4	28,3	1,74	0,90	11,8	35,7
1,25	0,71	18,1	28,3	1,75	0,90	11,7	36,0
1,26	0,72	17,9	28,4	1,76	0,91	11,7	36,2
1,27	0,72	17,7	28,5	1,77	0,91	11,6	36,4
1,28	0,73	17,4	28,6	1,78	0,91	11,6	36,6
1,29	0,74	17,2	28,7	1,79	0,91	11,5	36,9
1,30	0,74	17,0	28,8	1,80	0,91	11,5	37,1
1,31	0,75	16,8	28,9	1,81	0,92	11,4	37,3
1,32	0,75	16,6	28,9	1,82	0,92	11,3	37,6
1,33	0,76	16,4	29,0	1,83	0,92	11,3	37,8
1,34	0,76	16,2	29,1	1,84	0,92	11,2	38,1
1,35	0,77	16,1	29,3	1,85	0,92	11,2	38,3
1,36	0,77	15,9	29,4	1,86	0,92	11,2	38,6
1,37	0,78	15,7	29,5	1,87	0,92	11,1	38,8
1,38	0,78	15,5	29,6	1,88	0,93	11,1	39,1
1,39	0,79	15,4	29,7	1,89	0,93	11,0	39,3
1,40	0,79	15,2	29,8	1,90	0,93	11,0	39,6
1,41	0,80	15,1	30,0	1,91	0,93	10,9	39,8
1,42	0,80	14,9	30,1	1,92	0,93	10,9	40,1
1,43	0,81	14,8	30,2	1,93	0,93	10,8	40,4
1,44	0,81	14,6	30,3	1,94	0,93	10,8	40,6
1,45	0,82	14,5	30,5	1,95	0,94	10,8	40,9
1,46	0,82	14,4	30,6	1,96	0,94	10,7	41,2
1,47	0,82	14,2	30,8	1,97	0,94	10,7	41,5
1,48	0,83	14,1	30,9	1,98	0,94	10,7	41,7
1,49	0,83	14,0	31,1	1,99	0,94	10,6	42,0
1,50	0,84	13,9	31,2	2,00	0,94	10,6	42,3

Fonte: Clímaco (2015)

Imagem 23– Tabela relativa ao caso 2

$$M_x = pl_x^2/m_x; X_x = pl_x^2/n_x; M_y = pl_y^2/m_y; p_x = k_x p$$

2
 l_x

$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	n_x	m_y	$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	n_x	m_y
0,50	0,14	141,0	59,2	45,1	1,02	0,73	29,0	11,0	37,2
0,51	0,15	133,0	55,3	44,1	1,04	0,75	28,2	10,7	37,7
0,52	0,16	125,7	51,8	43,2	1,06	0,76	27,4	10,5	38,2
0,53	0,17	119,0	48,6	42,4	1,08	0,77	26,7	10,4	38,7
0,54	0,18	113,0	45,6	41,6	1,10	0,79	26,0	10,2	39,3
0,55	0,19	107,4	43,0	40,9	1,12	0,80	25,4	10,0	39,9
0,56	0,20	102,2	40,5	40,2	1,14	0,81	24,8	9,9	40,6
0,57	0,21	97,5	38,3	39,6	1,16	0,82	24,3	9,8	41,2
0,58	0,22	93,1	36,3	39,0	1,18	0,83	23,8	9,7	41,9
0,59	0,23	89,0	34,4	38,5	1,20	0,84	23,3	9,5	42,6
0,60	0,25	85,3	32,7	38,0	1,22	0,85	22,9	9,4	43,4
0,61	0,26	81,8	31,1	37,6	1,24	0,86	22,5	9,4	44,1
0,62	0,27	78,6	29,7	37,2	1,26	0,86	22,1	9,3	44,9
0,63	0,28	75,5	28,3	36,8	1,28	0,87	21,8	9,2	45,8
0,64	0,30	72,7	27,1	36,5	1,30	0,88	21,4	9,1	46,6
0,65	0,31	70,1	25,9	36,2	1,32	0,88	21,1	9,1	47,5
0,66	0,32	67,6	24,9	35,9	1,34	0,89	20,8	9,0	48,4
0,67	0,34	65,3	23,9	35,7	1,36	0,90	20,6	8,9	49,3
0,68	0,35	63,1	23,0	35,5	1,38	0,90	20,3	8,9	50,2
0,69	0,36	61,1	22,1	35,3	1,40	0,91	20,0	8,8	51,2
0,70	0,38	59,1	21,3	35,1	1,42	0,91	19,8	8,8	52,1
0,71	0,39	57,3	20,6	34,9	1,44	0,92	19,6	8,7	53,2
0,72	0,40	55,6	19,9	34,8	1,46	0,92	19,4	8,7	54,2
0,73	0,42	54,0	19,3	34,7	1,48	0,92	19,2	8,7	55,2
0,74	0,43	52,4	18,7	34,6	1,50	0,93	19,0	8,6	56,3
0,75	0,44	51,0	18,1	34,5	1,52	0,93	18,8	8,6	57,4
0,76	0,46	49,6	17,6	34,4	1,54	0,93	18,7	8,6	58,5
0,77	0,47	48,2	17,1	34,4	1,56	0,94	18,5	8,5	59,6
0,78	0,48	47,0	16,7	34,4	1,58	0,94	18,4	8,5	60,8
0,79	0,49	45,8	16,2	34,4	1,60	0,94	18,2	8,5	61,9
0,80	0,51	44,7	15,8	34,4	1,62	0,95	18,1	8,5	63,1
0,81	0,52	43,6	15,4	34,4	1,64	0,95	18,0	8,4	64,3
0,82	0,53	42,5	15,1	34,4	1,66	0,95	17,9	8,4	65,6
0,83	0,54	41,6	14,7	34,4	1,68	0,95	17,7	8,4	66,8
0,84	0,56	40,6	14,4	34,5	1,70	0,95	17,6	8,4	68,1
0,85	0,57	39,7	14,1	34,6	1,72	0,96	17,5	8,4	69,3
0,86	0,58	38,8	13,9	34,6	1,74	0,96	17,4	8,4	70,7
0,87	0,59	38,0	13,6	34,7	1,76	0,96	17,3	8,3	72,0
0,88	0,60	37,2	13,3	34,8	1,78	0,96	17,2	8,3	73,3
0,89	0,61	36,5	13,1	34,9	1,80	0,96	17,2	8,3	74,7
0,90	0,62	35,7	12,9	35,0	1,82	0,97	17,1	8,3	76,1
0,91	0,63	35,1	12,7	35,2	1,84	0,97	17,0	8,3	77,4
0,92	0,64	34,4	12,5	35,3	1,86	0,97	16,9	8,3	78,9
0,93	0,65	33,7	12,3	35,5	1,88	0,97	16,8	8,3	80,3
0,94	0,66	33,1	12,1	35,6	1,90	0,97	16,8	8,3	81,7
0,95	0,67	32,5	11,9	35,8	1,92	0,97	16,7	8,2	83,2
0,96	0,68	32,0	11,8	36,0	1,94	0,97	16,6	8,2	84,7
0,97	0,69	31,4	11,6	36,1	1,96	0,97	16,6	8,2	86,2
0,98	0,70	30,9	11,5	36,3	1,98	0,98	16,5	8,2	87,7
0,99	0,71	30,4	11,3	36,5	2,00	0,98	16,5	8,2	89,3
1,00	0,71	29,9	11,2	36,8					

Fonte: Clímaco (2015)

Imagem 24 – Tabela relativa ao caso 3

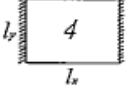
$l_x \begin{matrix} 3 \\ l_y \geq l_x \end{matrix}$

$$M_x = pl_x^2/m_x; X_x = pl_x^2/n_x; M_y = pl_x^2/m_y; X_y = pl_x^2/n_y; p_x = k_x p$$

$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	n_x	m_y	n_y	$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	n_x	m_y	
1,00	0,50	37,2	16,0	37,2	16,0	-	-	-	-	-	-
1,01	0,51	36,4	15,7	37,2	16,0	1,51	0,84	20,5	9,5	46,7	21,8
1,02	0,52	35,7	15,4	37,2	16,0	1,52	0,84	20,4	9,5	47,1	22,0
1,03	0,53	35,1	15,1	37,2	16,0	1,53	0,85	20,2	9,5	47,4	22,1
1,04	0,54	34,4	14,8	37,2	16,1	1,54	0,85	20,1	9,4	47,7	22,4
1,05	0,55	33,8	14,6	37,3	16,1	1,55	0,85	20,0	9,4	48,1	22,6
1,06	0,56	33,2	14,3	37,3	16,1	1,56	0,86	19,9	9,4	48,4	22,8
1,07	0,57	32,7	14,1	37,4	16,2	1,57	0,86	19,8	9,3	48,8	23,0
1,08	0,58	32,1	13,9	37,5	16,2	1,58	0,86	19,7	9,3	49,2	23,2
1,09	0,59	31,6	13,7	37,5	16,2	1,59	0,87	19,6	9,3	49,5	23,4
1,10	0,59	31,1	13,5	37,6	16,3	1,60	0,87	19,5	9,2	49,9	23,6
1,11	0,60	30,6	13,3	37,7	16,4	1,61	0,87	19,4	9,2	50,3	23,8
1,12	0,61	30,2	13,1	37,8	16,4	1,62	0,87	19,3	9,2	50,6	24,0
1,13	0,62	29,7	12,9	37,9	16,5	1,63	0,88	19,2	9,1	51,0	24,3
1,14	0,63	29,3	12,7	38,0	16,6	1,64	0,88	19,1	9,1	51,4	24,5
1,15	0,64	28,9	12,6	38,2	16,6	1,65	0,88	19,0	9,1	51,8	24,7
1,16	0,64	28,5	12,4	38,3	16,7	1,66	0,88	18,9	9,1	52,2	25,0
1,17	0,65	28,1	12,3	38,4	16,8	1,67	0,89	18,9	9,0	52,6	25,2
1,18	0,66	27,7	12,1	38,6	16,9	1,68	0,89	18,8	9,0	53,0	25,4
1,19	0,67	27,4	12,0	38,7	17,0	1,69	0,89	18,7	9,0	53,4	25,7
1,20	0,68	27,0	11,9	38,9	17,1	1,70	0,89	18,6	9,0	53,8	25,9
1,21	0,68	26,7	11,7	39,1	17,2	1,71	0,90	18,6	8,9	54,2	26,1
1,22	0,69	26,4	11,6	39,2	17,3	1,72	0,90	18,5	8,9	54,7	26,4
1,23	0,70	26,1	11,5	39,4	17,4	1,73	0,90	18,4	8,9	55,1	26,6
1,24	0,70	25,8	11,4	39,6	17,5	1,74	0,90	18,3	8,9	55,5	26,9
1,25	0,71	25,5	11,3	39,8	17,6	1,75	0,90	18,3	8,9	55,9	27,1
1,26	0,72	25,2	11,2	40,0	17,7	1,76	0,91	18,2	8,8	56,4	27,4
1,27	0,72	24,9	11,1	40,2	17,9	1,77	0,91	18,1	8,8	56,8	27,6
1,28	0,73	24,7	11,0	40,4	18,0	1,78	0,91	18,1	8,8	57,3	27,9
1,29	0,74	24,4	10,9	40,6	18,1	1,79	0,91	18,0	8,8	57,7	28,1
1,30	0,74	24,2	10,8	40,8	18,3	1,80	0,91	18,0	8,8	58,1	28,4
1,31	0,75	23,9	10,7	41,1	18,4	1,81	0,92	17,9	8,8	58,6	28,7
1,32	0,75	23,7	10,6	41,3	18,5	1,82	0,92	17,8	8,7	59,1	28,9
1,33	0,76	23,5	10,6	41,5	18,7	1,83	0,92	17,8	8,7	59,5	29,2
1,34	0,76	23,3	10,5	41,8	18,8	1,84	0,92	17,7	8,7	60,0	29,5
1,35	0,77	23,1	10,4	42,0	19,0	1,85	0,92	17,7	8,7	60,5	29,7
1,36	0,77	22,9	10,3	42,3	19,1	1,86	0,92	17,6	8,7	60,9	30,0
1,37	0,78	22,7	10,3	42,5	19,3	1,87	0,92	17,6	8,7	61,4	30,3
1,38	0,78	22,5	10,2	42,8	19,4	1,88	0,93	17,5	8,6	61,9	30,5
1,39	0,79	22,3	10,1	43,1	19,6	1,89	0,93	17,5	8,6	62,4	30,8
1,40	0,79	22,1	10,1	43,4	19,8	1,90	0,93	17,4	8,6	62,9	31,1
1,41	0,80	22,0	10,0	43,6	19,9	1,91	0,93	17,4	8,6	63,4	31,4
1,42	0,80	21,8	10,0	43,9	20,1	1,92	0,93	17,3	8,6	63,8	31,7
1,43	0,81	21,6	9,9	44,2	20,3	1,93	0,93	17,3	8,6	64,3	32,0
1,44	0,81	21,5	9,9	44,5	20,5	1,94	0,93	17,2	8,6	64,8	32,2
1,45	0,82	21,3	9,8	44,8	20,6	1,95	0,94	17,2	8,6	65,4	32,5
1,46	0,82	21,2	9,8	45,1	20,8	1,96	0,94	17,1	8,5	65,9	32,8
1,47	0,82	21,0	9,7	45,4	21,0	1,97	0,94	17,1	8,5	66,4	33,1
1,48	0,83	20,9	9,7	45,7	21,2	1,98	0,94	17,1	8,5	66,9	33,4
1,49	0,83	20,8	9,6	46,1	21,4	1,99	0,94	17,0	8,5	67,4	33,7
1,50	0,84	20,6	9,6	46,4	21,6	2,00	0,94	17,0	8,5	67,9	34,0

Fonte: Clímaco (2015)

Imagem 25 – Tabela relativa ao caso 4



$$M_x = pl_x^2/m_x; X_x = pl_x^2/n_x; M_y = pl_x^2/m_y; P_x = k_x P$$

$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	n_x	m_y	$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	n_x	
0,50	0,24	137,1	50,4	49,9	-	-	-	-	-
0,51	0,25	130,1	47,5	49,1	1,02	0,84	36,7	14,2	57,0
0,52	0,27	123,7	44,8	48,4	1,04	0,85	36,0	14,1	58,3
0,53	0,28	117,8	42,4	47,7	1,06	0,86	35,4	13,9	59,7
0,54	0,30	112,4	40,2	47,1	1,08	0,87	34,7	13,8	61,1
0,55	0,31	107,4	38,2	46,6	1,10	0,88	34,2	13,6	62,6
0,56	0,33	102,8	36,4	46,1	1,12	0,89	33,7	13,5	64,1
0,57	0,35	98,6	34,7	45,7	1,14	0,89	33,2	13,4	65,7
0,58	0,36	94,7	33,2	45,4	1,16	0,90	32,7	13,3	67,3
0,59	0,38	91,0	31,8	45,0	1,18	0,91	32,3	13,2	68,9
0,60	0,39	87,6	30,5	44,8	1,20	0,91	31,9	13,2	70,6
0,61	0,41	84,5	29,3	44,6	1,22	0,92	31,6	13,1	72,3
0,62	0,43	81,5	28,2	44,4	1,24	0,92	31,2	13,0	74,1
0,63	0,44	78,8	27,2	44,2	1,26	0,93	30,9	13,0	75,9
0,64	0,46	76,2	26,3	44,1	1,28	0,93	30,6	12,9	77,8
0,65	0,47	73,8	25,4	44,0	1,30	0,94	30,3	12,8	79,7
0,66	0,49	71,5	24,7	44,0	1,32	0,94	30,1	12,8	81,6
0,67	0,50	69,4	23,9	44,0	1,34	0,94	29,8	12,7	83,6
0,68	0,52	67,4	23,2	44,0	1,36	0,95	29,6	12,7	85,6
0,69	0,53	65,5	22,6	44,0	1,38	0,95	29,4	12,7	87,7
0,70	0,55	63,7	22,0	44,1	1,40	0,95	29,2	12,6	89,7
0,71	0,56	62,0	21,4	44,2	1,42	0,95	29,0	12,6	91,9
0,72	0,57	60,4	20,9	44,3	1,44	0,96	28,8	12,6	94,0
0,73	0,59	58,9	20,5	44,5	1,46	0,96	28,6	12,5	96,2
0,74	0,60	57,5	20,0	44,7	1,48	0,96	28,5	12,5	98,5
0,75	0,61	56,2	19,6	44,9	1,50	0,96	28,3	12,5	100,7
0,76	0,63	54,9	19,2	45,1	1,52	0,96	28,2	12,5	103,0
0,77	0,64	53,7	18,8	45,3	1,54	0,97	28,0	12,4	105,4
0,78	0,65	52,5	18,5	45,6	1,56	0,97	27,9	12,4	107,8
0,79	0,66	51,5	18,2	45,9	1,58	0,97	27,8	12,4	110,2
0,80	0,67	50,4	17,9	46,2	1,60	0,97	27,6	12,4	112,6
0,81	0,68	49,4	17,6	46,5	1,62	0,97	27,5	12,4	115,1
0,82	0,69	48,5	17,3	46,8	1,64	0,97	27,4	12,3	117,7
0,83	0,70	47,6	17,1	47,2	1,66	0,97	27,3	12,3	120,2
0,84	0,71	46,8	16,8	47,6	1,68	0,98	27,2	12,3	122,8
0,85	0,72	46,0	16,6	48,0	1,70	0,98	27,1	12,3	125,4
0,86	0,73	45,2	16,4	48,4	1,72	0,98	27,0	12,3	128,1
0,87	0,74	44,5	16,2	48,8	1,74	0,98	26,9	12,3	130,8
0,88	0,75	43,8	16,0	49,3	1,76	0,98	26,9	12,3	133,5
0,89	0,76	43,1	15,8	49,7	1,78	0,98	26,8	12,2	136,3
0,90	0,77	42,5	15,7	50,2	1,80	0,98	26,7	12,2	139,1
0,91	0,77	41,9	15,5	50,7	1,82	0,98	26,6	12,2	141,9
0,92	0,78	41,3	15,4	51,2	1,84	0,98	26,6	12,2	144,8
0,93	0,79	40,7	15,2	51,7	1,86	0,98	26,5	12,2	147,7
0,94	0,80	40,2	15,1	52,2	1,88	0,98	26,4	12,2	150,6
0,95	0,80	39,7	15,0	52,8	1,90	0,99	26,4	12,2	153,6
0,96	0,81	39,2	14,8	53,4	1,92	0,99	26,3	12,2	156,6
0,97	0,82	38,8	14,7	53,9	1,94	0,99	26,3	12,2	159,6
0,98	0,82	38,3	14,6	54,5	1,96	0,99	26,2	12,2	162,7
0,99	0,83	37,9	14,5	55,1	1,98	0,99	26,1	12,2	165,8
1,00	0,83	37,5	14,4	55,7	2,00	0,99	26,1	12,2	169,0

Fonte: Clímaco (2015)

Imagem 26 – Tabela relativa ao caso 5

l_y 5

$$M_x = pl_x^2/m_x; X_x = pl_x^2/n_x; M_y = pl_x^2/m_y; X_y = pl_x^2/n_y; p_x = k_x p$$

$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	n_x	m_y	n_y	$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	n_x	m_y	n_y
0,50	0,11	246,4	108,0	71,4	36,0	-	-	-	-	-	-
0,51	0,12	230,8	100,7	69,5	34,9	1,02	0,68	42,9	17,5	51,1	24,3
0,52	0,13	216,5	94,1	67,8	33,9	1,04	0,70	41,8	17,1	51,8	24,7
0,53	0,14	203,5	88,0	66,1	33,0	1,06	0,72	40,7	16,8	52,5	25,1
0,54	0,15	191,7	82,6	64,6	32,1	1,08	0,73	39,7	16,4	53,2	25,5
0,55	0,16	180,8	77,6	63,2	31,3	1,10	0,75	38,8	16,1	54,0	26,0
0,56	0,16	170,9	73,0	61,9	30,5	1,12	0,76	38,0	15,8	54,8	26,5
0,57	0,17	161,8	68,8	60,6	29,8	1,14	0,77	37,3	15,6	55,7	27,0
0,58	0,19	153,4	65,0	59,5	29,2	1,16	0,78	36,5	15,3	56,6	27,5
0,59	0,20	145,7	61,5	58,4	28,6	1,18	0,80	35,9	15,1	57,5	28,0
0,60	0,21	138,6	58,3	57,4	28,0	1,20	0,81	35,3	14,9	58,5	28,6
0,61	0,22	132,1	55,3	56,5	27,5	1,22	0,82	34,7	14,7	59,5	29,2
0,62	0,23	126,0	52,6	55,7	27,0	1,24	0,83	34,2	14,5	60,6	29,8
0,63	0,24	120,4	50,1	54,9	26,5	1,26	0,83	33,7	14,4	61,7	30,4
0,64	0,25	115,1	47,8	54,2	26,1	1,28	0,84	33,2	14,2	62,9	31,1
0,65	0,26	110,3	45,6	53,5	25,7	1,30	0,85	32,8	14,1	64,0	31,8
0,66	0,28	105,8	43,6	52,9	25,3	1,32	0,86	32,4	14,0	65,3	32,5
0,67	0,29	101,6	41,8	52,3	25,0	1,34	0,87	32,0	13,9	66,5	33,2
0,68	0,30	97,7	40,1	51,8	24,7	1,36	0,87	31,7	13,8	67,8	33,9
0,69	0,31	94,1	38,5	51,3	24,4	1,38	0,88	31,3	13,7	69,1	34,7
0,70	0,32	90,7	37,0	50,9	24,2	1,40	0,89	31,0	13,6	70,5	35,4
0,71	0,34	87,5	35,6	50,5	23,9	1,42	0,89	30,7	13,5	71,8	36,2
0,72	0,35	84,5	34,3	50,1	23,7	1,44	0,90	30,4	13,4	73,3	37,0
0,73	0,36	81,7	33,1	49,8	23,5	1,46	0,90	30,2	13,3	74,7	37,9
0,74	0,38	79,1	32,0	49,5	23,4	1,48	0,91	29,9	13,3	76,2	38,7
0,75	0,39	76,6	31,0	49,2	23,2	1,50	0,91	29,7	13,2	77,7	39,6
0,76	0,40	74,3	30,0	49,0	23,1	1,52	0,91	29,5	13,1	79,2	40,4
0,77	0,41	72,1	29,1	48,8	23,0	1,54	0,92	29,3	13,1	80,8	41,3
0,78	0,43	70,0	28,2	48,7	22,9	1,56	0,92	29,1	13,0	82,4	42,2
0,79	0,44	68,1	27,4	48,5	22,8	1,58	0,93	28,9	13,0	84,0	43,2
0,80	0,45	66,2	26,7	48,4	22,7	1,60	0,93	28,7	12,9	85,7	44,1
0,81	0,46	64,5	25,9	48,3	22,7	1,62	0,93	28,6	12,9	87,3	45,0
0,82	0,48	62,9	25,3	48,3	22,7	1,64	0,94	28,4	12,8	89,0	46,0
0,83	0,49	61,3	24,6	48,2	22,6	1,66	0,94	28,3	12,8	90,8	47,0
0,84	0,50	59,9	24,1	48,2	22,6	1,68	0,94	28,1	12,8	92,5	48,0
0,85	0,51	58,5	23,5	48,2	22,6	1,70	0,94	28,0	12,7	94,3	49,0
0,86	0,52	57,2	23,0	48,3	22,7	1,72	0,95	27,8	12,7	96,2	50,0
0,87	0,53	55,9	22,5	48,3	22,7	1,74	0,95	27,7	12,7	98,0	51,1
0,88	0,55	54,7	22,0	48,4	22,7	1,76	0,95	27,6	12,6	99,9	52,1
0,89	0,56	53,6	21,6	48,5	22,8	1,78	0,95	27,5	12,6	101,8	53,2
0,90	0,57	52,5	21,1	48,6	22,8	1,80	0,96	27,4	12,6	103,7	54,3
0,91	0,58	51,5	20,8	48,7	22,9	1,82	0,96	27,3	12,6	105,7	55,4
0,92	0,59	50,5	20,4	48,8	23,0	1,84	0,96	27,2	12,5	107,6	56,5
0,93	0,60	49,6	20,0	49,0	23,1	1,86	0,96	27,1	12,5	109,6	57,7
0,94	0,61	48,7	19,7	49,2	23,2	1,88	0,96	27,0	12,5	111,7	58,8
0,95	0,62	47,9	19,4	49,4	23,3	1,90	0,96	26,9	12,5	113,7	60,0
0,96	0,63	47,1	19,1	49,6	23,4	1,92	0,97	26,8	12,4	115,8	61,2
0,97	0,64	46,3	18,8	49,8	23,6	1,94	0,97	26,8	12,4	117,9	62,3
0,98	0,65	45,6	18,5	50,0	23,7	1,96	0,97	26,7	12,4	120,0	63,6
0,99	0,66	44,9	18,3	50,3	23,8	1,98	0,97	26,6	12,4	122,2	64,8
1,00	0,67	44,2	18,0	50,6	24,0	2,00	0,97	26,5	12,4	124,4	66,0

Fonte: Clímaco (2015)

Imagem 27 – Tabela relativa ao caso 6

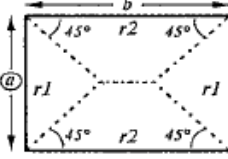
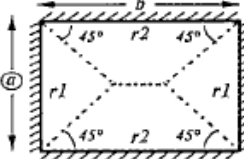
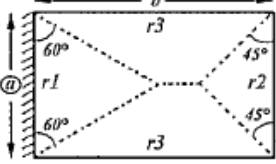
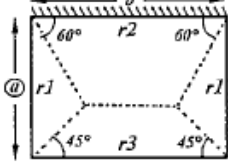
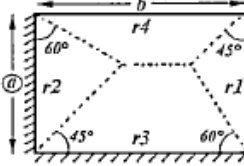
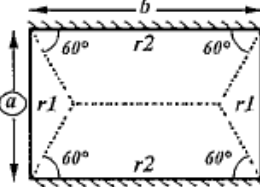
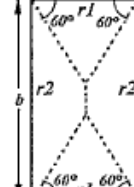
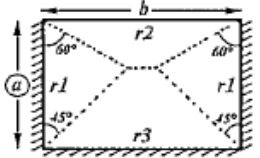
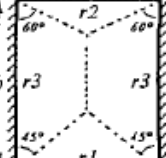
$$M_x = pl_x^2/m_x; X_x = pl_x^2/n_x; M_y = pl_x^2/m_y; X_y = pl_x^2/n_y; p_x = k_x p$$

l_x 6
 $l_y \geq l_x$

$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	n_x	m_y	n_y	$\lambda = l_y/l_x$	k_x	m_x	n_x	m_y	n_y
1,00	0,50	55,7	24,0	55,7	24,0	-	-	-	-	-	-
1,01	0,51	54,7	23,5	55,8	24,0	1,51	0,84	31,9	14,3	72,7	32,6
1,02	0,52	53,6	23,1	55,8	24,0	1,52	0,84	31,7	14,2	73,3	32,9
1,03	0,53	52,6	22,7	55,8	24,0	1,53	0,85	31,5	14,2	73,8	33,2
1,04	0,54	51,7	22,3	55,9	24,1	1,54	0,85	31,4	14,1	74,4	33,5
1,05	0,55	50,8	21,9	56,0	24,1	1,55	0,85	31,2	14,1	75,0	33,8
1,06	0,56	49,9	21,5	56,1	24,2	1,56	0,86	31,1	14,0	75,7	34,1
1,07	0,57	49,1	21,2	56,2	24,2	1,57	0,86	30,9	14,0	76,3	34,4
1,08	0,58	48,3	20,8	56,3	24,3	1,58	0,86	30,8	13,9	76,9	34,8
1,09	0,59	47,5	20,5	56,4	24,4	1,59	0,87	30,7	13,9	77,5	35,1
1,10	0,59	46,8	20,2	56,5	24,4	1,60	0,87	30,5	13,8	78,2	35,4
1,11	0,60	46,1	19,9	56,6	24,5	1,61	0,87	30,4	13,8	78,8	35,7
1,12	0,61	45,4	19,6	56,9	24,6	1,62	0,87	30,3	13,7	79,5	36,1
1,13	0,62	44,8	19,4	57,1	24,7	1,63	0,88	30,2	13,7	80,1	36,4
1,14	0,63	44,1	19,1	57,4	24,8	1,64	0,88	30,0	13,7	80,8	36,7
1,15	0,64	43,5	18,9	57,6	24,9	1,65	0,88	29,9	13,6	81,5	37,1
1,16	0,64	43,0	18,6	57,8	25,1	1,66	0,88	29,8	13,6	82,2	37,4
1,17	0,65	42,4	18,4	58,1	25,2	1,67	0,89	29,7	13,5	82,9	37,8
1,18	0,66	41,9	18,2	58,3	25,3	1,68	0,89	29,6	13,5	83,5	38,1
1,19	0,67	41,4	18,0	58,5	25,5	1,69	0,89	29,5	13,5	84,2	38,5
1,20	0,68	40,9	17,8	58,9	25,6	1,70	0,89	29,4	13,4	85,0	38,8
1,21	0,68	40,4	17,6	59,2	25,8	1,71	0,90	29,3	13,4	85,7	39,2
1,22	0,69	40,0	17,4	59,5	25,9	1,72	0,90	29,2	13,4	86,4	39,6
1,23	0,70	39,5	17,2	59,8	26,1	1,73	0,90	29,1	13,3	87,1	39,9
1,24	0,70	39,1	17,1	60,1	26,3	1,74	0,90	29,0	13,3	87,9	40,3
1,25	0,71	38,7	16,9	60,5	26,4	1,75	0,90	28,9	13,3	88,6	40,7
1,26	0,72	38,3	16,8	60,8	26,6	1,76	0,91	28,8	13,3	89,3	41,0
1,27	0,72	37,9	16,6	61,2	26,8	1,77	0,91	28,8	13,2	90,1	41,4
1,28	0,73	37,6	16,5	61,6	27,0	1,78	0,91	28,7	13,2	90,9	41,8
1,29	0,74	37,2	16,3	62,0	27,2	1,79	0,91	28,6	13,2	91,6	42,2
1,30	0,74	36,9	16,2	62,4	27,4	1,80	0,91	28,5	13,1	92,4	42,6
1,31	0,75	36,6	16,1	62,8	27,6	1,81	0,92	28,4	13,1	93,2	43,0
1,32	0,75	36,3	16,0	63,2	27,8	1,82	0,92	28,4	13,1	94,0	43,4
1,33	0,76	35,9	15,8	63,6	28,0	1,83	0,92	28,3	13,1	94,8	43,8
1,34	0,76	35,7	15,7	64,0	28,2	1,84	0,92	28,2	13,0	95,6	44,2
1,35	0,77	35,4	15,6	64,5	28,5	1,85	0,92	28,2	13,0	96,4	44,6
1,36	0,77	35,1	15,5	64,9	28,7	1,86	0,92	28,1	13,0	97,2	45,0
1,37	0,78	34,8	15,4	65,4	28,9	1,87	0,92	28,0	13,0	98,0	45,4
1,38	0,78	34,6	15,3	65,8	29,2	1,88	0,93	28,0	13,0	98,8	45,8
1,39	0,79	34,3	15,2	66,3	29,4	1,89	0,93	27,9	12,9	99,6	46,2
1,40	0,79	34,1	15,1	66,8	29,6	1,90	0,93	27,8	12,9	100,5	46,6
1,41	0,80	33,8	15,0	67,3	29,9	1,91	0,93	27,8	12,9	101,3	47,1
1,42	0,80	33,6	15,0	67,8	30,1	1,92	0,93	27,7	12,9	102,2	47,5
1,43	0,81	33,4	14,9	68,3	30,4	1,93	0,93	27,7	12,9	103,0	47,9
1,44	0,81	33,2	14,8	68,8	30,7	1,94	0,93	27,6	12,8	103,9	48,4
1,45	0,82	33,0	14,7	69,3	30,9	1,95	0,94	27,5	12,8	104,7	48,8
1,46	0,82	32,8	14,6	69,9	31,2	1,96	0,94	27,5	12,8	105,6	49,2
1,47	0,82	32,6	14,6	70,4	31,5	1,97	0,94	27,4	12,8	106,5	49,7
1,48	0,83	32,4	14,5	71,0	31,8	1,98	0,94	27,4	12,8	107,4	50,1
1,49	0,83	32,2	14,4	71,5	32,0	1,99	0,94	27,3	12,8	108,2	50,6
1,50	0,84	32,0	14,4	72,1	32,3	2,00	0,94	27,3	12,8	109,1	51,0

Fonte: Clímaco (2015)

Imagem 28 – Reações de apoio uniformemente distribuídas nos bordos de lajes retangulares

Casos 1 e 6	$a \leq b$ $r1 = 0,25 pa$ $r2 = 0,25 (2-a/b) pa$			
Casos 2	<p>1º Tipo</p> $a/b \leq 0,73$ $r1 = 0,43 pa$ $r2 = 0,25 pa$ $r3 = 0,34(1,46-a/b) pa$		<p>2º Tipo</p> $a/b \leq 1,37$ $r1 = 0,18 pa$ $r2 = 0,23(2,73-a/b) pa$ $r3 = 0,13 (2,73-a/b) pa$	
Casos 3	$a \leq b$ $r1 = 0,18 pa$ $r2 = 0,32 pa$ $r3 = 0,32 (2-a/b) pa$ $r4 = 0,18 (2-a/b) pa$			
Casos 4	<p>1º Tipo</p> $a/b \leq 1,73$ $r1 = 0,144 pa$ $r2 = 0,14 (3,46-a/b) pa$		<p>2º Tipo</p> $a/b \leq 0,57$ $r1 = 0,43 pa$ $r2 = 0,43 (1,15-a/b) pa$	
Casos 5 (*)	<p>1º Tipo</p> $a/b \leq 0,79$ $r1 = 0,32 pa$ $r2 = 0,23 (1,58-a/b) pa$ $r3 = 0,40 (1,58-a/b) pa$		<p>2º Tipo</p> $a/b \leq 1,27$ $r1 = 0,25 pa$ $r2 = 0,144 pa$ $r3 = 0,20 (2,54-a/b) pa$	

Fonte: Clímaco (2015)

4.3.2 Steel Deck.

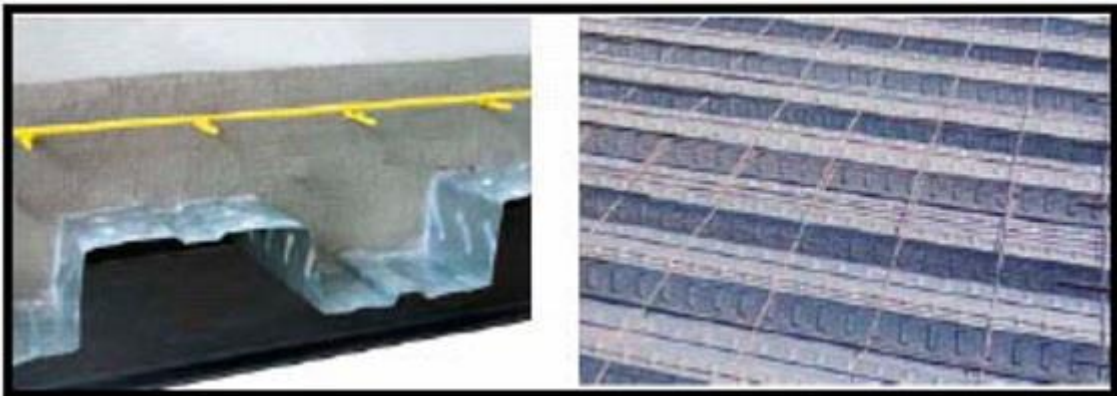
4.3.2.1 Sistema estrutural

O Steel Deck é uma laje composta por uma telha de aço galvanizado e uma camada de concreto, podendo ser de densidade normal ou leve. Durante a construção, o deck de aço serve de fôrma para o concreto. E após a cura, o deck substitui a armadura de tração resistindo aos momentos fletores positivos, estando o concreto comprimido entre as suas nervuras. Caso haja vários tramos consecutivos, a laje comporta-se como um elemento estrutural contínuo, com momentos fletores negativos, sendo necessário incorporar uma armadura superior aos apoios

(DIAS, 2006). Segundo a ABNT NBR 8800:2008, Anexo Q, antes do concreto atingir 75% da resistência à compressão especificada, a fôrma de aço suporta isoladamente as ações permanentes e a sobrecarga de construção.

Para que haja integração entre aço-concreto, a fôrma de aço deve transmitir o cisalhamento longitudinal através de: ligações mecânicas, como, mossas, ranhuras na chapa metálica e os conectores de cisalhamento “stud bolt”; ligações por atrito, devido ao confinamento do concreto nas fôrmas com cantos reentrantes (QUEIROZ; PIMENTA; MARTINS, 2012). A Imagem 29 ilustra as mossas e ranhuras na chapa metálica.

Imagem 29 – Detalhe das mossas e ranhuras na laje Steel Deck



Fonte: Saúde e Raimundo (2011)

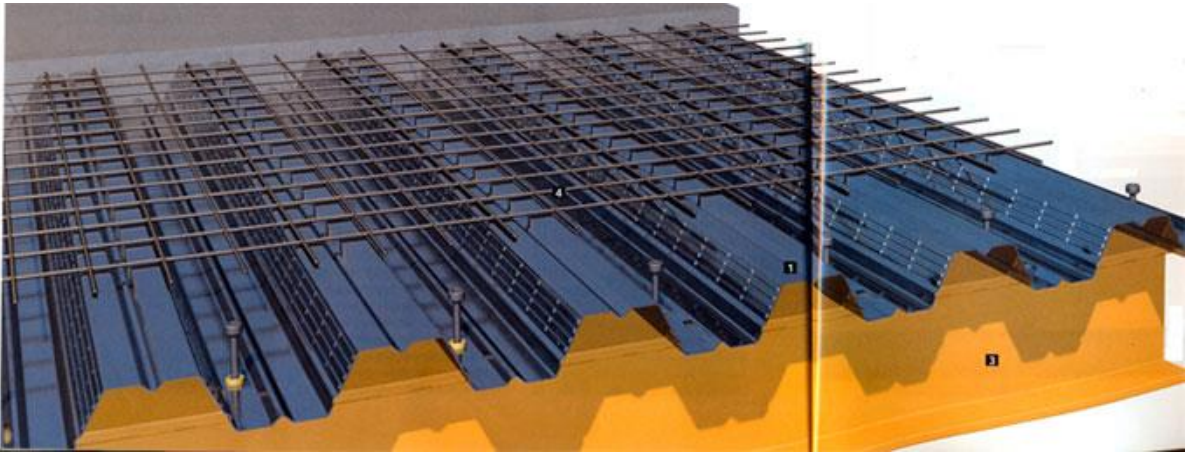
De acordo com Dias (2006), as telhas trapezoidais são indicadas para locais em que há uma constante carga distribuída, apresentam largura útil de 865 mm, espessuras de 0,80, 0,95 e 1,20 mm, altura da fôrma de aço de 75 mm e comprimento variando entre 1,5 e 12 m. O Steel Deck é perfilado a partir de chapas galvanizadas de aço ASTM A 446 Grau A, com tensão de escoamento de 230 Mpa. Sendo que o concreto deve ter resistência à compressão (f_{ck}) maior ou igual a 20 Mpa. A espessura do concreto que deve ser lançado depende: do comprimento das chapas de aço, sem apoios intermediários; dos tramos (simples, duplos ou triplos) e das cargas do projeto. Devendo ter espessura de 2 cm à 10,5 cm acima das cristas da telha.

O Steel Deck também é composto por telas eletrossoldadas, que atuam como armadura negativa, principalmente na direção normal das vigas. Normalmente, são do tipo malha em forma quadrada e com diâmetro pequeno, mas em grandes vãos é preciso calcular a armadura superior (SAÚDE; RAIMUNDO, 2011). Conforme a Imagem 30.

Esta armadura possui as seguintes vantagens (SAÚDE; RAIMUNDO, 2011):

- evitam o aparecimento de fissuras sobre os pontos de apoio;
- na ocorrência de fogo, adquirimos resistência à flexão nos apoios da laje;
- impede a fissuração no alinhamento dos conectores pois atua como armadura transversal.

Imagem 30 – Detalhe da laje Steel Deck



Fonte: Saúde e Raimundo (2011)

As lajes Steel Deck apresentam um bom desempenho em situação de incêndio. A presença da telha de aço é suficiente para assegurar a estanqueidade e o isolamento térmico pode ser garantido por uma espessura adequada de concreto. A resistência estrutural ao fogo é de no mínimo 30 minutos, podendo ser estendida até 120 minutos, com o uso adicional da armadura positiva no interior das nervuras (METÁLICA, 2009).

As vantagens do uso do Steel Deck são várias, podendo destacar (METÁLICA, 2009):

- a alta qualidade das chapas e conectores, pois são controladas em fábricas;
- dispensa escoramentos, e com isso, diminui os custos, como o aluguel de fôrmas, montagem, desmontagem e mão-de-obra. Além de acelerar o cronograma da obra, permitindo a execução de vários pavimentos simultaneamente, visto que, não dependemos do endurecimento do concreto. Dessa forma é ideal para edifícios altos, shopping centers, mercados, edifícios industriais, e outros devido a rapidez na execução

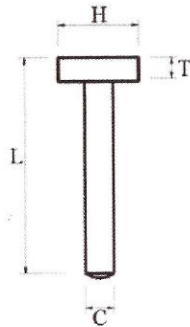
- o deck funciona como plataforma de trabalho, apoio de materiais e proteção aos operários que trabalham nos andares inferiores, aumentando a segurança;
- por serem leves, as chapas são transportadas facilmente por três funcionários. E ainda diminuem o peso próprio da estrutura;
- o projeto estrutural pode prever através da geometria das lajes, a passagem de dutos de diversas instalações e a fixação do forro.

4.3.2.2 Dimensionamento

4.3.3.2.1 Resistência dos conectores de rigidez do tipo pino com cabeça (stud bolt)

Os conectores “stud bolt”, são mais utilizados em estruturas de edificações para aplicações diretas sobre o perfil metálico e através da fôrma, no caso de laje mista. A Imagem 31 ilustra as dimensões e tolerâncias padronizadas dos conectores (QUEIROZ; PIMENTA; MARTINS, 2012):

Imagem 31 – Dimensões e tolerâncias dos conectores (stud bolt)



Diâmetro (C)		Tolerâncias de comprimento (L)		Diâmetro da cabeça do conector (H)	Altura mínima da cabeça do conector (T)
[pol]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
5/8"	15,9	+0,00 -0,25	±1,6	31,7 ± 0,4	7,1
3/4"	19,1	+0,00 -0,38	±1,6	31,7 ± 0,4	9,5
7/8"	22,2	+0,00 -0,38	±1,6	34,9 ± 0,4	9,5

Fonte: Queiroz, Pimenta e Martins (2012)

4.3.2.2.1.1 Determinação da resistência de cálculo dos conectores

$$Q_{Rd} = \frac{0,5 A_{cs} \sqrt{f_{ck} E_c}}{\gamma_{cs}} \text{ ou } Q_{Rd} = \frac{R_g R_p A_{cs} f_{ucs}}{\gamma_{cs}}, \quad \text{o menor dentre os dois valores}$$

Para os módulos de elasticidade do concreto obtidos de acordo com as seguintes fórmulas:

$$E_{cs} = E_c = \alpha e 5600 \sqrt{f_{ck}}, \quad \text{para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa}$$

Para os coeficientes do efeito da atuação de grupos de conectores (R_g) obtidos de acordo com as seguintes situações, conforme recomendações da ABNT NBR 8800:2008:

- Um conector soldado em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço, para qualquer número de conectores soldados diretamente no perfil de aço, ou ainda para qualquer número de conectores soldados através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço. E com a relação bF/hF igual ou superior a 1,5: $R_g = 1$;
- Dois conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço, ou para um conector soldado através de uma fôrma de aço em uma nervura paralela ao perfil de aço. E com a relação bF/hF inferior a 1,5: $R_g = 0,85$;
- Três ou mais conectores soldados em uma nervura de fôrma de aço perpendicular ao perfil de aço: $R_g = 0,7$.

Para os coeficientes do efeito da atuação das posições dos conectores (R_p) obtidos de acordo com as seguintes situações, conforme recomendações da ABNT NBR 8800:2008:

- Conectores soldados diretamente no perfil de aço e nos casos de haver nervuras paralelas a esse perfil se pelo menos 50% da largura da mesa superior estiver em contato direto com o concreto: $R_p = 1$;
- Conectores soldados em uma laje mista com as nervuras perpendiculares ao perfil de aço e em h for igual ou superior a 50 mm, ou para conectores soldados através de uma fôrma de aço e embutidos em uma laje mista com nervuras paralelas ao perfil de aço: $R_p = 0,75$;

- Conectores soldados em uma laje mista com nervuras perpendiculares ao perfil de aço e e_{mh} for inferior a 50 mm: $R_p = 0,60$.

Sendo que:

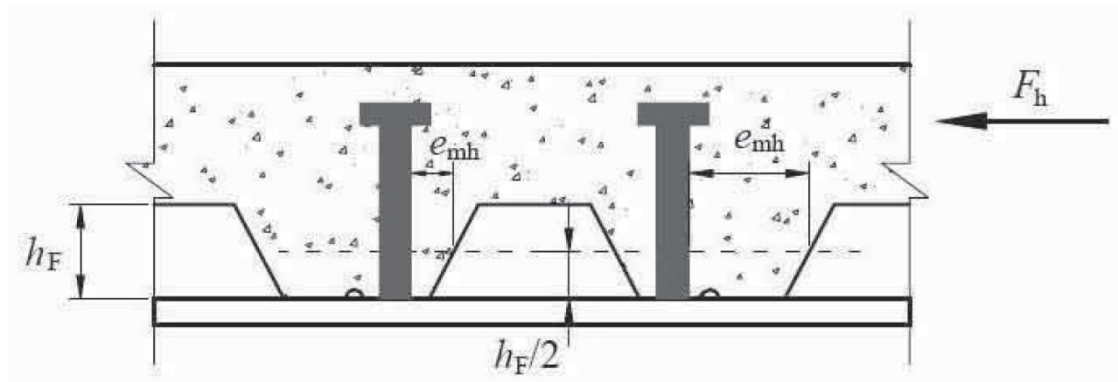
γ_{CS} é o coeficiente de ponderação da resistência do conector;

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

F_{UCS} é a resistência à ruptura do aço do conector;

e_{mh} é a distância da borda do fuste do conector à alma da nervura da fôrma de aço, medida à meia altura da nervura e no sentido da força cortante que atua no conector, conforme a Imagem 32.

Imagem 32 – Definição de e_{mh}

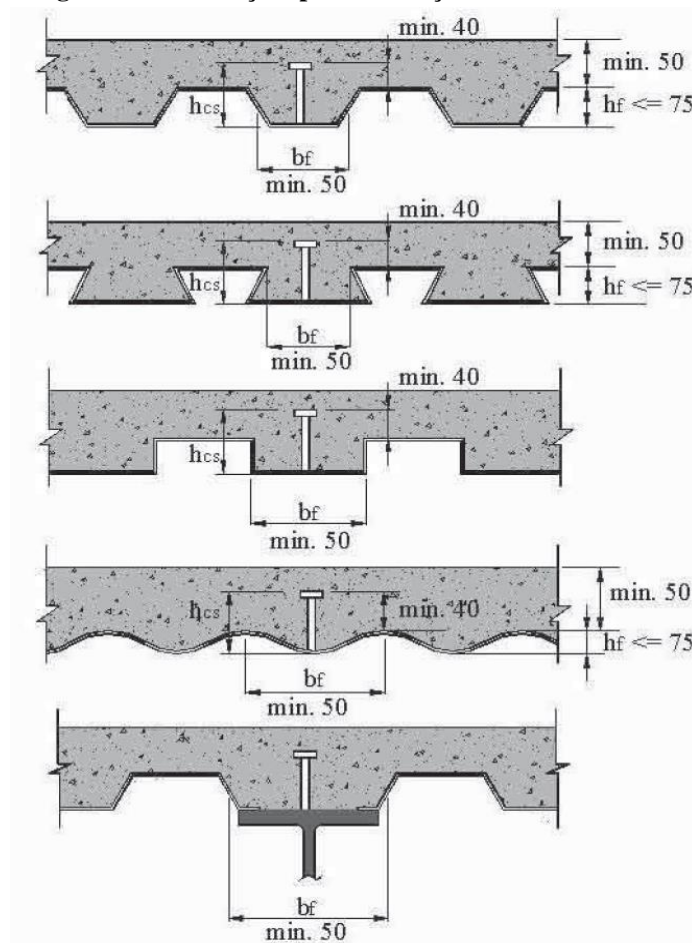


Fonte: Queiroz, Pimenta e Martins (2012)

Para que os conectores desempenhem adequadamente suas funções, as recomendações da ABNT NBR 8800:2008 são que a colocação dos conectores em fôrmas obedea as seguintes prescrições, ilustradas na Imagem 33: a face inferior da cabeça dos pinos (que resiste às forças verticais) deve estar acima da armadura do concreto; deve-se ter ao menos 10 mm de concreto acima da superfície superior da cabeça do conector; a espessura da chapa de aço onde serão instalados os conectores deve ser capaz de atender à sollicitação total dos conectores e da soldagem; a distância entre a face do conector e a borda do concreto não deve ser inferior a 25 mm, exceto quando os conectores são colocados nas nervuras das fôrmas de aço; a espessura de concreto acima da fôrma de aço deve ser de no mínimo 50 mm; o comprimento do pino acima da fôrma deve ser de no mínimo 40 mm; o espaçamento mínimo entre os conectores

devem ser seis vezes o diâmetro do pino na direção do eixo do perfil, de quatro vezes o diâmetro do pino na direção perpendicular ao eixo do perfil, ou de quatro vezes o diâmetro do pino em qualquer direção quando a laje for mista; o espaçamento máximo deve ser oito vezes a espessura da laje ou inferior a 915 mm quando as nervuras das fôrmas de aço forem perpendiculares à viga, assim como a ancoragem das fôrmas a intervalos iguais ou inferiores a 450 mm com conectores stud bolt combinados com soldas tipo bujão ou equivalente; o cobrimento de concreto deve respeitar a classe de agressividade recomendada pela ABNT NBR 6118:2014.

Imagem 33 – Prescrições para colocação de conectores em lajes mistas



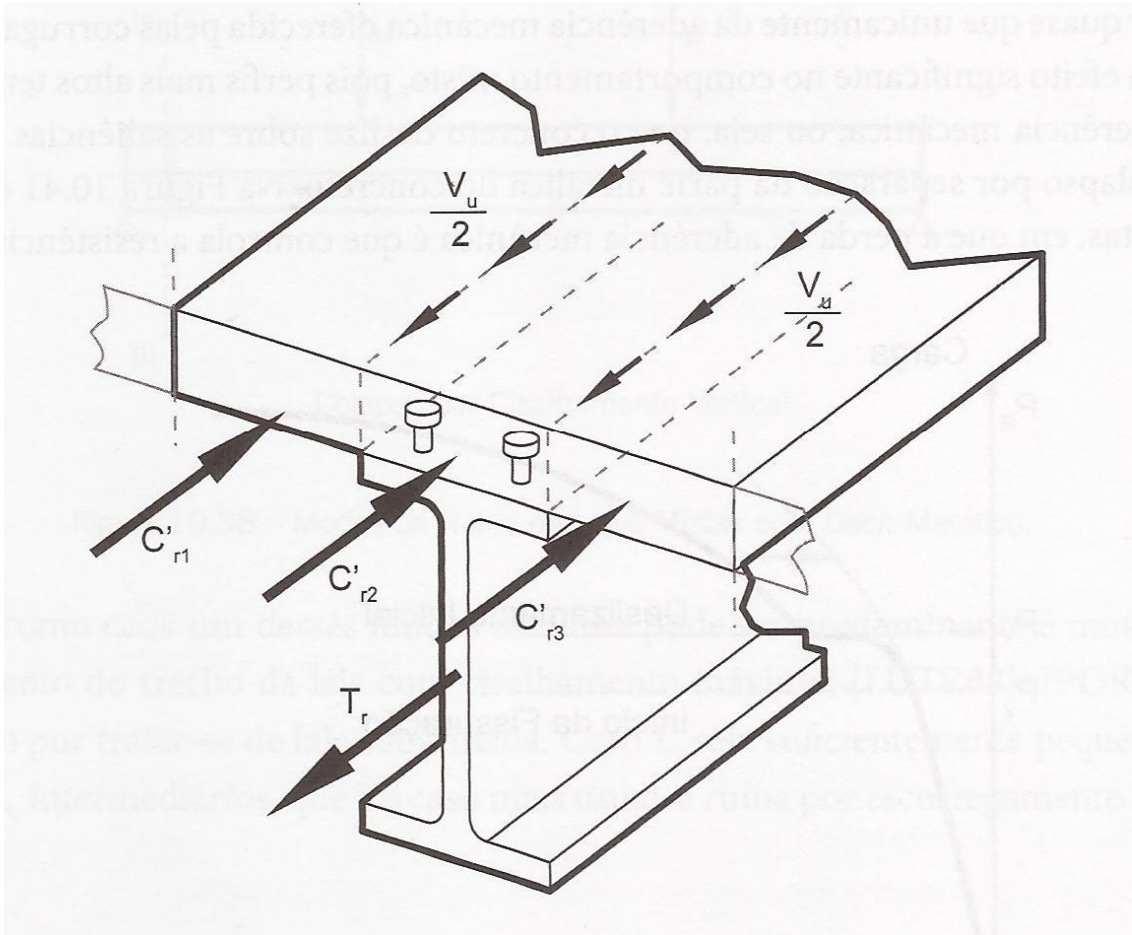
Fonte: Queiroz, Pimenta e Martins (2012)

4.3.2.2.2 Resistência longitudinal ao cisalhamento de lajes maciças ou mistas

De acordo com Andrade e Vellasco (2016), a transferência de esforços entre os conectores de rigidez e a laje de concreto, assim como à flexão conjunta da laje de concreto suportada pela

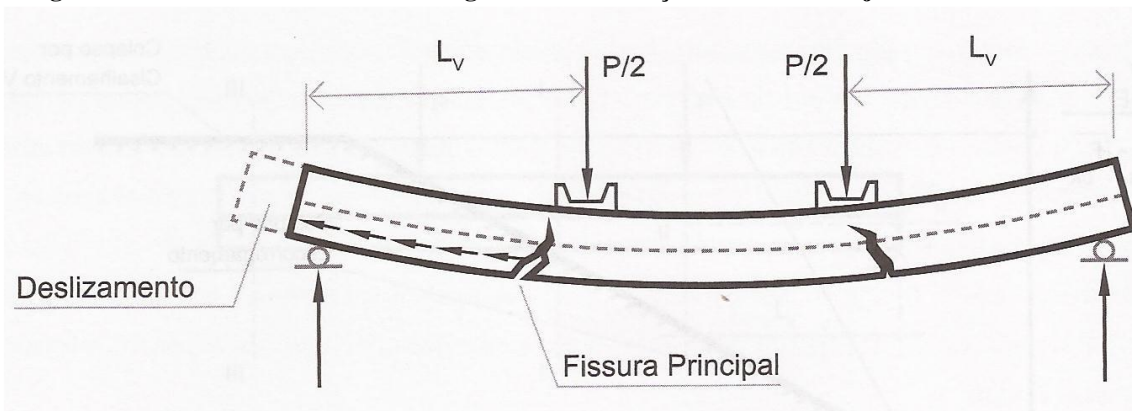
viga de aço, pode induzir o surgimento de fissuras quando a resistência ao cisalhamento longitudinal da laje é ultrapassada, conforme as imagens 34, 35, 36 e 37.

Imagem 34 – Ruína por cisalhamento longitudinal



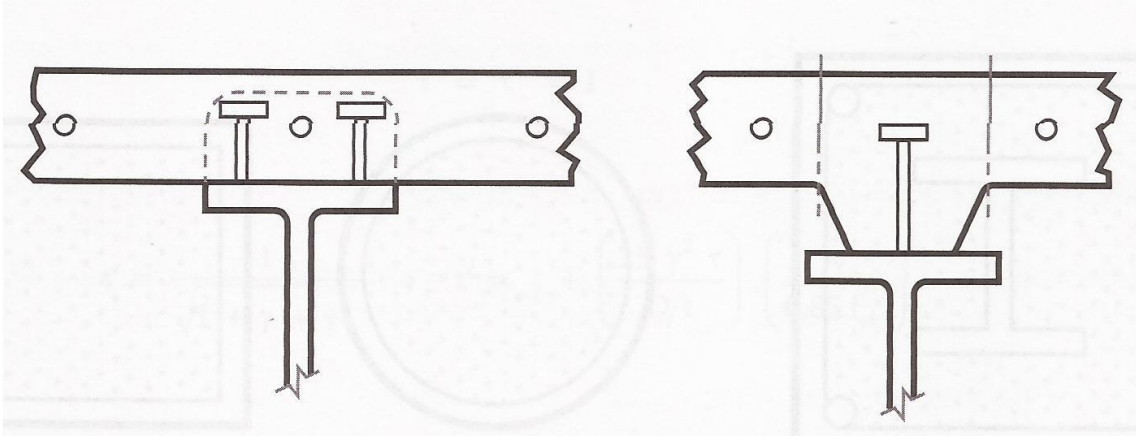
Fonte: Andrade e Vellasco (2016)

Imagem 35 – Planos de cisalhamento longitudinais e esforços atuantes em laje de concreto



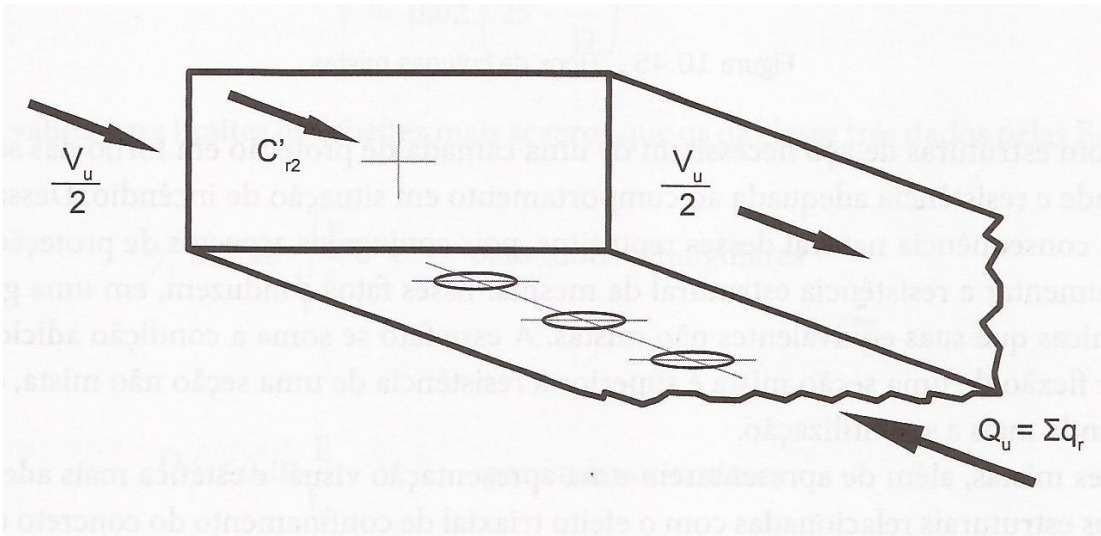
Fonte: Andrade e Vellasco (2016)

Imagem 36 – Planos de cisalhamento longitudinais adicionais em lajes com decks metálicos



Fonte: Andrade e Vellasco (2016)

Imagem 37 – Esforços atuantes em um plano de cisalhamento longitudinal da laje de concreto



Fonte: Andrade e Vellasco (2016)

4.3.2.2.1 Determinação da resistência longitudinal ao cisalhamento

A resistência longitudinal ao cisalhamento é verificada de acordo com a seguinte condição:

$$V_r \geq V_u$$

Sendo o esforço de cisalhamento longitudinal obtido por meio da seguinte fórmula:

$$V_u = \sum q_n - C'_{r2}, \quad \text{onde} \quad C'_{r2} = \varphi_c 0,85 f_{ck} A_{c2} + A_{rf} \varphi f_{yrf}$$

A resistência ao cisalhamento de projeto é obtida por meio da seguinte fórmula:

$$V_r = 0,68 A_{r2} f_{yr2} + 2,56 \varphi_c A_{cv} \text{ ou } V_r = 0,5 \varphi_c f_{ck} A_{cv}, \text{ o menor dentre os dois valores}$$

4.3.3 Viga Mista

4.3.3.1 Sistema estrutural

Segundo Dias (2006), Viga Mista é a associação de uma viga de aço com uma laje de concreto, sendo esta ligação realizada por meio de conectores mecânicos. No caso da utilização de perfis I, a laje de concreto recebe boa parte dos esforços de compressão que deveriam ser absorvidos pela mesa superior do perfil, enquanto os esforços de tração são normalmente absorvidos pela mesa inferior do perfil do aço.

Os conectores de cisalhamento são dispositivos mecânicos que devem garantir o trabalho conjunto da seção de aço com a laje de concreto. Com a função de absorver os esforços cisalhantes horizontais que se desenvolvem na interface da laje com a mesa superior da viga, e de impedir o afastamento vertical entre estes elementos. Os conectores mais recomendados por serem classificados como flexíveis, são os do tipo pino com cabeça (stud bolt). No sistema misto a laje de concreto funciona como laje estrutural e parte do vigamento. (PFEIL; PFEIL, 2009)

Ainda de acordo com Pfeil e Pfeil (2009), após a Segunda Guerra Mundial as Vigas Mistas começaram a ser muito empregadas. Anteriormente, ao utilizar as vigas metálicas com lajes de concreto, não era considerado no cálculo a laje no trabalho da viga. Apesar dessa participação já ser conhecida e comprovada, devido as medidas de flechas das vigas com as lajes de concreto. A dificuldade de encontrar aço depois da guerra fez com que os engenheiros europeus utilizassem a laje de concreto como parte integrante do vigamento, e dessa forma, começaram pesquisas sobre o comportamento da Viga Mista para esforços estáticos e cíclicos.

4.3.3.2 Dimensionamento

4.3.3.2.1 Pré-dimensionamento

De acordo com Andrade e Vellasco (2016), o processo de dimensionamento deve partir de uma estimativa para a altura da viga, conforme a equação:

$$\frac{h + t_c}{L} \geq \frac{f_y}{5500}$$

4.3.3.2.2 Resistência à flexão

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), a classificação da seção para uma Viga Mista será efetuada por meio da esbeltez da alma h/t_w , conforme as equações:

$$\frac{h}{t_w} \leq 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \quad \text{para seções compactas}$$

$$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \quad \text{para seções semicompactas}$$

Se a linha neutra, na interação da Viga Mista, se situa na laje de concreto, a componente resistente em compressão suportada pela laje de concreto é obtida conforme a equação (ANDRADE; VELLASCO, 2016):

$$C'_r = \phi_c 0,85 f_{ck} b_e a$$

As informações presentes a seguir são baseadas em Andrade e Vellasco (2016). Sendo que a componente resistente em tração suportada pelo perfil de aço é obtida por meio da equação:

$$T_r = \phi A_g f_y$$

A posição da linha neutra pode ser verificada através da equação:

$$a = \frac{\varphi A_g f_y}{\varphi_c 0,85 f_{ck} b_e}$$

O momento resistente da Viga Mista é obtido por meio da equação:

$$M_r = \varphi A_g f_y (e_2 - e_1), \quad \text{sendo } e_1 = h + t_c - \left(\frac{a}{2}\right) \text{ e } e_2 = \frac{h}{2}$$

Se a linha neutra, na interação da Viga Mista, se situa na mesa superior da viga, a componente resistente em compressão suportada pela laje de concreto é dada por:

$$C'_r = \varphi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c$$

A componente resistente em compressão suportada pela parcela de aço da viga é obtida através da equação:

$$C_r = \frac{\varphi A_g f_y - \varphi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c}{2}$$

A componente resistente à tração suportada pelo perfil de aço é obtida por meio da equação:

$$T_r = \frac{\varphi A_g f_y + \varphi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c}{2}$$

A posição da linha neutra pode ser verificada através das equações:

$$C_r = \varphi f_y b_f t_f, \quad a = t_c + x \quad \text{e} \quad x = \frac{C_r}{\varphi b_f f_y}$$

O momento resistente da viga mista pode ser obtido por meio da equação:

$$M_r = C'_r e_2 + C_{rm} e_3 - T_{rm} \left(\frac{h}{2}\right), \quad \text{sendo } e_2 = h + \left(\frac{t_c}{2}\right); \quad e_3 = h - \left(\frac{a - t_c}{2}\right);$$

$$C_{rm} = \varphi A_g f_y - \varphi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c \quad \text{e} \quad T_{rm} = \varphi A_g f_y$$

Se a linha neutra, na interação da Viga Mista, se situa na alma da viga, a componente resistente em compressão suportada pela laje de concreto é dada por:

$$C'_r = \phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c$$

A componente resistente em compressão suportada pela parcela de aço da viga é verificada conforme a equação:

$$C_r = \frac{\phi A_g f_y - \phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c}{2}$$

A componente resistente a tração suportada pelo perfil de aço é obtida por meio da equação:

$$T_r = \frac{\phi A_g f_y + \phi_c 0,85 f_{ck} b_e t_c}{2}$$

A posição da linha neutra pode ser verificada conforme as seguintes equações:

$$C_r > \phi f_y b_f t_f, \quad a = t_c + t_f + x_w \quad e \quad x = \frac{C_r - \phi f_y b_f t_f}{\phi t_w f_y}$$

O momento resistente da Viga Mista pode ser obtido por meio da equação:

$$M_r = C'_r e_2 + C_{rmf} e_{3mf} + C_{rmw} e_{3mw} - T_{rm} \left(\frac{h}{2} \right),$$

sendo $e_2 = h + \left(\frac{t_c}{2} \right)$; $e_{3mf} = h - \left(\frac{t_f}{2} \right)$; $e_{3mw} = h - \left(\frac{a - (t_c + t_f)}{2} \right)$

$$C_{rmf} = 2\phi b_f t_f f_y; \quad C_{rmw} = 2C_r - C_{rmf} \quad e \quad T_{rm} = \phi A_g f_y$$

4.3.3.2.3 Resistência ao esforço cortante

As informações da Subseção 4.3.3.2.3 e 4.3.3.2.4 são baseadas em Andrade e Vellasco (2016). Para que uma Viga Mista resista ao cisalhamento é necessário atender a condição básica que depende da contribuição da alma da viga de aço.

Sendo assim, para avaliar a resistência ao cisalhamento, quando $\lambda \leq \lambda_p$, a resistência nominal ao esforço cortante é igual a 90% do esforço cortante plástico; quando $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$, a resistência nominal ao esforço cortante é igual a 90% (λ_p / λ) do cortante plástico e quando $\lambda > \lambda_r$, a resistência nominal ao esforço cortante é igual a $1,24(\lambda_p / \lambda)^2$ do cortante plástico. A equação para a determinação do cortante plástico é a seguinte:

$$V_{pl} = 0,60 A_w f_y$$

As equações para a determinação dos coeficientes λ_p , λ , λ_r e K são obtidas por meio dessas equações:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} ; \lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{K E}{f_y}} ; \lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{K E}{f_y}}$$

$$K = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2}, \quad \text{para } \frac{a}{h} < 3$$

$$K = 5, \quad \text{para } \frac{a}{h} \geq 3$$

4.3.3.2.4 Resistência dos conectores de cisalhamento

A resistência de conectores tipo “stud bolt”, utilizados neste trabalho, quando as nervuras forem perpendiculares à viga de aço, pode ser verificada de acordo com a equação:

$$q'_r = C_{red} q_r, \quad \text{sendo } C_{red} = \frac{0,85}{\sqrt{\eta_{cs}}} \left(\frac{b_f}{h_f} \right) \left(\frac{h_{cs}}{h_f} - 1 \right) \leq \beta;$$

$$\beta = 1 \quad \text{para } \eta_{cs} = 1 \quad \text{e} \quad \beta = 0,8 \quad \text{para } \eta_{cs} = 2$$

A resistência de conectores tipo “stud bolt”, quando as nervuras forem paralelas à viga de aço, será verificada através da seguinte equação:

$$q'_r = C_{red} q_r, \quad \text{sendo } C_{red} = 0,6 \left(\frac{b_f}{h_f} \right) \left(\frac{h_{cs}}{h_f} - 10 \right) \leq 1;$$

$$\text{se } \frac{b_f}{h_f} > 1,5, \quad \text{então } C_{red} = 1$$

A resistência de projeto de um conector de pino “stud bolt” ao cisalhamento é dada pela equação:

$$q_r = 0,5 A_{sc} \varphi_{sc} \sqrt{E_c f_{ck}} \leq \varphi_{sc} A_{sc} f_u, \quad \text{sendo } E_c = 0,043 (\gamma)^{1,5} \sqrt{f_{ck}};$$

$$\text{para } 22 \text{ kN/m}^3 < \gamma < 25 \text{ kN/m}^3$$

4.4 DIMENSIONAMENTO DE PERFIS

4.4.1 Vigas de Alma Cheia

4.4.1.1 Sistema estrutural

Conforme Dias (2006), as Vigas de Alma Cheia são formadas por duas mesas interligadas por uma alma e se caracterizam pelo acentuado afastamento entre as mesas. Os perfis mais utilizados para estas vigas são os perfis tipo I soldados, I laminados e os perfis U estruturais formados a frio. Pela própria forma da seção, são adequados para resistir, por intermédio das mesas, aos esforços de compressão e tração.

As Vigas de Alma Cheia, são vigas de aço que não apresentam vãos em sua alma e que possuem perfis laminados ou soldados compostos por partes esbeltas denominadas mesas e almas, nos tipos construtivos usuais chamados I simples e duplo, H, W, duplo U aberto e fechado. Como as seções transversais dos perfis metálicos são esbeltas, há a possibilidade de grande redução na resistência de elementos estruturais fletidos devido aos fenômenos de flambagem lateral, quando a viga perde seu equilíbrio no plano principal de flexão e local, e

também a estabilidade das chapas comprimidas reduzindo o momento resistente da seção (PFEIL; PFEIL, 2009).

Para a execução deste trabalho, foi escolhido o perfil I, que é considerado o tipo de seção transversal mais adequado para o trabalho à flexão, por apresentar maior inércia no plano da alma e por ser dimensionado para obedecer às limitações de flambagem.

4.4.1.2 Dimensionamento

O dimensionamento das Vigas de Alma Cheia, apresentado nesta Seção e nas Subseções 4.4.1.2.1. e 4.4.1.2.2., são baseados nas informações de Andrade e Vellasco (2016). Inicia-se o dimensionamento pela determinação da altura da alma, conforme a equação:

$$h = 540 \left(\frac{M_d}{f_y} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Na sequência, o autor recomenda a determinação da área das mesas da viga, através da equação:

$$A_m = b_f t_f$$

É necessário que a esbeltez da mesa b_f/t_f atenda a seguinte condição:

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 0,67 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

A espessura da alma pode ser determinada por meio da equação:

$$t_w = \frac{1,83 V_d}{h f_y}, \text{ para um } t_w \geq 5 \text{ mm}$$

Enfim, é necessário que a esbeltez da alma h/t_w atenda a seguinte condição, conforme a equação:

$$\frac{h}{t_w} \leq 11,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \quad \text{se } \frac{a}{h} \leq 1,5$$

4.4.1.2.1 Resistência à flexão

A determinação da esbeltez limite da alma, conforme a equação que compõe o quadro na sequência:

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{0,42 E}{f_y} \quad e \quad \frac{h}{t_w} \leq \frac{5250}{\sqrt{f_y}}$$

Quadro 1 – Limitações da esbeltez máxima de chapa de alma

F _y (Mpa)	a/h>1,5	a/h≤1,5
250	336	331
290	290	307
345	243	282
380	221	268
415	202	257
450	187	247

Fonte: Andrade e Vellasco (2016)

4.4.1.2.2 Resistência ao esforço cortante

Para que uma viga resista ao cisalhamento, é necessário atender a condição básica que determina que o esforço cortante majorado de cálculo atuante seja menor ou igual a 90% da resistência nominal ao esforço cortante da viga.

Sendo assim, para $\lambda \leq \lambda_p$, a resistência nominal ao esforço cortante é igual ao esforço cortante plástico; para $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$, a resistência nominal ao esforço cortante é igual a λ_p / λ do cortante plástico e para $\lambda > \lambda_r$, a resistência nominal ao esforço cortante é igual a $1,24 (\lambda_p / \lambda)^2$ do cortante plástico. A equação para a determinação do cortante plástico é dada por:

$$V_{pl} = 0,60 h t_w f_y, \quad \text{para análise elástica}$$

$$V_{pl} = 0,66 h t_w f_y, \quad \text{para o cálculo plástico}$$

As equações para a determinação dos coeficientes λ_p , λ , λ_r e K são as seguintes:

$$\lambda = \frac{h}{t_w}; \quad \lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{K E}{f_y}}; \quad \lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{K E}{f_y}}$$

$$K = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2}, \quad \text{para } \frac{a}{h} \leq 3$$

$$K = 5, \quad \text{para } \frac{a}{h} > 3$$

4.5 MODELOS DE CÁLCULO

Os Estados Limites de Desempenho, as Ações atuantes em uma edificação, bem como as suas possíveis Combinações são discutidas nesta Seção.

4.5.1 Estados Limites de Desempenho

Diversas normas recomendam a verificação das solicitações com base nos Estados Limites de Desempenho, citando as principais como ABNT NBR 6118:2014, ABNT NBR 8681:2004 e ABNT NBR 8800:2008.

De acordo com as referidas normas, definem-se estados limites de uma estrutura como os estados a partir dos quais a estrutura apresenta desempenho inadequado às finalidades para as quais foi concebida. Segundo Clímaco (2015), Estados Limites de Desempenho são os que geram inadequação para o uso da estrutura, por razões de segurança, funcionalidade, estética, desempenho fora dos padrões especificados para sua utilização normal ou interrupção de funcionamento em razão da ruína parcial ou total.

Conforme as normas vigentes como as supracitadas, para a elaboração de projetos, devem ser considerados os Estados Limites Últimos e de Serviço. Os Estados Limites Últimos estão

relacionados ao colapso ou ruína estrutural que determine a paralisação do uso da estrutura. Sendo são caracterizados, especialmente, pela perda de equilíbrio, no todo ou em parte, admitindo-se a estrutura como um monólito; pela ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais; pela transformação da estrutura, no todo ou em parte, em sistema hipostático; pela instabilidade por deformação e pela instabilidade dinâmica.

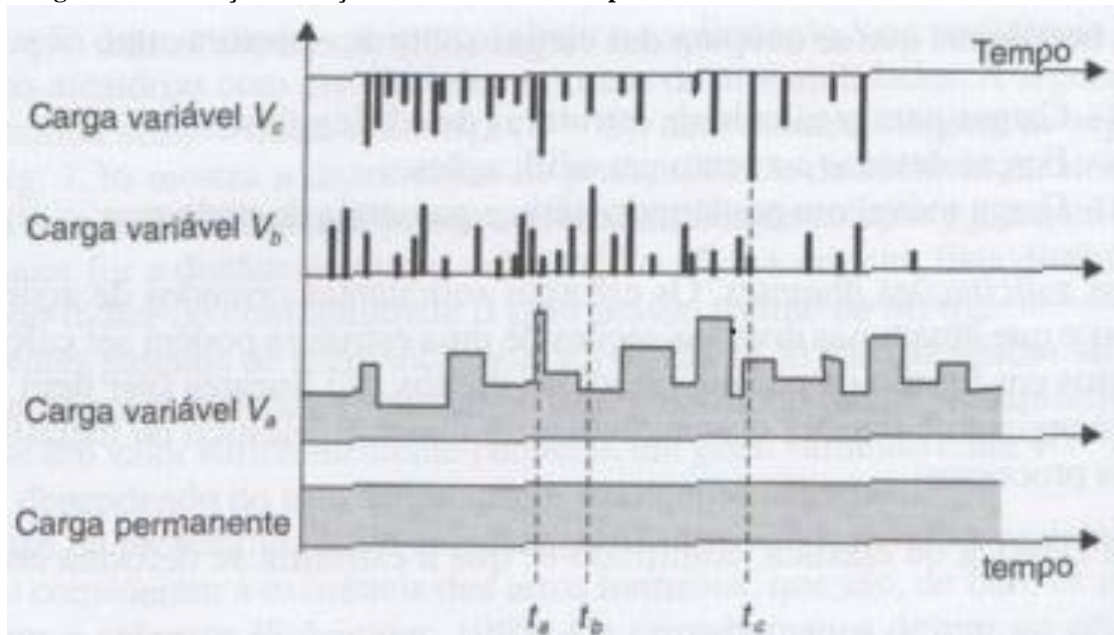
Ainda de acordo com as normas supracitadas, os Estados Limites de Serviço devem ser avaliados no período de vida útil da estrutura. Estes são caracterizados por danos localizados, que afetem a durabilidade, o conforto, a funcionalidade e o aspecto estético da construção; por deformações excessivas que interfiram na utilização normal da construção ou no seu aspecto estético e ainda pela vibração excessiva ou desconfortável.

4.5.2 Ações

Segundo Andrade e Vellasco (2016), as Ações atuantes em uma estrutura de aço podem ser classificadas em três classes, as Ações Permanentes, as Ações Variáveis e as Ações Excepcionais.

As Ações Permanentes (G) compreendem as ações decorrentes dos elementos da construção, assim como pisos, paredes permanentes, revestimentos, acabamentos, instalações e equipamentos fixos. Esta não tem praticamente nenhuma variação no decorrer do tempo. Por outro lado, as Ações Variáveis (Q) que possuem alta probabilidade de variação ao longo do tempo, incluem as sobrecargas decorrentes do uso e ocupação da estrutura, tais como equipamentos, divisórias, móveis, sobrecargas em coberturas, pressão hidrostática, empuxo de terra, vento e variação de temperatura. E ainda, as Ações Excepcionais (E) abrangem as ações de grande intensidade e baixa probabilidade de ocorrência, como choques de veículos, explosões e efeitos sísmicos. De forma que, as Ações Permanentes atuam continuamente na estrutura, enquanto as Ações Variáveis e as Excepcionais podem ou não agir na edificação em determinado momento da vida útil desta. Conforme a Imagem 38.

Imagem 38 – Variação das Ações no decorrer do tempo



Fonte: Pfeil e Pfeil (2009)

4.5.3 Combinações

Devido a diferença no comportamento das Ações Permanentes, Variáveis e Excepcionais é necessário um coeficiente de ponderação diferente para cada uma dessas Ações. De acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 – Valores de γ (NBR 8800:2008)

Combinações	Ações permanentes (γ_g)					
	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 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (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)					
	Efeito da temperatura	Ação do vento	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação	Ação Truncada		
Normais	1,20	1,40	1,50	1,20		
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,30	1,10		
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00		

Fonte: Andrade e Vellasco (2016)

Para o cálculo das solicitações de projeto, as ações devem ser combinadas de forma a considerar as ações mais desfavoráveis para a edificação durante a vida útil prevista. As combinações de ações referem-se aos momentos em que, cada ação variável é dominante e é combinada as ações permanentes e às outras ações variáveis simultâneas, estas produzem um acréscimo de solicitações ocasionando um efeito desfavorável (PFEIL; PFEIL, 2009).

De acordo com Pfeil e Pfeil (2009), para verificações nos estados limites últimos, tem-se os seguintes tipos de combinações de ações:

- a Combinação normal inclui todas as ações decorrentes do uso previsto da estrutura;
- a Combinação de construção considera as ações que podem causar algum estado limite último na fase de construção da estrutura;
- a Combinação especial inclui ações variáveis, cujos os efeitos tem maior importância que os efeitos das ações de uma combinação normal;

- a Combinação excepcional considera as ações excepcionais, estas podem causar efeitos catastróficos como explosões, choques de veículos, incêndio e sismos.

As Combinações de ações são utilizadas para a verificação dos estados limites de serviço conforme o rigor dado aos valores limites dos efeitos verificados. Como por exemplo, um valor limite de deslocamento vertical em viga é aplicado ao deslocamento resultante de uma combinação quase-permanente de ações, a fim de evitar a ocorrência de deslocamentos excessivos na viga (PFEIL; PFEIL, 2009).

Além do estado limite de deformação elástica, também deve ser verificado o estado limite de vibração excessiva, visto que, as cargas móveis e o vento podem produzir vibrações nas estruturas ocasionando insegurança aos usuários (PFEIL; PFEIL, 2009).

Segundo as recomendações da ABNT NBR 8800:2008, o deslocamento vertical de lajes mistas de aço e concreto não pode ser maior que $L_f/350$, considerando o efeito apenas das ações variáveis, sendo que L_f é o vão teórico da laje na direção das nervuras.

4.6 SOFTWARE SAP2000

O programa computacional SAP2000 é um software que utiliza o Método dos Elementos Finitos, possui interface gráfica em 3D e realiza de forma integrada a modelação, análise e dimensionamento de diversas estruturas. Permitindo a utilização de análises lineares e não lineares estáticas e dinâmicas.

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2009), no Método dos Elementos Finitos, subdivide-se a placa em elementos de dimensão finita conectados por pontos nodais, impondo-se nesses pontos a compatibilidade de esforços e deslocamentos. Dessa forma, essas condições aplicadas aos diversos pontos nodais dos elementos são conduzidas a um sistema de equações lineares.

5 ANÁLISE ESTRUTURAL

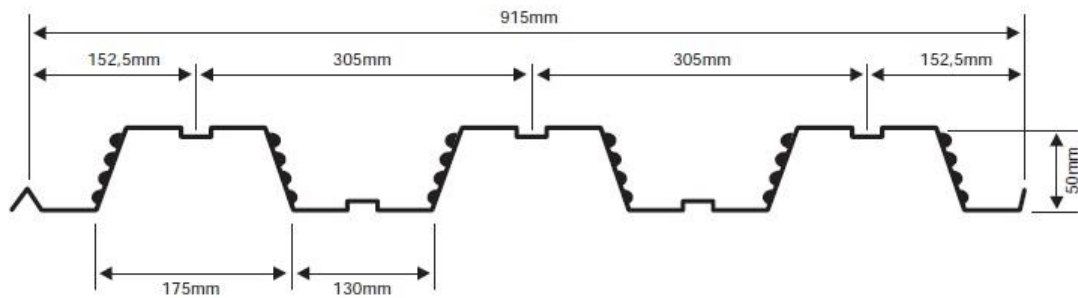
Esse Capítulo explica como se realiza a Análise Estrutural desse estudo. A Seção 5.1 descreve sobre as Topologias dos modelos estruturais propostos. A Seção 5.2 apresenta como se realiza o Dimensionamento Estrutural.

Nesse trabalho são avaliados três sistemas estruturais para a execução da Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária de Brasília. A diferença básica entre os modelos propostos são o espaçamento e a quantidade de vigas entre os pilares na parte central da estrutura. De forma que o Modelo 1 possui cinco espaços entre os pilares, bem como vigas mistas, vigas de alma cheia e lajes steel deck. O Modelo 2 é constituído por sete espaços entre as duas linhas de pilares, e ainda vigas mistas, vigas de alma cheia e lajes steel deck. Enquanto o Modelo 3 é composto por três espaços entre os pilares, como também vigas mistas, vigas de alma cheia e lajes maciças. Sendo que as vigas longitudinais são vigas mistas e as vigas transversais são vigas de alma cheia, ambas em perfis tipo I laminados e perfis tipo I soldados, dependendo de cada modelo.

Cada um dos três sistemas estruturais avaliados neste trabalho é constituído por dois diferentes modelos denominados como CR, referente à estrutura rotulada parcialmente, e o outro como SR, devido à estrutura sem rótulas. Os pilares possuem o mesmo perfil nos três modelos, com altura de três metros e perfil caixa soldada com dimensões 30x30 cm. Sendo que todos os pilares são engastados na base. Tanto as lajes maciças quanto as lajes steel deck possuem oito centímetros.

O aço utilizado nas vigas é denominado ASTM A-572 Grau 50, que é um aço de baixa liga e alta resistência mecânica, com limite de escoamento mínimo de 345 Mpa e limite de resistência de 450 Mpa (Dias, 2006). As lajes steel deck são dimensionadas conforme o catálogo da Metform, o modelo utilizado é o MF50 com aço ASTM A-653 Grau 40, segundo a Imagem 39. Esse trabalho é fundamentado conforme as normas da ABNT.

Imagem 39 – Dimensões do modelo MF50



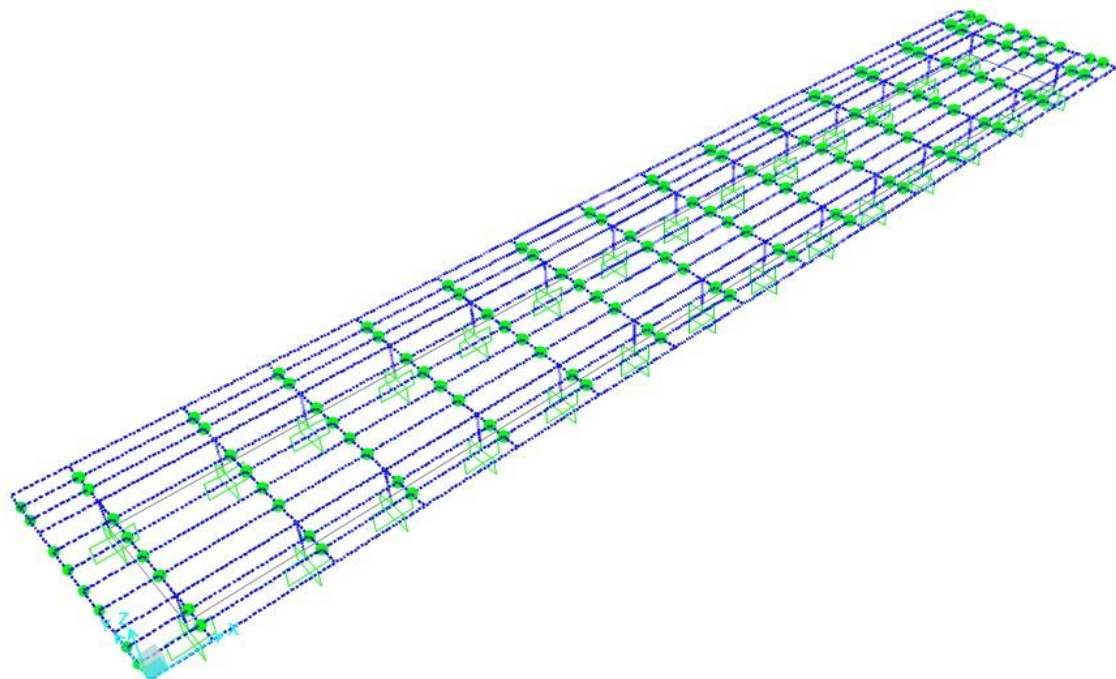
Fonte: Metform

5.1 TOPOLOGIA

5.1.1 Modelo 1

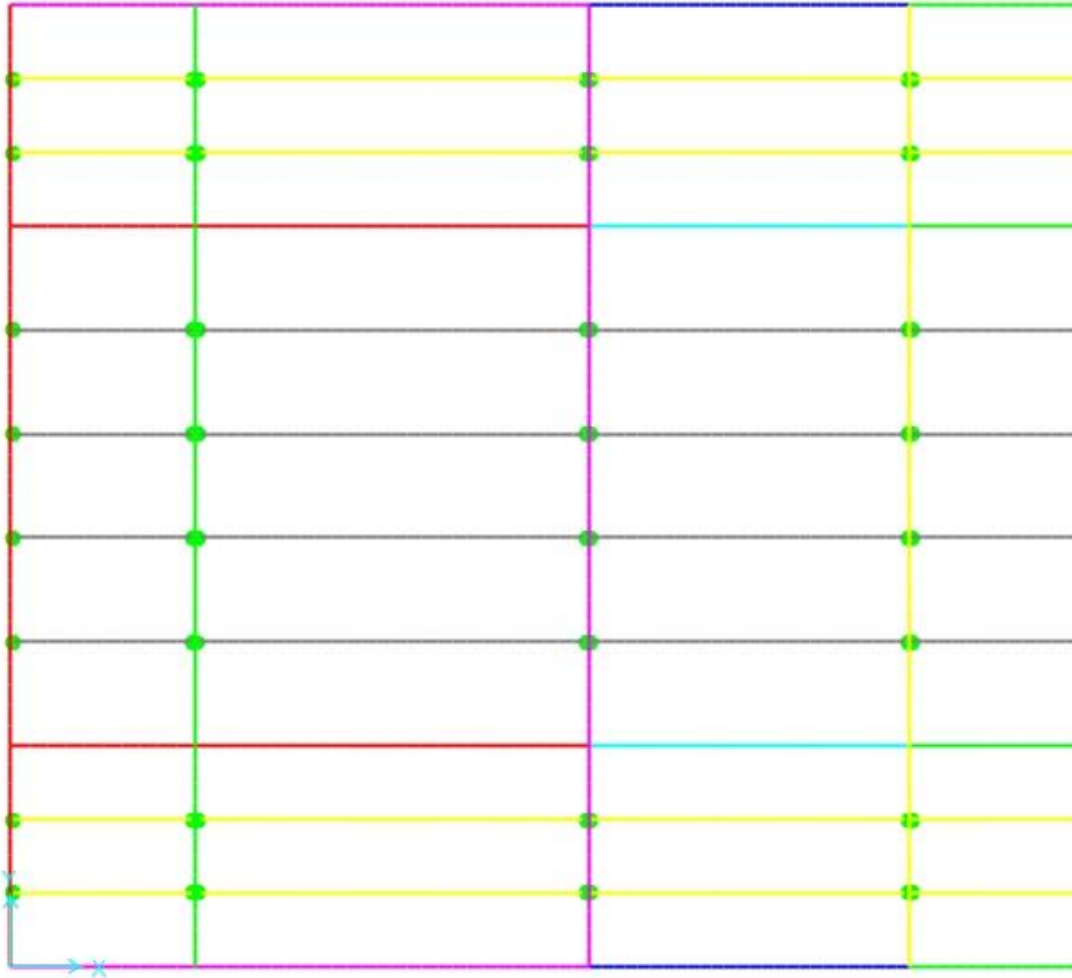
O Modelo 1 é subdividido no Modelo 1 com vigas rotuladas (M1CR) e no Modelo 1 com vigas contínuas (M1SR). E possui cinco espaços entre os pilares, na direção longitudinal. Conforme as Imagens 40, 41 e 42.

Imagem 40 – Modelo 1 rotulado parcialmente (M1CR)



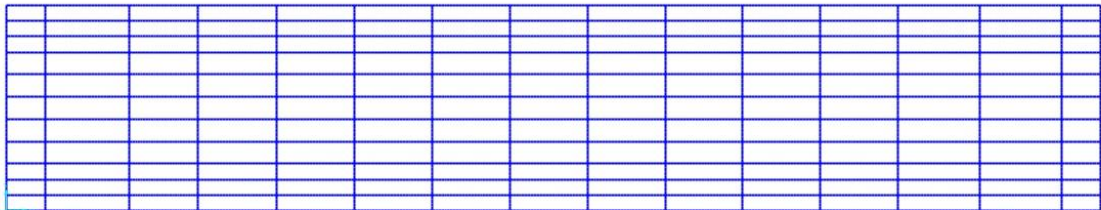
Fonte: Elaboração própria

Imagem 41: Detalhe das vigas rotuladas (M1CR)



Fonte: Elaboração própria

Imagem 42: Modelo 1 sem rótulas (M1SR)

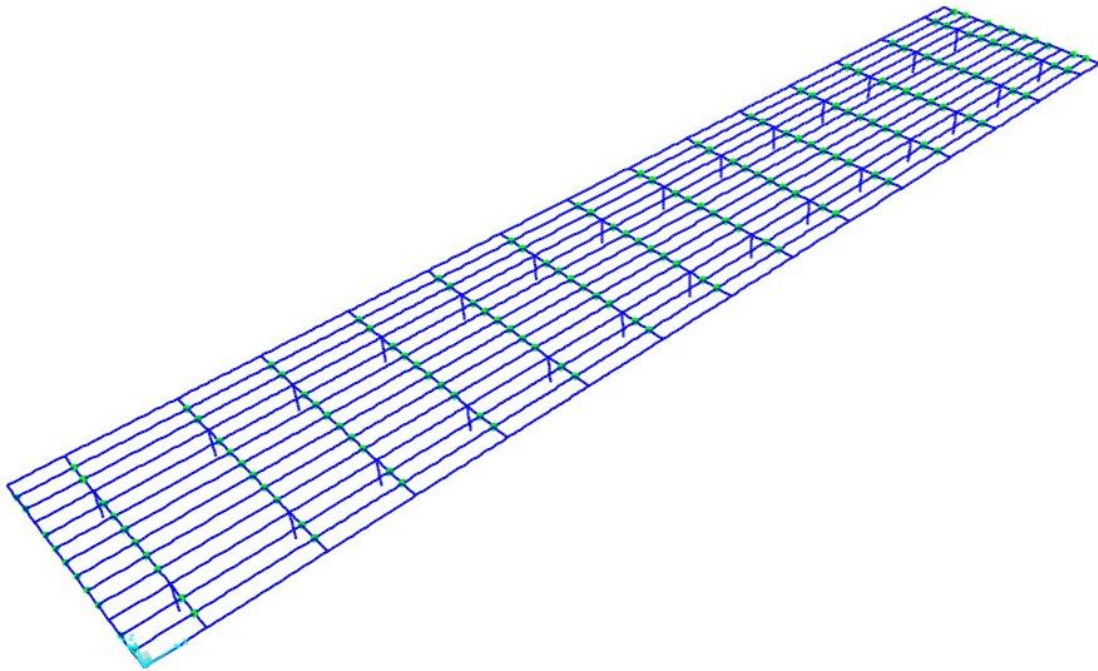


Fonte: Elaboração própria

5.1.2 Modelo 2

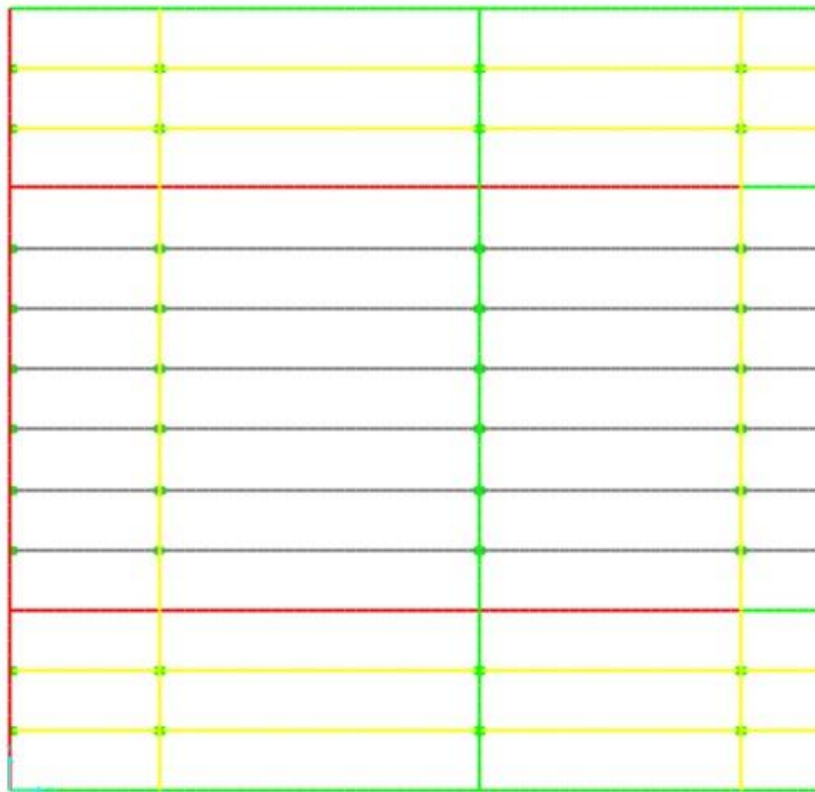
Assim como o Modelo 1, o Modelo 2 também é subdividido no Modelo 2 com vigas rotuladas (M2CR) e no Modelo 2 com vigas contínuas (M2SR). Sendo composto de sete espaços entre as linhas de pilares, na direção longitudinal. De acordo com as Imagens 43, 44 e 45.

Imagem 43 – Modelo 2 rotulado parcialmente (M2CR)



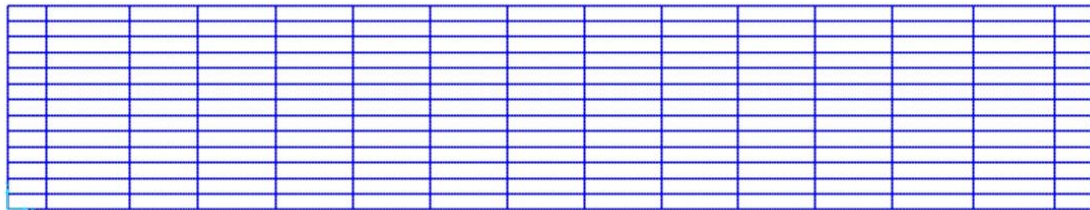
Fonte: Elaboração própria

Imagem 44 – Detalhe das vigas rotuladas (M2CR)



Fonte: Elaboração própria

Imagem 45 – Modelo 2 sem rótulas (M2SR)

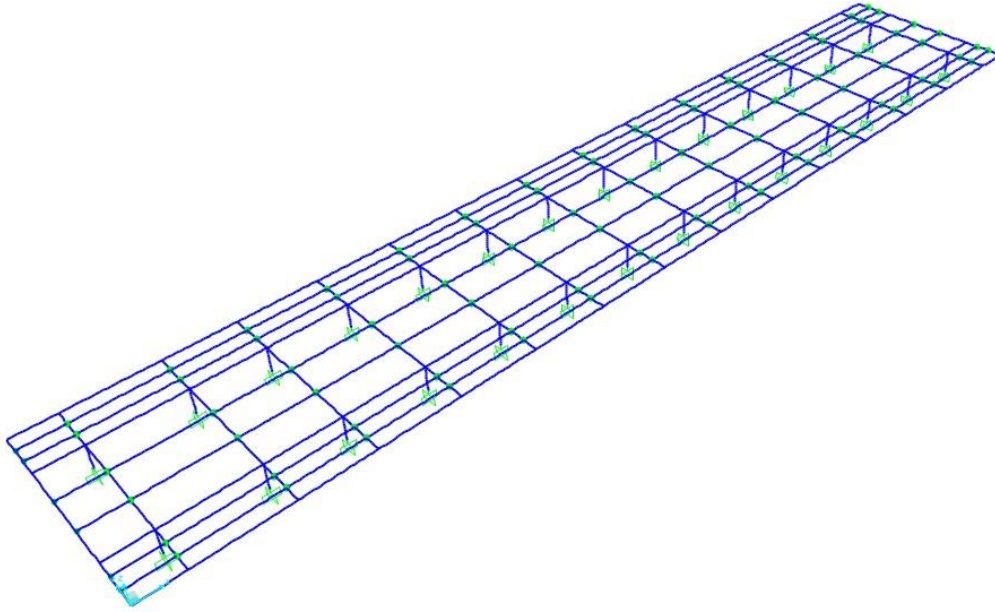


Fonte: Elaboração própria

5.1.3 Modelo 3

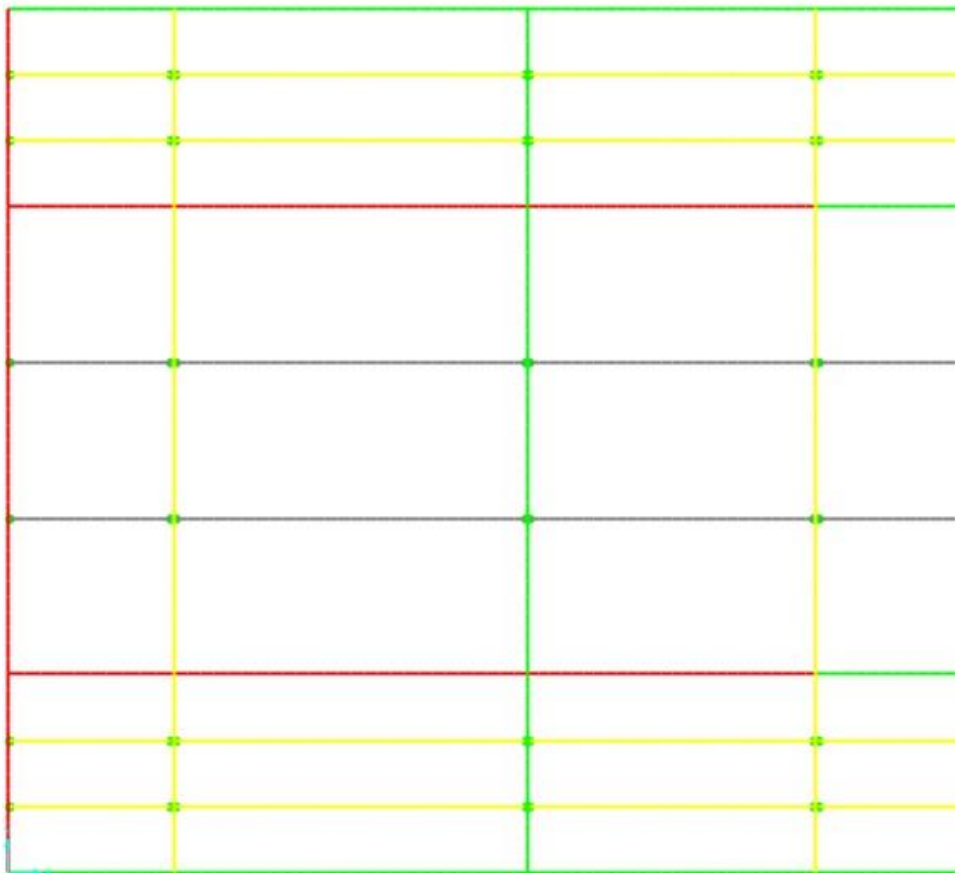
O Modelo 3 também é subdividido no Modelo 3 com vigas rotuladas (M3CR) e no Modelo 3 com vigas contínuas (M3SR). De acordo com as Imagens 46, 47 e 48.

Imagem 46 – Modelo 3 rotulado parcialmente (M3CR)



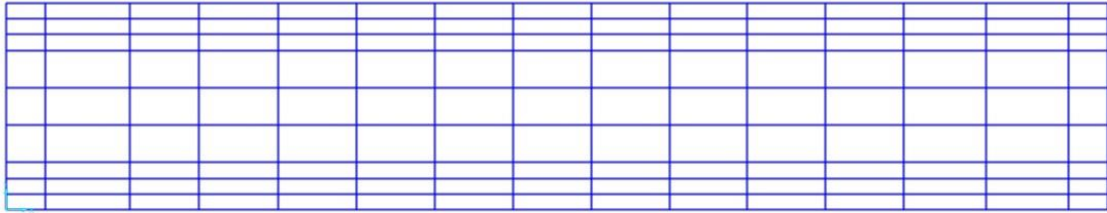
Fonte: Elaboração própria

Imagem 47 – Detalhe das vigas rotuladas (M3CR)



Fonte: Elaboração própria

Imagem 48 – Modelo 3 sem rótulas (M3SR)



Fonte: Elaboração própria

5.2 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

O dimensionamento dos elementos estruturais nos seis modelos propostos segue a seguinte sequência:

- escolha dos sistemas estruturais, bem como a topologia dos diferentes modelos;
- pré-dimensionamento das vigas por cálculos manuais;
- pré-dimensionamento das vigas pelo Software Ftool;
- pré-dimensionamento das vigas através do Software Visual Metal;
- pré-dimensionamento das vigas pelo Software Viga Mista;
- desenho da estrutura de acordo com a arquitetura do projeto original pelo AutoCad 3D;
- pré-dimensionamento dos seis modelos através do Software SAP2000 V17;
- definição dos carregamentos permanentes DEAD ($D=120 \text{ Kg/m}_2$), sendo que o peso próprio da estrutura foi definido pelo programa computacional SAP2000 V17;
- definição dos carregamentos de uso: LIVE 1 ($L1=100 \text{ Kg/m}_2$) para as lajes do núcleo da estrutura e LIVE 2 ($L2=100 \text{ Kg/m}_2$) para as lajes que estão em balanço;
- avaliação dos esforços;
- dimensionamento;
- atualização do software SAP2000 V17;
- novos esforços;
- novo dimensionamento;
- análise dos deslocamentos;

- novos dimensionamentos e análises até a estrutura atender aos aspectos de segurança estrutural e estados limites de desempenho segundo as normas da ABNT;
- comparação dos resultados.

As combinações utilizadas nos modelos estruturais para a análise estática linear são as seguintes:

A – DEAD

B – LIVE 1

C- LIVE 2

D - D+L1+L2

E - D+L1

F - D+L2

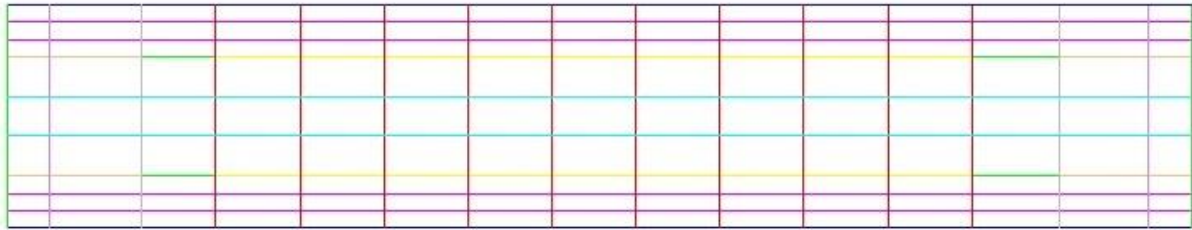
G - 1,4D+1,5L1+1,5L2

H - 1,4D+1,5L1

I - 1,4D+1,5L2

A Imagem 49 ilustra a legenda das vigas referentes aos modelos propostos. É importante ressaltar que a quantidade e a disposição da viga longitudinal núcleo (d1) é diferente em cada modelo, Modelo 1 (com 5 espaços), Modelo 2 (com 7 espaços) e Modelo 3 (com 3 espaços).

Imagem 49 – Legenda das vigas dos modelos propostos (representação do Modelo 3)



LEGENDA:

—	viga longitudinal borda (a1)
—	viga longitudinal extremidade (b1)
—	viga longitudinal pilar balanço (c1)
—	viga longitudinal pilar meio (c2)
—	viga longitudinal pilar núcleo (c3)
—	viga longitudinal núcleo (d1)
—	viga transversal borda (e1)
—	viga transversal balanço (f1)
—	viga transversal meio (f2)
—	viga transversal núcleo (f3)

Fonte: Elaboração própria

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Apresentam-se neste Capítulo os resultados obtidos através da análise dos modelos estruturais e o consumo do aço, para os Modelos 1 rotulado parcialmente e Modelo 1 sem rótulas, bem como para o Modelo 2 rotulado parcialmente e Modelo 2 sem rótulas, e por fim para o Modelo 3 rotulado parcialmente e Modelo 3 sem rótulas. Neste Capítulo também é exposta a Análise das Vigas Transversais e Longitudinais, e a Análise dos Pesos Totais.

6.1 ANÁLISE DO MODELO 1

Os resultados do dimensionamento das vigas do Modelo 1 rotulado parcialmente (M1CR) pode ser observado nos Quadros 4 e 5.

Quadro 4 - Análise das vigas longitudinais**Modelo 1 rotulado parcialmente (M1CR)**

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda a1	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
Viga longitudinal extremidade b1	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
Viga pilar (balanço) c1	CVS 600x226	226,10	55,86	12.629,95
Viga pilar (meio) c2	CVS 600x190	189,90	34,30	6.513,57
Viga pilar (núcleo) c3	W 310x21	21,00	160,04	3.360,84
Viga longitudinal (núcleo) d1	W 310x23,8	23,80	500,40	11.909,52
Total geral (Kg)				47.124,04

Fonte: Elaboração própria

Quadro 5 - Análise das vigas transversais**Modelo 1 rotulado parcialmente (M1CR)**

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda e1	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
Viga transversal (balanço) f1	W 610x174	174,00	46,88	8.157,12
Viga transversal (meio) f2	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
Viga transversal (núcleo) f3	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60
Total geral (Kg)				62.580,11

Fonte: Elaboração própria

Os resultados do dimensionamento das vigas do Modelo 1 sem rótulas (M1SR) pode ser observado nos Quadros 6 e 7.

Quadro 6 - Análise das vigas longitudinais
Modelo 1 sem rótulas (M1SR)

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda a1	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
Viga longitudinal extremidade b1	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
Viga pilar (balanço) c1	CVS 600x226	226,10	55,86	12.629,95
Viga pilar (meio) c2	CVS 600x190	189,90	34,30	6.513,57
Viga pilar (núcleo) c3	W 310x21	21,00	160,04	3.360,84
Viga longitudinal (núcleo) d1	W 310x23,8	23,80	500,40	11.909,52
Total geral (Kg)				47.124,04

Fonte: Elaboração própria

Quadro 7 - Análise das vigas transversais
Modelo 1 sem rótulas (M1SR)

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda e1	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
Viga transversal (balanço) f1	W 610x155	155,00	46,88	7.266,40
Viga transversal (meio) f2	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
Viga transversal (núcleo) f3	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60
Total geral (Kg)				61.689,39

Fonte: Elaboração própria

6.2 ANÁLISE DO MODELO 2

Os resultados do dimensionamento das vigas do Modelo 2 rotulado parcialmente (M2CR) pode ser observado nos Quadros 8 e 9.

Quadro 8 - Análise das vigas longitudinais**Modelo 2 rotulado parcialmente (M2CR)**

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda a1	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
Viga longitudinal extremidade b1	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
Viga pilar (balanço) c1	CVS 600x226	226,10	55,86	12.629,95
Viga pilar (meio) c2	CVS 600x190	189,90	34,30	6.513,57
Viga pilar (núcleo) c3	W 250x17,9	17,90	160,04	2.864,72
Viga longitudinal (núcleo) d1	W 250x22,3	22,30	750,60	16.738,38
Total geral (Kg)				51.456,77

Fonte: Elaboração própria

Quadro 9 - Análise das vigas transversais**Modelo 2 rotulado parcialmente (M2CR)**

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda e1	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
Viga transversal (balanço) f1	W 610x174	174,00	46,88	8.157,12
Viga transversal (meio) f2	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
Viga transversal (núcleo) f3	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60
Total geral (Kg)				62.580,11

Fonte: Elaboração própria

Os resultados do dimensionamento das vigas do Modelo 2 sem rótulas (M2SR) pode ser observado nos Quadros 10 e 11.

Quadro 10 - Análise das vigas longitudinais**Modelo 2 sem rótulas (M2SR)**

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda a1	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
Viga longitudinal extremidade b1	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
Viga pilar (balanço) c1	CVS 600x226	226,10	55,86	12.629,95
Viga pilar (meio) c2	W 610x174	174,00	34,30	5.968,20
Viga pilar (núcleo) c3	W 250x25,3	25,30	160,04	4.049,01
Viga longitudinal (núcleo) d1	W 250x22,3	22,30	750,60	16.738,38
Total geral (Kg)				52.095,70

Fonte: Elaboração própria

Quadro 11 - Análise das vigas transversais**Modelo 2 sem rótulas (M2SR)**

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda e1	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
Viga transversal (balanço) f1	W 610x155	155,00	46,88	7.266,40
Viga transversal (meio) f2	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
Viga transversal (núcleo) f3	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60
Total geral (Kg)				61.689,39

Fonte: Elaboração própria

6.3 ANÁLISE DO MODELO 3

Os resultados do dimensionamento das vigas do Modelo 3 rotulado parcialmente (M3CR) pode ser observado nos Quadros 12 e 13.

Quadro 12 - Análise das vigas longitudinais**Modelo 3 rotulado parcialmente (M3CR)**

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda a1	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
Viga longitudinal extremidade b1	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
Viga pilar (balanço) c1	CVS 600x239	239,00	55,86	13.350,54
Viga pilar (meio) c2	CVS 600x190	189,90	34,30	6.513,57
Viga pilar (núcleo) c3	W 250x17,9	17,90	160,04	2.864,72
Viga longitudinal (núcleo) d1	W 310x23,8	23,80	250,20	5.954,76
Total geral (Kg)				41.393,75

Fonte: Elaboração própria

Quadro 13 - Análise das vigas transversais**Modelo 3 rotulado parcialmente (M3CR)**

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda e1	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
Viga transversal (balanço) f1	W 610x155	155,00	46,88	7.266,40
Viga transversal (meio) f2	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
Viga transversal (núcleo) f3	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60
Total geral (Kg)				61.689,39

Fonte: Elaboração própria

Os resultados do dimensionamento das vigas do Modelo 3 sem rótulas (M3SR) pode ser observado nos Quadros 14 e 15.

Quadro 14 - Análise das vigas longitudinais**Modelo 3 sem rótulas (M3SR)**

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda a1	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
Viga longitudinal extremidade b1	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
Viga pilar (balanço) c1	CVS 600x226	226,10	55,86	12.629,95
Viga pilar (meio) c2	CVS 600x190	189,90	34,30	6.513,57
Viga pilar (núcleo) c3	W 250x17,9	17,90	160,04	2.864,72
Viga longitudinal (núcleo) d1	W 310x23,8	23,80	250,20	5.954,76
Total geral (Kg)				40.673,15

Fonte: Elaboração própria

Quadro 15 - Análise das vigas transversais**Modelo 3 sem rótulas (M3SR)**

Elemento	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
Viga borda e1	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
Viga transversal (balanço) f1	W 610x155	155,00	46,88	7.266,40
Viga transversal (meio) f2	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
Viga transversal (núcleo) f3	W 610x174	174,00	234,4	40.785,60
Total geral (Kg)				61.689,39

Fonte: Elaboração própria

6.4 ANÁLISE DAS VIGAS LONGITUDINAIS

O Quadro 16 é um resumo das Vigas Longitudinais para cada um dos modelos propostos.

Quadro 16 - Análise das vigas longitudinais

Classificação	Quadro Geral - Análise das vigas longitudinais					
	Elemento	Tipo viga/modelo	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
a1	Viga borda a1	long-M1 CR	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
a1		long-M1 SR	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
a1		long-M2 CR	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
a1		long-M2 SR	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
a1		long-M3 CR	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
a1		long-M3 SR	W 200x15	15,00	250,20	3.753,00
b1	Viga longitudinal extremidade b1	long-M1 CR	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
b1		long-M1 SR	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
b1		long-M2 CR	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
b1		long-M2 SR	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
b1		long-M3 CR	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
b1		long-M3 SR	W 250x17,9	17,90	500,40	8.957,16
c1	Viga pilar (balanço) c1	long-M1 CR	CVS 600x226	226,10	55,86	12.629,95
c1		long-M1 SR	CVS 600x226	226,10	55,86	12.629,95
c1		long-M2 CR	CVS 600x226	226,10	55,86	12.629,95
c1		long-M2 SR	CVS 600x226	226,10	55,86	12.629,95
c1		long-M3 CR	CVS 600x239	239,00	55,86	13.350,54
c1		long-M3 SR	CVS 600x226	226,10	55,86	12.629,95
c2	Viga pilar (meio) c2	long-M1 CR	CVS 600x190	189,90	34,30	6.513,57
c2		long-M1 SR	CVS 600x190	189,90	34,30	6.513,57
c2		long-M2 CR	CVS 600x190	189,90	34,30	6.513,57
c2		long-M2 SR	W 610x174	174,00	34,30	5.968,20
c2		long-M3 CR	CVS 600x190	189,90	34,30	6.513,57
c2		long-M3 SR	CVS 600x190	189,90	34,30	6.513,57
c3	Viga pilar (núcleo) c3	long-M1 CR	W 310x21	21,00	160,04	3.360,84
c3		long-M1 SR	W 310x21	21,00	160,04	3.360,84
c3		long-M2 CR	W 250x17,9	17,90	160,04	2.864,72
c3		long-M2 SR	W 250x25,3	25,30	160,04	4.049,01
c3		long-M3 CR	W 250x17,9	17,90	160,04	2.864,72
c3		long-M3 SR	W 250x17,9	17,90	160,04	2.864,72
d1	Viga longitudinal (núcleo) d1	long-M1 CR	W 310x23,8	23,80	500,40	11.909,52
d1		long-M1 SR	W 310x23,8	23,80	500,40	11.909,52
d1		long-M2 CR	W 250x22,3	22,30	750,60	16.738,38
d1		long-M2 SR	W 250x22,3	22,30	750,60	16.738,38
d1		long-M3 CR	W 310x23,8	23,80	250,20	5.954,76
d1		long-M3 SR	W 310x23,8	23,80	250,20	5.954,76

Fonte: Elaboração própria

A Imagem 50 ilustra quais são as vigas longitudinais.

Imagem 50 – Legenda das vigas longitudinais (M3)

a1	a1	a1	a1
b1	b1	b1	b1
b1	b1	b1	b1
c1	c1	c2	c3
d1	d1	d1	d1
d1	d1	d1	d1
c1	c1	c2	c3
b1	b1	b1	b1
b1	b1	b1	b1
a1	a1	a1	a1

Fonte: Elaboração própria

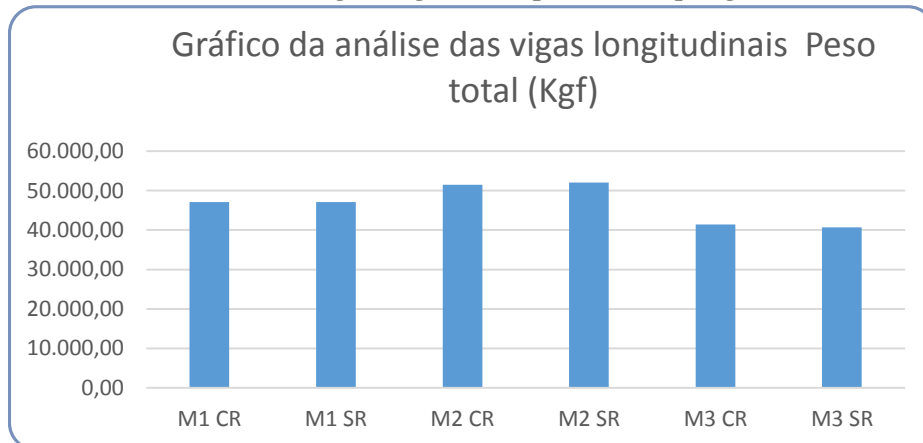
No Quadro 17 estão representados os Pesos Totais das Vigas Longitudinais para os seis modelos propostos nesse trabalho.

Quadro 17 – Peso Total das vigas longitudinais para cada modelo

Modelo	Peso total (Kgf)
M1 CR	47.124,04
M1 SR	47.124,04
M2 CR	51.456,77
M2 SR	52.095,70
M3 CR	41.393,75
M3 SR	40.673,15

Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 1 apresenta os Pesos Totais das Vigas Longitudinais para as seis diferentes topologias.

Gráfico 1 – Peso Total das vigas longitudinais para cada topologia

Fonte: Elaboração própria

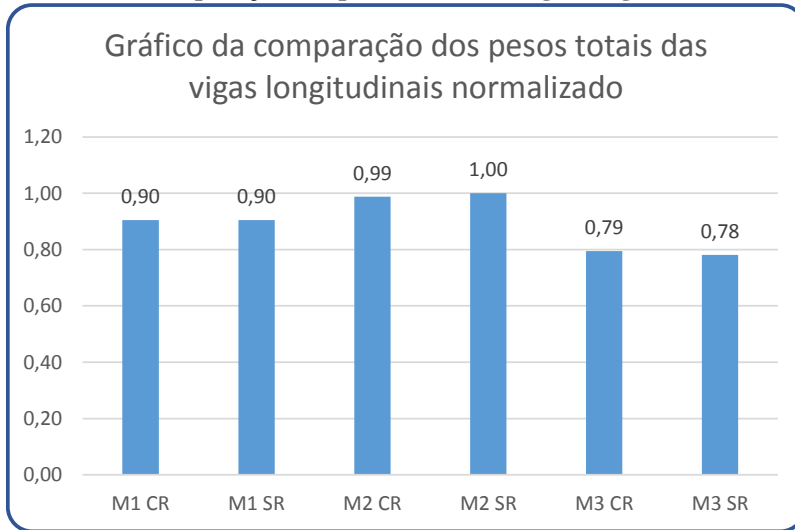
De acordo com o Gráfico 1, o Modelo 3 sem rótulas (M3SR) é o mais leve em relação as Vigas Longitudinais e, portanto, apresenta o menor consumo de aço. Com uma diferença de 11.422,55 kgf se comparado com o Modelo 2 sem rótulas (M2SR).

O Quadro 18 é representado pela Comparação dos Pesos Totais das Vigas Longitudinais Normalizado. Que consiste na divisão do resultado da soma de cada modelo proposto pelo modelo de maior peso. Assim como, o Gráfico 2 apresenta a Comparação dos Pesos Totais das Vigas Longitudinais Normalizado.

Quadro 18 - Comparação dos pesos totais das vigas longitudinais normalizado

Modelo	Peso normalizado
M1 CR	0,90
M1 SR	0,90
M2 CR	0,99
M2 SR	1,00
M3 CR	0,79
M3 SR	0,78

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 2 – Comparação dos pesos totais das vigas longitudinais normalizado

Fonte: Elaboração própria

6.5 ANÁLISE DAS VIGAS TRANSVERSAIS

O Quadro 19 é um resumo das Vigas Transversais para cada modelo proposto.

Quadro 19 – Resumo da análise das vigas transversais

Classificação	Quadro Geral - Análise das vigas transversais					
	Elemento	Tipo viga/modelo	Perfil	Peso (Kgf/m)	Comprimento (m)	Peso total (Kgf)
e1	Viga borda e1	transv-M1 CR	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
e1		transv-M1 SR	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
e1		transv-M2 CR	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
e1		transv-M2 SR	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
e1		transv-M3 CR	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
e1		transv-M3 SR	W 610x101	101,00	46,88	4.734,88
f1	Viga transversal (balanço) f1	transv-M1 CR	W 610x174	174,00	46,88	8.157,12
f1		transv-M1 SR	W 610x155	155,00	46,88	7.266,40
f1		transv-M2 CR	W 610x174	174,00	46,88	8.157,12
f1		transv-M2 SR	W 610x155	155,00	46,88	7.266,40
f1		transv-M3 CR	W 610x155	155,00	46,88	7.266,40
f1		transv-M3 SR	W 610x155	155,00	46,88	7.266,40
f2	Viga transversal (meio) f2	transv-M1 CR	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
f2		transv-M1 SR	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
f2		transv-M2 CR	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
f2		transv-M2 SR	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
f2		transv-M3 CR	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
f2		transv-M3 SR	CVS 600x190	189,90	46,88	8.902,51
f3	Viga transversal (núcleo) f3	transv-M1 CR	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60
f3		transv-M1 SR	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60
f3		transv-M2 CR	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60
f3		transv-M2 SR	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60
f3		transv-M3 CR	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60
f3		transv-M3 SR	W 610x174	174,00	234,40	40.785,60

Fonte: Elaboração própria

Imagem 51 – Legenda das vigas transversais

e1	f1	f2	f3
e1	f1	f2	f3
e1	f1	f2	f3

Fonte: Elaboração própria

No Quadro 20 estão representados os Pesos Totais das Vigas Transversais para os seis modelos propostos nesse trabalho.

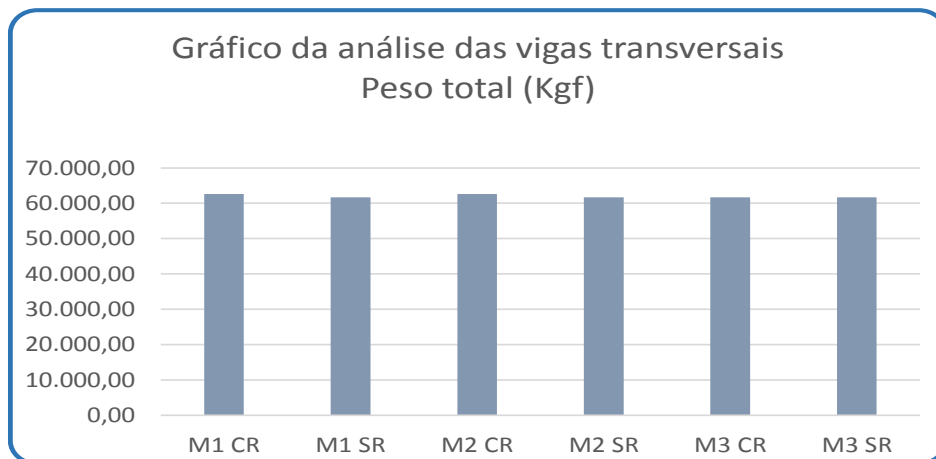
Quadro 20 – Peso Total das vigas transversais para cada modelo

Modelo	Peso total (Kgf)
M1 CR	62.580,11
M1 SR	61.689,39
M2 CR	62.580,11
M2 SR	61.689,39
M3 CR	61.689,39
M3 SR	61.689,39

Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 3 apresenta os Pesos Totais das Vigas Transversais para cada topologia.

Gráfico 3 – Peso Total das vigas transversais para cada modelo



Fonte: Elaboração própria

De acordo com o Gráfico 3, quatro modelos apresentam os mesmos valores, sendo que estes são os menores resultados da soma das Vigas Transversais. Mas ao considerar a soma total de todas as vigas para cada modelo, nota-se que o modelo mais leve é o Modelo 3 sem rótulas (M3SR). Visto que, este modelo possui o menor peso no somatório das Vigas Longitudinais e o menor valor na soma das Vigas Transversais, portanto apresenta o menor consumo de aço. Com uma diferença de 890,72 kgf se comparado com o modelo de maior valor, que neste caso, são os Modelos M1CR e M2CR, pois possuem o mesmo resultado.

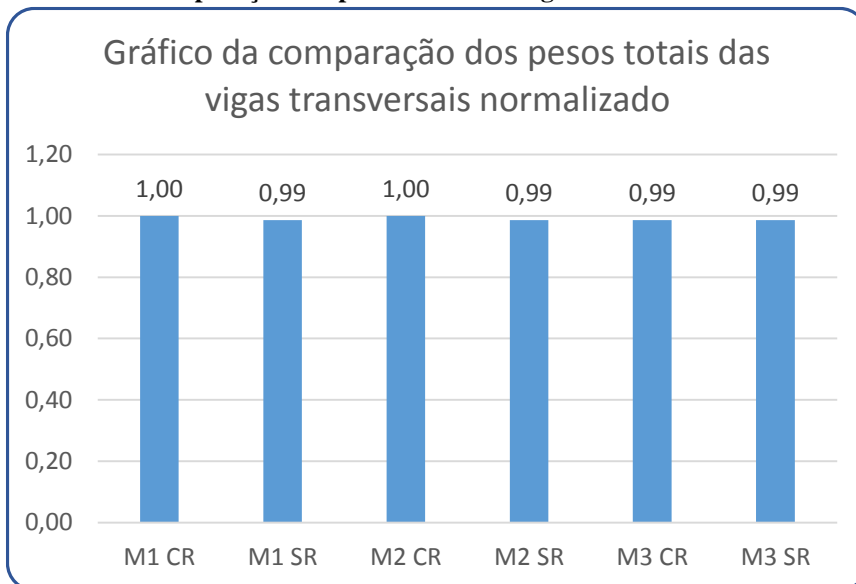
O Quadro 21 apresenta a Comparação dos Pesos Totais das Vigas Transversais Normalizado. A normalização consiste na divisão do resultado da soma das Vigas Transversais de cada modelo pelo valor da soma de maior peso. Assim como, o Gráfico 4 expõe a Comparação dos Pesos Totais das Vigas Transversais Normalizado.

Quadro 21 - Comparação dos pesos totais das vigas transversais normalizado

Modelo	Peso normalizado
M1 CR	1,00
M1 SR	0,99
M2 CR	1,00
M2 SR	0,99
M3 CR	0,99
M3 SR	0,99

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 4 – Comparação dos pesos totais das vigas transversais normalizado



Fonte: Elaboração própria

6.6 ANÁLISE DOS PESOS TOTAIS

O Quadro 22 apresenta a somatória dos Pesos Totais das Vigas Longitudinais, o Quadro 23 aponta a soma dos Pesos Totais das Vigas Transversais, e ainda a soma para cada um dos seis modelos propostos. Já o Quadro 24 e o Gráfico 5 expõem o Peso Total das Vigas Longitudinais e Transversais de cada topologia.

Quadro 22 – Peso Total das vigas longitudinais para cada modelo

Análise das vigas longitudinais

		long-M1 CR	long-M1 SR	long-M2 CR	long-M2 SR	long-M3 CR	long-M3 SR
classif.	Elemento	Peso total (Kgf)	Peso total (Kgf)	Peso total (Kgf)	Peso total (Kgf)	Peso total (Kgf)	Peso total (Kgf)
a1	Viga borda a1	3.753,00	3.753,00	3.753,00	3.753,00	3.753,00	3.753,00
b1	Viga longitudinal extremidade b1	8.957,16	8.957,16	8.957,16	8.957,16	8.957,16	8.957,16
c1	Viga pilar (balanço) c1	12.629,95	12.629,95	12.629,95	12.629,95	13.350,54	12.629,95
c2	Viga pilar (meio) c2	6.513,57	6.513,57	6.513,57	5.968,20	6.513,57	6.513,57
c3	Viga pilar (núcleo) c3	3.360,84	3.360,84	2.864,72	4.049,01	2.864,72	2.864,72
d1	Viga longitudinal (núcleo) d1	11.909,52	11.909,52	16.738,38	16.738,38	5.954,76	5.954,76
Totais		47.124,04	47.124,04	51.456,77	52.095,70	41.393,75	40.673,15

Fonte: Elaboração própria

Quadro 23 – Peso Total das vigas transversais para cada modelo e a soma total das vigas longitudinais e

transversais

Análise das vigas transversais

		transv-M1 CR	transv-M1 SR	transv-M2 CR	transv-M2 SR	transv-M3 CR	transv-M3 SR
classif.	Elemento	Peso total (Kgf)	Peso total (Kgf)	Peso total (Kgf)	Peso total (Kgf)	Peso total (Kgf)	Peso total (Kgf)
e1	Viga borda e1	4.734,88	4.734,88	4.734,88	4.734,88	4.734,88	4.734,88
f1	Viga transversal (balanço) f1	8.157,12	7.266,40	8.157,12	7.266,40	7.266,40	7.266,40
f2	Viga transversal (meio) f2	8.902,51	8.902,51	8.902,51	8.902,51	8.902,51	8.902,51
f3	Viga transversal (núcleo) f3	40.785,60	40.785,60	40.785,60	40.785,60	40.785,60	40.785,60
Totais		62.580,11	61.689,39	62.580,11	61.689,39	61.689,39	61.689,39

Peso total das vigas longitudinais e transversais	109.704,15	108.813,43	114.036,88	113.785,09	103.083,14	102.362,54
--	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Fonte: Elaboração própria

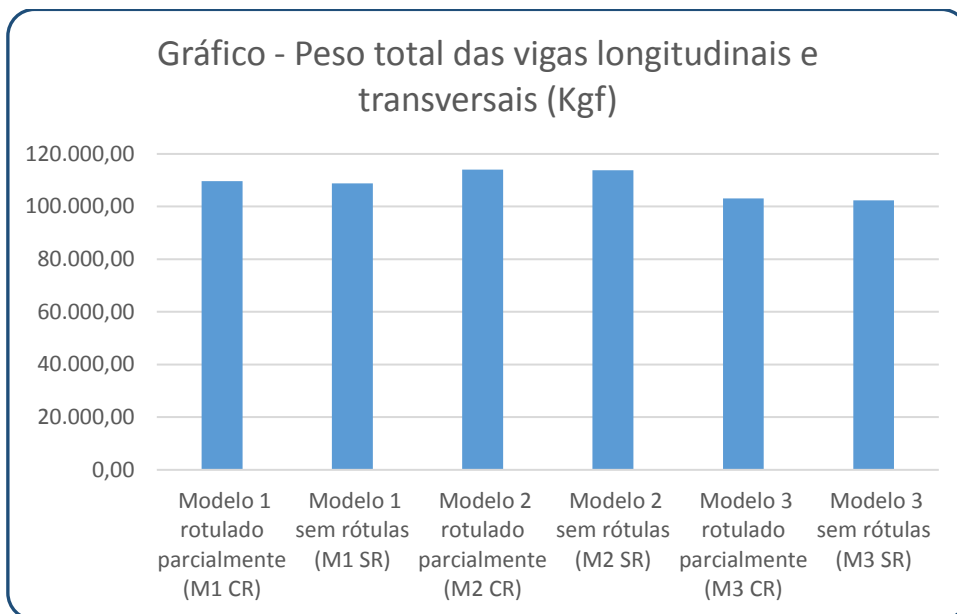
Quadro 24 – Peso Total das vigas longitudinais e transversais para cada modelo

Quadro – Peso total das vigas longitudinais e transversais

Modelo	Peso total (Kgf)
Modelo 1 rotulado parcialmente (M1 CR)	109.704,15
Modelo 1 sem rótulas (M1 SR)	108.813,43
Modelo 2 rotulado parcialmente (M2 CR)	114.036,88
Modelo 2 sem rótulas (M2 SR)	113.785,09
Modelo 3 rotulado parcialmente (M3 CR)	103.083,14
Modelo 3 sem rótulas (M3 SR)	102.362,54

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 5 – Peso Total das vigas longitudinais e transversais para cada modelo



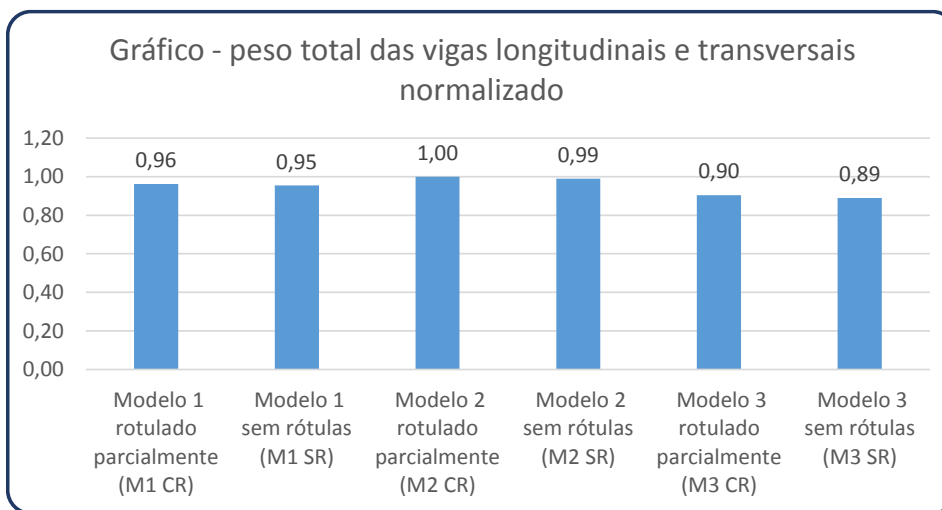
Fonte: Elaboração própria

O Quadro 25 apresenta a Comparação dos Pesos Totais das Vigas Transversais e Longitudinais Normalizados. A normalização consiste na divisão do resultado da soma dos Pesos Totais das Vigas Transversais e Longitudinais Normalizados de cada modelo pelo valor da soma de maior peso. Assim como, o Gráfico 6 expõe a Comparação dos Pesos Totais das Vigas Transversais e Longitudinais Normalizados.

Quadro 25 – Comparação dos pesos totais das vigas longitudinais e transversais normalizado

Modelo	Peso Normalizado
Modelo 1 rotulado parcialmente (M1 CR)	0,96
Modelo 1 sem rótulas (M1 SR)	0,95
Modelo 2 rotulado parcialmente (M2 CR)	1,00
Modelo 2 sem rótulas (M2 SR)	0,99
Modelo 3 rotulado parcialmente (M3 CR)	0,90
Modelo 3 sem rótulas (M3 SR)	0,89

Fonte: Elaboração própria

Gráfico 6 – Comparação dos pesos totais das vigas longitudinais e transversais normalizado

Fonte: Elaboração própria

O Quadro 26 é uma comparação entre os pesos totais e a área da Cobertura. Dessa forma, é possível verificar que o modelo que possui o menor consumo de aço por metro quadrado é o Modelo 3 sem rótulas, com 34,91 Kgf/m². Visto que, a área da edificação é de 2.932,34 m².

Quadro 26 – Comparação do consumo de aço por metro quadrado

Quadro – Comparação do consumo de aço por metro quadrado

Modelo	Peso total (Kgf/m ²)
Modelo 1 rotulado parcialmente (M1 CR)	37,41
Modelo 1 sem rótulas (M1 SR)	37,11
Modelo 2 rotulado parcialmente (M2 CR)	38,89
Modelo 2 sem rótulas (M2 SR)	38,80
Modelo 3 rotulado parcialmente (M3 CR)	35,15
Modelo 3 sem rótulas (M3 SR)	34,91

Fonte: Elaboração própria

Em todos os modelos propostos nesse trabalho foram verificados os Momentos Máximos e as Flechas, conforme as normas previstas pela ABNT. No Quadro 27 estão os Momentos Máximos de cada viga do Modelo 3 sem rótulas (M3SR). Já no Quadro 28 apresentam-se os Deslocamentos Máximos verticais de cada viga do M3SR. E no Anexo A estão a localização dos nós referentes aos maiores deslocamentos, assim como outros esforços das vigas do M3SR.

Quadro 27 – Momentos Máximos de cada viga do Modelo 3 sem rótulas

Modelo 3 sem rótulas (M3SR)

Elemento	Momento Máximo (kgf.m)
Viga borda longitudinal a1	2.840,74
Viga longitudinal extremidade b1	5.102,53
Viga pilar longitudinal (balanço) c1	59.375,00
Viga pilar longitudinal (meio) c2	21.365,00
Viga pilar longitudinal (núcleo) c3	8.189,52
Viga longitudinal (núcleo) d1	10.024,50
Viga borda transversal e1	12.511,10
Viga transversal (balanço) f1	65.973,30
Viga transversal (meio) f2	76.904,00
Viga transversal (núcleo) f3	80.494,20

Fonte: Elaboração própria

Quadro 28 – Máximos deslocamentos verticais de cada viga do Modelo 3 sem rótulas

Modelo 3 sem rótulas (M3SR)

Elemento	Flecha (cm)	Deslocamento máximo	Deslocamento admissível
Viga borda longitudinal a1	relativa 5,59	L/265	L/250
Viga longitudinal extremidade b1	relativa 3,80	L/368	L/350
Viga pilar longitudinal (balanço) c1	real 1,28	L/351	L/250
Viga pilar longitudinal (meio) c2	real 0,27	L/353	L/350
Viga pilar (núcleo) longitudinal c3	real 2,92	L/351	L/350
Viga longitudinal (núcleo) d1	relativa 4,32	L/351	L/350
Viga borda transversal e1	real 1,82	L/252	L/250
Viga transversal (balanço) f1	real 1,92	L/279	L/250
Viga transversal (meio) f2	real 2,15	L/251	L/250
Viga transversal (núcleo) f3	real 2,16	L/250	L/250

Fonte: Elaboração própria

7 CONCLUSÃO

Esse estudo teve como objetivo geral a análise de diferentes sistemas estruturais para a execução da Cobertura da Plataforma Superior de Brasília. Entende-se que o seu escopo é muito importante devido aos relatórios feitos recentemente pela Novacap sobre a Cobertura, e pela situação em que a estrutura se encontra atualmente, com diversas manifestações patológicas, deformações excessivas, além de grande desconforto visual causando uma intensa sensação de insegurança aos seus usuários.

Caso a estrutura venha a ser demolida, os resultados obtidos após o Dimensionamento Estrutural dos três modelos propostos e as suas variações, rotulado parcialmente e sem rótulas, demonstrou que o modelo mais leve e, portanto, com o menor consumo de aço é o Modelo 3 sem rótulas (M3SR), com um peso total de 102.362,54 Kgf. Porém, devido à grande variação do preço do aço nos dias atuais, não foram feitas comparações com os valores totais de cada modelo. Além disso, é preciso levar em consideração que o Modelo 3 possui uma quantidade menor de vigas na parte central, com três espaços, gerando uma diminuição do peso total das vigas. Na análise dos deslocamentos verticais observou-se que os maiores deslocamentos verticais se deram nas vigas longitudinais.

É importante ressaltar que nesse trabalho não foi levado em consideração as ligações, sejam elas permanentes, executadas com soldas e rebites, e removíveis, executadas com parafusos e pinos. Dessa forma, não é possível ter certeza de qual modelo é o mais rentável pois, para isso é necessário realizar uma análise das ligações que compõem a estrutura de cada modelo proposto, além do sistema de execução da estrutura. Visto que, a quantidade de ligações de determinado modelo pode encarecer muito a estrutura que antes desta análise seria a mais econômica. Também é importante destacar que o vento não foi considerado, por se tratar de uma estrutura baixa, tornando a sua análise praticamente insignificante. Assim como não foi feita a verificação dos pilares, pois os sistemas estruturais propostos são em aço, o que torna a estrutura mais leve do que o concreto protendido, usado atualmente.

O consumo de aço por metro quadrado foi analisado, sendo que o modelo que possui o menor consumo/m² é o Modelo 3 com vigas contínuas (M3SR), com 34,91 kgf/m², apesar da diferença entre os outros modelos não ter sido tão expressiva. Após uma estimativa da quantidade de conectores de cisalhamento do tipo stud bolt pelo software Viga Mista com interação parcial, verificou-se que o Modelo 3 rotulado parcialmente (M3CR) obteve o menor

consumo, com aproximadamente 2.192 conectores, o Modelo 3 sem rótulas (M3SR) obteve 2.292 conectores, já o Modelo 2 com vigas contínuas (M2SR) apresenta o maior valor com 3.271 conectores. É preciso considerar o número total de conectores para cada modelo proposto devido ao seu elevado preço nos dias atuais, podendo aumentar muito o custo da obra.

Caso as intervenções estruturais que forem realizadas futuramente consistirem somente em reformas na Cobertura, é preciso reparar a edificação de forma que esta não possua mais manifestações patológicas e ainda, atenda aos aspectos de segurança estrutural e do estado limite de deformações.

Como sugestões e direcionamentos para trabalhos futuros, incluem-se a avaliação das ligações para que seja possível estimar qual modelo tem o melhor custo; a análise não linear da estrutura com os mesmos modelos propostos nesse estudo; a avaliação da estrutura utilizando outros programas computacionais, como o SCIA, e ainda, a análise das estruturas propostas levando em conta o efeito do vento na edificação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências - Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

_____. **NBR 13752**: Perícias de engenharia na construção civil. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

_____. **NBR 14037**: Manual de operação, uso e manutenção das edificações – Conteúdo e recomendações para elaboração e apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 13532**: Elaboração de projetos de edificações - Arquitetura. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ALMEIDA, Ronaldo Oliveira de. **Relatório da monitoração das vibrações da estrutura da Marquise da Plataforma Superior da Rodoviária do Plano Piloto, Brasília-DF**, Novacap, Processo n 002/2016, 75.p.

ANDRADE, Sebastião; VELLASCO, Pedro. **Comportamento e Projeto de Estruturas de Aço**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier; Editora Puc Rio, 2016.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 1.v.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 2.v.

BELLEI, Ildony H. **Edifícios Industriais em Aço**: Projeto e cálculo. 6.ed. São Paulo: Pini, 2010.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 3.ed. São Carlos: EdUFSCar, 2009.

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO. **Construção em aço: Vantagens**. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-vantagens.php>> Acesso: 23 mar. 2016.

CLÍMACO, João Carlos Teatini de Souza. **Estruturas de concreto armado: Fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2.ed. Brasília: Editora UnB, 2015.

CORULLON, Martin. **A Plataforma Rodoviária de Brasília: infraestrutura, arquitetura e urbanidade**. 2013. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

COMPUTERS AND STRUCTURES, *Inc.* **SAP 2000 advanced: Structural Analysis**. Program – Version 15. Berkley: Computers and Structures, *Inc.*, 2011.

DIAS, Luís Andrade de Mattos. **Estruturas de Aço: conceitos, técnicas e linguagem**. 5.ed. São Paulo: Ziguarte, 2006.

FEIJÃO, Carlos Henrique Linhares. **Relatório Técnico da Estrutura de Cobertura da Plataforma Superior da Rodoviária de Brasília**, Novacap, 2014, 3.p.

FREIRE, Carlos. **Lajes e Pisos para Estrutura Metálica**, 2009. Disponível em: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=467> Acesso em: 10 jun. 2016.

GUERRIN, A.; LAVAUUR, Roger C. **Tratado de concreto armado: Coberturas, arcos, cúpulas**. Paraná: Hemus, 2004. 4.v.

LIMA, Adeildo Viegas de; COSTA, Maria Elisa. **Brasília 57-85: do Plano Piloto ao Plano Piloto**. Brasília: Terracap, 1985.

MATOS, Rodrigo Portal de. **Estrutura da Plataforma Superior da Estação Rodoviária de Brasília: Análise de intervenções e avaliação pós-reparo**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado) – Estruturas e Construção Civil, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

METÁLICA. **Lajes: Steel Deck**, 2009. Disponível em: <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=468> Acesso: 10 jun. 2016.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

QUEIROZ, Gilson; PIMENTA, Roberval José; MARTINS, Alexandre Galvão. **Manual de Construção em aço: estruturas mistas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil; CBCA, 2012. 1.v.

QUEIROZ, Gilson; PIMENTA, Roberval José; MARTINS, Alexandre Galvão. **Manual de Construção em aço: estruturas mistas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil; CBCA, 2012. 2.v.

ROSSETTI, Eduardo Pierrotti. **Arquitetura: arquiteturas de Brasília**. Brasília: Instituto Terceiro Setor, 2012.

ROSSETTI, Eduardo Pierrotti. **Lúcio Costa e a Plataforma Rodoviária de Brasília**. *Arquitextos*, Brasília, 119.03, abr. 2010. Disponível em:
<<http://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/10.119/3371>> Acesso: 02 abr. 2016.

SAÚDE, Jorge; RAIMUNDO, Duarte. **Lajes Mistas: Aspectos construtivos e respectivas recomendações do Eurocódigo 4**, 2011. Disponível em:
<http://www.metallica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=970> Acesso em: 08 maio 2016.

VASCONCELOS, A. C. de. **O Concreto no Brasil: Recordes – Realização – História**. São Paulo: Pini, 1992. 1.v.

ANEXO A

Neste Anexo apresentam-se os resultados do Software SAP2000 V17 para as vigas do Modelo 3 sem rótulas (M3SR), referentes ao Momento Máximo (M3) de cada tipo de viga e ao maior deslocamento vertical (U3), bem como as Imagens de cada viga com os nós referentes ao maior deslocamento. Também estão as verificações de cada viga para o seu respectivo perfil, nos Softwares Viga Mista, para as vigas longitudinais, e Visual Metal, para as vigas transversais. É importante ressaltar que as Vigas Mistas analisadas nesse estudo são construídas com escoramento.

Viga borda longitudinal - a1

Quadro 1A – Referente ao Momento Máximo (M3)

TABLE: Element Forces - Frames											
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Text	m
548	0,35846	1,4D+1,5L2	LinStatic	131,96	1231,42	-1,25	-0,07744	0,31	-2840,74	548-1	0,35846

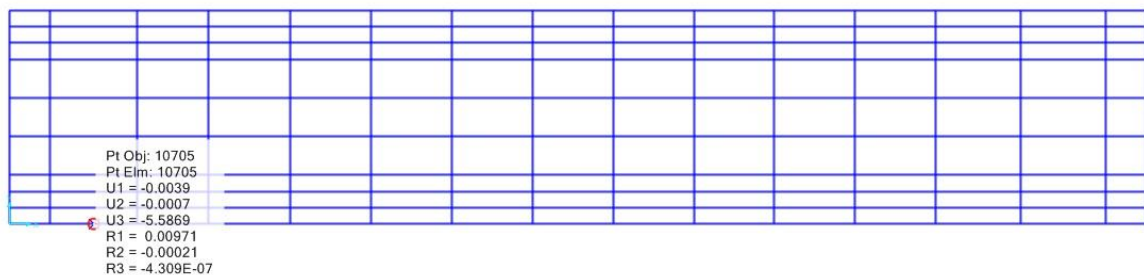
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Quadro 2A – Referente ao maior deslocamento (U3)

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
10705	D+L2	LinStatic	-0,00389	-0,00073	-5,58686	0,009706	-0,00021	-4,3E-07

Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Imagem 1A – Localização do nó referente ao maior deslocamento (U3)



Fonte: SAP2000 V17

Relatório do Software Viga Mista – viga borda longitudinal – a1

Relatório Viga: viga borda longitudinal - a1

Observações: W 200x15

Dados de Entrada

Geometria

Mesa Superior ---- bf [mm] = 100 tf [mm] = 5.2

Mesa Inferior ----- bf [mm] = 100 tf [mm] = 5.2

Alma ----- hw [mm] = 190 tw [mm] = 4.3

Geometria da laje:

- h1 [mm] =50 - h2 [mm] =50

- L1 [mm] =305 - L2 [mm] =130 - L3 [mm] =175

Materiais

Aço ----- fy [MPa] = 345

Concreto ----- fck [MPa] = 30 g [KN/m³] = 25

Tipo de Construção

Escorada

Momento fletor solicitante [KN.m] = nominal: 19.95

Momento fletor solicitante [KN.m] = cálculo: 28.40

Temperatura

Analisar apenas em temperatura ambiente.

Conectores

Tipo: Pino com Cabeça ("Stud Bolts")

Diâmetro do conector [mm] = 15.9

Limite de resistência à tração do aço do conector [MPa] = 450

Comprimento do pino após a soldagem [mm] = 90

Número de conectores de cisalhamento por nervura = 2

Resultados para Temperatura Ambiente - de acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Interação Completa

Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 113.84

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 609.35

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 17.00

Posição da Linha Neutra y [mm] = -73.24

OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço

Positivo para baixo

Tensão de tração [kN/cm²] = 1.00

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.01

Interação Parcial

Momento Resistente de Cálculo [KN.m] = 83.97

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [KN] = 243.74

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 7.00

Tensão de tração [kN/cm²] = 2.41

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.14

OBS: grau de interação mínimo é de [%] = 40.00

Força Cortante (sem reforçadores)

Cortante Resistente de Cálculo [KN] = 162.16

Viga longitudinal extremidade – b1

Quadro 3A – Referente ao Momento Máximo (M3)

TABLE: Element Forces - Frames											
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Text	m
2290	0,345	1,4D+1,5L1+1,5L2	LinStatic	101,22	2150,66	1	-0,17	-0,21	-5102,53	2290-1	0,345

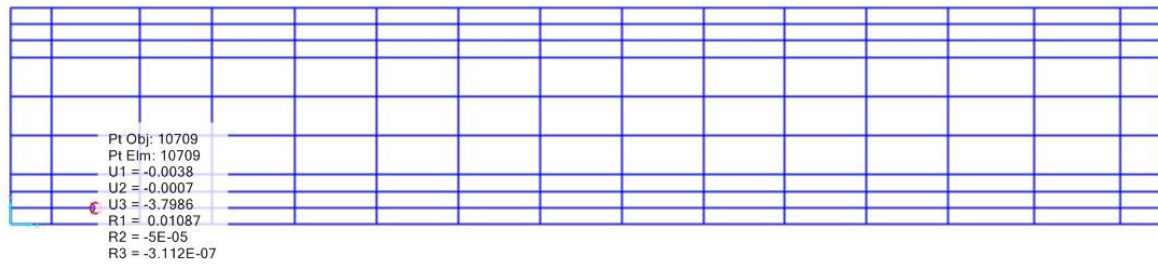
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Quadro 4A - Referente ao maior deslocamento (U3)

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
10709	D+L2	LinStatic	-0,00384	-0,00075	-3,79861	0,010871	-5,1E-05	-3,1E-07

Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Imagem 2A – Localização do nó referente ao maior deslocamento (U3)



Fonte: SAP2000 V17

Relatório do Software Viga Mista – viga longitudinal extremidade – b1

Relatório Viga: viga longitudinal extremidade - b1

Observações: W 250x17,9

Dados de Entrada

Geometria

Mesa Superior ---- bf [mm] = 101 tf [mm] = 5.3

Mesa Inferior ----- bf [mm] = 101 tf [mm] = 5.3

Alma ----- hw [mm] = 240 tw [mm] = 4.8

Geometria da laje:

- h1 [mm] =50 - h2 [mm] =50

- L1 [mm] =305 - L2 [mm] =130 - L3 [mm] =175

Materiais

Aço ----- fy [MPa] = 345

Concreto ----- fck [MPa] = 30 g [KN/m3] = 25

Tipo de Construção

Escorada

Momento fletor solicitante [KN.m] = nominal: 35.85

Momento fletor solicitante [KN.m] = cálculo: 51.02

Temperatura

Analisar apenas em temperatura ambiente.

Conectores

Tipo: Pino com Cabeça ("Stud Bolts")

Diâmetro do conector [mm] = 15.9

Limite de resistência à tração do aço do conector [MPa] = 450

Comprimento do pino após a soldagem [mm] = 90

Número de conectores de cisalhamento por nervura = 2

Resultados para Temperatura Ambiente - de acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Interação Completa

Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 151.61

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 724.01

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 20.00

Posição da Linha Neutra y [mm] = -68.20

OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço

Positivo para baixo

Tensão de tração [kN/cm²] = 1.71

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.02

Interação Parcial

Momento Resistente de Cálculo [KN.m] = 116.25

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [KN] = 289.60

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 8.00

Tensão de tração [kN/cm²] = 4.05

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.23

OBS: grau de interação mínimo é de [%] = 40.00

Força Cortante (sem reforçadores)

Cortante Resistente de Cálculo [KN] = 226.36

Viga pilar (balanço) – c1

Quadro 5A – Referente ao Momento Máximo (M3)

Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

TABLE: Element Forces - Frames											
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Text	m
492	0,45	1,4D+1,5L2	LinStatic	-1958,04	16739,12	-349,59	-23,73	148,89	-59375	492-1	0,45

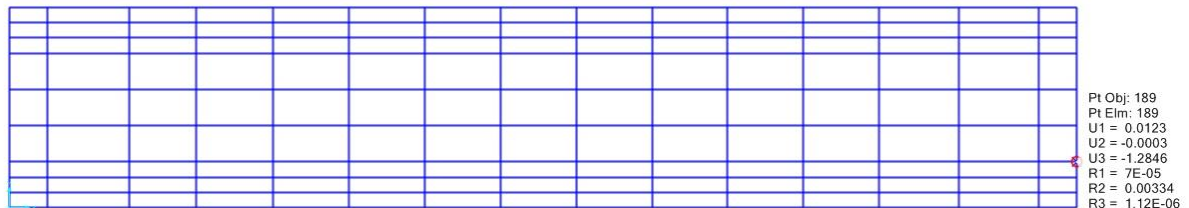
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Quadro 6A – Referente ao maior deslocamento (U3)

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
189	D+L2	LinStatic	0,01235	-0,00033	-1,28464	0,000071	0,003338	1,12E-06

Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Imagem 3A – Localização do nó referente ao maior deslocamento



Fonte: SAP2000 V17

Relatório do Software Viga Mista – viga pilar (balanço) – c1

Relatório Viga: viga pilar (balanço) - c1

Observações: CVS 600x226

Dados de Entrada

Geometria

Mesa Superior ---- bf [mm] = 400 tf [mm] = 25

Mesa Inferior ----- bf [mm] = 400 tf [mm] = 25

Alma ----- hw [mm] = 550 tw [mm] = 16

Geometria da laje:

- h1 [mm] =50 - h2 [mm] =50
- L1 [mm] =305 - L2 [mm] =130 - L3 [mm] =175

Materiais

Aço ----- fy [MPa] = 345

Concreto ----- fck [MPa] = 30 g [KN/m3] = 25

Tipo de Construção

Escorada

Momento fletor solicitante [KN.m] = nominal: 417.56

Momento fletor solicitante [KN.m] = cálculo: 593.74

Temperatura

Analisar apenas em temperatura ambiente.

Conectores

Tipo: Pino com Cabeça ("Stud Bolts")

Diâmetro do conector [mm] = 15.9

Limite de resistência à tração do aço do conector [MPa] = 450

Comprimento do pino após a soldagem [mm] = 90

Número de conectores de cisalhamento por nervura = 2

Resultados para Temperatura Ambiente - de acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Interação Completa

Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 2545.24

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 1138.39

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 32.00

Posição da Linha Neutra y [mm] = 186.57

OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço

Positivo para baixo

Tensão de tração [kN/cm²] = 4.11

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.37

Interação Parcial

Momento Resistente de Cálculo [KN.m] = 2350.17

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [KN] = 455.36

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 13.00

Tensão de tração [kN/cm²] = 6.28

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.71

OBS: grau de interação mínimo é de [%] = 40.00

Força Cortante (sem reforçadores)

Cortante Resistente de Cálculo [KN] = 1656.00

Viga pilar (meio) – c2

Quadro 7A – Referente ao Momento Máximo (M3)

TABLE: Element Forces - Frames											
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Text	m
3799	0	1,4D+1,5L1+1,5L2	LinStatic	163,79	-11986,3	141,14	3,78	53,58	-21365	3799-1	0

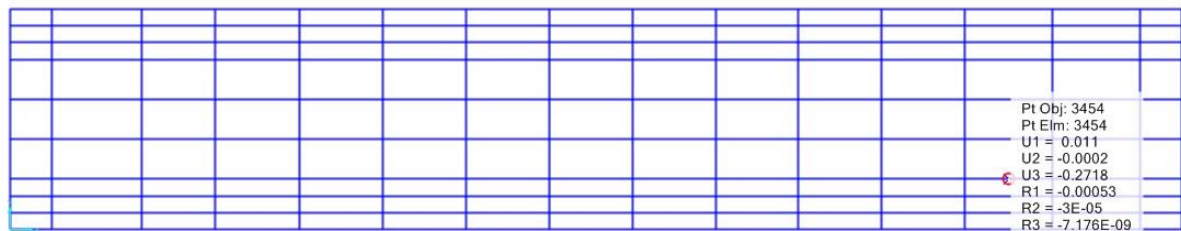
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Quadro 8A – Referente ao maior deslocamento (U3)

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
3454	D+L1+L2	LinStatic	0,011039	-0,00018	-0,2718	-0,00053	-2,9E-05	-7,2E-09

Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Imagem 4A – Localização do nó referente ao maior deslocamento (U3)



Fonte: SAP2000 V17

Relatório do Software Viga Mista – viga pilar (meio) – c2

Relatório Viga: viga pilar (meio) - c2

Observações: CVS 600x190

Dados de Entrada

Geometria

Mesa Superior ---- bf [mm] = 400 tf [mm] = 19

Mesa Inferior ----- bf [mm] = 400 tf [mm] = 19

Alma ----- hw [mm] = 562 tw [mm] = 16

Geometria da laje:

- h1 [mm] =50 - h2 [mm] =50

- L1 [mm] =305 - L2 [mm] =130 - L3 [mm] =175

Materiais

Aço ----- fy [MPa] = 345

Concreto ----- fck [MPa] = 30 g [KN/m³] = 25

Tipo de Construção

Escorada

Momento fletor solicitante [KN.m] = nominal: 150.26

Momento fletor solicitante [KN.m] = cálculo: 213.64

Temperatura

Analisar apenas em temperatura ambiente.

Conectores

Tipo: Pino com Cabeça ("Stud Bolts")

Diâmetro do conector [mm] = 15.9

Limite de resistência à tração do aço do conector [MPa] = 450

Comprimento do pino após a soldagem [mm] = 90

Número de conectores de cisalhamento por nervura = 2

Resultados para Temperatura Ambiente - de acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Interação Completa

Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 2143.47

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 1138.39

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 32.00

Posição da Linha Neutra y [mm] = 186.57

OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço

Positivo para baixo

Tensão de tração [kN/cm²] = 1.65

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.15

Interação Parcial

Momento Resistente de Cálculo [KN.m] = 1948.39

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [KN] = 455.36

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 13.00

Tensão de tração [kN/cm²] = 2.62

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.29

OBS: grau de interação mínimo é de [%] = 40.00

Força Cortante (sem reforçadores)

Cortante Resistente de Cálculo [KN] = 1692.13

Viga pilar (núcleo) – c3

Quadro 9A– Referente ao Momento Máximo (M3)

TABLE: Element Forces - Frames											
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Text	m
3460	0,345	1,4D+1,5L1+1,5L2	LinStatic	140,21	5858,69	-4,61	-0,04751	1,05	-8189,52	3460-1	0,345

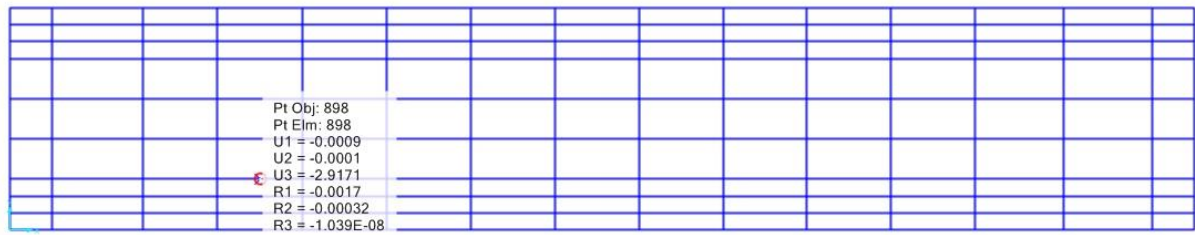
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Quadro 10A – Referente ao maior deslocamento (U3)

TABLE: Joint Displacements									
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3	
Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians	
898	D+L1+L2	LinStatic	-0,00089	-0,00014	-2,91707	-0,0017	-0,00032	-1E-08	

Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Imagem 5A – Localização do nó referente ao maior deslocamento (U3)



Fonte: SAP2000 V17

Relatório do Software Viga Mista – viga pilar (núcleo) – c3

Relatório Viga: viga pilar (núcleo) - c3

Observações: W 250x17.9

Dados de Entrada

Geometria

Mesa Superior ---- bf [mm] = 101 tf [mm] = 5.3

Mesa Inferior ----- bf [mm] = 101 tf [mm] = 5.3

Alma ----- hw [mm] = 240 tw [mm] = 4.8

Geometria da laje:

- h1 [mm] =50 - h2 [mm] =50

- L1 [mm] =305 - L2 [mm] =130 - L3 [mm] =175

Materiais

Aço ----- fy [MPa] = 345

Concreto ----- fck [MPa] = 30 g [KN/m3] = 25

Tipo de Construção

Escorada

Momento fletor solicitante [KN.m] = nominal: 57.53

Momento fletor solicitante [KN.m] = cálculo: 81.89

Temperatura

Analisar apenas em temperatura ambiente.

Conectores

Tipo: Pino com Cabeça ("Stud Bolts")

Diâmetro do conector [mm] = 15.9

Limite de resistência à tração do aço do conector [MPa] = 450

Comprimento do pino após a soldagem [mm] = 90

Número de conectores de cisalhamento por nervura = 2

Resultados para Temperatura Ambiente - de acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Interação Completa

Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 151.61

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 724.01

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 20.00

Posição da Linha Neutra y [mm] = -68.20

OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço

Positivo para baixo

Tensão de tração [kN/cm²] = 2.75

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.04

Interação Parcial

Momento Resistente de Cálculo [KN.m] = 116.25

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [KN] = 289.60

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 8.00

Tensão de tração [kN/cm²] = 6.50

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.37

OBS: grau de interação mínimo é de [%] = 40.00

Força Cortante (sem reforçadores)

Cortante Resistente de Cálculo [KN] = 226.36

Viga longitudinal (núcleo) – d1

Quadro 11A – Referente ao Momento Máximo (M3)

TABLE: Element Forces - Frames											
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Text	m
1277	0	1,4D+1,5L1+1,5L2	LinStatic	113,69	-4243,46	-0,32	-0,12	-0,06598	-10024,5	1277-1	0

Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Momento fletor solicitante [KN.m] = cálculo: 100.24

Temperatura

Analisar apenas em temperatura ambiente.

Conectores

Tipo: Pino com Cabeça ("Stud Bolts")

Diâmetro do conector [mm] = 15.9

Limite de resistência à tração do aço do conector [MPa] = 450

Comprimento do pino após a soldagem [mm] = 90

Número de conectores de cisalhamento por nervura = 2

Resultados para Temperatura Ambiente - de acordo com a ABNT NBR 8800:2008

Interação Completa

Momento Resistente de Cálculo [kN.m] = 262.02

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [kN] = 1138.39

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 32.00

Posição da Linha Neutra y [mm] = 0.09

OBS: Posição da Linha Neutra a partir do topo da viga de aço

Positivo para baixo

Tensão de tração [kN/cm²] = 1.51

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.06

Interação Parcial

Momento Resistente de Cálculo [KN.m] = 213.89

Resistência Mínima dos Conectores no Trecho [KN] = 455.36

Número de Conectores Necessários em Meia Viga = 13.00

Tensão de tração [kN/cm²] = 5.62

Tensão de compressão [kN/cm²] = 0.27

OBS: grau de interação mínimo é de [%] = 40.00

Força Cortante (sem reforçadores)

Cortante Resistente de Cálculo [KN] = 348.66

Viga borda transversal – e1

Quadro 13A – Referente ao Momento Máximo (M3)

TABLE: Element Forces - Frames												
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation	
Text	m	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Text	m	
4178	0,4475	1,4D+1,5L2	LinStatic	445,79	3696,81	13,16	1,95	-5,47	-12511,1	4178-1	0,4475	

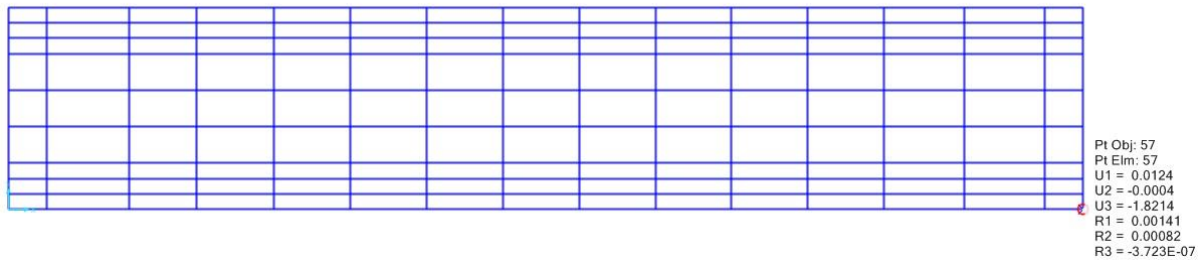
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Quadro 14A –Referente ao maior deslocamento (U3)

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
57	D+L1+L2	LinStatic	0,012355	-0,00036	-1,82141	0,00141	0,000818	-3,7E-07

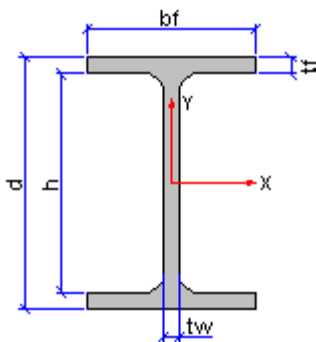
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Imagem 7A – Localização do nó referente ao maior deslocamento (U3)



Fonte: SAP2000 V17

Relatório do Software Visual Metal – viga borda transversal – e1



Dimensionamento Perfil I Laminado

Propriedades do Aço

Tipo = ASTM A 572 gr-50

$f_y = 34,50 \text{ kN/cm}^2$

$f_u = 45,00 \text{ kN/cm}^2$

$f_r = 11,5 \text{ kN/cm}^2$

$$E = 20500 \text{ kN/cm}^2$$

$$G = 7892,5 \text{ kN/cm}^2$$

Propriedades geométricas do perfil

Perfil W 310 x 38,7

$$bf = 165,00 \text{ mm}$$

$$tf = 9,70 \text{ mm}$$

$$tw = 5,80 \text{ mm}$$

$$d = 310,00 \text{ mm}$$

$$Ag = 49,70 \text{ cm}^2$$

$$\text{Peso} = 38,70 \text{ kgf}$$

$$Ix = 8581,00 \text{ cm}^4$$

$$Iy = 727,00 \text{ cm}^4$$

$$IT = 13,20 \text{ cm}^4$$

$$Wx = 553,60 \text{ cm}^3$$

$$Wy = 88,10 \text{ cm}^3$$

$$Zx = 615,40 \text{ cm}^3$$

$$Zy = 134,90 \text{ cm}^3$$

$$rx = \text{raiz}(Ix/Ag)$$

$$rx = \text{raiz}(8581,00/49,70)$$

$$rx = 13,14 \text{ cm}$$

$$ry = \text{raiz}(Iy/Ag)$$

$$ry = \text{raiz}(727,00/49,70)$$

$$ry = 3,82 \text{ cm}$$

$$h = d - 2*tf$$

$$h = 310,00 - 2*9,70$$

$$h = 290,60 \text{ mm}$$

Comprimentos de Flambagem

$$L_{fx} = 1270,00 \text{ cm}$$

$$L_{fy} = 423,00 \text{ cm}$$

$$L_b = 423,00 \text{ cm}$$

Esforços Solicitantes

$$Nd = 0,00 \text{ kN}$$

$$Vd = 36,96 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 12511,10 \text{ kN*cm}$$

$$M_{dy} = 0,00 \text{ kN*cm}$$

Verificação do Esforço Cortante

Análise plástica

$$A_w = h*tw$$

$$A_w = 290,60*5,80$$

$$A_w = 1798,00 \text{ mm}^2$$

$$A_w = 17,98 \text{ cm}^2$$

Considerando Item 5.2.2 nota a da NBR8800/88

$$a = 4 \cdot t_w;$$

$$a = 4 \cdot 5,80$$

$$a = 23,20 \text{ mm}$$

$$(a/h) < 1$$

$$k = 4 + 5,34 / (a/h)^2$$

$$k = 4 + 5,34 / (23,20 / 290,60)^2$$

$$k = 841,83$$

$$l = h / t_w$$

$$l = 290,60 / 5,80$$

$$l = 50,10$$

$$l_p = 1,08 \cdot \text{raiz}(k \cdot E / f_y)$$

$$l_p = 1,08 \cdot \text{raiz}(841,83 \cdot 20500,00 / 34,50)$$

$$l_p = 763,84$$

$$l_r = 1,4 \cdot \text{raiz}(k \cdot E / f_y)$$

$$l_r = 1,4 \cdot \text{raiz}(841,83 \cdot 20500,00 / 34,50)$$

$$l_r = 34160,70$$

$$V_{pl} = 0,55 \cdot A_w \cdot f_y$$

$$V_{pl} = 0,55 \cdot 17,98 \cdot 34,50$$

$$V_{pl} = 341,17 \text{ kN}$$

$$l < l_p$$

$$V_n = V_{pl}$$

$$V_n = 341,17 \text{ kN}$$

$$f_v = 0,9$$

$$R_d(V_d) = f_v \cdot V_n$$

$$R_d(V_d) = 0,90 \cdot 341,17$$

$$R_d(V_d) = 307,05 \text{ kN}$$

$$R_d(V_d) \geq V_d$$

$$307,05 \text{ kN} \geq 36,96 \text{ kN}$$

Ok! Perfil suporta ao esforço solicitado!

Verificação de Flexão em x

$$Z = Z_x$$

$$Z = 615,40 \text{ cm}^3$$

$$W = W_x$$

$$W = 553,60 \text{ cm}^3$$

$$W_c = W$$

$$W_c = 553,60 \text{ cm}^3$$

$$W_t = W$$

$$W_t = 553,60 \text{ cm}^3$$

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

$$M_{pl} = 615,40 \cdot 34,50$$

$$M_{pl} = 21231,30 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Flambagem local da alma(FLA)

$$l = h/t_w$$

$$l = 290,60/5,80$$

$$l = 50,10$$

$$l_p = 3,5 \cdot \text{raiz}(E/f_y)$$

$$l_p = 3,5 \cdot \text{raiz}(20500,00/34,50)$$

$$l_p = 85,32$$

$$l \leq l_p$$

$$M_n = M_{pl}$$

$$M_n = 21231,30 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Flambagem local da mesa(FLM)

$$l = b_f/(2 \cdot t_f)$$

$$l = 165,00/(2 \cdot 9,70)$$

$$l = 8,51$$

$$l_p = 0,38 \cdot \text{raiz}(E/f_y)$$

$$l_p = 0,38 \cdot \text{raiz}(20500,00/34,50)$$

$$l_p = 9,26$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W_c$$

$$M_r = (34,50 - 11,50) \cdot 553,60$$

$$M_r = 12732,80 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_r = f_y \cdot W_t$$

$$M_r = 34,50 \cdot 553,60$$

$$M_r = 19099,20 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Adota-se o menor valor de M_r

$$M_r = 12732,80$$

$$l_r = 0,62 \cdot \text{raiz}(E \cdot W_c / M_r)$$

$$l_r = 0,62 \cdot \text{raiz}(20500,00 \cdot 553,60 / 12732,80)$$

$$l_r = 18,51$$

$$l \leq l_p$$

$$M_n = M_{pl}$$

$$M_n = 21231,30 \text{ kN*cm}$$

Flambagem Lateral com torção(FLT)

$$l = L_b/r_y$$

$$l = 423,00/3,82$$

$$l = 110,60$$

$$l_p = 1,75 * \text{raiz}(E/f_y)$$

$$l_p = 1,75 * \text{raiz}(20500,00/34,50)$$

$$l_p = 42,66$$

$$C_b = 1$$

$$B_1 = \pi * \text{raiz}(G * E * I_T * A_g)$$

$$B_1 = \pi * \text{raiz}(7892,50 * 20500,00 * 13,20 * 49,70)$$

$$B_1 = 1,02353E6$$

$$B_2 = ((\pi^2 * E) / (4 * G)) * (A_g * ((d - t_f) / 10)^2 / I_T)$$

$$B_2 = ((\pi^2 * 20500,00) / (4 * 7892,50)) * (49,70 * ((310,00 - 9,70) / 10)^2 / 13,20)$$

$$B_2 = 21760,70$$

$$M_r = (f_y - f_r) * W$$

$$M_r = (34,50 - 11,50) * 553,60$$

$$M_r = 12732,80 \text{ kN*cm}$$

$$l_r = ((0,707 * C_b * B_1) / M_r) * \text{raiz}(1 + \text{raiz}(1 + ((4 * B_2) / (C_b^2 * B_1^2)) * M_r^2))$$

$$l_r = ((0,707 * 1,00 * 1,02353E6) / 12732,80) * \text{raiz}(1 + \text{raiz}(1 + ((4 * 21760,70) / (1,00^2 * 1,02353E6^2)) * 12732,80^2))$$

$$l_r = 124,57$$

$$l_p < l \leq l_r$$

$$M_n = M_{pl} - ((M_{pl} - M_r) * ((l - l_r) / (l_r - l_p)))$$

$$M_n = 21231,30 - ((21231,30 - 12732,80) * ((110,60 - 42,66) / (124,57 - 42,66)))$$

$$M_n = 14181,90 \text{ kN*cm}$$

Adota-se para M_n o menor valor de FLA, FLT ou FLM e ainda segundo NBR 8800/88 (Item 5.4.1.3.1) $M_n < (1,25 * W * f_y)$

$$M_n \leq (1,25 * W * f_y) \rightarrow \text{Ok!}$$

$$M_n = 14181,90 \text{ kN*cm}$$

$$f_b = 0,9$$

$$R_d(M_d) = f_b * M_n$$

$$R_d(M_d) = 0,90 * 14181,90$$

$$R_d(M_d) = 12763,70 \text{ kN}$$

Rd(Md) >= Mdx
 12763,70 kN >= 12511,10 kN

Ok! Perfil suporta ao esforço solicitado!

Viga transversal (balanço) – f1

Quadro 15A – Referente ao Momento Máximo (M3)

TABLE: Element Forces - Frames											
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Text	m
4202	0,4475	1,4D+1,5L2	LinStatic	-1385,8	19068,65	-206,43	-12,87	77,12	-65973,3	4202-1	0,4475

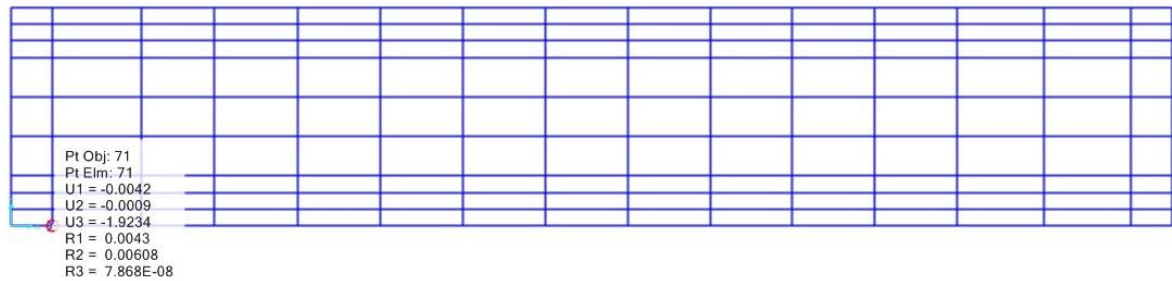
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Quadro 16A – Referente ao maior deslocamento (U3)

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
71	D+L2	LinStatic	-0,00422	-0,00094	-1,92337	0,004303	0,006075	7,87E-08

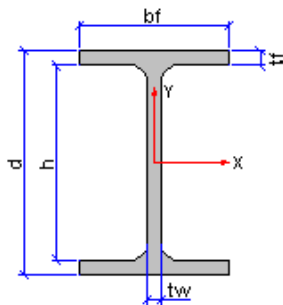
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Imagem 8A – Localização do nó referente ao maior deslocamento (U3)



Fonte: SAP2000 V17

Relatório do Software Visual Metal – viga transversal (balanço) – f1



Dimensionamento Perfil I Laminado**Propriedades do Aço**

Tipo = ASTM A 572 gr-50

$f_y = 34,50 \text{ kN/cm}^2$

$f_u = 45,00 \text{ kN/cm}^2$

$f_r = 11,5 \text{ kN/cm}^2$

$E = 20500 \text{ kN/cm}^2$

$G = 7892,5 \text{ kN/cm}^2$

Propriedades geométricas do perfil

Perfil W 610 x 101

$bf = 228,00 \text{ mm}$

$tf = 14,90 \text{ mm}$

$tw = 10,50 \text{ mm}$

$d = 603,00 \text{ mm}$

$A_g = 130,30 \text{ cm}^2$

Peso = 101,00 kgf

$I_x = 77003,00 \text{ cm}^4$

$I_y = 2951,00 \text{ cm}^4$

$IT = 81,68 \text{ cm}^4$

$W_x = 2554,00 \text{ cm}^3$

$W_y = 258,80 \text{ cm}^3$

$Z_x = 2922,70 \text{ cm}^3$

$Z_y = 405,00 \text{ cm}^3$

$r_x = \text{raiz}(I_x/A_g)$

$r_x = \text{raiz}(77003,00/130,30)$

$r_x = 24,31 \text{ cm}$

$r_y = \text{raiz}(I_y/A_g)$

$r_y = \text{raiz}(2951,00/130,30)$

$r_y = 4,76 \text{ cm}$

$h = d - 2*tf$

$h = 603,00 - 2*14,90$

$h = 573,20 \text{ mm}$

Comprimentos de Flambagem

$L_{fx} = 1270,00 \text{ cm}$

$L_{fy} = 423,00 \text{ cm}$

$L_b = 423,00 \text{ cm}$

Esforços Solicitantes

$N_d = 0,00 \text{ kN}$

$V_d = 190,68 \text{ kN}$

$M_{dx} = 65973,90 \text{ kN*cm}$

$M_{dy} = 0,00 \text{ kN*cm}$

Verificação do Esforço Cortante

Análise plástica

$$A_w = h \cdot t_w$$

$$A_w = 573,20 \cdot 10,50$$

$$A_w = 6331,50 \text{ mm}^2$$

$$A_w = 63,32 \text{ cm}^2$$

Considerando Item 5.2.2 nota a da NBR8800/88

$$a = 4 \cdot t_w;$$

$$a = 4 \cdot 10,50$$

$$a = 42,00 \text{ mm}$$

$$(a/h) < 1$$

$$k = 4 + 5,34 / (a/h)^2$$

$$k = 4 + 5,34 / (42,00 / 573,20)^2$$

$$k = 998,62$$

$$l = h / t_w$$

$$l = 573,20 / 10,50$$

$$l = 54,59$$

$$l_p = 1,08 \cdot \sqrt{k \cdot E / f_y}$$

$$l_p = 1,08 \cdot \sqrt{998,62 \cdot 20500,00 / 34,50}$$

$$l_p = 831,94$$

$$l_r = 1,4 \cdot \sqrt{k \cdot E / f_y}$$

$$l_r = 1,4 \cdot \sqrt{998,62 \cdot 20500,00 / 34,50}$$

$$l_r = 37206,10$$

$$V_{pl} = 0,55 \cdot A_w \cdot f_y$$

$$V_{pl} = 0,55 \cdot 63,32 \cdot 34,50$$

$$V_{pl} = 1201,40 \text{ kN}$$

$$l < l_p$$

$$V_n = V_{pl}$$

$$V_n = 1201,40 \text{ kN}$$

$$f_v = 0,9$$

$$R_d(V_d) = f_v \cdot V_n$$

$$R_d(V_d) = 0,90 \cdot 1201,40$$

$$R_d(V_d) = 1081,26 \text{ kN}$$

$$R_d(V_d) \geq V_d$$

$$1081,26 \text{ kN} \geq 190,68 \text{ kN}$$

Ok! Perfil suporta ao esforço solicitado!**Verificação de Flexão em x**

$$Z = Z_x$$

$$Z = 2922,70 \text{ cm}^3$$

$$W = W_x$$

$$W = 2554,00 \text{ cm}^3$$

$$W_c = W$$

$$W_c = 2554,00 \text{ cm}^3$$

$$W_t = W$$

$$W_t = 2554,00 \text{ cm}^3$$

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

$$M_{pl} = 2922,70 \cdot 34,50$$

$$M_{pl} = 100833,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Flambagem local da alma(FLA)

$$l = h/t_w$$

$$l = 573,20/10,50$$

$$l = 54,59$$

$$l_p = 3,5 \cdot \text{raiz}(E/f_y)$$

$$l_p = 3,5 \cdot \text{raiz}(20500,00/34,50)$$

$$l_p = 85,32$$

$$l \leq l_p$$

$$M_n = M_{pl}$$

$$M_n = 100833,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Flambagem local da mesa(FLM)

$$l = b_f/(2 \cdot t_f)$$

$$l = 228,00/(2 \cdot 14,90)$$

$$l = 7,65$$

$$l_p = 0,38 \cdot \text{raiz}(E/f_y)$$

$$l_p = 0,38 \cdot \text{raiz}(20500,00/34,50)$$

$$l_p = 9,26$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W_c$$

$$M_r = (34,50 - 11,50) \cdot 2554,00$$

$$M_r = 58742,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_r = f_y \cdot W_t$$

$$M_r = 34,50 \cdot 2554,00$$

$$M_r = 88113,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Adota-se o menor valor de M_r

$$M_r = 58742,00$$

$$l_r = 0,62 \cdot \sqrt{E \cdot W_c / M_r}$$

$$l_r = 0,62 \cdot \sqrt{20500,00 \cdot 2554,00 / 58742,00}$$

$$l_r = 18,51$$

$$l \leq l_p$$

$$M_n = M_{pl}$$

$$M_n = 100833,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Flambagem Lateral com torção (FLT)

$$l = L_b / r_y$$

$$l = 423,00 / 4,76$$

$$l = 88,88$$

$$l_p = 1,75 \cdot \sqrt{E / f_y}$$

$$l_p = 1,75 \cdot \sqrt{20500,00 / 34,50}$$

$$l_p = 42,66$$

$$C_b = 1$$

$$B_1 = \pi \cdot \sqrt{G \cdot E \cdot I_T \cdot A_g}$$

$$B_1 = \pi \cdot \sqrt{7892,50 \cdot 20500,00 \cdot 81,68 \cdot 130,30}$$

$$B_1 = 4,12253E6$$

$$B_2 = ((\pi^2 \cdot E) / (4 \cdot G)) \cdot (A_g \cdot ((d - t_f) / 10)^2 / I_T)$$

$$B_2 = ((\pi^2 \cdot 20500,00) / (4 \cdot 7892,50)) \cdot (130,30 \cdot ((603,00 - 14,90) / 10)^2 / 81,68)$$

$$B_2 = 35359,80$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W$$

$$M_r = (34,50 - 11,50) \cdot 2554,00$$

$$M_r = 58742,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$l_r = ((0,707 \cdot C_b \cdot B_1) / M_r) \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + ((4 \cdot B_2) / (C_b^2 \cdot B_1^2)) \cdot M_r^2}}$$

$$l_r = ((0,707 \cdot 1,00 \cdot 4,12253E6) / 58742,00) \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + ((4 \cdot 35359,80) / (1,00^2 \cdot 4,12253E6^2)) \cdot 58742,00^2}}$$

$$l_r = 126,03$$

$$l_p < l <= l_r$$

$$M_n = M_{pl} - ((M_{pl} - M_r) \cdot ((l - l_r) / (l_r - l_p)))$$

$$M_n = 100833,00 - ((100833,00 - 58742,00) \cdot ((88,88 - 42,66) / (126,03 - 42,66)))$$

$$M_n = 77494,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Adota-se para M_n o menor valor de FLA, FLT ou FLM e ainda segundo NBR 8800/88 (Item 5.4.1.3.1) $M_n < (1,25 \cdot W \cdot f_y)$

$$M_n \leq (1,25 \cdot W \cdot f_y) \rightarrow \text{Ok!}$$

$$M_n = 77494,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$f_b = 0,9$$

$$R_d(M_d) = f_b * M_n$$

$$R_d(M_d) = 0,90 * 77494,00$$

$$R_d(M_d) = 69744,60 \text{ kN}$$

$$R_d(M_d) \geq M_{dx}$$

$$69744,60 \text{ kN} \geq 65973,90 \text{ kN}$$

Ok! Perfil suporta ao esforço solicitado!

Viga transversal (meio) – f2

Quadro 17A – Referente ao Momento Máximo (M3)

TABLE: Element Forces - Frames											
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Text	m
4274	0,4475	1,4D+1,5L2	LinStatic	-2197,31	21814,4	-71,16	0,28	26,39	-76904	4274-1	0,4475

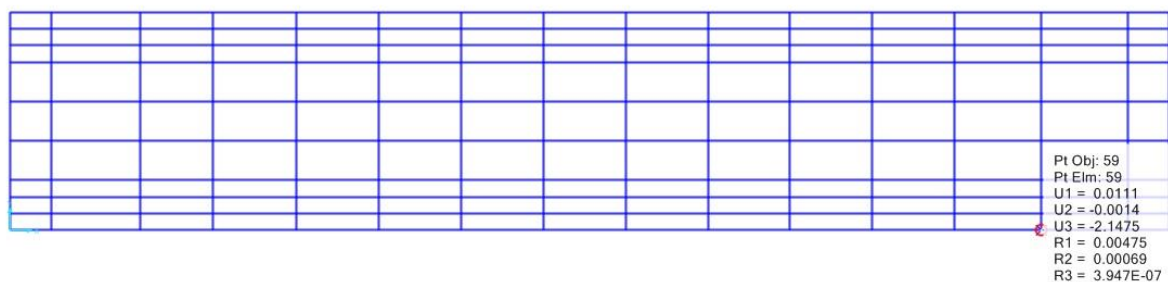
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Quadro 18A – Referente ao maior deslocamento (U3)

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
59	D+L2	LinStatic	0,011074	-0,00139	-2,14747	0,004746	0,000688	3,95E-07

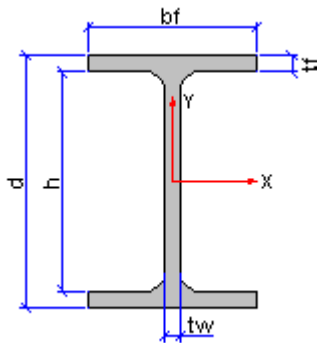
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Imagem 9A – Localização do nó referente ao maior deslocamento (U3)



Fonte: SAP2000 V17

Relatório do Software Visual Metal – viga transversal (meio) – f2



Dimensionamento Perfil I Laminado

Propriedades do Aço

Tipo = ASTM A 572 gr-50

$f_y = 34,50 \text{ kN/cm}^2$

$f_u = 45,00 \text{ kN/cm}^2$

$f_r = 11,5 \text{ kN/cm}^2$

$E = 20500 \text{ kN/cm}^2$

$G = 7892,5 \text{ kN/cm}^2$

Propriedades geométricas do perfil

Perfil W 610 x 113

$bf = 228,00 \text{ mm}$

$tf = 17,30 \text{ mm}$

$tw = 11,20 \text{ mm}$

$d = 608,00 \text{ mm}$

$A_g = 145,30 \text{ cm}^2$

Peso = 113,00 kgf

$I_x = 88196,00 \text{ cm}^4$

$I_y = 3426,00 \text{ cm}^4$

$IT = 116,50 \text{ cm}^4$

$W_x = 2901,20 \text{ cm}^3$

$W_y = 300,50 \text{ cm}^3$

$Z_x = 3312,90 \text{ cm}^3$

$Z_y = 469,70 \text{ cm}^3$

$r_x = \text{raiz}(I_x/A_g)$

$r_x = \text{raiz}(88196,00/145,30)$

$r_x = 24,64 \text{ cm}$

$r_y = \text{raiz}(I_y/A_g)$

$r_y = \text{raiz}(3426,00/145,30)$

$r_y = 4,86 \text{ cm}$

$h = d - 2*tf$

$h = 608,00 - 2*17,30$

$$h = 573,40 \text{ mm}$$

Comprimentos de Flambagem

$$L_{fx} = 1270,00 \text{ cm}$$

$$L_{fy} = 423,00 \text{ cm}$$

$$L_b = 423,00 \text{ cm}$$

Esforços Solicitantes

$$N_d = 0,00 \text{ kN}$$

$$V_d = 218,44 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 76904,00 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

$$M_{dy} = 0,00 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

Verificação do Esforço Cortante

Análise plástica

$$A_w = h \cdot t_w$$

$$A_w = 573,40 \cdot 11,20$$

$$A_w = 6809,60 \text{ mm}^2$$

$$A_w = 68,10 \text{ cm}^2$$

Considerando Item 5.2.2 nota a da NBR8800/88

$$a = 4 \cdot t_w;$$

$$a = 4 \cdot 11,20$$

$$a = 44,80 \text{ mm}$$

$$(a/h) < 1$$

$$k = 4 + 5,34 / (a/h)^2$$

$$k = 4 + 5,34 / (44,80 / 573,40)^2$$

$$k = 878,78$$

$$l = h / t_w$$

$$l = 573,40 / 11,20$$

$$l = 51,20$$

$$l_p = 1,08 \cdot \text{raiz}(k \cdot E / f_y)$$

$$l_p = 1,08 \cdot \text{raiz}(878,78 \cdot 20500,00 / 34,50)$$

$$l_p = 780,43$$

$$l_r = 1,4 \cdot \text{raiz}(k \cdot E / f_y)$$

$$l_r = 1,4 \cdot \text{raiz}(878,78 \cdot 20500,00 / 34,50)$$

$$l_r = 34902,40$$

$$V_{pl} = 0,55 \cdot A_w \cdot f_y$$

$$V_{pl} = 0,55 \cdot 68,10 \cdot 34,50$$

$$V_{pl} = 1292,12 \text{ kN}$$

$$l < l_p$$

$$V_n = V_{pl}$$

$$V_n = 1292,12 \text{ kN}$$

$$f_v = 0,9$$

$$R_d(V_d) = f_v \cdot V_n$$

$$R_d(V_d) = 0,90 \cdot 1292,12$$

$$R_d(V_d) = 1162,91 \text{ kN}$$

$$R_d(V_d) \geq V_d$$

$$1162,91 \text{ kN} \geq 218,44 \text{ kN}$$

Ok! Perfil suporta ao esforço solicitado!

Verificação de Flexão em x

$$Z = Z_x$$

$$Z = 3312,90 \text{ cm}^3$$

$$W = W_x$$

$$W = 2901,20 \text{ cm}^3$$

$$W_c = W$$

$$W_c = 2901,20 \text{ cm}^3$$

$$W_t = W$$

$$W_t = 2901,20 \text{ cm}^3$$

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

$$M_{pl} = 3312,90 \cdot 34,50$$

$$M_{pl} = 114295,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Flambagem local da alma (FLA)

$$l = h/t_w$$

$$l = 573,40/11,20$$

$$l = 51,20$$

$$l_p = 3,5 \cdot \text{raiz}(E/f_y)$$

$$l_p = 3,5 \cdot \text{raiz}(20500,00/34,50)$$

$$l_p = 85,32$$

$$l \leq l_p$$

$$M_n = M_{pl}$$

$$M_n = 114295,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Flambagem local da mesa (FLM)

$$l = b_f/(2 \cdot t_f)$$

$$l = 228,00/(2 \cdot 17,30)$$

$$l = 6,59$$

$$l_p = 0,38 \cdot \text{raiz}(E/f_y)$$

$$l_p = 0,38 \cdot \sqrt{20500,00/34,50}$$

$$l_p = 9,26$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W_c$$

$$M_r = (34,50 - 11,50) \cdot 2901,20$$

$$M_r = 66727,60 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_r = f_y \cdot W_t$$

$$M_r = 34,50 \cdot 2901,20$$

$$M_r = 100091,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Adota-se o menor valor de M_r

$$M_r = 66727,60$$

$$l_r = 0,62 \cdot \sqrt{E \cdot W_c / M_r}$$

$$l_r = 0,62 \cdot \sqrt{20500,00 \cdot 2901,20 / 66727,60}$$

$$l_r = 18,51$$

$$l \leq l_p$$

$$M_n = M_{pl}$$

$$M_n = 114295,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Flambagem Lateral com torção (FLT)

$$l = L_b / r_y$$

$$l = 423,00 / 4,86$$

$$l = 87,11$$

$$l_p = 1,75 \cdot \sqrt{E / f_y}$$

$$l_p = 1,75 \cdot \sqrt{20500,00 / 34,50}$$

$$l_p = 42,66$$

$$C_b = 1$$

$$B_1 = \pi \cdot \sqrt{G \cdot E \cdot I_T \cdot A_g}$$

$$B_1 = \pi \cdot \sqrt{7892,50 \cdot 20500,00 \cdot 116,50 \cdot 145,30}$$

$$B_1 = 5,19912E6$$

$$B_2 = ((\pi^2 \cdot E) / (4 \cdot G)) \cdot (A_g \cdot ((d - t_f) / 10)^2) / I_T$$

$$B_2 = ((\pi^2 \cdot 20500,00) / (4 \cdot 7892,50)) \cdot (145,30 \cdot ((608,00 - 17,30) / 10)^2) / 116,50$$

$$B_2 = 27890,30$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W$$

$$M_r = (34,50 - 11,50) \cdot 2901,20$$

$$M_r = 66727,60 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$l_r = ((0,707 \cdot C_b \cdot B_1) / M_r) \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + ((4 \cdot B_2) / (C_b^2 \cdot B_1^2)) \cdot M_r^2}}$$

$$l_r = ((0,707 \cdot 1,00 \cdot 5,19912E6) / 66727,60) \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + ((4 \cdot 27890,30) / (1,00^2 \cdot 5,19912E6^2)) \cdot 66727,60^2}}$$

$$l_r = 128,03$$

$$l_p < l \leq l_r$$

$$M_n = M_{pl} - ((M_{pl} - M_r) * ((l - l_r) / (l_r - l_p)))$$

$$M_n = 114295,00 - ((114295,00 - 66727,60) * ((87,11 - 42,66) / (128,03 - 42,66)))$$

$$M_n = 89526,60 \text{ kN*cm}$$

Adota-se para M_n o menor valor de FLA, FLT ou FLM e ainda segundo NBR 8800/88 (Item 5.4.1.3.1) $M_n < (1,25 * W * f_y)$

$$M_n \leq (1,25 * W * f_y) \rightarrow \text{Ok!}$$

$$M_n = 89526,60 \text{ kN*cm}$$

$$f_b = 0,9$$

$$R_d(M_d) = f_b * M_n$$

$$R_d(M_d) = 0,90 * 89526,60$$

$$R_d(M_d) = 80573,90 \text{ kN}$$

$$R_d(M_d) \geq M_{dx}$$

$$80573,90 \text{ kN} \geq 76904,00 \text{ kN}$$

Ok! Perfil suporta ao esforço solicitado!

Viga transversal (núcleo) – f3

Quadro 19A – Referente ao Momento Máximo (M3)

TABLE: Element Forces - Frames											
Frame	Station	OutputCase	CaseType	P	V2	V3	T	M2	M3	FrameElem	ElemStation
Text	m	Text	Text	Kgf	Kgf	Kgf	Kgf-m	Kgf-m	Kgf-m	Text	m
3938	0,4475	1,4D+1,5L2	LinStatic	-2499,47	26452,7	-50,32	13,39	18,25	-80494,2	3938-1	0,4475

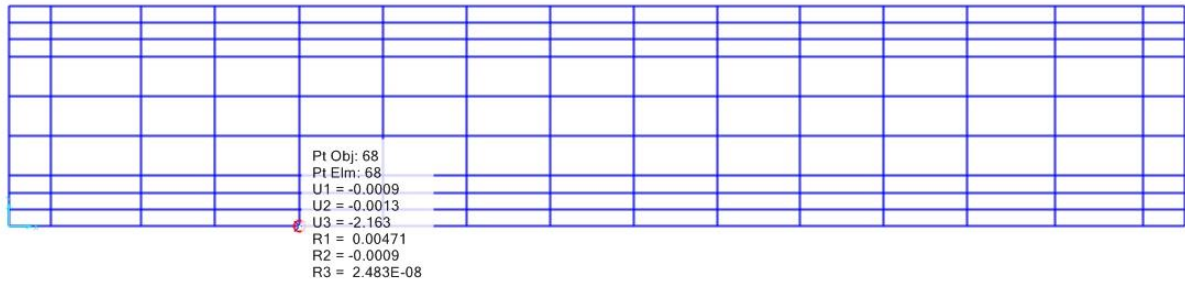
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Quadro 20A – Referente ao maior deslocamento (U3)

TABLE: Joint Displacements								
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3	R1	R2	R3
Text	Text	Text	cm	cm	cm	Radians	Radians	Radians
68	D+L2	LinStatic	-0,00095	-0,00134	-2,16302	0,004712	-0,0009	2,48E-08

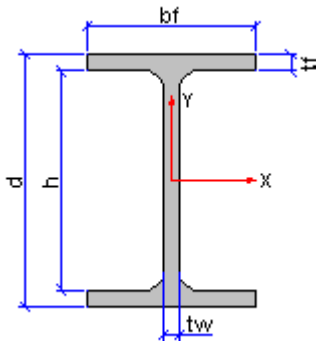
Fonte: SAP2000 V17 (adaptada)

Imagem 10A – Localização do nó referente ao maior deslocamento (U3)



Fonte: SAP2000 V17

Relatório do Software Visual Metal – viga transversal (núcleo) – f3



Dimensionamento Perfil I Laminado

Propriedades do Aço

Tipo = ASTM A 572 gr-50

$f_y = 34,50 \text{ kN/cm}^2$

$f_u = 45,00 \text{ kN/cm}^2$

$f_r = 11,5 \text{ kN/cm}^2$

$E = 20500 \text{ kN/cm}^2$

$G = 7892,5 \text{ kN/cm}^2$

Propriedades geométricas do perfil

Perfil W 610 x 113

$b_f = 228,00 \text{ mm}$

$t_f = 17,30 \text{ mm}$

$t_w = 11,20 \text{ mm}$

$d = 608,00 \text{ mm}$

$A_g = 145,30 \text{ cm}^2$

Peso = 113,00 kgf

$I_x = 88196,00 \text{ cm}^4$

$I_y = 3426,00 \text{ cm}^4$

$I_T = 116,50 \text{ cm}^4$

$W_x = 2901,20 \text{ cm}^3$

$W_y = 300,50 \text{ cm}^3$

$$Z_x = 3312,90 \text{ cm}^3$$

$$Z_y = 469,70 \text{ cm}^3$$

$$r_x = \text{raiz}(I_x/A_g)$$

$$r_x = \text{raiz}(88196,00/145,30)$$

$$r_x = 24,64 \text{ cm}$$

$$r_y = \text{raiz}(I_y/A_g)$$

$$r_y = \text{raiz}(3426,00/145,30)$$

$$r_y = 4,86 \text{ cm}$$

$$h = d - 2*tf$$

$$h = 608,00 - 2*17,30$$

$$h = 573,40 \text{ mm}$$

Comprimentos de Flambagem

$$L_{fx} = 1270,00 \text{ cm}$$

$$L_{fy} = 423,00 \text{ cm}$$

$$L_b = 423,00 \text{ cm}$$

Esforços Solicitantes

$$N_d = 0,00 \text{ kN}$$

$$V_d = 264,52 \text{ kN}$$

$$M_{dx} = 80494,20 \text{ kN*cm}$$

$$M_{dy} = 0,00 \text{ kN*cm}$$

Verificação do Esforço Cortante

Análise plástica

$$A_w = h*tw$$

$$A_w = 573,40*11,20$$

$$A_w = 6809,60 \text{ mm}^2$$

$$A_w = 68,10 \text{ cm}^2$$

Considerando Item 5.2.2 nota a da NBR8800/88

$$a = 4*tw;$$

$$a = 4*11,20$$

$$a = 44,80 \text{ mm}$$

$$(a/h) < 1$$

$$k = 4 + 5,34/(a/h)^2$$

$$k = 4 + 5,34/(44,80/573,40)^2$$

$$k = 878,78$$

$$l = h/tw$$

$$l = 573,40/11,20$$

$$l = 51,20$$

$$l_p = 1,08*\text{raiz}(k*E/f_y)$$

$$l_p = 1,08 \cdot \sqrt[3]{(878,78 \cdot 20500,00 / 34,50)}$$

$$l_p = 780,43$$

$$l_r = 1,4 \cdot \sqrt{k \cdot E / f_y}$$

$$l_r = 1,4 \cdot \sqrt[3]{(878,78 \cdot 20500,00 / 34,50)}$$

$$l_r = 34902,40$$

$$V_{pl} = 0,55 \cdot A_w \cdot f_y$$

$$V_{pl} = 0,55 \cdot 68,10 \cdot 34,50$$

$$V_{pl} = 1292,12 \text{ kN}$$

$$l < l_p$$

$$V_n = V_{pl}$$

$$V_n = 1292,12 \text{ kN}$$

$$f_v = 0,9$$

$$R_d(V_d) = f_v \cdot V_n$$

$$R_d(V_d) = 0,90 \cdot 1292,12$$

$$R_d(V_d) = 1162,91 \text{ kN}$$

$$R_d(V_d) \geq V_d$$

$$1162,91 \text{ kN} \geq 264,52 \text{ kN}$$

Ok! Perfil suporta ao esforço solicitado!

Verificação de Flexão em x

$$Z = Z_x$$

$$Z = 3312,90 \text{ cm}^3$$

$$W = W_x$$

$$W = 2901,20 \text{ cm}^3$$

$$W_c = W$$

$$W_c = 2901,20 \text{ cm}^3$$

$$W_t = W$$

$$W_t = 2901,20 \text{ cm}^3$$

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

$$M_{pl} = 3312,90 \cdot 34,50$$

$$M_{pl} = 114295,00 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Flambagem local da alma (FLA)

$$l = h / t_w$$

$$l = 573,40 / 11,20$$

$$l = 51,20$$

$$l_p = 3,5 \cdot \sqrt{E / f_y}$$

$$l_p = 3,5 \cdot \sqrt{20500,00/34,50}$$

$$l_p = 85,32$$

$$l \leq l_p$$

$$M_n = M_{pl}$$

$$M_n = 114295,00 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

Flambagem local da mesa (FLM)

$$l = b_f / (2 \cdot t_f)$$

$$l = 228,00 / (2 \cdot 17,30)$$

$$l = 6,59$$

$$l_p = 0,38 \cdot \sqrt{E/f_y}$$

$$l_p = 0,38 \cdot \sqrt{20500,00/34,50}$$

$$l_p = 9,26$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot W_c$$

$$M_r = (34,50 - 11,50) \cdot 2901,20$$

$$M_r = 66727,60 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

$$M_r = f_y \cdot W_t$$

$$M_r = 34,50 \cdot 2901,20$$

$$M_r = 100091,00 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

Adota-se o menor valor de M_r

$$M_r = 66727,60$$

$$l_r = 0,62 \cdot \sqrt{E \cdot W_c / M_r}$$

$$l_r = 0,62 \cdot \sqrt{20500,00 \cdot 2901,20 / 66727,60}$$

$$l_r = 18,51$$

$$l \leq l_p$$

$$M_n = M_{pl}$$

$$M_n = 114295,00 \text{ kN}\cdot\text{cm}$$

Flambagem Lateral com torção (FLT)

$$l = L_b / r_y$$

$$l = 423,00 / 4,86$$

$$l = 87,11$$

$$l_p = 1,75 \cdot \sqrt{E/f_y}$$

$$l_p = 1,75 \cdot \sqrt{20500,00/34,50}$$

$$l_p = 42,66$$

$$C_b = 1$$

$$B_1 = \pi \cdot \sqrt{G \cdot E \cdot I_T \cdot A_g}$$

$$B_1 = \pi \cdot \sqrt{7892,50 \cdot 20500,00 \cdot 116,50 \cdot 145,30}$$

$$B1 = 5,19912E6$$

$$B2 = ((\pi^2 * E) / (4 * G)) * (A_g * ((d - t_f) / 10)^2) / I_T$$

$$B2 = ((\pi^2 * 20500,00) / (4 * 7892,50)) * (145,30 * ((608,00 - 17,30) / 10)^2) / 116,50$$

$$B2 = 27890,30$$

$$M_r = (f_y - f_r) * W$$

$$M_r = (34,50 - 11,50) * 2901,20$$

$$M_r = 66727,60 \text{ kN*cm}$$

$$l_r = ((0,707 * C_b * B1) / M_r) * \text{raiz}(1 + \text{raiz}(1 + ((4 * B2) / (C_b^2 * B1^2)) * M_r^2))$$

$$l_r = ((0,707 * 1,00 * 5,19912E6) / 66727,60) * \text{raiz}(1 + \text{raiz}(1 + ((4 * 27890,30) / (1,00^2 * 5,19912E6^2)) * 66727,60^2))$$

$$l_r = 128,03$$

$$l_p < l \leq l_r$$

$$M_n = M_{pl} - ((M_{pl} - M_r) * ((l - l_r) / (l_r - l_p)))$$

$$M_n = 114295,00 - ((114295,00 - 66727,60) * ((87,11 - 42,66) / (128,03 - 42,66)))$$

$$M_n = 89526,60 \text{ kN*cm}$$

Adota-se para M_n o menor valor de FLA, FLT ou FLM e ainda segundo NBR 8800/88 (Item 5.4.1.3.1) $M_n < (1,25 * W * f_y)$

$$M_n \leq (1,25 * W * f_y) \rightarrow \text{Ok!}$$

$$M_n = 89526,60 \text{ kN*cm}$$

$$f_b = 0,9$$

$$R_d(M_d) = f_b * M_n$$

$$R_d(M_d) = 0,90 * 89526,60$$

$$R_d(M_d) = 80573,90 \text{ kN}$$

$$R_d(M_d) \geq M_{dx}$$

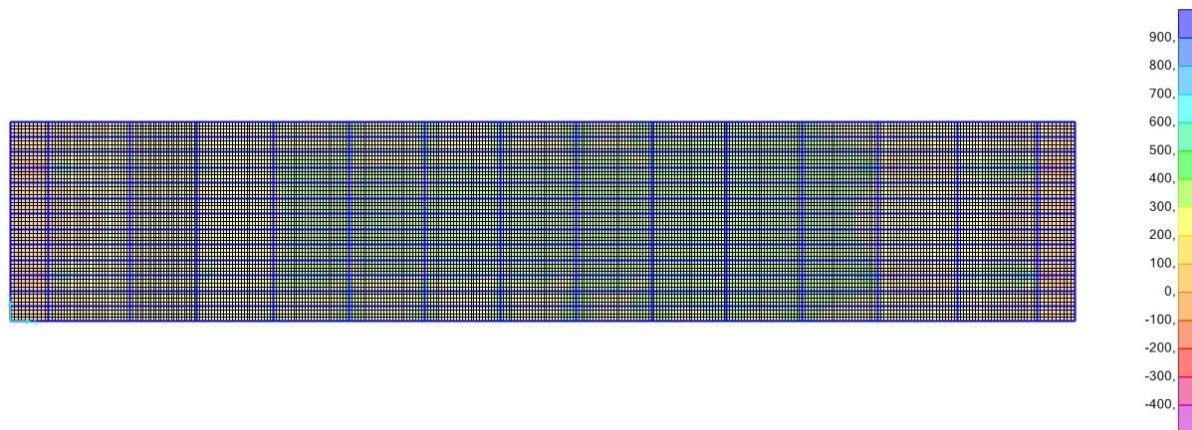
$$80573,90 \text{ kN} \geq 80494,20 \text{ kN}$$

Ok! Perfil suporta ao esforço solicitado!

ANEXO B

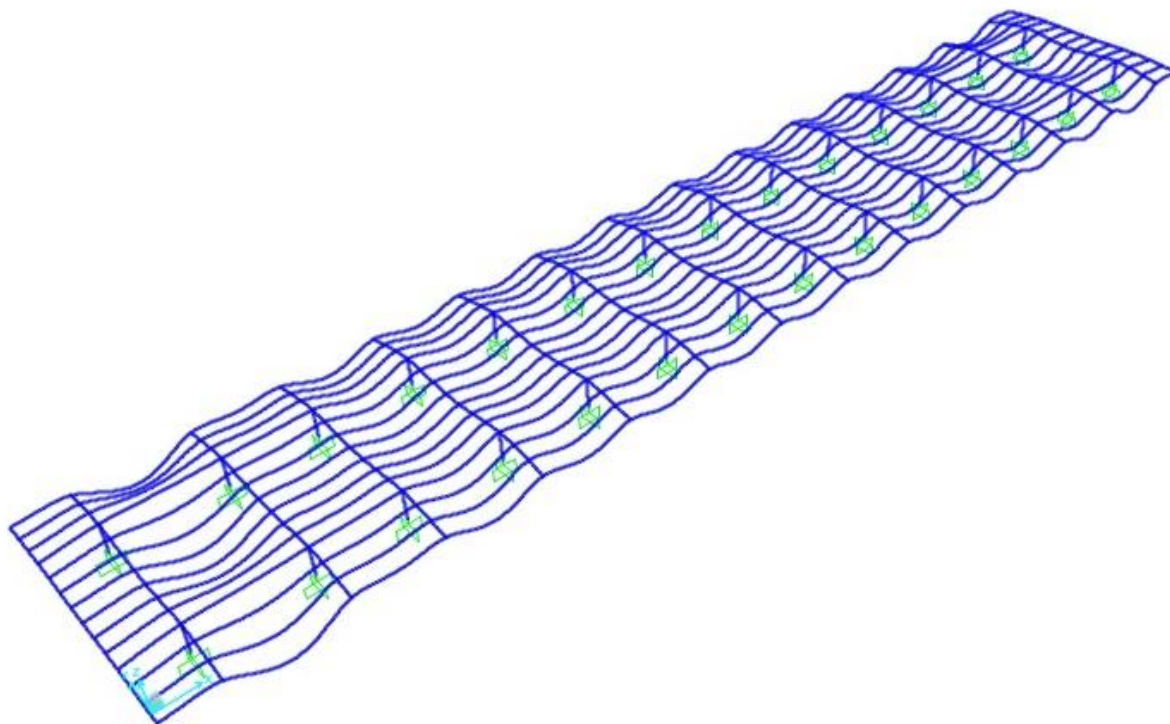
Nesse Anexo apresentam-se algumas imagens referentes aos resultados do Modelo 3 sem rótulas (M3SR) pelo software SAP2000 V17.

Imagem 1B – Deformações referentes a Combinação D+L1+L2 (xy)



Fonte: SAP2000 V17

Imagem 2B – Deformações referentes a Combinação D+L1+L2 (3D)



Fonte: SAP2000 V17

Imagem 3B – Deformações referentes a Combinação D+L1+L2 (xz)



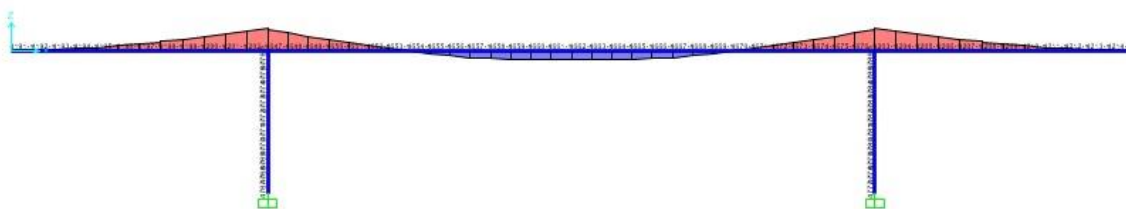
Fonte: SAP2000 V17

Imagem 4B – Deformações referentes a Combinação D+L1+L2 (yz)



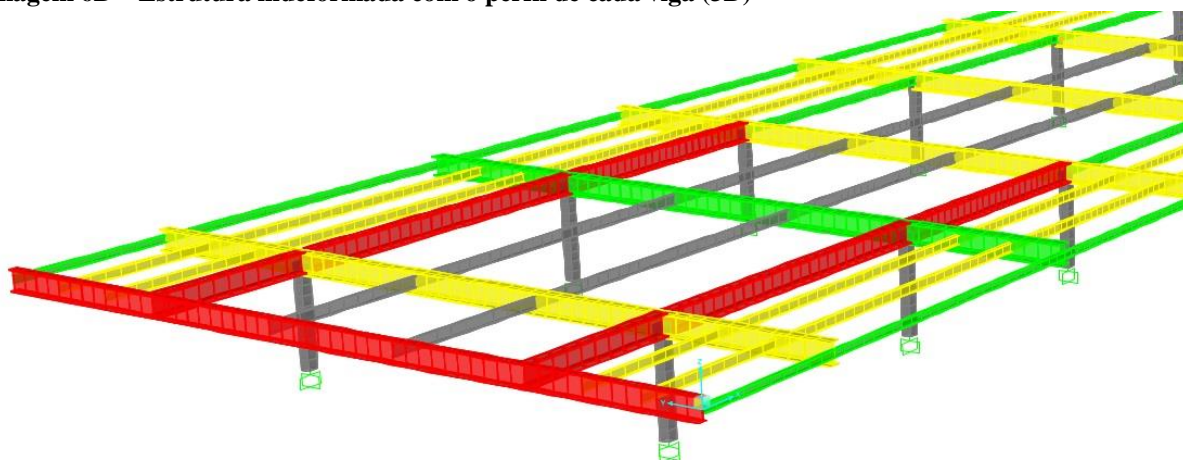
Fonte: SAP2000 V17

Imagem 5B – Momento Máximo (M3) (yz)



Fonte: SAP2000 V17

Imagem 6B – Estrutura indeformada com o perfil de cada viga (3D)



Fonte: SAP2000 V17