



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ERICKSON BRUNO MOURA BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM PROJETO DE ESTRUTURA
ESPACIAL COM AUXÍLIO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.**

ANGICOS

2021

ERICKSOM BRUNO MOURA BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM PROJETO DE ESTRUTURA
ESPACIAL COM AUXÍLIO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Wendell Rossine Medeiros de
Souza, Prof. Dr.

ANGICOS

2021

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

B574d Bezerra, Erickson Bruno.
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM PROJETO DE
ESTRUTURA ESPACIAL COM AUXÍLIO DE FERRAMENTAS
COMPUTACIONAIS. / Erickson Bruno Bezerra. - 2021.
85 f. : il.

Orientador: Wendell Rossine Medeiros de Souza.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2021.

1. Estrutura Espacial. 2. Estruturas
Metálicas. 3. Treliças espaciais. 4. Arranjos. I.
Medeiros de Souza, Wendell Rossine, orient. II.
Título.

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

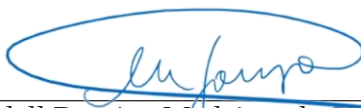
ERICKSON BRUNO MOURA BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM PROJETO DE ESTRUTURA
ESPACIAL COM AUXÍLIO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 31 / 05 / 2021.

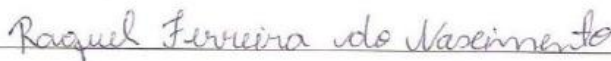
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Wendell Rossine Medeiros de Souza, (UFERSA)
Presidente



Prof. Dr. Kleber Cavalcante Cabral, (UFERSA)
Membro Examinador



Engenheira Raquel Ferreira do Nascimento
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por tudo de bom que consegui alcançar em minha vida e pela oportunidade de apresentar meu trabalho final de graduação.

A minha mãe Maria Alvani, meu pai Erivanildo, meu irmão Jean Michel, minha noiva Sandriely Eville, aos amigos Carlos Jorge, Rodolfo Rodrigo, Kaline e José Alto por todo o apoio que me deram durante os momentos árduos e por acreditarem em mim e no meu potencial.

A meu padrinho Pe. Henrique Nascimento por conduzir minha bússola moral, sempre me dando força, apoio e nortando minhas atitudes.

Ao meu orientador Wendell Rossine, pela confiança e por toda a paciência e dedicação ao longo deste trabalho.

A professora Andrea Saraiva por toda ajuda e amizade.

RESUMO

O surgimento das estruturas reticuladas tridimensionais se deu por volta do século XVIII, sendo hoje muito utilizadas em locais com grandes vãos livres como elemento de cobertura para ginásios, rodoviárias e hangares. Atualmente, é mais fácil a análise das estruturas metálicas com o uso de softwares que realizam cálculos utilizando métodos numéricos, como o dos elementos finitos, portanto, foi desenvolvido um projeto vinculado a análise da estrutura, por meio da integração do sistema BIM, comparando com a dissertação de Magalhães (1996). Neste trabalho foram utilizados os softwares AutoCAD 2017, Revit 2021 e Robot Structural Analysis Professional 2021 com licença estudantil para a análise e desenvolvimento do projeto estudado, que possui dimensões de 50 x 50m, com vãos de 40m entre pilares. A partir do modelo da arquitetura inicial, foram calculadas as barras principais dos banzo superior, banzo inferior e barras auxiliares com seções distintas. Foi possível separar as barras por grupos e categorias para obter informações referentes a quantitativos de barras por seção e por grupo, comprimento, peso unitário, peso da barra, área de pintura e informações referentes ao dimensionamento. Com os resultados foram obtidas as ações atuantes nas barras principais do banzo superior e inferior e barras auxiliares onde cada caso mostra o tipo de ação atuante na barra, tendo como parâmetro de resistência de cálculo a NBR 8800 (2008), os critérios de análise de tração e compressão do Robot que seguem a norma ANSI/AISC 360-16. Foi possível determinar os esforços máximos e mínimos exercidos nas demais barras que não fazem parte das barras principais. Por meio da integração entre os softwares, foi possível desenvolver o projeto estrutural paralelamente com o software Revit.

Palavras-chave: Estrutura Espacial. Estruturas Metálicas. Treliças espaciais. Arranjos.

ABSTRACT

The emergence of three-dimensional truss structures took place around the 18th century, and today they are widely used in places with large free spans as a covering element for gyms, bus stations and hangars. Currently, it is easier to analyze metallic structures with the use of software that perform calculations through numerical methods, such as finite elements, therefore, a project linked to the analysis of the structure was developed, through the integration of the BIM system, comparing with the dissertation by Magalhães (1996). In this work, the software AutoCAD 2017, Revit 2021 and Robot Structural Analysis Professional 2021 with student license were used for the analysis and development of the studied project, which has dimensions of 50 x 50m, with 40m spans between columns, based on the architectural model the main bars of the upper flange, lower flange and auxiliary bars with different sections were calculated. It was possible to separate the bars by groups and categories to obtain information regarding the number of bars per section and per group, length, unit weight, bar weight, painting area and information about sizing. With the results, the actions acting on the main bars of the upper and lower flange and on the auxiliary bars were obtained, where each case shows the type of action acting on the bar, with the resistance calculation parameter NBR 8800 (2008), robot criterion which follows the ANSI / AISC 360-16 standard. It was possible to determine the maximum and minimum efforts exerted on the other bars that are not part of the main bars. Through the integration between the software, it was possible to develop the structural design in parallel with the Revit software.

Keywords: Spatial Structure. Metallic structures. Space trusses. Arrangements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Givel (Salgueiro-PE).....	1
Figura 2 - Cobertura do estádio Mané Garrincha com estrutura espacial	2
Figura 3 - Honda (Salgueiro - PE).....	6
Figura 4 - Representação do sistema tridimensional	7
Figura 5 - Tipos de Apoio	8
Figura 6 - Ginásio Poliesportivo Francisco Torres de Carvalho (Salgueiro-PE)	8
Figura 7 - Disposição dos tipos de apoio.....	9
Figura 8 - Tipos de Arranjos	9
Figura 9 - Tipos de Grades de Camada Dupla.....	10
Figura 10 - Tipos de Grades de Camada Dupla.....	11
Figura 11 - Representação do comprimento das Barras e a profundidade	13
Figura 12 - Conector MERO	14
Figura 13 - Representação do conector MERO.....	15
Figura 14 - Representação do Conector Octatube	15
Figura 15 - Representação do Sistema Tuball	16
Figura 16 - Sistema com Barras Amassadas	17
Figura 17 - Representação dos Sistemas de conexões mais usadas no Brasil.....	17
Figura 18 - Representação de Contra Flecha.....	18
Figura 19 - Representação de Apoios para Terças	19
Figura 20 - Estrutura Espacial em Planta	19
Figura 21 - Placa Equivalente em Planta.....	20
Figura 22 - Discretização de Treliça Espacial para Placa Equivalente	21
Figura 23 - Tabela 17 da NBR 6123	24
Figura 24 - Tabela 18 da NBR 6123	24
Figura 25 - Tabela 2 da NBR 8800	25
Figura 26 - Tabela 3 da NBR 8800	26
Figura 27 - Tabela 1 da NBR 8800	28
Figura 28 - Fragmentada Tabela A.1 da NBR 8800.....	28
Figura 29 - Tabela A.2 da NBR 8800.....	29
Figura 30 - Tabela 4 da NBR 8800	31
Figura 31 - Tabela E.1 da NBR 8800	32
Figura 32 - Barras principais a serem calculadas no banzo superior.....	34
Figura 33 - Barras principais a serem calculadas no banzo inferior.....	34
Figura 34 - Barras auxiliares para apoio.....	35
Figura 35 - Planta baixa.....	36
Figura 36 - Planta de Cobertura (Magalhães, 1996).....	37
Figura 37 - Corte AA (Magalhães, 1996).....	37
Figura 38 - Corte BB (Magalhães, 1996)	38
Figura 39 - Carga Permanente	39
Figura 40 - Carregamento da Platabanda	40
Figura 41 - Carregamento das Telhas.....	40

Figura 42 - Sobrecarga Normativa	41
Figura 43 - Representação das Cargas de Vento	42
Figura 44 - Prancha 1/4 - planta baixa e detalhes.....	56
Figura 45 - Prancha 2/4 - Cortes e detalhes.....	57
Figura 46 - Prancha 3/4 - Cobertura e vista 3D.....	58
Figura 47 - Prancha 4/4 - Vistas isométricas e quantitativos	59
Figura 48 - Caso 1 - Banzo Inferior.....	47
Figura 49 - Caso 2 - Banzo Inferior.....	47
Figura 50 - Caso 3 - Banzo Inferior.....	48
Figura 51 - Caso 4 - Banzo Inferior.....	48
Figura 52 - Caso 5 - Banzo Inferior.....	49
Figura 53 - Caso 6 - Banzo Inferior Fonte: Autoria Própria	49
Figura 54 - Caso 7 - Banzo Inferior.....	50
Figura 55 - Caso 1 - Banzo Superior Fonte: Autoria Própria.....	50
Figura 56 - Caso 2 - Banzo Superior	51
Figura 57 - Caso 3 - Banzo Superior Fonte: Autoria Própria.....	51
Figura 58 - Caso 4 - Banzo Superior	52
Figura 59 - Caso 5 - Banzo Superior Fonte: Autoria Própria.....	52
Figura 60 - Caso 6 - Banzo Superior	53
Figura 61 - Caso 7 - Banzo Superior	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo entre os casos 6 e 8.....	47
Gráfico 2 - Comparativo entre os casos 7 e 9.....	48
Gráfico 3 - Comparativo entre os casos 6 e 8.....	48
Gráfico 4 - Comparativo entre os casos 7 e 9.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de Grades de Camada Dupla	12
Tabela 2 - Resumo de barras	35
Tabela 3 - Ações	39
Tabela 4 - Seção e quantidade das barras	44
Tabela 5 - Comprimento e Peso	44
Tabela 6 - Esforços nas principais nas barras do banzo superior	45
Tabela 7 Esforços nas principais nas barras do banzo Inferior	45
Tabela 8 - Esforços nas principais nas barras auxiliares	46
Tabela 9 - Esforços nas colunas	46
Tabela 10 - Valores resistentes de cálculo em kN.....	47
Tabela 11 - Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Inferior (caso 1 e 2)	50
Tabela 12- Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Inferior (caso 3 e 4)	51
Tabela 13- Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Inferior (caso 5, 6 e 7)	52
Tabela 14- Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Superior (caso 1 e 2).....	53
Tabela 15- Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Superior (caso 3, 4 e 5).....	54
Tabela 16- Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Superior (caso 6 e 7).....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

BIM Building Information Modeling

MERO Mengerighausen

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo Geral.....	3
1.1.1 Objetivos específicos	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 BIM.....	3
2.2 Revit e Robot	4
2.3 Tipos de Projeto	4
2.3.1 Projeto Estrutural	4
2.3.2 Projeto de Telhado	5
2.4 Tipos de Estruturas	5
2.4.1 Galpão	5
2.4.2 Estrutura Reticulada	5
2.4.3 Estrutura Espacial.....	6
2.5 Sistema Tridimensional	6
2.5.1 Classificação e aspectos gerais das Estruturas espaciais.....	7
2.5.2 Tipos de Apoio.....	7
2.5.3 Tipos de arranjos e geometrias.....	9
2.5.4 Quanto a escolha dos arranjos.....	10
2.5.5 Parâmetros de Projeto	12
2.5.6 Vantagens das Estruturas espaciais.....	13
2.5.7 Conectores de nós	14
2.5.8 Sistema MERO.....	14
2.5.9 Sistema Octatube.....	15
2.5.10 Sistema Tuball.....	16
2.5.11 Sistema usado no Brasil	16
2.5.12 Considerações sobre ligações com perfis de seção tubular.....	18
2.5.13 Sistema de cobertura	18
2.6 Análise da Estrutura.....	19
2.6.1 Espessura da Placa Equivalente	20
2.6.2 Esforços na Treliça a partir da Placa Equivalente.....	21
2.7 Estados limites	22

2.7.1 Estado limite último	22
2.7.2 Estado limite de serviço	22
2.8 Ações e Esforços.....	22
2.8.1 Ações Permanentes	22
2.8.2 Ações Variáveis	23
2.8.3 Esforços Solicitantes e Resistentes	24
2.8.4 Axiais	24
2.8.5 Combinações normais.	25
2.8.6 Projeto de peças sob Tração	26
2.8.7 Projeto de peças sob Compressão	30
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 Modelagem	33
3.2 Desenvolvimento do projeto	33
3.3 Dados do projeto	33
3.3.1 Planta Baixa	36
3.3.2 Planta de Cobertura e Cortes.....	37
3.3.3 Ações e Combinações	38
4 RESULTADOS	44
4.1 Quantitativos de barras por grupo.....	44
4.2 Comprimento e Peso dos Elementos da Estrutura	44
4.3 Esforço de Tração e Compressão nas Barras Principais.....	45
4.4 Capacidade de Utilização das Barras	47
4.5 Esforço de Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Inferior	49
4.6 Esforço de Tração e Compressão Máximos e Mínimos do Banzo Superior	53
4.7 Resultado do Processo de Importação	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS	44
ANEXO A – REAÇÕES NO BANZO INFERIOR	47
ANEXO B – REAÇÕES NO BANZO SUPERIOR	50

1 INTRODUÇÃO

O surgimento das estruturas reticuladas tridimensionais se deu por volta do século XVIII (SOUZA, 2003). Atualmente, o aço e o alumínio são os materiais mais comuns na execução desse tipo de estrutura. Somente no ano de 1942 deu-se início a industrialização e a produção otimista de um novo sistema de ligações que seriam adequadas para as estruturas espaciais. As estruturas reticuladas tridimensionais ou simplesmente estruturas espaciais de aço são muito utilizadas em locais com grandes vãos livres (ginásios, rodoviárias, hangares e etc.) (SOUZA, 2003), e para essas edificações existem diversos padrões de arranjos possíveis a serem explorados, a Figura 1 é exemplo que representa um arranjo de estrutura espacial.

Figura 1 - Givel (Salgueiro-PE)



Fonte: Autoria Própria, 2021

As escolhas desses arranjos estão atreladas a vários fatores, como por exemplo: a arquitetura propriamente dita, questões de pré-dimensionamento, fatores estruturais e sistemas de conexões a serem explorado. Vale frisar que as ligações feitas nos nós das estruturas espaciais sempre foram um obstáculo junto à dificuldade de encontrar os esforços internos das barras em função do nível de indeterminação estática. Por essa razão, todas as conexões devem ser adotadas como rótulas e os carregamentos devem ser aplicados aos nós (SOUZA, 2003).

Os motivos que levam ao uso de estruturas espaciais ao invés de aderir a estruturas mais tradicionais é a alta rigidez da estrutura, fácil método construtivo que permite uma expansão da edificação e embelezamento arquitetônico com aplicação de diversas formas geométricas como

mostra a Figura 2 (MAGALHÃES & MALITE, 1998). Atualmente torna-se mais fácil a análise dessas estruturas, por meio de cálculos realizados por softwares, utilizando de métodos numéricos como o dos “elementos finitos”.

Figura 2- Cobertura do estádio Mané Garrincha com estrutura espacial



Fonte: Souza, 2002

O dimensionamento das estruturas de aço no Brasil é feito com base nas especificações dispostas pelas normas técnicas da ABNT. No Brasil, a norma que rege as regras para dimensionamento das estruturas de aço é NBR 8800. Entretanto, é comum encontrar outras normas semelhantes a norma brasileira, é o caso da ANSI/AISC 360-05 (norma americana) e o EUROCODE 3 (aplicado na Europa). De forma análoga, a NBR 8800 seria um compilado das normas internacionais, com algumas variações, como por exemplo, alguns fatores de segurança (SANTOS; VITO, 2016).

Essas normas são amplamente utilizadas em softwares de cálculos estruturais, é o caso de softwares como SAP2000, ROBOT, CYPECAD, STRAP e etc. No entanto, alguns desses softwares ainda não estão completamente adaptados a norma brasileira (NBR 8800), contudo, os softwares possuem flexibilidade em suas configurações, permitindo que o usuário configure os parâmetros de cálculo de acordo com a necessidade.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo usar recursos computacionais a fim de aplicar o conceito BIM vinculando o software Robot e Revit para desenvolver um modelo de projeto para analisar e dimensionar a estrutura espacial estudada na dissertação de Magalhães (1996).

1.1.1 Objetivos específicos

- Realizar o lançamento e dimensionamento da estrutura espacial estudada, por meio do software Robot Structural Analysis.
- Realizar uma comparação entre os resultados das combinações obtidas pelo software Robot, os critérios da NBR 8800 de 2008 e da dissertação de Magalhães (1996).
- Integrar o conceito BIM vinculando o projeto ao software Revit, para obtenção do projeto arquitetônico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As estruturas de aço se destacam no sistema de produção por serem produzidas parte no local da construção e outra parte nas fábricas. Isso quer dizer que haverá padronização de peças durante o processo de produção fora do canteiro de obras (PINHO, 2018). Ao escolher uma edificação e priorizar o método construtivo por meio de estruturas metálicas deve-se levar em consideração o quanto de reaproveitamento do aço pode ser feito nas edificações após os 50 anos de longevidade prevista. Existem algumas opções de reaproveitamento de material, são algumas delas (MARINGONI, 2011):

- Fazer uma reforma ao invés de demolir;
- Fazer o desmonte e reutilização dos componentes;
- Optar por reciclar o material, pois o aço é um material 100% reciclável

2.1 BIM

O conceito BIM pode ser usado em várias fases de uma obra, isto é, pode ser usado de tal forma a integrar qualquer parte da construção, partindo da fase de projeto e extrapolando para outras vertentes atreladas a um modelo computacional (orçamento, instalações,

demolições e etc.). O uso do BIM traz ganhos que estão ligados a melhoria da qualidade das informações durante as fases do projeto. Essas informações são processos, atividades e dados que agregam valor a tomadas de decisão. Com o uso do BIM é possível obter ganhos tecnológicos em função da integração entre diversos softwares (CAMPESTRINI; GARRIDO; MENDES JUNIOR; SCHEER; FREITAS, 2015).

2.2 Revit e Robot

Robot Structural Analysis é um software que faz análise das cargas aplicadas a estrutura, usando conceitos integrados ao BIM para trocar informações com o Revit. Com esses softwares é possível conectar projetos que sejam mais precisos, coordenados e conectados ao BIM, isto é, existe uma correlação de informações entre os programas (AUTODESK INC, 2021).

2.3 Tipos de Projeto

Existem diversos tipos de projetos que podem ser desenvolvidos ao longo do processo elaboração de uma estrutura, logo, deve-se levar em consideração a tipologia, onde será definido a quantidade de vãos por exemplo. Podendo ainda prever a ampliação na estrutura e os carregamentos (D'ALAMBERT, 2012).

2.3.1 Projeto Estrutural

Nesse projeto são informados os tipos de carregamentos bem como os detalhamentos em cada peça, dessa forma é possível ter os parâmetros geométricos registrado. Com essas informações é possível realizar o cálculo estrutural para encontrar as dimensões adequadas para cada elemento. Também deve ser levado em consideração os tipos de ligações que serão usados para unir as peças, isto é, parafusos ou soldas que deverão ser utilizados nas ligações. O memorial de cálculo, desenhos detalhados e listas de quantitativos de materiais são os fatores que compõem o projeto estrutural (PINHO, 2018).

De acordo com Guinzelli (2017), o projeto estrutural é uma etapa importante para definir a escolha do sistema estrutural que possa proporcionar benefício para o conjunto da obra, trazendo menor peso para estrutura. Segundo Pfeil e Pfeil (2009), o projeto estrutural tem como objetivo garantir a segurança estrutural para evitar o colapso da estrutura, bem como a garantia de um bom desempenho da estrutura evitando-se que ocorra grandes deslocamentos, vibrações e danos locais.

2.3.2 Projeto de Telhado

O projeto de telhado é o grande responsável por trazer conforto térmico e conforto acústico nas edificações. (MARINGONI, 2011). É importante frisar e sempre atentar para medidas de vedação, isto é, sempre que o telhado houver pequenas inclinações deverão ser vedadas as aberturas, por outro lado, isso pode fazer com que haja impedimentos na circulação do ar quente. Porém, é possível resolver esse problema com ajuda de lanternim, que é uma abertura no telhado que ajuda a circulação de ar.

Segundo Maringoni (2011), é sempre importante avaliar o tipo de material da telha, consequentemente o vão que compõe as águas do telhado, bem como o seu caimento. Ao entrar nos cálculos de pré-dimensionamento das calhas, pode-se utilizar de artifícios e fórmulas práticas e empíricas: a cada 10 m² de cobertura 15 cm² de calha e 1 cm² de tubos de descida para cada m² de área drenada.

2.4 Tipos de Estruturas

Segundo Pinho (2018), quando se adquire qual quer tipo de estrutura metálica é necessário possuir alguns itens necessários para obter o produto final. Esses itens podem ser fornecidos por uma única empresa ou por várias empresas. Esses itens são os diversos tipos de projeto que devem ser adquiridos antes do transporte e da montagem.

2.4.1 Galpão

Segundo o Instituto Aço Brasil (2018), os galpões são formados, geralmente, por um único pavimento, composto por sistemas de pórticos com espaçamentos regulares. A cobertura se apoia em sistemas de terças, vigas ou tesouras destinadas para uso comercial e industrial. As colunas ficam ligadas estruturalmente aos pórticos e as vigas. Os pórticos podem adotar diversas formas de treliças bem como diversos tipos de coberturas, por exemplo: Shed, duas águas, uma água e etc.

2.4.2 Estrutura Reticulada

Segundo Suzuki (2014), as estruturas reticuladas são divididas em categorias como: vigas, treliças planas, treliças espaciais pórticos planos, pórticos espaciais e grelhas, onde a forma mais simples, seria formada por 6 barras e 4 nós. Esse tipo de estrutura é muito utilizado para construção de torres, isto é, que tem como objetivo erguer cabos ou equipamentos de rádio, antenas, linhas de transmissão e etc.

2.4.3 Estrutura Espacial

Segundo Ramaswamy, Eekhout e Suresh (2002), as estruturas espaciais são um tipos de sistema estrutural composto por elementos lineares dispostos de forma que as cargas sejam transferidas de forma tridimensional, podendo em alguns casos, os elementos serem bidimensionais. Esse tipo de estrutura é muito comum, por exemplo em: aeroportos, rodoviárias, hangares e etc. Essas estruturas seguem um padrão horizontal e que na maioria das vezes, faz uso de platibandas para ocultar a estrutura do telhado. A Figura 3 é um exemplo de uma estrutura espacial que foi utilizada na construção de uma loja de veículos.

Figura 3 - Honda (Salgueiro - PE)

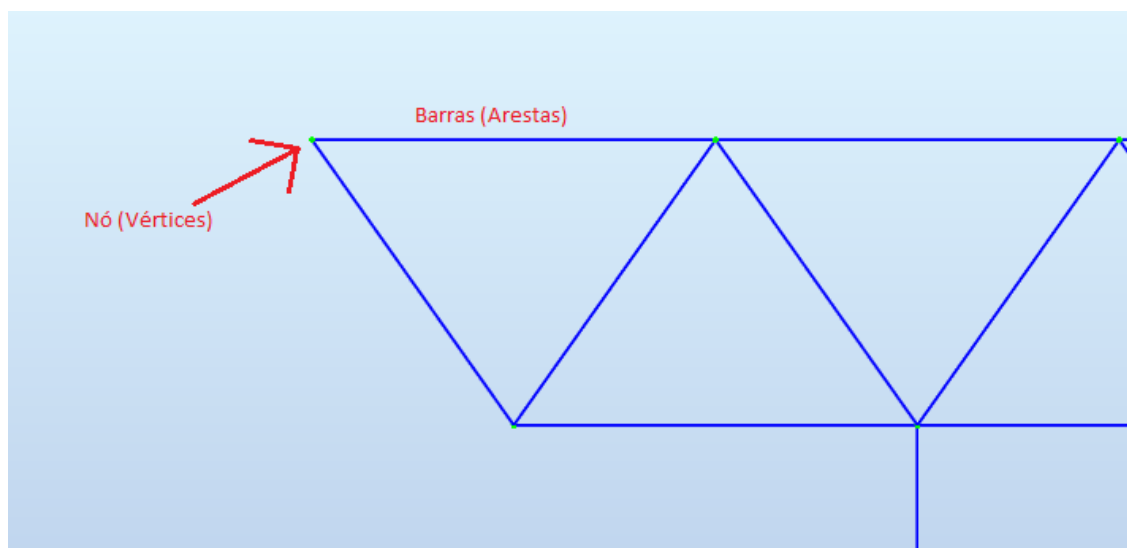


Fonte: Autoria Própria, 2021

2.5 Sistema Tridimensional

Esses sistemas são entendidos como partes de uma forma geométrica tridimensional, de forma análoga, os nós podem ser vistos como vértices e as barras como arestas, como mostra a Figura 4 a seguir (MARINGONI, 2011).

Figura 4 - Representação do sistema tridimensional



Fonte: Autoria Própria, 2021

2.5.1 Classificação e aspectos gerais das Estruturas espaciais

As treliças espaciais podem ser classificadas a partir de sua elevação ou de sua vista em planta. Em sua posição vertical, pode ser classificada quanto ao número de camadas que a estrutura possui. Vale frisar, que é comum o uso de duas camadas para as estruturas que tem por objetivo vencer grandes vãos, pois são mais rígidas. Quanto a classificação a partir de sua vista em planta, essa se dá a partir da quantidade de direções em que as barras dos banzos inferiores e superiores tomam. Ou seja, o simples fato de que os banzos podem estar paralelos aos lados de uma estrutura apoiada continuamente, também é a formação de uma outra classificação (MAGALHÃES J. R., 1996).

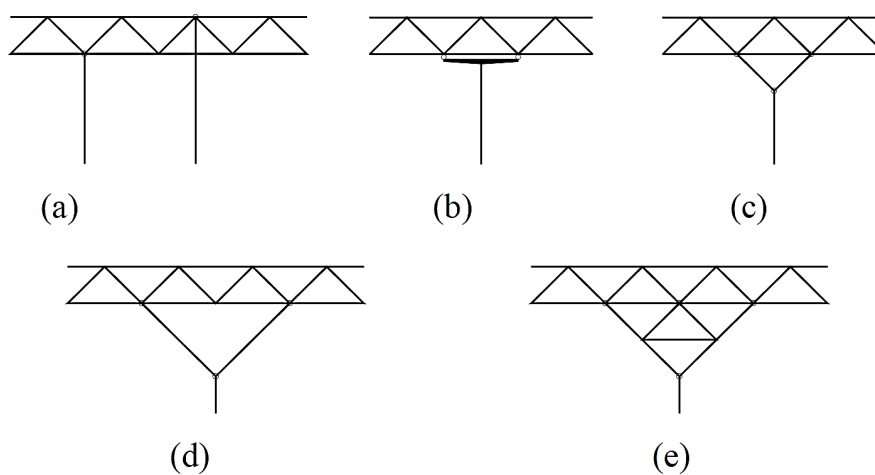
Ainda é possível obter uma outra classificação partindo do volume de aço gerado a partir das junções entre as peças. Dessa forma percebe-se que as estruturas espaciais podem apresentar formas de pirâmides ou simplesmente formando grelhas espaciais (MAGALHÃES J. R., 1996).

2.5.2 Tipos de Apoio

As treliças espaciais podem ser apoiadas nos nós dos banzos inferiores ou superiores por meio de pilares, sejam eles de concreto armado ou metálicos. Existem casos em que reações de apoio podem ter valores elevados, como solução para esse tipo de problema, é comum usar elementos adicionais para reduzir as reações. Por consequência, haverá uma redução também nas reações de esforços normais nas diagonais que se conectam com os nós de apoio. Isso pode

ser feito com auxílio de vigas de transição, “pé de galinha” com ou sem travejamento. A Figura 5 a seguir mostra exemplos de tipos de apoios das estruturas espaciais (SCHERER; ESPIL, 2016).

Figura 5 - Tipos de Apoio



Fonte: Wai-Fah, 1999

A Figura 6 é um exemplo de uma de um ginásio que utiliza um dos tipos de apoio demonstrado na Figura 5 (e)

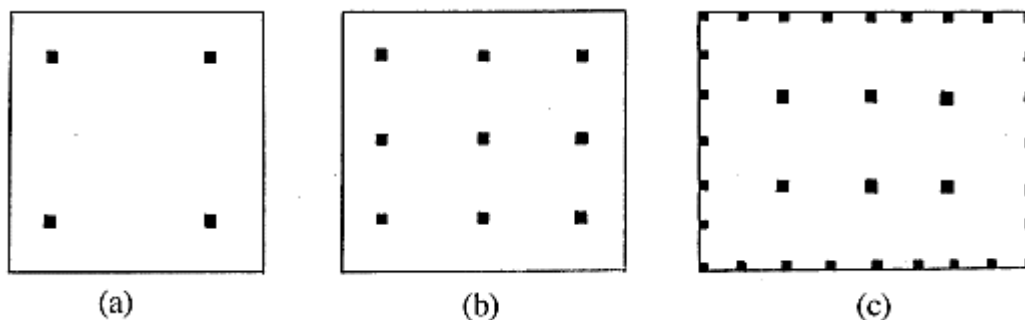
Figura 6 - Ginásio Poliesportivo Francisco Torres de Carvalho (Salgueiro-PE)



Fonte: Autoria Própria, 2021

Além de determinar os tipos de apoios, é importante determinar a disposição dos mesmos em toda a estrutura, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Disposição dos tipos de apoio



Fonte: Wai-Fah, 1999

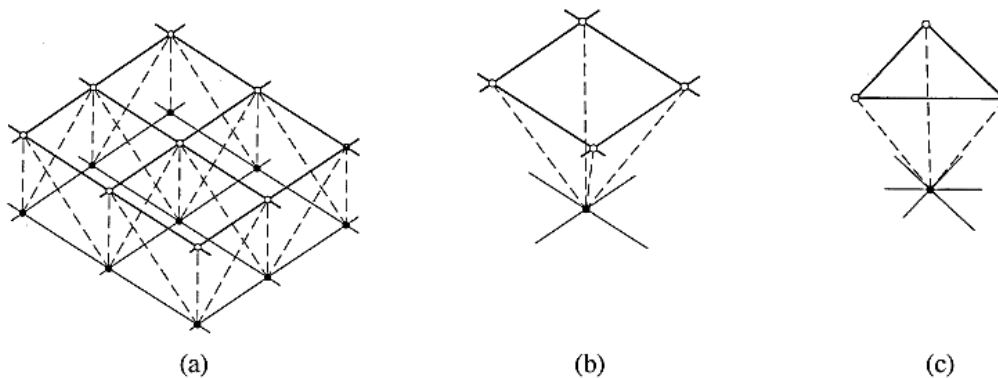
2.5.3 Tipos de arranjos e geometrias

As estruturas de camadas duplas são caracterizadas pelas juntas ou nós articulados sem a presença de momento ou torção, isto é, as barras devem resistir a tração e compressão. Mesmo em casos que considere as conexões como sendo ligações rígidas, a presença do momento ou da torção serão insignificantes (WAI-FAH, 1999).

As estruturas com camada dupla são formadas, geralmente, por elementos básicos:

- Treliça planar (Figura 8-a)
- Uma pirâmide com base quadrada (Figura 8-b)
- Uma pirâmide com base triangular (Figura 8-c)

Figura 8 - Tipos de Arranjos

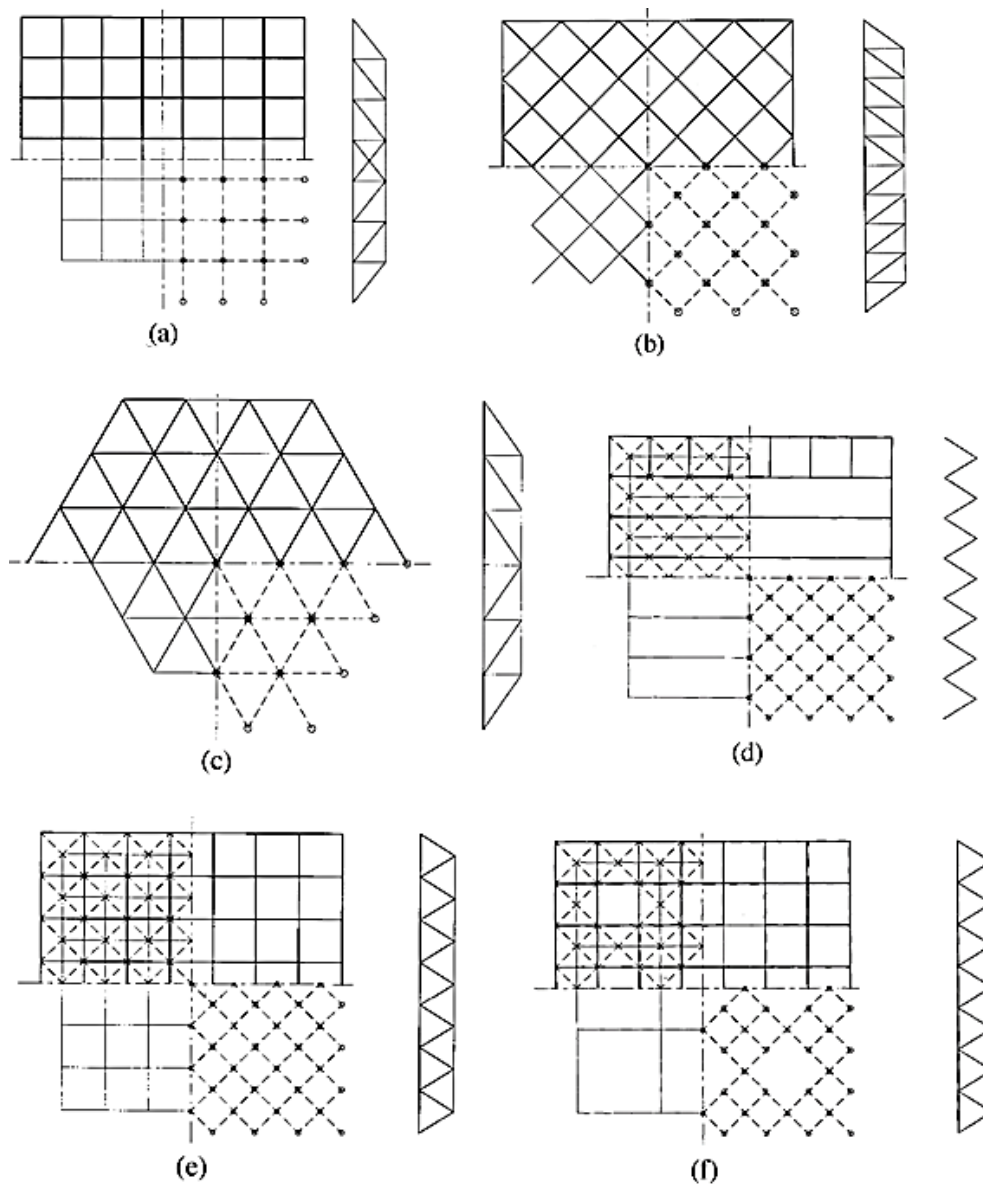


Fonte: Wai-Fah, 1999

2.5.4 Quanto a escolha dos arranjos

Segundo Wai-Fah (1999), as treliças espaciais podem ser escolhidas mediante a necessidade da arquitetura. No caso das estruturas que possuem camada dupla que são apoiadas em colunas intermediárias, o tipo que pode ser escolhido são os quadrados sobre quadrados, quadrado sobre quadrado sem diagonais esconsas e quadrado sobre quadrado com aberturas, isto é, Tipos a, b e f, como mostrado na Figura 9 a seguir.

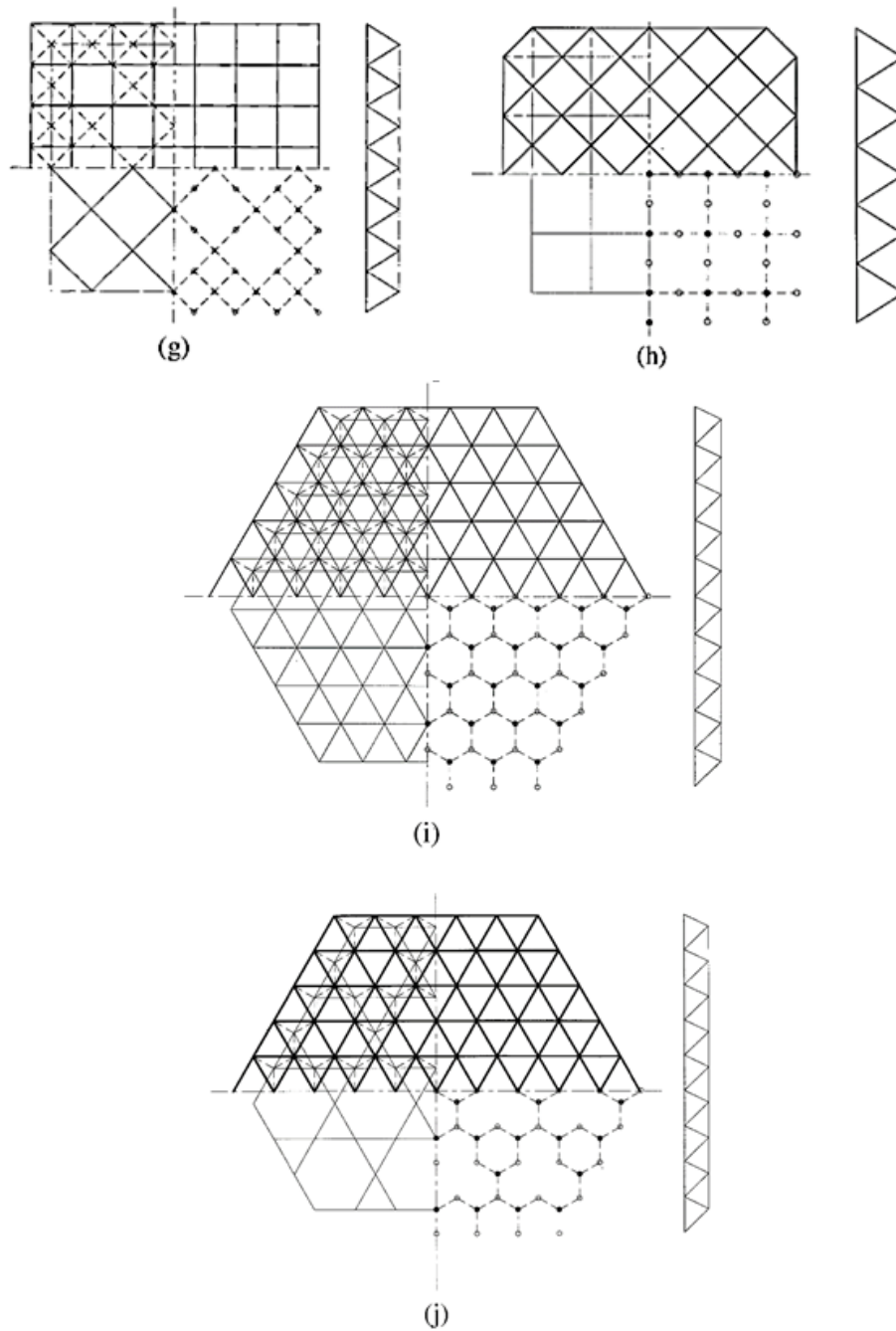
Figura 9 - Tipos de Grades de Camada Dupla



Fonte: Wai-Fah, 1999

Segundo Wai-Fah, 1999, para as estruturas de camada dupla com formas geométricas circulares, triangulares, hexagonais e outras formas estranhas com pilares ao longo do perímetro, são apropriados para usar os tipos com estruturas triangulares na camada superior, ou seja, tipos c (Figura 9), i e j (Figura 10).

Figura 10 - Tipos de Grades de Camada Dupla



Fonte: Wai-Fah, 1999

Os tipos de estrutura recomendados estão resumidos na Tabela 1 de acordo com a forma do plano e suas condições de apoio.

Tabela 1 - Tipos de Grades de Camada Dupla

Forma do plano	Condição de suporte	Tipos Recomendados
Quadrado, retangular (proporção D 1 para 1.5)	Ao longo de perímetros	a, b, e, f, g, h
Retangular (proporção da imagem D 1.5 para 2)	Ao longo de perímetros	a, e, f, g
Faixa longa (proporção de aspecto > 2)	Ao longo de perímetros	d
Quadrado, retangular	Suporte intermediário	a, e, f
Quadrado, retangular	Suporte intermediário combinado com suporte ao longo de perímetros	a, b, e, f, g
Circular, triangular, hexagonal e outras formas estranhas	Ao longo de perímetros	c, i, j

2.5.5 Parâmetros de Projeto

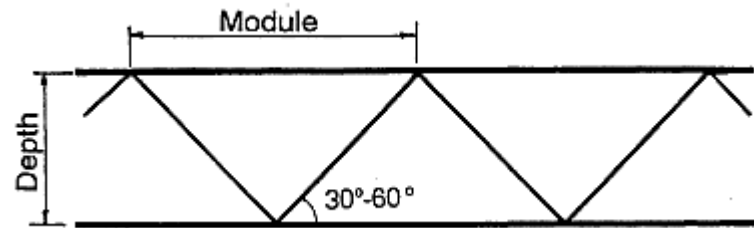
Antes de avaliar cargas ou antes de qualquer trabalho é necessário estabelecer a profundidade e o tamanho do módulo, isto é, a distância entre os banzos e comprimento das barras. Embora esses parâmetros sejam relativamente simples de serem obtidos, eles farão um papel importante no âmbito do projeto de telhado (WAI-FAH, 1999).

Alguns os fatores que contribuem para a determinação desses parâmetros, são eles:

- Tipo de camada dupla
- Vãos entre os apoios
- Revestimento da cobertura

Segundo Wai-Fah (1999), a profundidade e o comprimento das barras são dependentes um do outro, isso está totalmente relacionado com o ângulo permissível entre linha central das barras inclinadas (diagonais) e o plano dos banzos superior e inferior. O ângulo deve variar de 30° a 60°, de acordo com a Figura 11, assim, poderá ser evitado que as barras diagonais tenham comprimentos excessivos. Na maioria das vezes esses parâmetros são definidos pela experiência prática.

Figura 11 - Representação do comprimento das Barras e a profundidade



Fonte: Wai-Fah, 1999

Segundo Magalhães (1996), existem algumas recomendações para as alturas das treliças espaciais sugerido por alguns autores.

$\frac{l}{30}$ a $\frac{l}{40}$ MORINI (1976)

$\frac{l}{20}$ a $\frac{l}{60}$ IFFLAND (1982)

$\frac{l}{20}$ a $\frac{l}{40}$ MAKOWSKI (1981)

$\frac{l}{15}$ a $\frac{l}{20}$ WALKER (1981), AGERSKOV (1986)

Onde l é a distância entre os apoios da estrutura.

No Brasil a prática comum é considerar a altura da treliça variando de $\frac{l}{15}$ a $\frac{l}{20}$. Essa variação ocorre em função da rigidez do sistema utilizado, malha retangular ou diagonal e apoios (MAGALHÃES J. R., 1996).

2.5.6 Vantagens das Estruturas espaciais

Segundo Ramaswamy, Eekhout e Suresh (2002), existem algumas vantagens na aplicação das estruturas espaciais são elas:

- São leves e eficiente na sua estrutura;
- Existe uma padronização e otimização;
- É um meio de baratear e embelezar grandes vãos;
- As cargas aplicadas em um ponto não são apenas transportadas pelos membros reunidos naquele local, mas são dispersas e compartilhadas em vários outros membros;
- Os componentes são leves, o que facilita o transporte;
- Por se tratar de uma estrutura leve, fazendo com que o peso próprio seja bem menor.

- Hiperestaticidade elevada. Ao danificar um elemento, isso não implica diretamente no colapso de toda a estrutura (MAGALHÃES J. R., 1996).

2.5.7 Conectores de nós

Existe uma gama de sistemas criados e patenteados para a união dos nós nas estruturas espaciais. São alguns deles:

- Sistema MERO (Alemanha)
- Conectores Octatube
- Conectores Tuball
- Octaplate (Alemanha)
- Nodos (Inglaterra)
- Unistrut (USA)

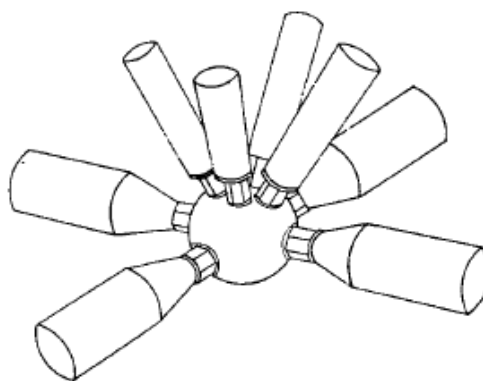
Segundo Magalhães (1996), desses sistemas, o mais usado mundialmente é sistema MERO.

2.5.8 Sistema MERO

MERO é uma abreviatura de Mengeringhausen, que foi o inventor do sistema MERO. É formado por uma esfera com vários orifícios com rosca de aço podendo chegar a uma quantidade de até 18 fustes (orifícios para encaixes) roscados sempre variando os ângulos. As linhas centrais sempre se encontram de forma precisa no centro do nó, de acordo com Ramaswamy, Eekhout, & Suresh, (2002).

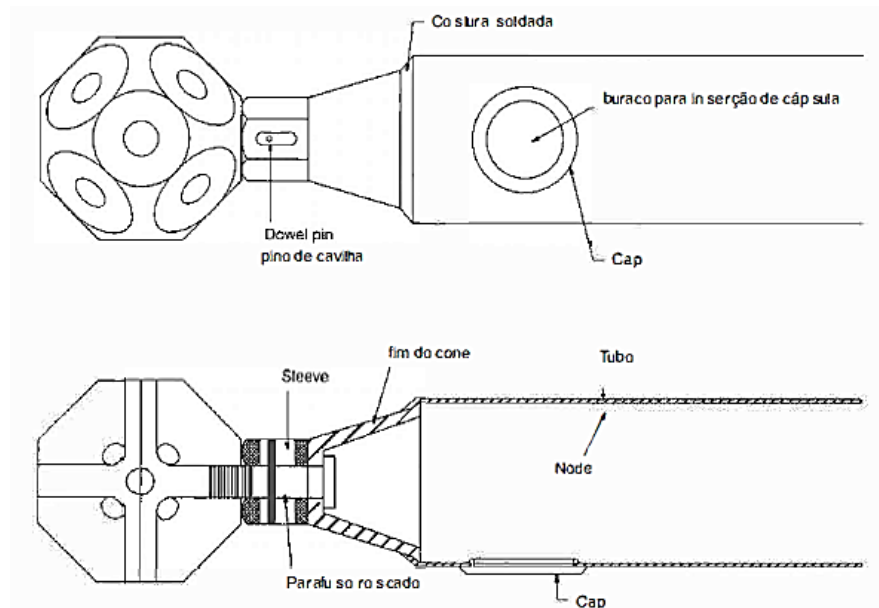
A Figura 12 e 13 a seguir são representações do sistema MERO.

Figura 12 - Conector MERO



Fonte: Wai-Fah, 1999

Figura 13 - Representação do conector MERO

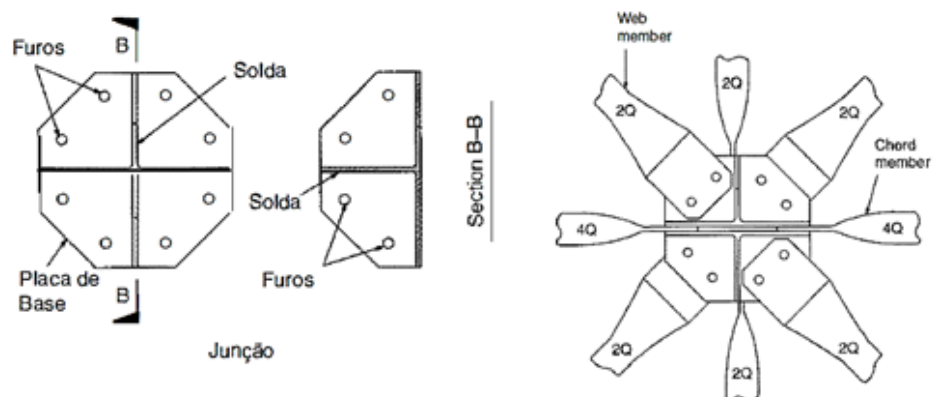


Fonte: Ramaswamy, Eekhout & Suresh, 2002

2.5.9 Sistema Octatube

O conector do nó Octatube é um conector de placa, é formado por uma placa de base octagonal onde são soldadas duas placas semi-octagonais que são dispostas sempre em ângulos retos entre si, de acordo com a Figura 14 a seguir (RAMASWAMY, EEKHOUT, & SURESH, 2002).

Figura 14 - Representação do Conector Octatube

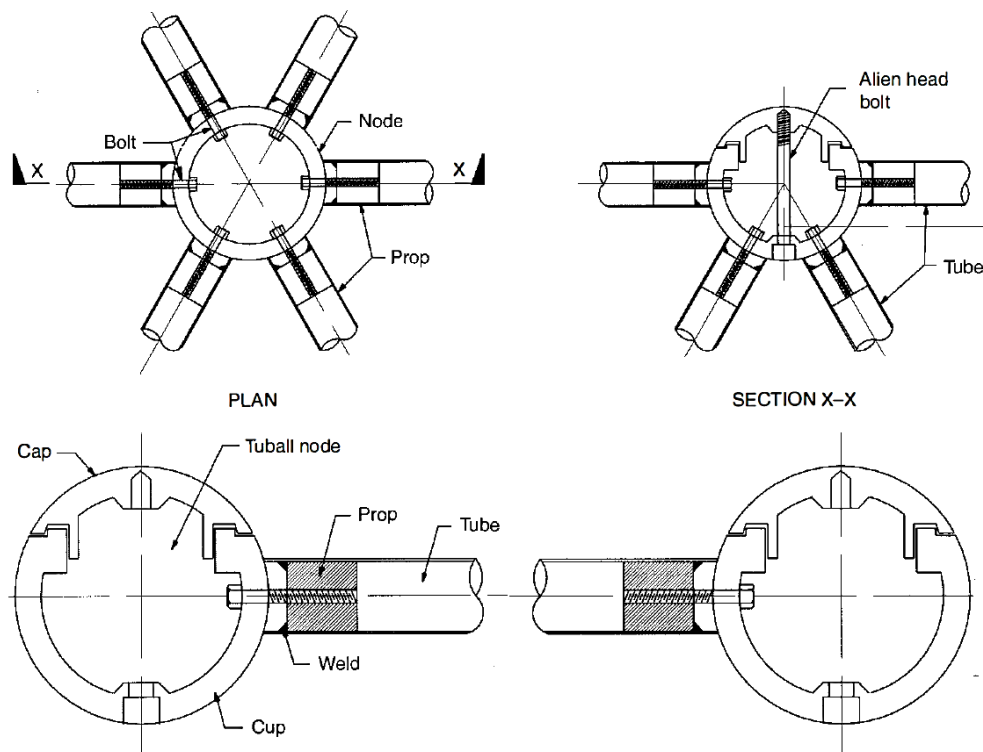


Fonte: Ramaswamy, Eekhout & Suresh, 2002

2.5.10 Sistema Tuball

O conector Tuball é uma esfera oca e é equipado em suas extremidades com suportes sólidos roscados por soldagem, trabalhando de dentro da esfera com parafusos de alta resistência, são cravados no suporte roscado por meio de uma chave de torque, como mostra a Figura 15 a seguir (RAMASWAMY, EEKHOUT, & SURESH, 2002).

Figura 15 - Representação do Sistema Tuball



Fonte: Ramaswamy, Eekhout & Suresh, 2002

2.5.11 Sistema usado no Brasil

Segundo Martini (2014), a maioria dos sistemas apresentam ligações parafusadas, em função do elevado custo de conexões por solda e difícil execução em uma obra. No Brasil, barras estampadas unidas por parafusos e arruelas, é o tipo mais utilizado devido ao baixo custo de fabricação e montagem. A Figura 16 mostra um sistema com barras amassadas utilizadas na construção da cobertura da empresa Givel.

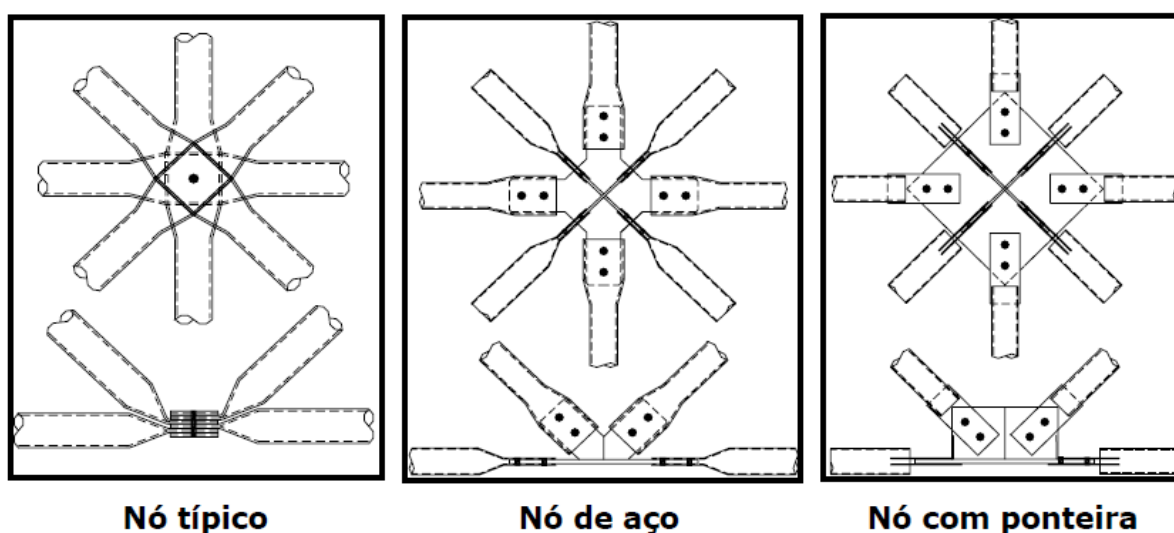
Figura 16 - Sistema com Barras Amassadas



Fonte: Autoria Própria, 2021

Segundo Souza (2003), as técnicas construtivas mais utilizadas no Brasil são as junções de barras com as extremidades amassadas e conectadas por meio de um parafuso, podendo também utilizar a associação com chapas planas, como pode-se observar na representação da Figura 17.

Figura 17 - Representação dos Sistemas de conexões mais usadas no Brasil



Fonte: Souza, 2003

Segundo Magalhães (1996), apesar da simplicidade, não são conhecidos estudos que comprovem a eficiência da hipótese de cálculo assumida. Sabe-se que existe variações na

rigidez da peça em suas extremidades. Na prática, existem problemas nos cálculos estruturais em função de premissas não verificadas. Não se tem uma comprovação com relação ao grau de segurança que a estrutura proporciona.

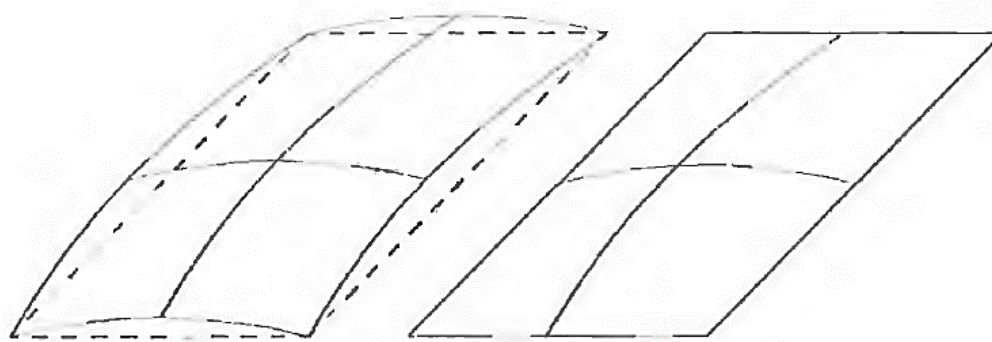
2.5.12 Considerações sobre ligações com perfis de seção tubular

Segundo a ABNT (2008), em seu item 6.1.14, recomenda-se, fazer adaptações necessárias para manter a segurança no dimensionamento das ligações, para isso, deve-se adotar as normas ANSI/AISC 360 ou Eurocod 3 Part 1-8, na ausência de Norma Brasileira aplicável.

2.5.13 Sistema de cobertura

Segundo Magalhães (1996), a cobertura pode ser aplicada nas estruturas espaciais de duas formas diferentes. A primeira maneira é fixando as telhas diretamente nas barras da treliça espacial, mas para que isso seja possível, deve ser previsto uma contra flexa na estrutura, isto é, deve haver uma alteração no comprimento das barras do banzo inferior ou do superior, assim a estrutura possuirá uma inclinação como mostrado na Figura 18.

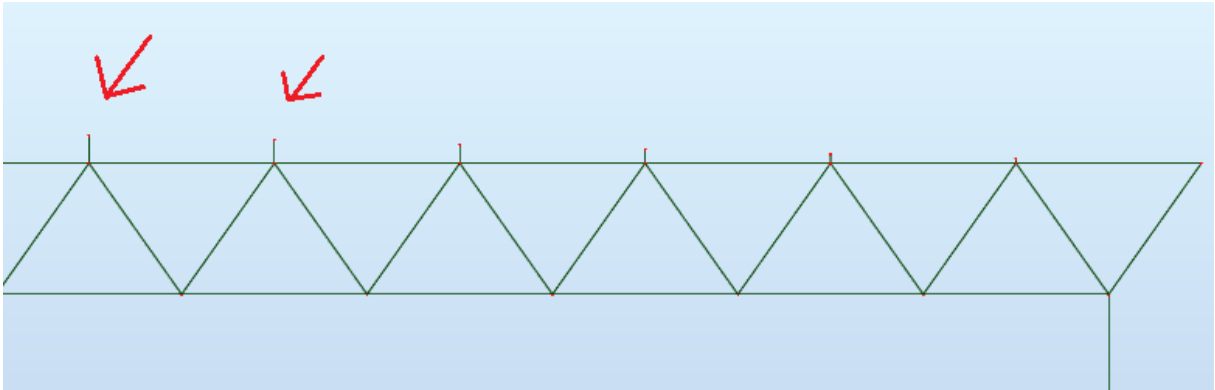
Figura 18 - Representação de Contra Flecha



Fonte: Magalhães, 1996

A segunda forma de fazer a fixação do telhado é inserindo barras verticais posicionadas nos nós (servindo como apoios) para receber as terças, desta forma não haverá esforços de flexo compressão nas barras do banzo superior, isto é, transmitindo o carregamento das terças diretamente para os nós da treliça espacial, como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Representação de Apoios para Terças

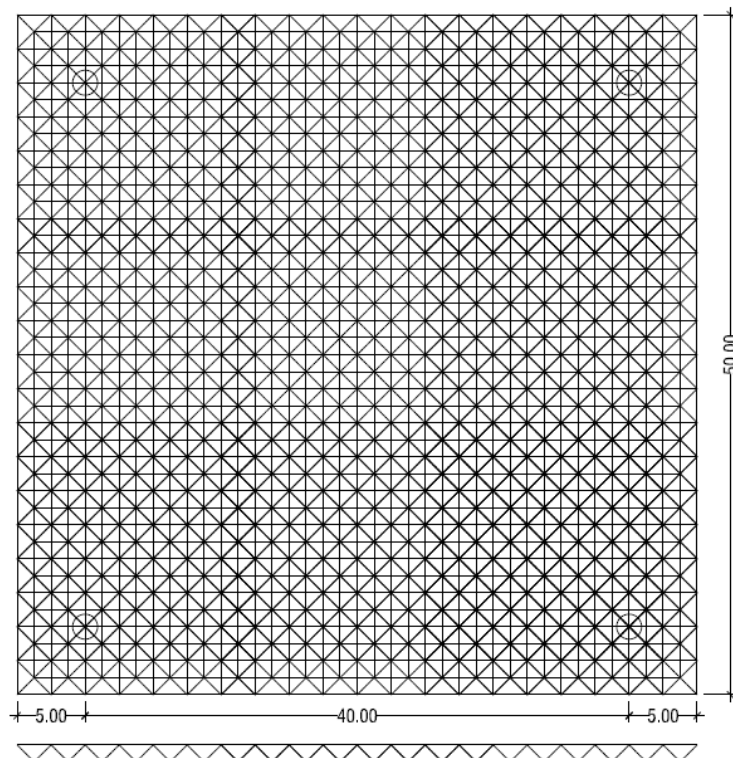


Fonte: Autoria Própria, 2021

2.6 Análise da Estrutura

As estruturas espaciais possuem uma elevada quantidade de barras por metro cúbico, a Figura 20 mostra uma estrutura espacial em planta. É comum fazer uma análise de forma mais simplificada para obter resultados mais rápidos com relação aos esforços, deslocamentos e reações atuantes (MAGALHÃES, 1996).

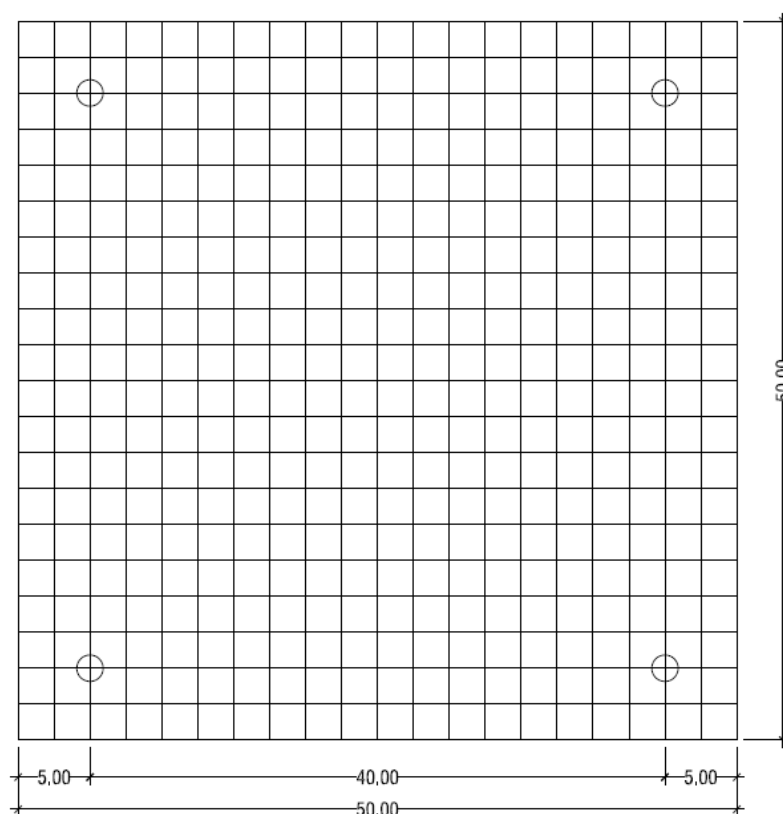
Figura 20 - Estrutura Espacial em Planta



Fonte: Magalhães, 1996

A forma mais comum seria transformar a estrutura espacial em uma estrutura de placa equivalente, como mostra a Figura 21. Em alguns casos, é comum o uso de tabelas para placas, pois podem ser aplicadas diretamente para estruturas espaciais. Contudo, para obter os resultados de reações, deslocamentos e esforços em uma placa, é muito importante o uso de ferramentas computacionais (MAGALHÃES, 1996).

Figura 21 - Placa Equivalente em Planta

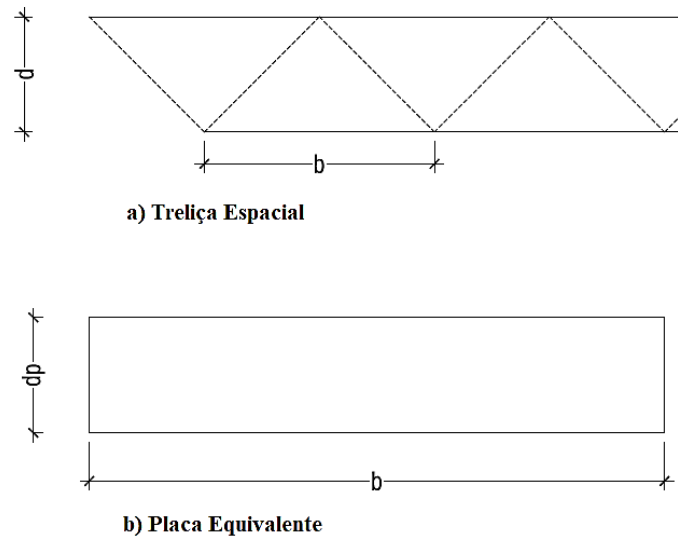


Fonte: Magalhães, 1996

2.6.1 Espessura da Placa Equivalente

Segundo Magalhães (1996), para obter a espessura da placa equivalente, deve-se usar uma compatibilidade de rigidez à flexão, admitindo-se uma faixa isolada da placa, ou seja, será feito a discretização da estrutura, como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Discretização de Treliza Espacial para Placa Equivalente



Fonte: Magalhães, 1996

$$I_t = 2 \cdot A_g \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \frac{A_g \cdot d^2}{2} \quad (1)$$

$$I_p = \frac{b \cdot d_p^3}{12} \quad (2)$$

Fazendo:

$$I_t = I_p \rightarrow d_p = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot A_g \cdot d^2}{b}} \quad (3)$$

Onde:

- a) I_t é o momento de inércia da treliça espacial
- b) I_p é o momento de inércia da placa.
- c) A_g é a área de aço

2.6.2 Esforços na Treliza a partir da Placa Equivalente

Seguindo a mesma linha de raciocínio, é possível discretizar os esforços.

$$M_p = \sigma \cdot w = \sigma \cdot \frac{b \cdot d_p^2}{6} \quad (4)$$

$$M_t = N \cdot d \quad (5)$$

$$M_t = M_p \rightarrow N = \frac{b \cdot d_p^2}{6 \cdot d} \quad (6)$$

2.7 Estados limites

Segundo a NBR 8681 (2004), os estados limites são divididos em duas categorias, estado limite último e estado limite de serviço. Eles são considerados nos projetos de estruturas e dependem diretamente do tipo de material a ser utilizado na construção.

2.7.1 Estado limite último

De acordo com a NBR 8681 (2004), é caracterizado por:

- Perda de equilíbrio
- Ruptura ou deformação plástica dos materiais
- Transformação da estrutura em um sistema hipostático
- Instabilidade por deformação
- Instabilidade dinâmica

2.7.2 Estado limite de serviço

De acordo com a NBR 8681 (2004), o estado limite de serviço é caracterizado por:

- Ações com combinações com até três ordens de grandezas
- Danos localizados que podem comprometer a estética ou a durabilidade da edificação
- Vibração excessiva

2.8 Ações e Esforços

De acordo com NBR 8681 (2004), as ações são divididas em ações permanentes, variáveis e excepcionais.

As formulas são baseadas no método dos estados limites ABNT 8800 (2008), com coeficiente 1,50 para assim ficar ajustado com o método das tensões admissíveis (D'ALAMBERT & LIPPI, 2012).

2.8.1 Ações Permanentes

São considerados os pesos próprios das estruturas bem como o peso das coberturas, equipamentos específicos e sistemas de vedação. A NBR 6120 (2019), traz os valores pré-estabelecidos de peso específico de diversos tipos de materiais bem como suas composições. Para o sistema de cobertura das estruturas espaciais comuns, o peso próprio das estruturas em

aço varia de 0,1 a 0,3 kN/m². para as estruturas composta por peças de alumínio, esse valor varia de 0,03 a 0,2 kN/m². O sistema de vedação, podendo ser aço ou alumínio, varia de 0,05 a 0,12 kN/m² (MAGALHÃES, 1996).

2.8.2 Ações Variáveis

Considera-se as cargas acidentais e sobrecargas no telhado, efeitos do vento, chuva, temperatura e neve. Dessas cargas variáveis, deve-se ter uma atenção maior para os efeitos do vento, na qual existe uma norma específica para tratar dos cálculos de vento NBR 6123 (1988) (MAGALHÃES, 1996).

A NBR 6123 (1988), aborda os coeficientes de pressão para coberturas que possuem fechamentos nas laterais e de forma restrita as coberturas sem fechamento (isoladas). No item 8.2.3 da norma, diz que as tabelas 17 e 18 (Figura 23 e 24) só poderão ser usadas se o critério $h \geq 0,5I_2$ for atendido. Onde:

- h é altura livre entre o piso e o nível da aresta horizontal mais baixa
- I_2 é profundidade da cobertura

O ponto 8.2.4 da na NBR 6123 (1988), diz que quando houver obstruções colocadas sob a cobertura ou junto a ela, esta deve resistir a ação do vento, na zona de obstrução, com $C_{pi} = +0,8$ para construções na borda do sotavento, e $C_{pi} = -0,3$ para construções na borda do barlavento. Segundo Magalhães (1996), se estes valores de pressão internos forem aplicados em toda cobertura, isso trará condições de carregamento muito conservadoras.

A norma ainda fala nos pontos 8.2.5, 8.2.8, 8.2.9 e 8.2.10 sobre as forças horizontais de atrito que deverão ser levadas em consideração.

- $F_{at} = 0,05q a b$, para vento paralelo à geratriz, sendo a e b dimensões em planta da cobertura.
- $\begin{cases} F = 1,3 q A_e, \text{ para barlavento} \\ F = 0,8q A_e, \text{ para sotavento} \end{cases}$, para abas planas ou quase planas nas bordas do telhado.
- $F_{at} = 0,05q A_e$, para abas paralelas a direção do vento
- $C_p = \pm 2,0$, para elementos de vedação.

Figura 23 - Tabela 17 da NBR 6123

Tabela 17 - Coeficiente de pressão em coberturas isoladas a uma água plana

Vento	Primeiro carregamento	Segundo carregamento	
	$0 \leq \operatorname{tg} \theta \leq 0,7$	$0 \leq \operatorname{tg} \theta \leq 0,2$	$0,2 \leq \operatorname{tg} \theta \leq 0,3$

Fonte: NBR 6123, 1988

Figura 24 - Tabela 18 da NBR 6123

Tabela 18 - Coeficiente de pressão em coberturas isoladas a duas águas planas simétricas

Coeficientes	Primeiro carregamento		Segundo carregamento	
	$0,07 \leq \operatorname{tg} \theta \leq 0,4$	$0,4 \leq \operatorname{tg} \theta \leq 0,6$	$0,07 \leq \operatorname{tg} \theta \leq 0,4$	$0,4 \leq \operatorname{tg} \theta \leq 0,6$
c_{pb}	$2,4 \operatorname{tg} \theta + 0,6$	$2,4 \operatorname{tg} \theta + 0,6 \leq 2,0$	$0,6 \operatorname{tg} \theta - 0,74$	$6,5 \operatorname{tg} \theta - 3,1$
c_{ps}	$3,0 \operatorname{tg} \theta - 0,5$	$+ 0,7$	$- 1,0$	$5,0 \operatorname{tg} \theta - 3,0$

Sentidos positivos dos coeficientes de pressão

Fonte: NBR 6123, 1988

2.8.3 Esforços Solicitantes e Resistentes

As peças agem de formas distintas sob efeito de vários tipos de ações, como ações de vento, peso próprio, sobrecarga e etc. onde cada uma faz com que a peça se comporte de maneiras diferentes sob o efeito dessas cargas (MARINGONI, 2011).

2.8.4 Axiais

São esforços que ao serem aplicados em um corpo, agem por todo comprimento da peça podendo causar o efeito de tração ou o efeito de compressão. Se o esforço é de tração, a peça resiste pela área da seção transversal. Para resistir a compressão, além da área da seção transversal da peça, inclui as propriedades geométricas da peça (tipo de perfil), pois deve ser

levado em consideração o efeito da flambagem em peças comprimidas, logo, a esbeltez da peça deve ser levada em consideração (MARINGONI, 2011).

2.8.5 Combinações normais.

A NBR 8800 (2008), traz a formulação para as combinações, devendo ser feitas quantas combinações forem necessários para verificar todas as condições de segurança para os estados limites últimos. Em cada combinação deve conter ações permanentes e ações variáveis principais e ações secundárias.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{g1} \cdot F_{G_i}) + \gamma_{q1} \cdot F_{q1} + \sum_{i=1}^n (\gamma_{q2} \cdot \psi_0 \cdot F_{q_i}) \quad (7)$$

A Figura 25 nos traz os valores dos fatores de combinação e de redução para ações variáveis segundo a NBR 8800 (2008).

Figura 25 - Tabela 2 da NBR 8800

Valores dos fatores de combinação ψ_0 e de redução ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis

Ações		γ_{r2}^a		
		ψ_0	ψ_1^d	ψ_2^e
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^{b)}	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^{c)}	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas (ver B.5.1)	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Vigas de rolamento de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
^a Ver alínea c) de 4.7.5.3. ^b Edificações residenciais de acesso restrito. ^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ^d Para estado-limite de fadiga (ver Anexo K), usar ψ_1 igual a 1,0. ^e Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.				

Fonte: NBR 8800, 2008

2.8.6 Projeto de peças sob Tração

É comum nas estruturas espaciais usar perfis tubulares com seção circular, quadrada ou retangular (RAMASWAMY; EEKHOUT & SURESH, 2002)

Usando a NBR 8800 (2008), podemos encontrar a força resistente de cálculo para os esforços de tração. A força de cálculo a ser usada será sempre o menor valor obtido entre as equações, deve ser levado em consideração o estado limite último de escoamento da seção bruta e a ruptura da seção líquida.

- Para o escoamento da seção bruta

$$N_{t,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (8)$$

Onde:

A_g é área bruta da seção transversal da peça

f_y é resistência de escoamento do aço

γ_{a1} é o valor de ponderação para escoamento, flambagem e instabilidade

A Figura 26 mostra os coeficientes de ponderação das resistências presente na NBR 8800.

Figura 26 - Tabela 3 da NBR 8800

Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m

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

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

Fonte: NBR 8800, 2008

- Para a ruptura da seção líquida

$$N_{t,Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a2}} \quad (9)$$

- γ_{a2} é o valor de ponderação para ruptura
- A_e é área líquida efetiva da seção transversal da peça

$$A_e = C_t \cdot A_n \quad (10)$$

- A_n é área líquida da barra
- C_t é um coeficiente de redução da área líquida. Se a força de tração for transmitida somente por soldas ou parafusos, isso quer dizer que $C_t = 1,00$. Como as estruturas espaciais são ligadas por meio de parafusos, adotamos esse valor para o C_t .

Deve-se levar em consideração o esforço solicitante de cálculo ($N_{t,Sd}$), que pode ser definido por meio de majorações dos ações. Para fins de cálculo e segurança, temos que:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (11)$$

Onde:

$$N_{t,Sd} = \gamma_g \cdot N_{t,cp} + \gamma_q \cdot N_{t,ca} \quad (12)$$

A Figura 27 mostra a tabela dos coeficientes de ponderação das ações.

Figura 27 - Tabela 1 da NBR 8800

Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_f = \gamma_{f1} \gamma_{f3}$						
Combinações	Ações permanentes (γ_g) ^{a c}					
	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 e empuxos permanentes	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) ^{a d}					
	Efeito da temperatura ^b		Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação	
Normais	1,20		1,40	1,20	1,50	
Especiais ou de construção	1,00		1,20	1,10	1,30	
Excepcionais	1,00		1,00	1,00	1,00	

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

^b O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

^c Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

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

^e Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a este valor-limite.

Fonte: NBR 8800, 2008

As tensões de escoamento e tensões de ruptura para perfis tubulares (circular, quadrado ou retangular) estão descritas na Figura 28 e 29, presente na NBR:8800.

Figura 28 - Fragmento da Tabela A.1 da NBR 8800

Denominação	Seção circular		Seções quadrada e retangular	
	f_y MPa	f_u MPa	f_y MPa	f_u MPa
B	290	400	317	400
C	317	427	345	427

Fonte: NBR 8800, 2008

Figura 29 - Tabela A.2 da NBR 8800

Aços de uso freqüente especificados pela ASTM para uso estrutural

Classificação	Denominação	Produto	Grupo de perfil ^{a b} ou faixa de espessura disponível	Grau	f_y MPa	f_u MPa
Aços-carbono	A36	Perfis	1, 2 e 3	-	250	400 a 550
		Chapas e barras ^c	$t \leq 200$ mm			
	A500	Perfis	4	A	230	310
				B	290	400
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica	A572	Perfis	1, 2 e 3	42	290	415
				50	345	450
				55	380	485
			1 e 2	60	415	520
				65	450	550
		Chapas e barras ^{c)}	$t \leq 150$ mm	42	290	415
			$t \leq 100$ mm	50	345	450
			$t \leq 50$ mm	55	380	485
			$t \leq 31,5$ mm	60	415	520
				65	450	550
	A992 ^d	Perfis	1, 2 e 3	-	345 a 450	450
Aços de baixa liga e alta resistência mecânica resistentes à corrosão atmosférica	A242	Perfis	1	-	345	485
			2	-	315	460
			3	-	290	435
		Chapas e barras ^{c)}	$t \leq 19$ mm	-	345	480
			$19 \text{ mm} < t \leq 37,5$ mm	-	315	460
			$37,5 \text{ mm} < t \leq 100$ mm	-	290	435
	A588	Perfis	1 e 2	-	345	485
		Chapas e barras ^c	$t \leq 100$ mm	-	345	480
			$100 \text{ mm} < t \leq 125$ mm	-	315	460
			$125 \text{ mm} < t \leq 200$ mm	-	290	435
Aços de baixa liga temperados e auto-revenidos	A913	Perfis	1 e 2	50	345	450
				60	415	520
				65	450	550

^a Grupos de perfis laminados para efeito de propriedades mecânicas:

- Grupo 1: Perfis com espessura de mesa inferior ou igual a 37,5 mm;
- Grupo 2: Perfis com espessura de mesa superior a 37,5 mm e inferior ou igual a 50 mm;
- Grupo 3: Perfis com espessura de mesa superior a 50 mm;
- Grupo 4: Perfis tubulares.

^b t corresponde à menor dimensão ou ao diâmetro da seção transversal da barra.

^c Barras redondas, quadradas e chatas.

^d A relação f_u/f_y não pode ser inferior a 1,18.

2.8.7 Projeto de peças sob Compressão

É comum encontrar peças comprimidas axialmente em partes de treliças, sistemas de travejamento e em pilares com contraventamento. As peças comprimidas podem estar sujeitos ao efeito da flambagem que depende diretamente da esbeltez da peça (PFEIL & PFEIL, 2009). Nas estruturas espaciais deve ser calculado o índice de esbeltez limite da peça a partir do módulo de elasticidade e da tensão de escoamento.

$$\lambda_{lim} = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (13)$$

Deve-se calcular a compressão permitida pelo processo de cálculo estabelecido pela NBR 8800 (2008). Usa-se a formula seguinte para calcular a força axial de compressão resistente de cálculo em seu estado limite último.

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi Q A_g f_y}{\gamma_{a1}} \quad (14)$$

Onde:

χ é o fator de redução associado à resistência à compressão:

- Para $\lambda_0 \leq 1,5$: $\chi = 0,658 \lambda_0^2$

- Para $\lambda_0 > 1,5$: $\chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{Q A_g f_y}{N_e}} \quad (15)$$

Pode-se ainda usar a tabela como mostra a Figura 30 a seguir.

Figura 30 - Tabela 4 da NBR 8800

Valor de χ em função do índice de esbeltez λ_0

λ_0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_0
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,0
0,1	0,996	0,995	0,994	0,993	0,992	0,991	0,989	0,988	0,987	0,985	0,1
0,2	0,983	0,982	0,980	0,978	0,976	0,974	0,972	0,970	0,968	0,965	0,2
0,3	0,963	0,961	0,958	0,955	0,953	0,950	0,947	0,944	0,941	0,938	0,3
0,4	0,935	0,932	0,929	0,926	0,922	0,919	0,915	0,912	0,908	0,904	0,4
0,5	0,901	0,897	0,893	0,889	0,885	0,881	0,877	0,873	0,869	0,864	0,5
0,6	0,860	0,856	0,851	0,847	0,842	0,838	0,833	0,829	0,824	0,819	0,6
0,7	0,815	0,810	0,805	0,800	0,795	0,790	0,785	0,780	0,775	0,770	0,7
0,8	0,765	0,760	0,755	0,750	0,744	0,739	0,734	0,728	0,723	0,718	0,8
0,9	0,712	0,707	0,702	0,696	0,691	0,685	0,680	0,674	0,669	0,664	0,9
1,0	0,658	0,652	0,647	0,641	0,636	0,630	0,625	0,619	0,614	0,608	1,0
1,1	0,603	0,597	0,592	0,586	0,580	0,575	0,569	0,564	0,558	0,553	1,1
1,2	0,547	0,542	0,536	0,531	0,525	0,520	0,515	0,509	0,504	0,498	1,2
1,3	0,493	0,488	0,482	0,477	0,472	0,466	0,461	0,456	0,451	0,445	1,3
1,4	0,440	0,435	0,430	0,425	0,420	0,415	0,410	0,405	0,400	0,395	1,4
1,5	0,390	0,385	0,380	0,375	0,370	0,365	0,360	0,356	0,351	0,347	1,5
1,6	0,343	0,338	0,334	0,330	0,326	0,322	0,318	0,314	0,311	0,307	1,6
1,7	0,303	0,300	0,296	0,293	0,290	0,286	0,283	0,280	0,277	0,274	1,7
1,8	0,271	0,268	0,265	0,262	0,259	0,256	0,253	0,251	0,248	0,246	1,8
1,9	0,243	0,240	0,238	0,235	0,233	0,231	0,228	0,226	0,224	0,221	1,9
2,0	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	0,209	0,207	0,205	0,203	0,201	2,0
2,1	0,199	0,197	0,195	0,193	0,192	0,190	0,188	0,186	0,185	0,183	2,1
2,2	0,181	0,180	0,178	0,176	0,175	0,173	0,172	0,170	0,169	0,167	2,2
2,3	0,166	0,164	0,163	0,162	0,160	0,159	0,157	0,156	0,155	0,154	2,3
2,4	0,152	0,151	0,150	0,149	0,147	0,146	0,145	0,144	0,143	0,141	2,4
2,5	0,140	0,139	0,138	0,137	0,136	0,135	0,134	0,133	0,132	0,131	2,5
2,6	0,130	0,129	0,128	0,127	0,126	0,125	0,124	0,123	0,122	0,121	2,6
2,7	0,120	0,119	0,119	0,118	0,117	0,116	0,115	0,114	0,113	0,113	2,7
2,8	0,112	0,111	0,110	0,110	0,109	0,108	0,107	0,106	0,106	0,105	2,8
2,9	0,104	0,104	0,103	0,102	0,101	0,101	0,100	0,099	0,099	0,098	2,9
3,0	0,097	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0

Fonte: NBR 8800, 2008

Q é um fator de redução de flambagem que em seções circulares possui os seguintes valores:

$$Q = 1, \text{ para } \frac{D}{t} \leq 0,11 \frac{E}{f_y}$$

$$Q = \frac{0,038}{D/t} \cdot \frac{E}{f_y} + \frac{2}{3}, \text{ para } 0,11 \frac{E}{f_y} < \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y}$$

Onde:

D é o diâmetro da peça

t é a espessura

A_g é a área bruta da seção

f_y é a tensão de escoamento da peça

N_e depende do tipo de perfil (simétricos, mono-simétricos ou assimétricos), no caso de uma barra circular usamos perfil simétrico.

Flambagem por flexão para os eixos x e y:

$$N_e = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (16)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade do aço

I é o momento de inércia

KL é o comprimento de flambagem por flexão

A Figura 31, mostra a tabela de coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados.

Figura 31 - Tabela E.1 da NBR 8800

Coeficiente de flambagem por flexão de elementos isolados						
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
A linha tracejada indica a linha elástica de flambagem						
Valores teóricos de K_x ou K_y	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0
Código para condição de apoio	 Rotação e translação impedidas Rotação livre, translação impedida Rotação impedida, translação livre Rotação e translação livres					

Fonte: NBR 8800, 2008

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os recursos utilizados para o desenvolvimento e análise de uma estrutura espacial, seguindo os parâmetros geométricos contidos na dissertação de Magalhães (1996).

3.1 Modelagem

Foram utilizados softwares com licença estudantil para fazer o desenvolvimento do projeto arquitetônico da estrutura, bem como o desenvolvimento do cálculo estrutural por meio da integração do sistema BIM. Esse projeto foi realizado com o uso dos softwares AutoCAD 2017, Revit 2021 e Robot Structural Analysis Professional 2021 da Autodesk que contemplam o conceito BIM, por meio da licença estudantil ID da Autodesk: brunobass2RZXQAQ.

3.2 Desenvolvimento do projeto

Foi definido um projeto arquitetônico inicial baseado no modelo contido na dissertação Magalhães (1996), que serviu como base para desenvolver o projeto estrutural a partir das informações de cálculo estabelecidas na dissertação.

Foram utilizados os dados, contidos na dissertação, como parâmetros iniciais com o objetivo de verificar os resultados fornecidos pelo software Robot, a fim de analisar os resultados e confiabilidade do software para o dimensionamento de estruturas espaciais produzidas no Brasil, uma vez que, é sabido que o Robot Structural Analysis Professional 2021 ainda não contempla, dentro de seus cálculos, as formulações da NBR 8800 (2008).

3.3 Dados do projeto

Segundo Magalhães (1996), os dados que são necessários para iniciar o projeto da cobertura tridimensional em estudo são: as seções das barras, bem como os comprimentos das mesmas. A Figura 32 mostra as barras principais a serem calculadas no banzo superior.

Figura 32 - Barras principais a serem calculadas no banzo superior

										1									
										2									
										3									
										4									
										5									
										6									
										7									
										8									
										9									
										10									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
									10	10									
									9										
									8										
									7										
									6										
									5										
									4										
									3										
									2										
									1										

Fonte: Magalhães, 1996

Da mesma forma, a Figura 33 mostra as barras principais a serem calculadas no banzo inferior, que provavelmente, serão as barras mais solicitadas.

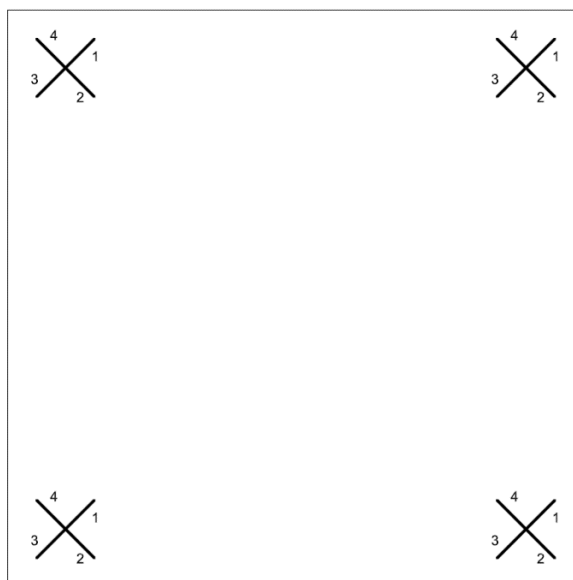
Figura 33 - Barras principais a serem calculadas no banzo inferior

										1	1								
										2	2								
										3	3								
										4	4								
										5	5								
										6	6								
										7	7								
										8	8								
										9	9								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
									10	10									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
									8	8									
									7	7									
									6	6									
									5	5									
									4	4									
									3	3									
									2	2									
									1	1									

Fonte: Magalhães, 1996

A Figura 34 mostra as barras auxiliares para apoio da estrutura espacial a serem calculadas.

Figura 34 - Barras auxiliares para apoio



Fonte: Magalhães, 1996

A Tabela 2 mostra um resumo da disposição das barras auxiliares, dos banzos superior e inferior da estrutura, seguido da seção das mesmas.

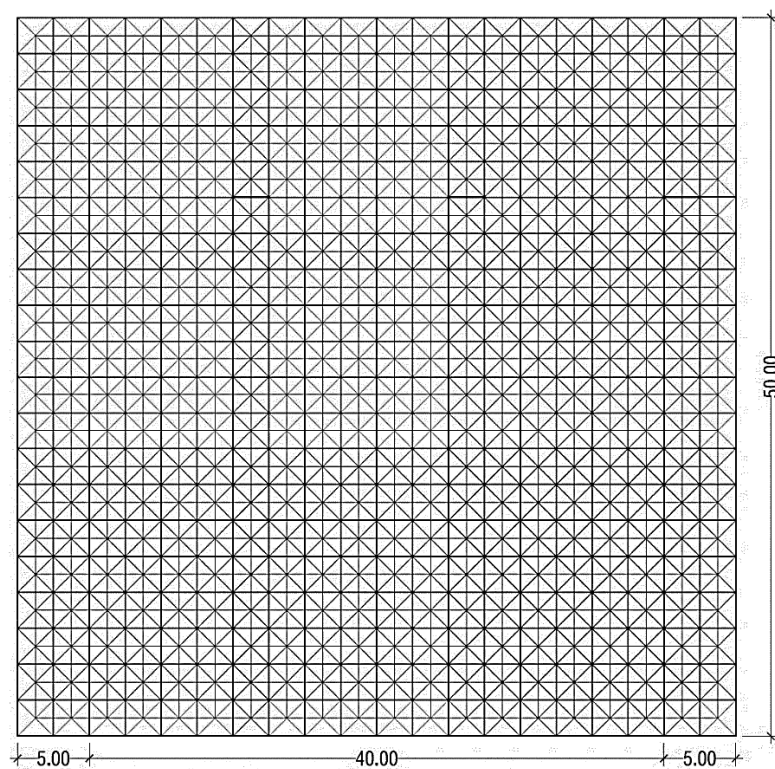
Tabela 2 - Resumo de barras

BANZO SUPERIOR	SEÇÃO	BANZO INFERIOR	SEÇÃO	BARRAS AUXILIARES	SEÇÃO
BS1	63,5 x 1,9	BI1	63,5 x 1,9	A1	254 x 4,76
BS2	63,5 x 1,9	BI2	63,5 x 1,9	A2	254 x 4,76
BS3	63,5 x 1,9	BI3	63,5 x 1,9	A3	254 x 4,76
BS4	63,5 x 1,9	BI4	76,1 x 1,9	A4	254 x 4,76
BS5	76,1 x 1,9	BI5	76,1 x 1,9		
BS6	76,1 x 1,9	BI6	88,9 x 2,66		
BS7	88,9 x 2,66	BI7	88,9 x 2,66		
BS8	88,9 x 2,66	BI8	88,9 x 2,66		
BS9	88,9 x 2,66	BI9	88,9 x 2,66		
BS10	88,9 x 2,66	BI10	88,9 x 2,66		

3.3.1 Planta Baixa

A Figura 35 mostra a planta baixa da estrutura estudada, possuindo dimensões de 50m x 50m, com uma altura de 6m (do piso ao banzo inferior) sem fechamento lateral, 4 pilares com afastamento de 5m das bordas. As barras dos banzos possuem um comprimento de 2,50m e a profundidade (altura entre o banzo superior e o banzo inferior) é de 2m, fazendo com que as diagonais fiquem com comprimento de 2,67m.

Figura 35 - Planta baixa



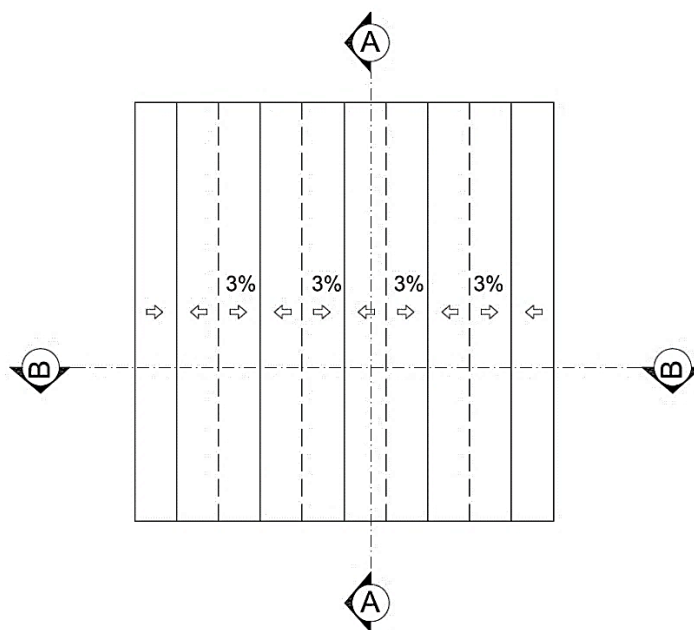
Fonte: Magalhães, 1996

Partindo dessa concepção adota por Magalhães (1996), foi possível desenvolver o projeto arquitetônico inicial utilizando o software Revit, como mostram as pranchas a seguir, na tentativa de mostrar os detalhes de cobertura, informações sobre as barras, detalhes de conexão e ligações entre barras e uma renderização para melhorar o entendimento da estrutura projetada.

3.3.2 Planta de Cobertura e Cortes

A Figura 36 mostra a planta de cobertura da estrutura expondo o valor da inclinação das telhas e o posicionamento junto com as vistas dos cortes AA e BB. É possível notar a presença de platibanda em todo o perímetro da estrutura, com altura de 2,40m.

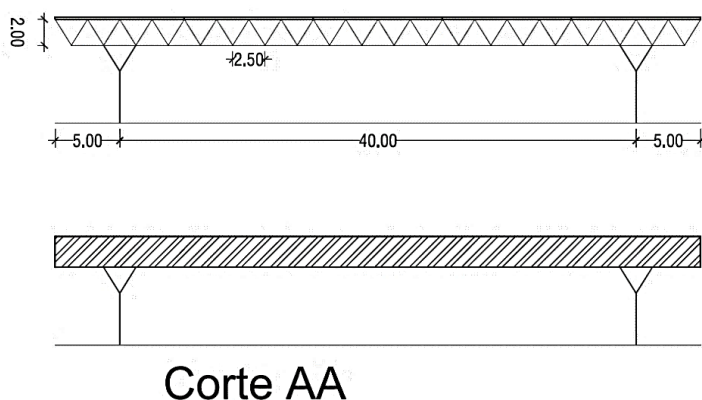
Figura 36 - Planta de Cobertura (Magalhães, 1996)



Fonte: Magalhães, 1996

A Figura 37 mostra o corte AA da estrutura, expondo os detalhes de cobertura no sentido longitudinal da geratriz.

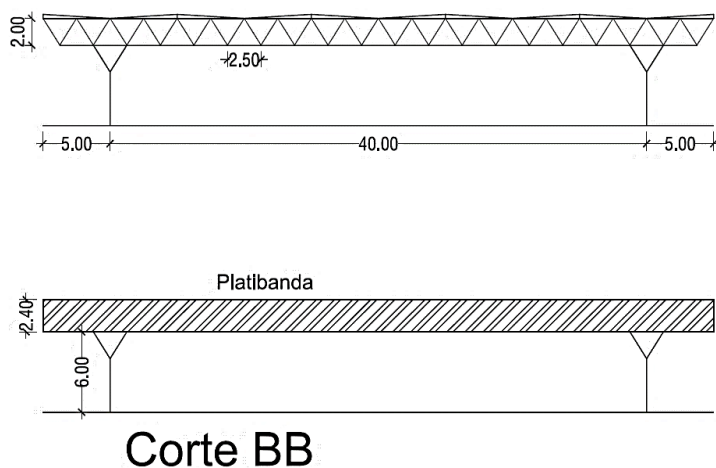
Figura 37 - Corte AA (Magalhães, 1996)



Fonte: Magalhães, 1996

A Figura 38 mostra o corte BB da estrutura expondo os detalhes de cobertura no sentido transversal da geratriz.

Figura 38 - Corte BB (Magalhães, 1996)



Fonte: Magalhães, 1996

3.3.3 Ações e Combinações

As ações aplicadas na estrutura:

- Ações Permanentes (MAGALHÃES, 1996)
 - a) Peso próprio da estrutura – 15,0 kgf/m². Porém, o peso próprio da estrutura é calculado automaticamente pelo software Robot.
 - b) Telhas de Aço – 15,0 kgf/m²
 - c) Sobrecarga Normativa – 25 kgf/m²
 - d) Platibanda – 15,0 kgf/m

O Robot consegue calcular, de forma direta, o peso próprio das peças sem a necessidade incluir manualmente. Para outras ações é necessário a inserção manual, como é o caso do Peso próprio das telhas, platibanda, sobrecarga e ações de vento. A Tabela 5 mostra as ações atuantes na estrutura.

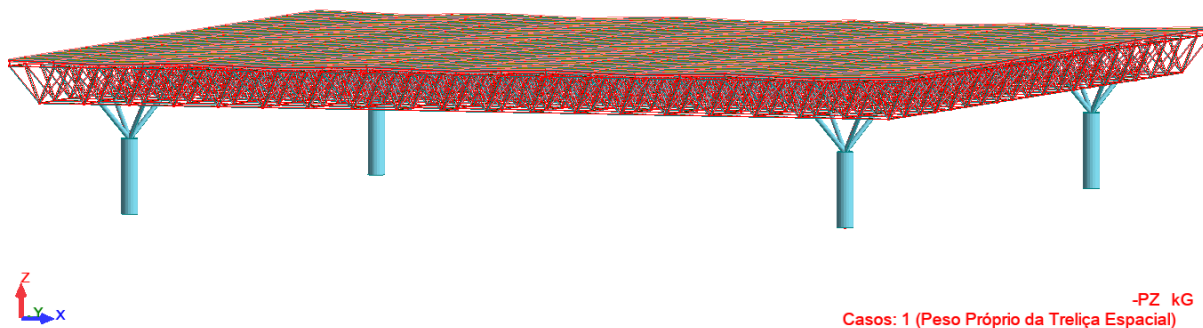
A aplicação dos carregamentos foi analisada em grupos de elementos, isto é, as barras foram divididas nos grupos de Banzo Superior, Banzo Inferior, Diagonais, Barras auxiliares e colunas, podendo ser verificado separadamente.

Tabela 3 - Ações

Caso	Legenda	Nome do caso
1	PP	Peso Próprio da Treliza Espacial
2	Pt	Peso Próprio das Telhas
3	Pplat.	Platibanda
4	Q	Sobrecarga Normativa
5	V0°	Vento - sucção
6	Combinação	COMB3 - $1,25.C_p + 1,5.Sc$
7	Combinação	COMB4 - $1.C_p + 1,4.Vento\ sucção$
8	Combinação - Referência	COMB1 - $1,4.C_p + 1,5.Sc$
9	Combinação - Referência	COMB2 - $0,9.C_p + 1,4.Vento\ sucção$

Das ações citadas, foram levadas em consideração apenas o carregamento das telhas e da platibanda, pois o software faz o cálculo de forma automática do peso próprio das barras, como mostrado na Figura 39.

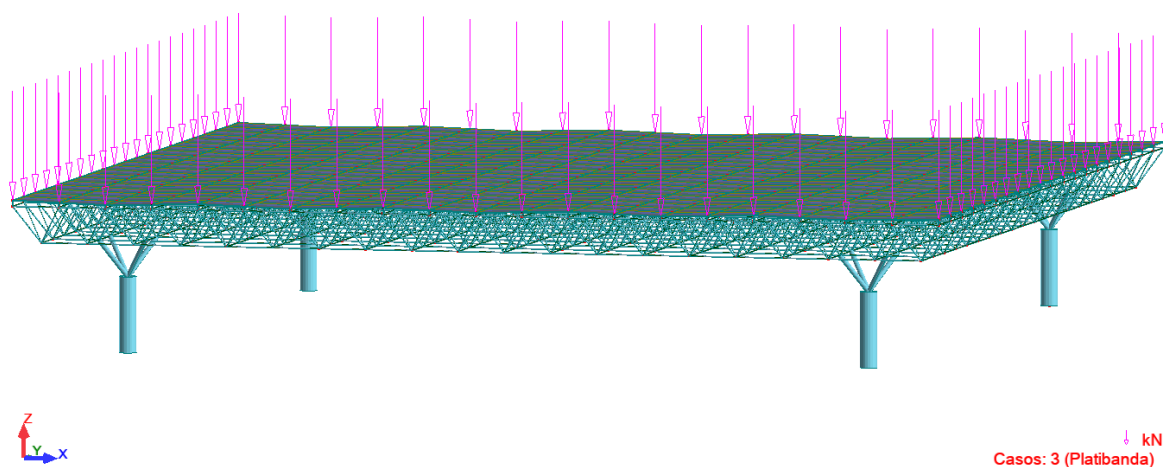
Figura 39 - Carga Permanente



Fonte: Autoria Própria, 2021

O carregamento da platibanda foi distribuído apenas nas bordas da estrutura e em seus nós, sendo que o carregamento de 0,15 kN/m, foi transformado em 0,375 kN e aplicado somente aos nós que ficam situados nas bordas da estrutura para evitar esforços de flexo compressão. A Figura 40 a seguir mostra a disposição do carregamento da platibanda.

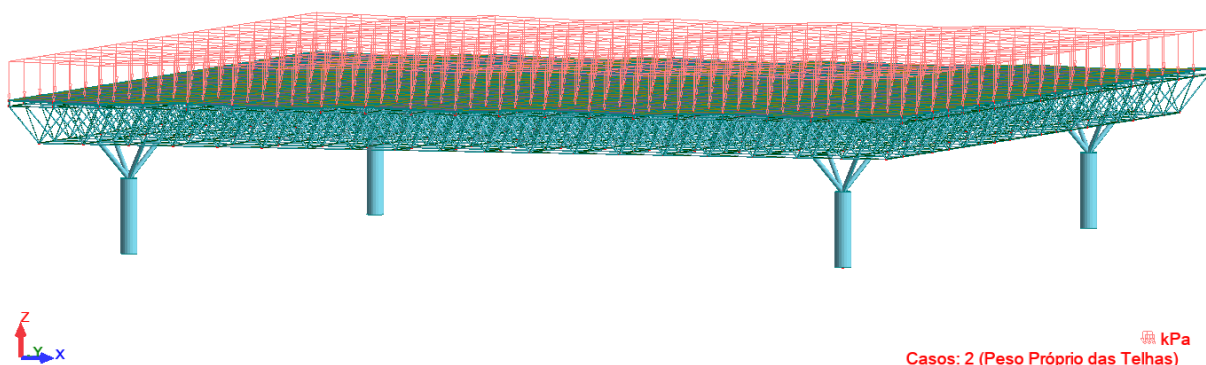
Figura 40 - Carregamento da Platibanda



Fonte: Autoria Própria, 2021

A Figura 41 mostra que o carregamento das telhas foi distribuído na direção da gravidade.

Figura 41 - Carregamento das Telhas



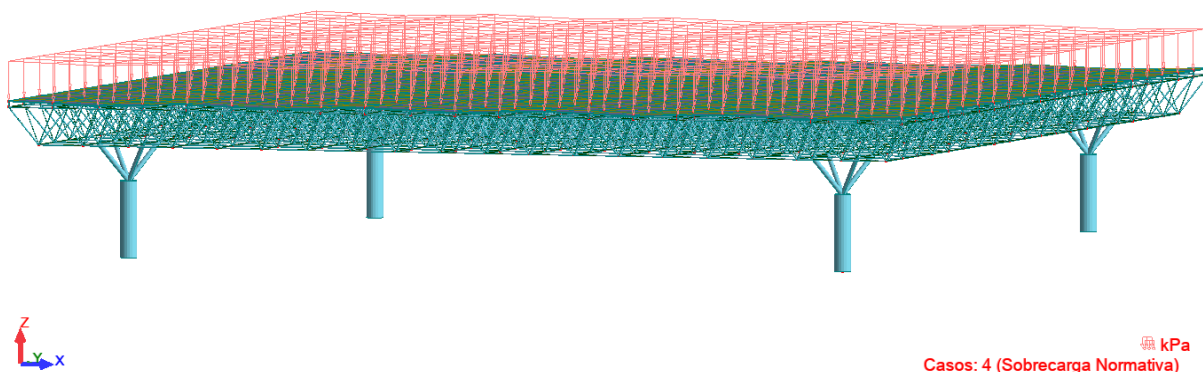
Fonte: Autoria Própria, 2021

- Sobrecarga Normativa

a) $25,0 \text{ kgf/m}^2$, segundo a NBR 8800

A NBR 8800 (2008), recomenda usar uma sobrecarga mínima de $0,25 \text{ kN/m}^2$, a norma ainda admite que esse valor engloba cargas de instalações elétricas e hidráulicas e pequenas peças fixadas na cobertura. Da mesma forma que o carregamento das telhas, esse carregamento foi distribuído em toda cobertura na direção da gravidade, como mostra a Figura 42.

Figura 42 - Sobrecarga Normativa



Fonte: Autoria Própria, 2021

- Vento (MAGALHÃES, 1996)
 - a) Velocidade básica - $V_0 = 40 \text{ m/s}$
 - b) Fator topográfico - $S_1 = 1,0$
 - c) Fator de rugosidade - $S_2 = 0,8$
 - d) Categoria IV, Classe B, $h = 8,0 \text{ m}$
 - e) Fator estatístico - $S_3 = 1,0$
 - f) Edificação comercial (alto fator de ocupação)
 - g) Velocidade característica $S_2 = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 = 32,0 \text{ m/s}$
 - h) Pressão de Obstrução - $q = 0,613 * V_k^2 = 628 \text{ N/m}^2 \approx 0,63 \text{ kN/m}^2$

- Coeficiente de forma

A estrutura não pode ser considerada como uma cobertura isolada, ainda que não possua paredes ou revestimentos como fechamento da estrutura, pois a NBR 6123 (1988), estabelece em seu item 8.2.3, que os coeficientes das tabelas 17 e 18 da norma, só serão aplicadas quando for obedecido o seguinte critério:

$$\begin{cases} 0,07 \leq tg\theta \leq 0,6 \\ h \geq 0,5l_2 \end{cases}$$

Onde:

- a) h é a altura entre o piso e a aresta horizontal mais baixa da cobertura
- b) l_2 é a profundidade do telhado

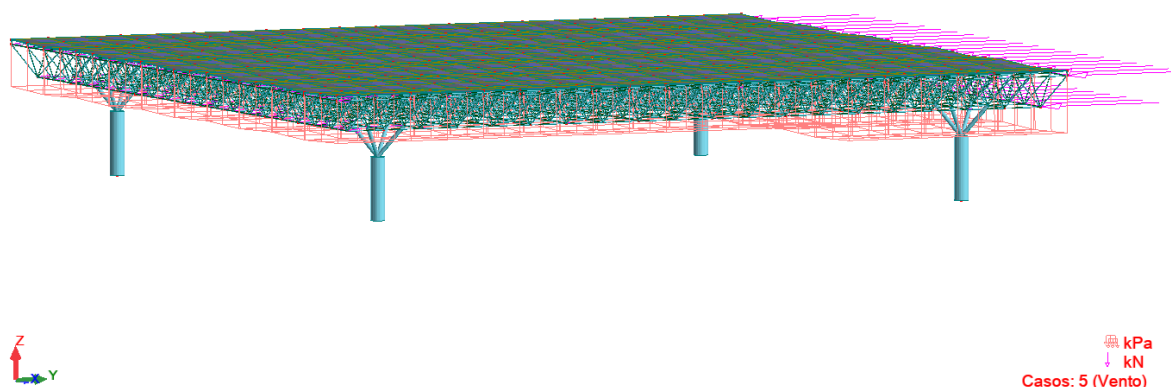
É mencionado no item 8.2.4 da NBR 6123 (1988), que, para os casos onde a altura h seja inferior ao limite estabelecido no item 8.2.3 ou em que as obstruções (platibanda) possam

ser colocadas junto a cobertura, esta estrutura deverá resistir a ação do vento na zona de obstrução, calculada para edificação fechada e de mesma cobertura, usando:

- a) $c_{pi} = +0,8$, para obstruções na borda de sotavento
- b) $c_{pi} = -0,3$, para obstruções na borda de barlavento
- c) $F_{at} = 0,05 q a b$, para vento paralelo a geratriz da cobertura

A Figura 43 mostra como foi realizada a disposição das cargas de vento aplicado no telhado, ficando posicionado perpendicularmente ao posicionamento das telhas.

Figura 43 - Representação das Cargas de Vento



Fonte: Autoria Própria, 2021

- Combinações

As combinações adotadas por Magalhães (1996), foram:

- a) Combinação 1

$$C1 = 1,4.Carga\ permanente + 1,5.sobrecarga$$

- b) Combinação 2

$$C2 = 0,9.Carga\ permanente + 1,4.Vento\ de\ sucção$$

Corrigindo para uma versão mais atual da NBR 8800 (2008), tem-se:

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{g1} \cdot F_G) + \gamma_{q1} \cdot F_{q1} + \sum_{i=1}^n (\gamma_{q2} \cdot \psi_0 \cdot F_q)$$

a) Combinação 1 (Figura 44):

$$C1 = 1,25. \textit{Carga permanente} + 1,5. \textit{sobrecarga}$$

b) Combinação 2 (Figura 45):

$$C2 = 1,00. \textit{Carga permanente} + 1,4. \textit{Vento de sucção}$$

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o software Robot e Revit, os resultados analíticos da NBR 8800 (2008).

4.1 Quantitativos de barras por grupo

Com o uso do software Robot foi possível definir grupos para as barras, fazendo com que a visualização e o processo de absorção de informação sejam maiores, independentemente do tamanho da estrutura. A Tabela 3 a seguir, mostra a quantidade de barras que está sendo usada em cada um dos grupos, bem como suas seções.

Tabela 4 - Seção e quantidade das barras

Grupo	Seção das Barras				
	63,5 x 1,9	76,1 x 1,9	88,9 x 2,66	254 x 4,76	900 x 19
Banzo Inferior	396	184	180	0	0
Banzo Superior	528	168	144	0	0
Diagonais	924	352	324	0	0
Barras de Apoio	0	0	0	16	0
Colunas	0	0	0	0	4

4.2 Comprimento e Peso dos Elementos da Estrutura

O Robot consegue filtrar, além das informações geométricas, informações referentes as características físicas dos elementos, como mostrado na Tabela 4, de tal forma a conduzir o projeto para uma avaliação mais precisa ao levar em consideração o peso das barras, de forma unitária e de forma geral. Esse levantamento de quantitativo é fundamental para serviços posteriores, tal como a pintura da estrutura.

Tabela 5 - Comprimento e Peso

ASTM	Número	Comprimento (m)	Peso Unitário (kg/m)	Peso da Barra (kg)	Peso Total (kg)	Área de Pintura (m²)
63,5 x 1,9	1848	4777,08	2,94	14060,34	14060	952,99
76,1 x 1,9	704	1819,84	3,55	6451,93	6452	435,08
88,9 x 2,66	648	1675,08	5,77	9663,29	9663	467,83
254 x 4,76	16	42,72	29,83	1274,54	1275	34,09
900 x 19	4	16	420,95	6735,17	6735	45,24
Total:	3220	8330,72	463,04	38185,27	38185	1935,23

4.3 Esforço de Tração e Compressão nas Barras Principais

A Tabela 6 mostra as ações atuantes nas barras principais do banzo superior da estrutura. As barras seguem a sequência da Figura 32. E cada caso mostra o tipo de ação atuante na barra, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 6 - Esforços nas principais nas barras do banzo superior

Barras	Seção	Esforços							Referência	
		caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5	caso 6	caso 7	caso 8	caso 9
BS1	63,5 x 1,9	-0,23	-0,29	-0,23	-0,49	1,48	-1,67	-0,55	-2	5,3
BS2	63,5 x 1,9	1,69	1,33	-0,56	2,22	-6,76	6,42	-8,66	6,3	-7,6
BS3	63,5 x 1,9	4,64	3,67	-0,8	6,12	-18,52	18,56	-19,81	19,3	-20,6
BS4	63,5 x 1,9	7,89	6,04	-0,98	10,07	-30,35	31,29	-30,67	33,9	-35
BS5	76,1 x 1,9	10,97	8,06	-1,11	13,43	-40,23	42,54	-39,4	47,7	-48,6
BS6	76,1 x 1,9	13,63	9,52	-1,2	15,86	-47,19	51,22	-45,06	60,1	-60,6
BS7	88,9 x 2,66	16,13	10,89	-1,26	18,15	-53,62	59,44	-50,04	70,9	-71
BS8	88,9 x 2,66	18,28	12,18	-1,28	20,3	-59,54	66,92	-54,64	80	-79,7
BS9	88,9 x 2,66	19,93	13,24	-1,28	22,07	-64,32	72,97	-58,24	86	-86
BS10	88,9 x 2,66	20,84	13,86	-1,28	23,09	-66,84	76,4	-59,77	90,1	-89,4

(-) Tração

(+) Compressão

A Tabela 7 mostra as ações atuantes nas barras principais do banzo inferior da estrutura. As barras seguem a sequência da Figura 33. E cada caso mostra o tipo de ação atuante na barra, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 7 Esforços nas principais nas barras do banzo Inferior

Barras	Seção	Esforços							Referência	
		caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5	caso 6	caso 7	caso 8	caso 9
BI1	63,5 x 1,9	-1,85	-1,7	0,35	-2,84	8,62	-8,26	8,06	-8,6	13,5
BI2	63,5 x 1,9	-4,58	-3,96	0,62	-6,61	20,01	-19,81	18,11	-20,7	26,6
BI3	63,5 x 1,9	-7,41	-6,07	0,84	-10,12	30,54	-31	26,94	-33	39,1
BI4	76,1 x 1,9	-12,21	-8,86	1,13	-14,76	43,88	-47,06	36,51	-44,1	49,3
BI5	76,1 x 1,9	-14,06	-9,59	1,22	-15,98	47,01	-52,02	37,78	-54,4	57,6
BI6	88,9 x 2,66	-15,93	-10,52	1,26	-17,53	51,05	-57,79	39,98	-64	65
BI7	88,9 x 2,66	-18,77	-12,23	1,28	-20,39	58,36	-67,74	44,55	-72,5	73,4
BI8	88,9 x 2,66	-19,19	-12,51	1,28	-20,86	59,18	-69,32	44,82	-79,5	80,3
BI9	88,9 x 2,66	-9,94	-7,67	1,01	-12,79	38,33	-39,94	32,9	-84,1	84,9
BI10	88,9 x 2,66	-17,6	-11,49	1,27	-19,15	55,27	-63,49	42,61	-85,7	86,5

(-) Tração

(+) Compressão

A Tabela 8 mostra as ações atuantes nas barras auxiliares da estrutura. As barras seguem a sequência da Figura 34. E cada caso mostra o tipo de ação atuante na barra, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 8 - Esforços nas principais nas barras auxiliares

Barras	Seção	Esforços							Referência	
		caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5	caso 6	caso 7	caso 8	caso 9
A1	254 x 4,76	28,07	28,53	3,67	47,55	-212	145,92	-222,22	-284,7	-243,1
A2	254 x 4,76	28,1	28,53	3,67	47,55	-142,9	145,97	-125,45	164,9	-146,4
A3	254 x 4,76	-60,09	-56,76	-1,09	-94,6	323,42	-289,3	305,36	-	346,64
A4	254 x 4,76	138,53	124,89	3,62	208,14	-715	645,27	-668	690,4	-761,3
(-) Tração		(+) Compressão								

A Tabela 9 mostra as ações atuantes nas colunas de acordo com a Tabela 5. Vale lembrar que o software Robot considera a tração como negativa (-) e a compressão como positiva (+).

Tabela 9 - Esforços nas colunas

Barras	Seção	Esforços							Referência	
		caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5	caso 6	caso 7	caso 8	caso 9
P1	900 x 19	118,49	93,79	7,4	156,32	-559,4	509,08	-529,16	551,1	-600,7
P2	900 x 19	118,49	93,79	7,4	156,32	-559,4	509,08	-529,16	551,1	-600,7
P3	900 x 19	118,49	93,79	7,4	156,32	-559,4	509,08	-529,16	551,1	-600,7
P4	900 x 19	118,49	93,79	7,4	156,32	-559,4	509,08	-529,16	551,1	-600,7
(-) Tração		(+) Compressão								

A Tabela 10 mostra os esforços resistentes de cálculos para todas as barras citadas anteriormente, evidenciando que todas as barras principais passam nas verificações de tração e compressão segundo a NBR 8800 (2008).

Vale frisar que os valores calculados de N_{trd} e N_{crd} , foram calculados de acordo com a NBR 8800 (2008), como mostram as formulas 4, 4.1 e 5.1. Os outros valores apresentados na Tabela 10, refere-se as resistências a tração e compressão segundo Magalhães (1996) e os dados fornecidos pelo software Robot de acordo com a norma ANSI/AISC 360 – 16.

Tabela 10 - Valores resistentes de cálculo em kN

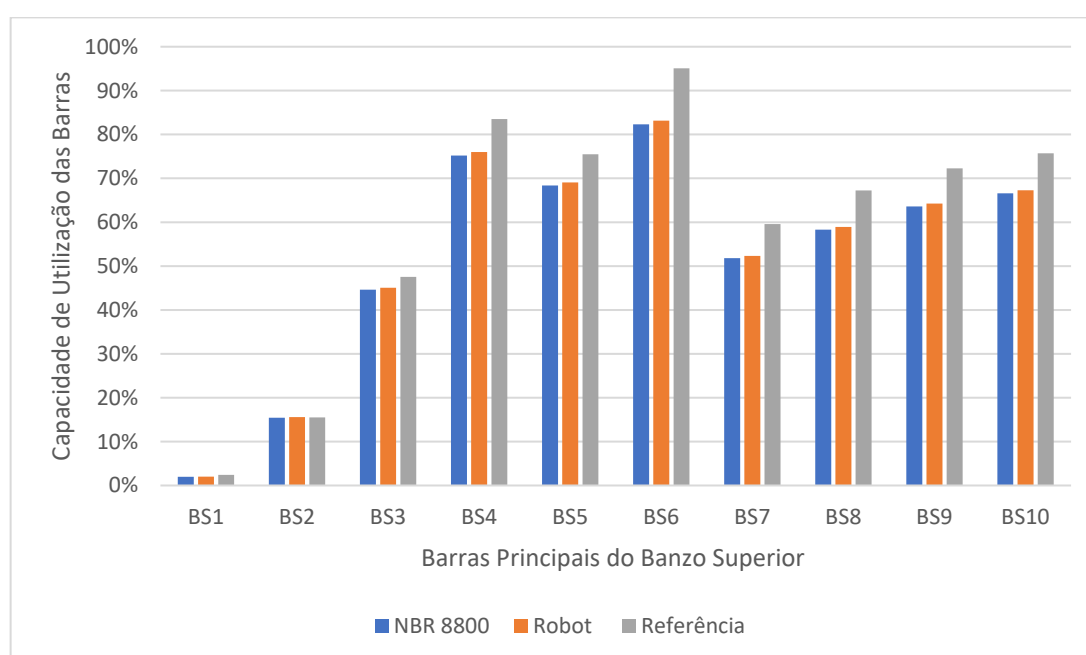
Perfil	NBR 8800 (2008)			Referência (NBR 8800 - 1986)		Robot (ANSI/AISC 360 -16)	
	Ntrd		Ncrd	Ntrd	Ncrd	Ntrd	Ncrd
	Escoamento da seção bruta	Ruptura da seção líquida					
63,5x1,9	83,64	149,93	41,60	82,7	40,6	82,73	41,17
76,1 x 1,9	100,68	180,48	62,22	99,6	63,2	99,65	61,6
88,9 x 2,66	163,86	293,74	114,76	162,1	119	162,15	113,58
254x4,76	847,05	1518,41	811,68	838,6	811,7	838,6	798,8
900x19	5975,91	10712,37	5965,72	11835	11575	11832,1	11729,16

4.4 Capacidade de Utilização das Barras

Os Gráficos 1 e 2 mostram uma comparação da capacidade de utilização das barras principais do banzo superior para as combinações dos casos 6, 7, 8 e 9. As barras apresentam capacidade de utilização distintas para cada caso apresentado, havendo em alguns casos, valores divergentes ao comparar os valores da NBR 8800 (2008), com a dissertação. Por outro lado, nota-se que não há muitas variações nos resultados obtidos ao comparar a NBR 8800 (2008), com os dados obtidos pelo Robot.

O Gráfico 1 mostra a relação entre a capacidade de utilização das barras nos casos 6 da NBR 8800 (2008) e dos resultados do Robot (ANSI/AISC 360 – 16) em comparação com o caso 8.

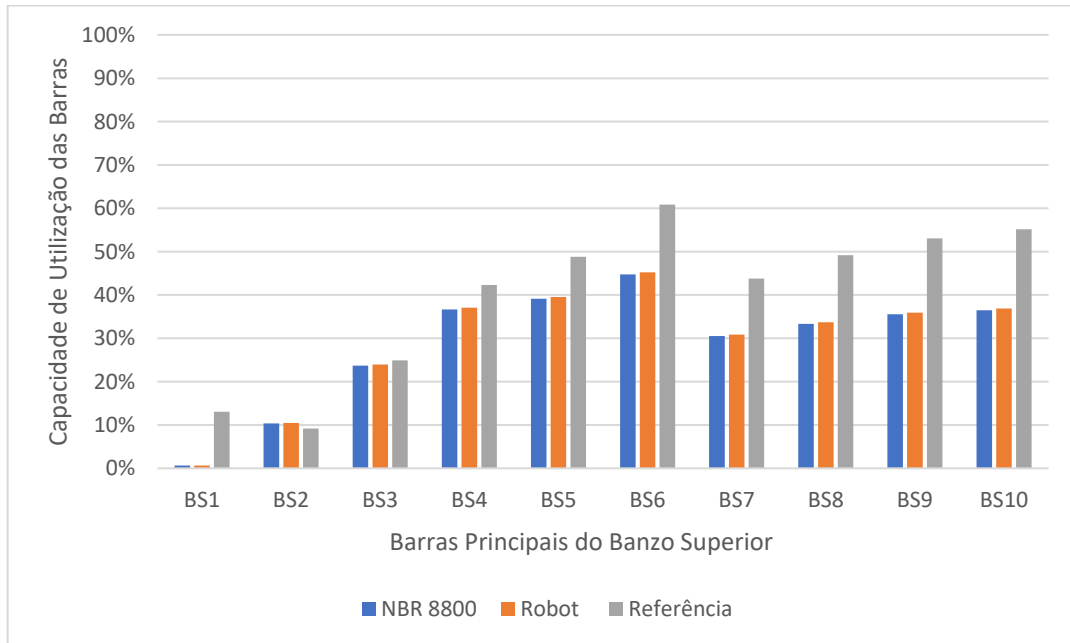
Gráfico 1 - Comparativo entre os casos 6 e 8 para o banzo superior



Fonte: Autoria Própria, 2021

O Gráfico 2 mostra a relação entre a capacidade de utilização das barras nos casos 7 da NBR 8800 (2008) e dos resultados do Robot (ANSI/AISC 360 – 16) em comparação com o caso 9.

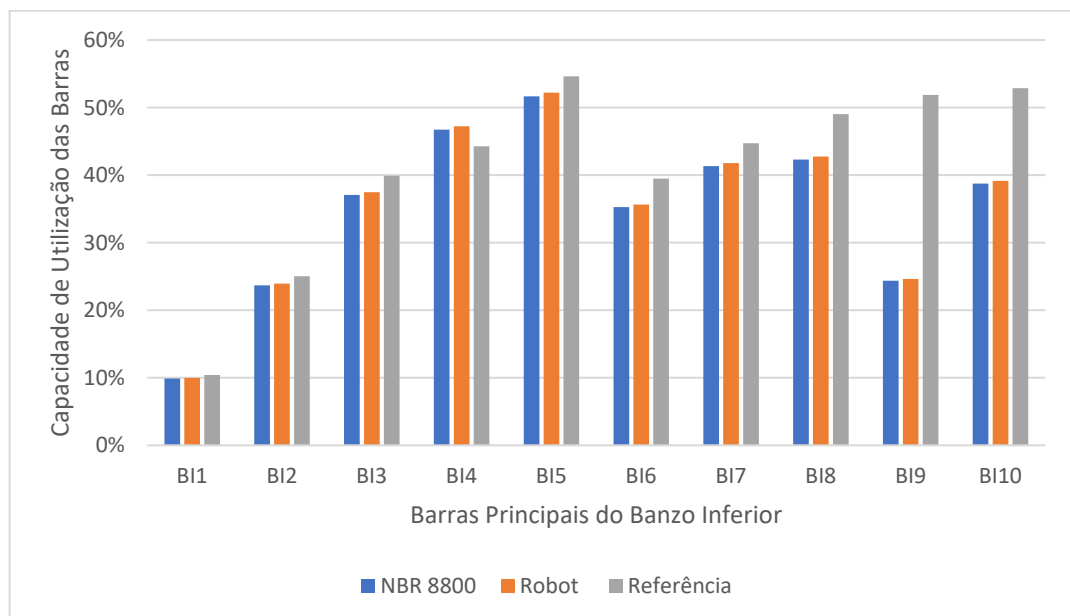
Gráfico 2 - Comparativo entre os casos 7 e 9 para o banzo superior



Fonte: Autoria Própria, 2021

O Gráfico 3 mostra a relação entre a capacidade de utilização das barras do banzo inferior nos casos 6 em comparação com o caso 8.

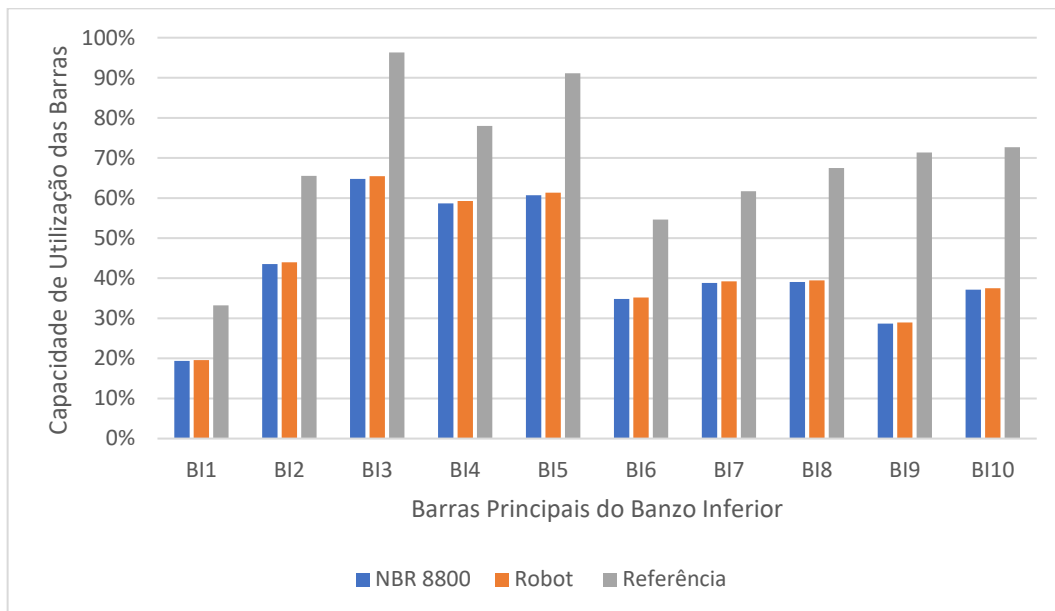
Gráfico 3 - Comparativo entre os casos 6 e 8 para o banzo inferior



Fonte: Autoria Própria, 2021

O Gráfico 4 mostra a relação entre a capacidade de utilização das barras nos casos 7 em comparação com o caso 9.

Gráfico 4 - Comparativo entre os casos 7 e 9 para o banzo inferior



Fonte: Autoria Própria, 2021

4.5 Esforço de Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Inferior

As tabelas a seguir, mostram os esforços solicitantes máximos (tração e compressão) das barras mais solicitadas do banzo inferior. Cada caso mostra o tipo de ação atuante na barra, de acordo com a Tabela 5.

Percebendo que há uma divergência na análise dos esforços de outras barras em comparação com as barras principais, de acordo com a Figura 33, assim como foram calculadas na Tabela 7 e foi verificado que em todos os casos as barras principais passam nos critérios da NBR 8800 (2008). Isso mostra que, segundo os dados obtidos pelo Robot, existem barras mais solicitadas a esforços de tração e compressão além das barras principais mostradas na Figura 33.

Tabela 11 - Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Inferior (caso 1 e 2)

Caso 1						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MÁX	49	0	0,07	0	0	0
Barra	339	702	280	1	1	1
Nó	799	1207	748	1289	1289	1289
Caso	1	1	1	1	1	1
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
Caso 1						
MÍN	-29,51	0	-0,07	0	0	0
Barra	279	462	131	1	1	1
Nó	747	943	595	1289	1289	1289
Caso	1	1	1	1	1	1
Seção	88,9 x 2,66	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
Caso 2						
MÁX	44,36	0	0	0	0	0
Barra	702	473	462	1	1	1
Nó	1207	946	943	1289	1289	1289
Caso	2	2	2	2	2	2
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
Caso 2						
MÍN	-24,67	0	0	0	0	0
Barra	406	696	292	1	1	1
Nó	887	1208	754	1289	1289	1289
Caso	2	2	2	2	2	2
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9

Nota-se que nos casos 1 e 2, as barras mais solicitadas com esforços de compressão são barras com seção 63,5 x 1,9 e que a barras mais solicitada com o esforço de tração, tem a seção 88,9 x 2,66. Percebe-se também, que, de acordo com a Tabela 11, todas as barras passam na verificação dos esforços

Tabela 12- Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Inferior (caso 3 e 4)

Caso 3						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MÁX	2,17	0	0	0	0	0
Barra	474	729	290	1	1	1
Nó	963	1257	732	1289	1289	1289
Caso	3	3	3	3	3	3
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
Caso 4						
MÍN	-1,64	0	0	0	0	0
Barra	595	395	591	1	1	1
Nó	1098	872	1095	1289	1289	1289
Caso	3	3	3	3	3	3
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
Caso 4						
MÁX	73,93	0	0	0	0	0
Barra	339	57	49	1	1	1
Nó	799	500	471	1289	1289	1289
Caso	4	4	4	4	4	4
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
MÍN	-41,12	0	0	0	0	0
Barra	406	8	103	1	1	1
Nó	887	1275	564	1289	1289	1289
Caso	4	4	4	4	4	4
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9

Nota-se que nos casos 3 e 4 as barras mais solicitadas com esforços de compressão são barras de seção 63,5 x 1,9, da mesma forma para as barras mais solicitadas a tração. Percebe-se também, que, de acordo com a Tabela 12, todas as barras que estão sofrendo maior solicitação, passam nas verificações da NBR 8800.

Tabela 13- Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Inferior (caso 5, 6 e 7)

Caso 5						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MÁX	151,26	0	0	0	0	0
Barra	595	462	737	1	1	1
Nó	1098	943	1202	1289	1289	1289
Caso	5	5	5	5	5	5
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	76,1 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
MÍN						
MÍN	-263,23	0	0	0	0	0
Barra	696	340	488	1	1	1
Nó	1208	779	990	1289	1289	1289
Caso	5	5	5	5	5	5
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	76,1 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
Caso 6						
MÁX	229,65	0	0,09	0	0	0
Barra	339	702	640	1	1	1
Nó	799	1207	1157	1289	1289	1289
Caso	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
MÍN						
MÍN	-126,94	0	-0,09	0	0	0
Barra	406	696	614	1	1	1
Nó	887	1208	1128	1289	1289	1289
Caso	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
Caso 7						
MÁX	159,56	0	0,07	0	0	0
Barra	595	462	524	1	1	1
Nó	1098	943	1008	1289	1289	1289
Caso	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9
MÍN						
MÍN	-273,52	0	-0,07	0	0	0
Barra	696	340	482	1	1	1
Nó	1208	779	988	1289	1289	1289
Caso	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9

Percebe-se que nos casos 5, 6 e 7, as barras mais solicitadas com esforços de compressão são da seção 63,5 x 1,9, da mesma forma para as barras mais solicitadas a tração. nota-se

também, que, de acordo com a Tabela 13, nenhuma das barras atendem aos critérios da NBR 8800.

4.6 Esforço de Tração e Compressão Máximos e Mínimos do Banzo Superior

As tabelas a seguir, mostram os esforços máximos e mínimos das barras mais solicitadas do banzo superior. Cada caso mostra o tipo de ação atuante na barra, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 14- Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Superior (caso 1 e 2)

Caso 1						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MÁX	36,14	0	0,07	0	0	0
Barra	978	1035	908	762	762	762
Nó	70	80	36	275	275	275
Caso	1	1	1	1	1	1
Seção	88,9 x 2,66	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
MÍN	-30,76	0	-0,07	0	0	0
Barra	1067	1117	1426	762	762	762
Nó	131	168	324	275	275	275
Caso	1	1	1	1	1	1
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
Caso 2						
MÁX	31,77	0	0	0	0	0
Barra	1136	1000	1041	762	762	762
Nó	184	92	106	275	275	275
Caso	2	2	2	2	2	2
Seção	63,5 x 1,9	76,1 x 1,9	76,1 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
MÍN	-28,19	0	0	0	0	0
Barra	1542	1223	1498	762	762	762
Nó	404	234	382	275	275	275
Caso	2	2	2	2	2	2
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66

Nota-se que nos casos 1 e 2, as barras mais solicitadas do banzo superior, com esforços de compressão, é da seção 88,9 x 2,66 e que a barras mais solicitada com o esforço de tração, tem a seção 63,5 x 1,9. Percebe-se também, que, de acordo com a Tabela 14, todas as barras passam na verificação dos esforços.

Tabela 15- Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Superior (caso 3, 4 e 5)

Caso 3						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MÁX	1,66	0	0	0	0	0
Barra	1423	1532	816	762	762	762
Nó	334	403	364	275	275	275
Caso	3	3	3	3	3	3
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
Caso 4						
MÍN	-1,81	0	0	0	0	0
Barra	1229	1328	1432	762	762	762
Nó	238	217	167	275	275	275
Caso	3	3	3	3	3	3
Seção	63,5 x 1,9	76,1 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
Caso 5						
MÁX	52,95	0	0	0	0	0
Barra	1134	1316	1188	762	762	762
Nó	183	278	42	275	275	275
Caso	4	4	4	4	4	4
Seção	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	76,1 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
MÍN	-46,98	0	0	0	0	0
Barra	1055	1039	1578	762	762	762
Nó	125	91	143	275	275	275
Caso	4	4	4	4	4	4
Seção	63,5 x 1,9	76,1 x 1,9	76,1 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
Caso 5						
MÁX	162,81	0	0	0	0	0
Barra	1541	1223	1236	762	762	762
Nó	407	234	43	275	275	275
Caso	5	5	5	5	5	5
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
MÍN	-196,42	0	0	0	0	0
Barra	1401	1462	1182	762	762	762
Nó	318	351	208	275	275	275
Caso	5	5	5	5	5	5
Seção	63,5 x 1,9	76,1 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66

Nota-se que nos casos 3, 4 e 5, as barras mais solicitadas com esforços de compressão são da seção 63,5 x 1,9, da mesma forma para as barras mais solicitadas a tração. Percebe-se

também, que, de acordo com a Tabela 15, todas as barras atendem aos critérios da NBR 8800, com exceção das barras 1401 e 1541 do caso 5.

Tabela 16- Tração e Compressão Máximas e Mínimas do Banzo Superior (caso 6 e 7)

Caso 6						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MÁX	163,75	0	0,09	0	0	0
Barra	1136	1532	908	762	762	762
Nó	184	403	36	275	275	275
Caso	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
MÍN	-146,11	0	-0,09	0	0	0
Barra	1067	1253	1425	762	762	762
Nó	131	242	322	275	275	275
Caso	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)	6 (C)
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
Caso 7						
MÁX	167,42	0	0,07	0	0	0
Barra	1541	1223	1236	762	762	762
Nó	407	234	43	275	275	275
Caso	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)
Seção	63,5 x 1,9	63,5 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66
MÍN	-207,54	0	-0,07	0	0	0
Barra	1401	1462	1425	762	762	762
Nó	318	351	322	275	275	275
Caso	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)	7 (C)
Seção	63,5 x 1,9	76,1 x 1,9	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66	88,9 x 2,66

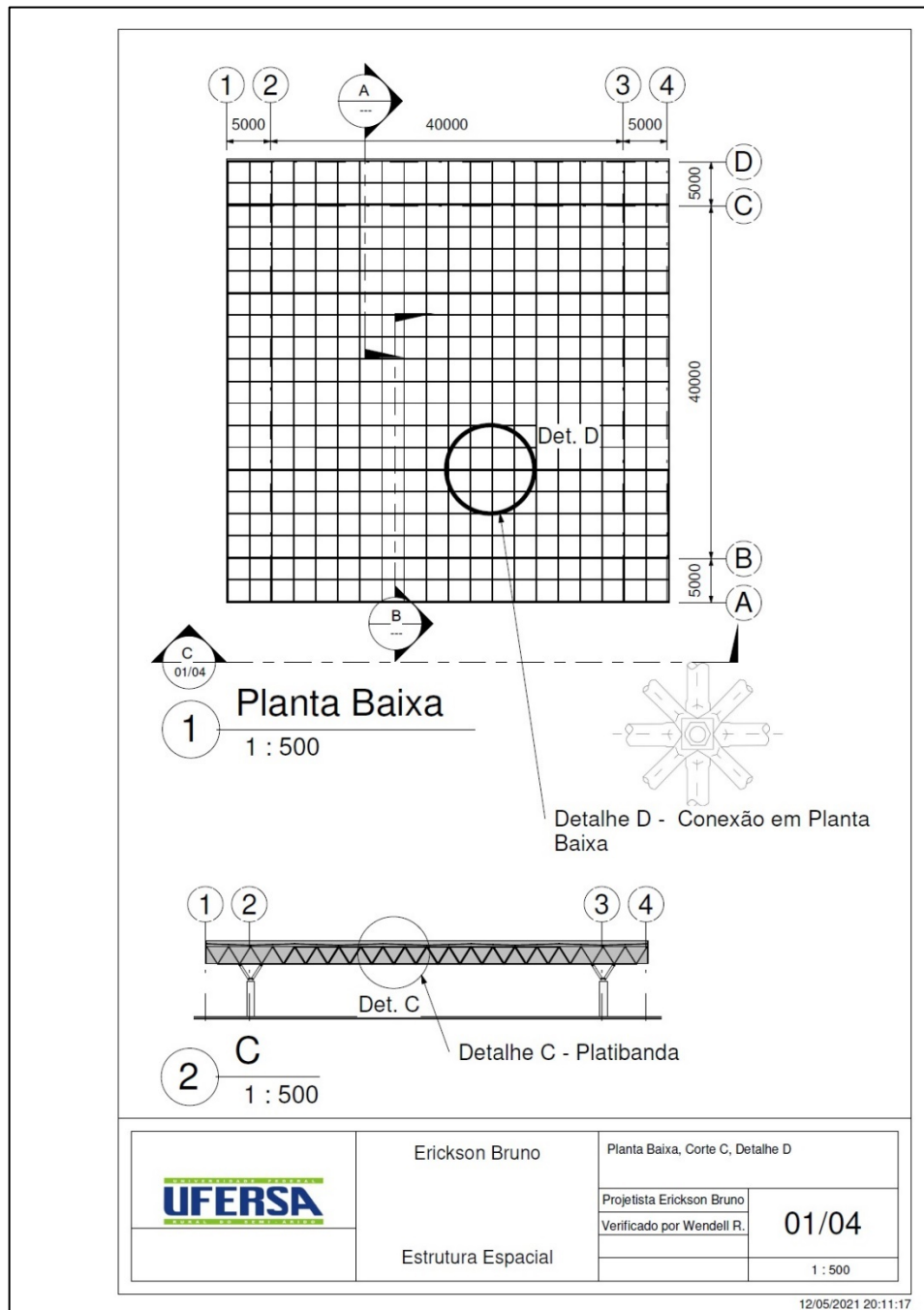
Nota-se que nos casos 6 e 7 as barras mais solicitadas do banzo superior, com esforços de compressão, são da seção 63,5 x 1,9, da mesma forma para as barras mais solicitadas a tração. Percebe-se também, de acordo com a Tabela 16, nenhuma das barras atendem aos critérios da NBR 8800 nos casos citados.

No banzo superior, existe uma divergência na análise dos esforços de outras barras em comparação com as barras principais. Isso mostra que, segundo as informações obtidas pelo software Robot, existem barras mais solicitadas além das barras principais.

4.7 Resultado do Processo de Importação

A Figura 44 mostra uma prancha com o modelo de planta baixa obtido a partir do processo de importação do projeto realizado no software Robot para o Revit.

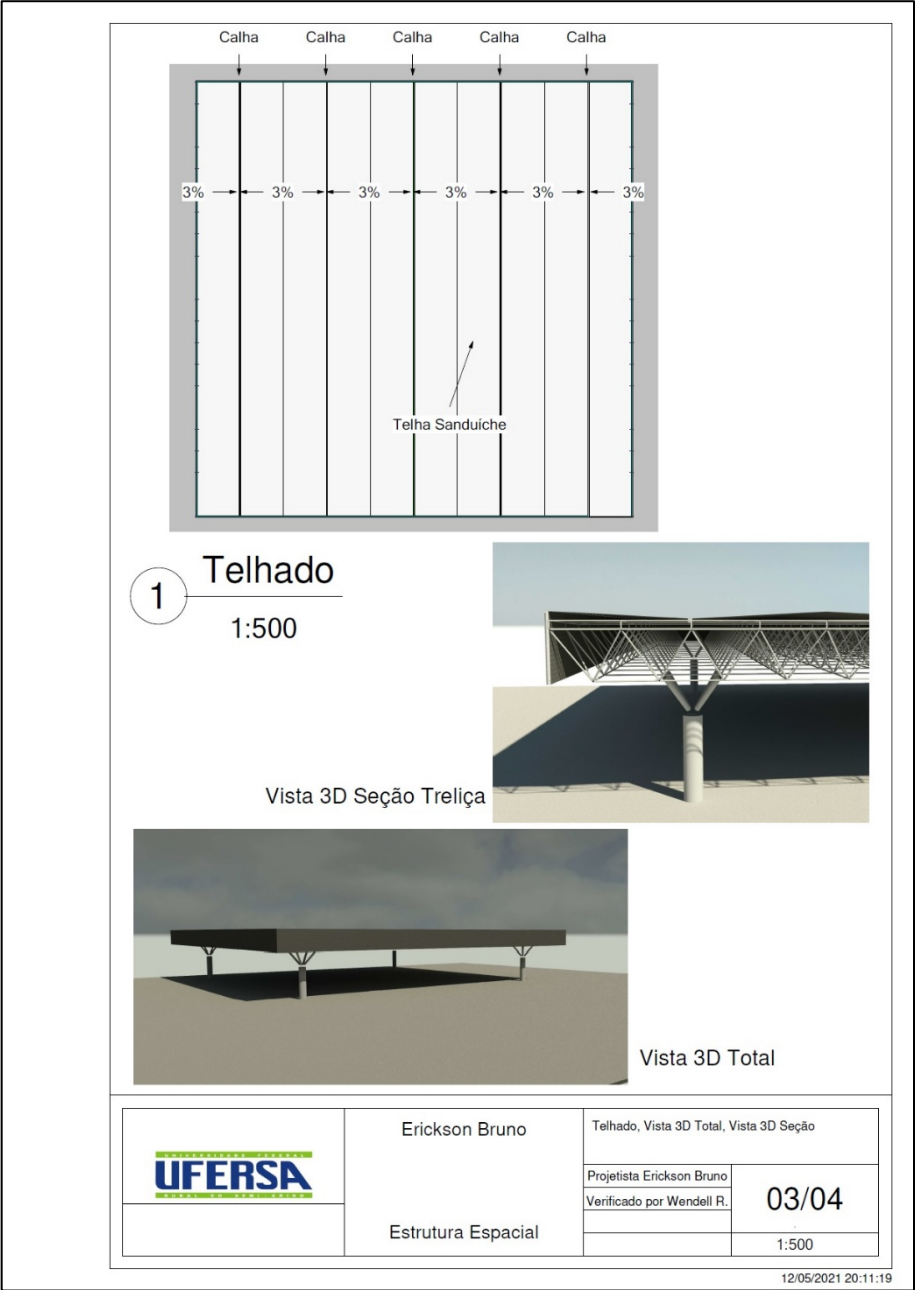
Figura 44 - Prancha 1/4 - planta baixa e detalhes



Fonte: Autoria Própria, 2021

A Figura 46 mostra a prancha 3/4, que apresenta as vistas de telhado com os detalhes de inclinação, o tipo de telha e vistas isométricas renderizadas pelo Revit.

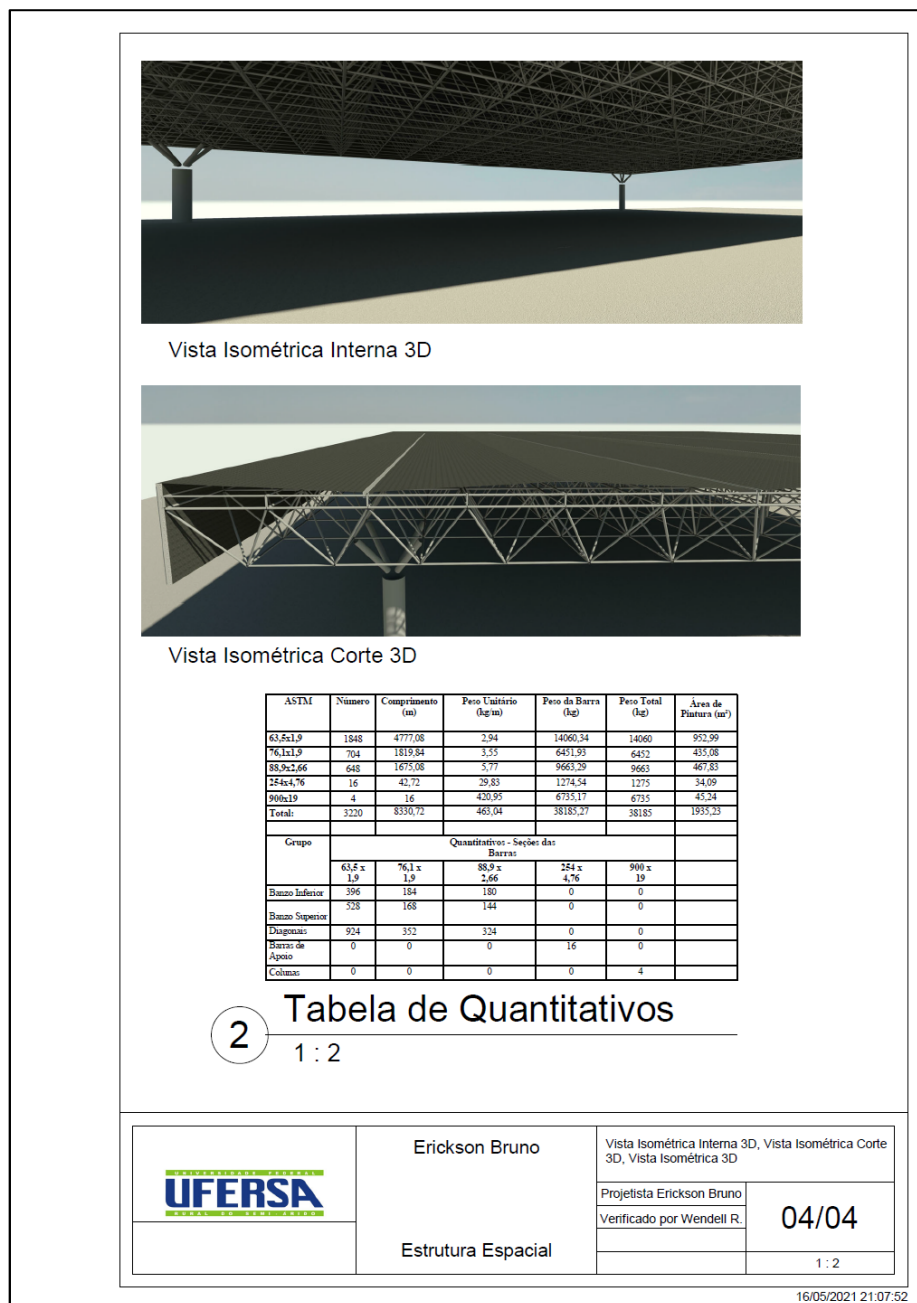
Figura 46 - Prancha 3/4 - Cobertura e vista 3D



Fonte: Autoria Própria, 2021

A Figura 47 mostra a prancha 4/4, que apresenta detalhes isométricos renderizados e uma tabela de quantitativos de barras importada do Robot.

Figura 47 - Prancha 4/4 - Vistas isométricas e quantitativos



Fonte: Autoria Própria, 2021

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do lançamento e dimensionamento da estrutura espacial no Software Robot Structural Analysis foi possível obter, com precisão, os valores dos esforços de tração e compressão atuante na estrutura espacial. Foi possível extrair os resultados das demais barras, e não somente das barras principais. A partir desses valores, percebe-se que existem resultados que não passam nas verificações de tração e compressão, sendo que, esses resultados não foram exibidos na dissertação do estudo de caso. Percebe-se que essas demais barras se comportam diferente do esperado, pois algumas barras sofrem carregamentos superior ao que é previsto. Foi observado que o software Robot tem um número limitado de tipos de conexões de barras que possam contribuir para o cálculo da estrutura espacial.

Os resultados mostram que existem poucas divergências com os resultados obtidos pelo software Robot, que utiliza a norma ANSI/AISC 360 – 16, e os critérios da NBR 8800 (2008). Porém, ao comparar os valores do estudo de caso, que utiliza a NBR 8800 (1986), verifica-se que há uma maior divergência nas combinações que envolve carga de vento.

O desenvolvimento do projeto realizado no Revit sofreu alterações instantâneas no processo de análise estrutural, em função do vínculo que o Revit possui junto ao Robot. Essa integração do conceito BIM acelerou o processo de elaboração das pranchas de projeto, pois esse desenvolvimento aconteceu paralelamente a análise estrutural, possibilitando o uso de recursos gráficos de renderização e acompanhado de tabelas automáticas.

REFERÊNCIAS

ABCEM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA (Brasil). Manual Técnico - Telhas de Aço: Cbca, 2009. 36 p.

AGUIAR, Ludimar Lima de. PROJETO E DIMENSIONAMENTO AUTOMÁTICO DE TRELIÇAS ESPACIAIS METÁLICAS. 2002. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2019. 60 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 1988. 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. 1 ed. São Paulo: Abnt, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 237 p.

AUTODESK INC. Software de análise estrutural BIM para engenheiros. 2021. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview?term=1-YEAR#features>. Acesso em: 10 maio 2021.

CAMPESTRINI, Tiago Francisco; GARRIDO, Marlon Câmara; MENDES JUNIOR, Prof. Dr. Ricardo; SCHEER, Prof. Dr. Sérgio; FREITAS, Prof. Dra. Maria do Carmo Duarte. Entendendo BIM. Curitiba: Tiago Francisco Campestrini, 2015. 51 p.

D.SE., M.s. Troitsky. TUBULAR STEEL STRUCTURES: theory and design. 2. ed.: 1990.

D'ALAMBERT, Flávio; LIPPI, Ivan. Tabela de Vãos e Cargas. 3. ed. São Paulo: Gerdau, 2012. 66 p. (Coletânea do Uso do Aço).

D'ALAMBERT, Flávio. GALPÕES EM PÓRTICOS COM PERFIS ESTRUTURAIS LAMINADOS. 5. ed: Gerdau, 2012. 68 p.

FICANHA, Ricardo; NARDI, Fábio A.; PRAVIA, Zacarias M. Chamberlain. DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE ESTRUTURAS DE AÇO USANDO MÉTODOS NUMÉRICOS. In: CONSTRUMETAL 2010 – CONGRESSO LATINO-AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 1., 2010, São Paulo. Etc. São Paulo: 2016. p. 1-13.

GUINZELLI, Adriano José. Projeto Estrutural de Uma Edificação Residencial Com Estrutura Metálica. 2017. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

INSTITUTO AÇO BRASIL (Brasil). Galpões para Usos Gerais: manual de construção em aço. 4. ed. Rio de Janeiro: Cbca, 2018. 76 p.

INSTITUTO AÇO BRASIL (Brasil). Ligações em Estruturas Metálicas. 4. ed. Rio de Janeiro: Cbca, 2011. 61 p.

INSTITUTO AÇO BRASIL (Brasil). Ligações em Estruturas Metálicas. Rio de Janeiro: Cbca, 2017. 139 p. (Manual de construção em aço).

MAGALHÃES, João Ricardo Maia de. SOBRE O PROJETO E A CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS ESPACIAIS. 1996. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MAGALHÃES, João Ricardo Maia de; MALITE, Maximiliano. Treliças metálicas espaciais: alguns aspectos relativos ao projeto e à construção. 1998. 32 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

MAKOWSKI, Dr. Ing. Z. S. Estruturas Espaciales de Acero. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1989. 208 p.

MARINGONI, Heloisa Martins. PRINCÍPIOS DE ARQUITETURA EM AÇO. 3. ed. São Paulo: Gerda, 2011.

MARTINI, Renata Jardim. ESTRUTURA DE COBERTURA METÁLICA EM MALHA TRELIÇADA ESPACIAL. 2014. 213 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2014.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. Estruturas de Aço: dimensionamento prático. 8. ed. Rio de Janeiro: Lct, 2009. 382 p.

PINHO, Mauro Ottoboni. Transporte e Montagem. Rio de Janeiro: Cbca, 2018. 146 p. (Manual de Construção em Aço).

PROJETO ALPHA ENGENHARIA DE ESTRUTURAS S/C LTDA (Brasil). ANEXO 2 – MEMORIAL DE CÁLCULO DE ESTRUTURA ESPACIAL. Barueri: Projeto Alpha, 18 p.

RAMASWAMY, G s; EEKHOUT, M; SURESH, G R. Analysis, design and construction of steel space frames. Heron Ouay, Londres: Thomastelford, 2002. 262 p.

SANTOS, Rogério dos; VITO, Marcio. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS ARTICULADAS EM AÇO PARA TRELIÇA EM ARCO PELA NBR 8800:2008, EUROCODE 3 E ANSI/AISC 360-05. Santa Catarina: Unesc, 2016. 18 p.

SCHERER, Bruna; ESPIL, Maurício Ungaretti. Treliças Espaciais: aspectos gerais, comportamento estrutural e informações para projetos. Aspectos gerais, Comportamento Estrutural e informações para Projetos. 2016. Disponível em:

<http://pilastro.weebly.com/blog/trelicas-espaciais-aspectos-gerais-comportamento-estrutural-e-informacoes-para-projetos>. Acesso em: 10 mar. 2021.

SILVA, Fabrício Costa. Análise de sistemas estruturais metálicos em arco para centros esportivos: 2017. 99 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SILVA, Tiago Filipe Bastos Santos. Dimensionamento dos Elementos Constituintes de uma Estrutura Espacial em Aço. 2011. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Estruturas, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2011.

SOUZA, Alex Sander Clemente de. Análise Teórica e experimental de treliças espaciais. 2003. 350 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

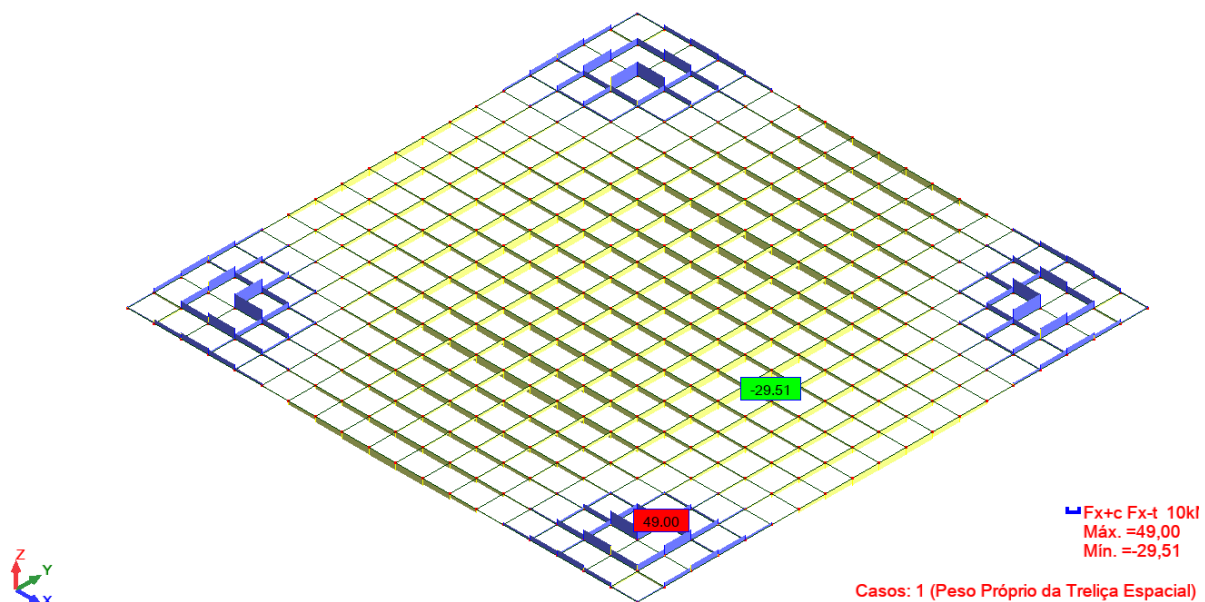
SOUZA, Arnaldo Nascimento de. Análise do Projeto de Estruturas Metálicas Espaciais: Ênfase em Coberturas. 2002. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SUZUKI, Marcos Seiti. Análise De Estruturas Reticuladas Utilizando o Software Excel Pelo Método dos Elementos Finitos. 2014. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

WAI-FAH, Chen. Space Frame Structures: structural engineering handbook. Boca Raton: Crc Press Llc, 1999. 59 p.

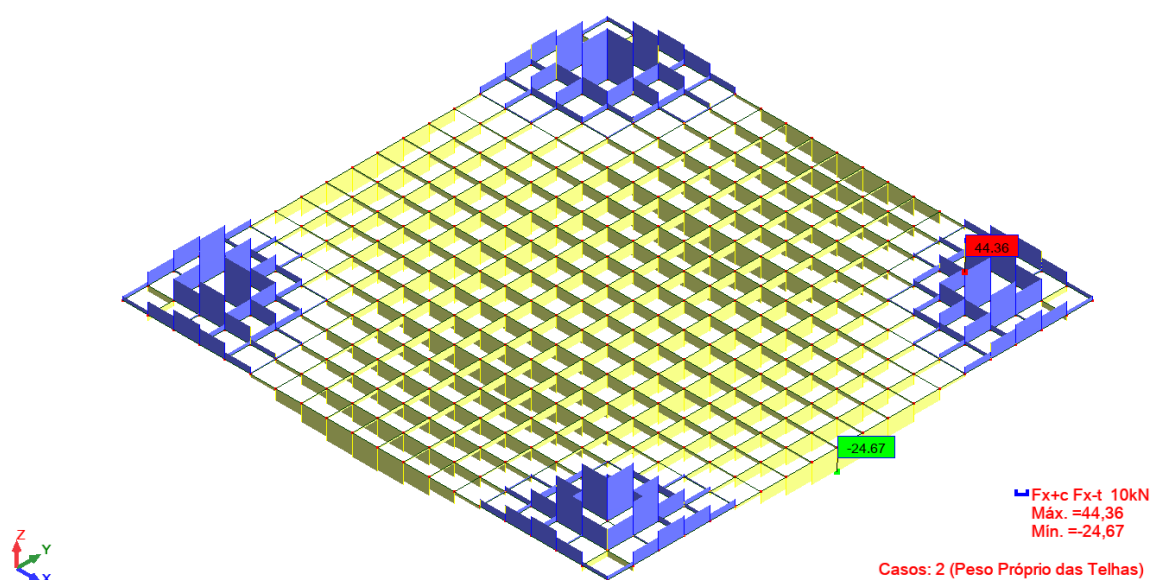
ANEXO A – REAÇÕES NO BANZO INFERIOR

Figura 48 -Caso 1 - Banzo Inferior



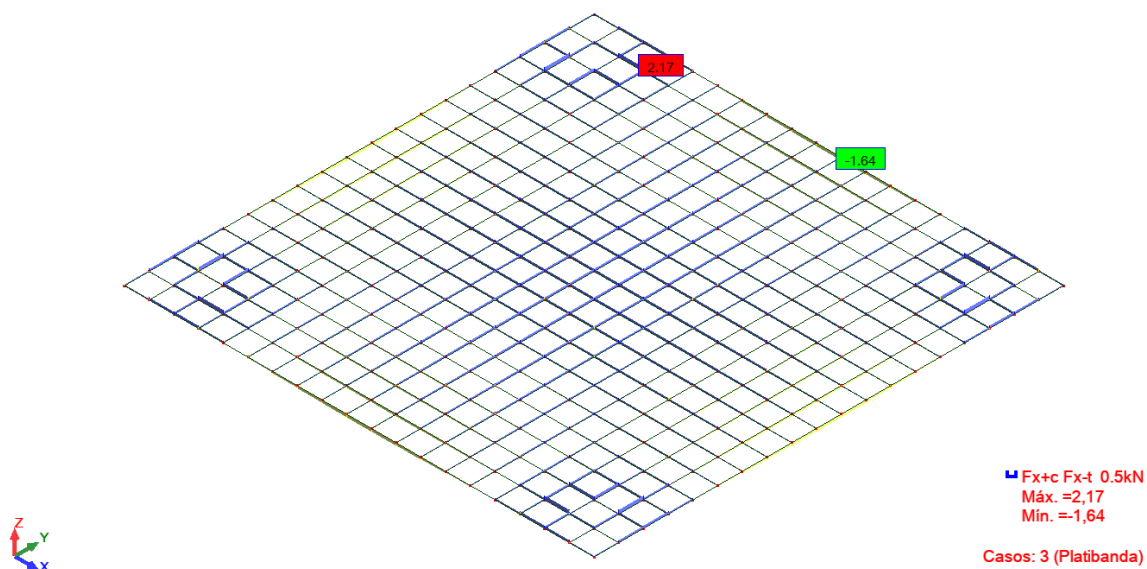
Fonte: Autoria Própria

Figura 49 -Caso 2 - Banzo Inferior



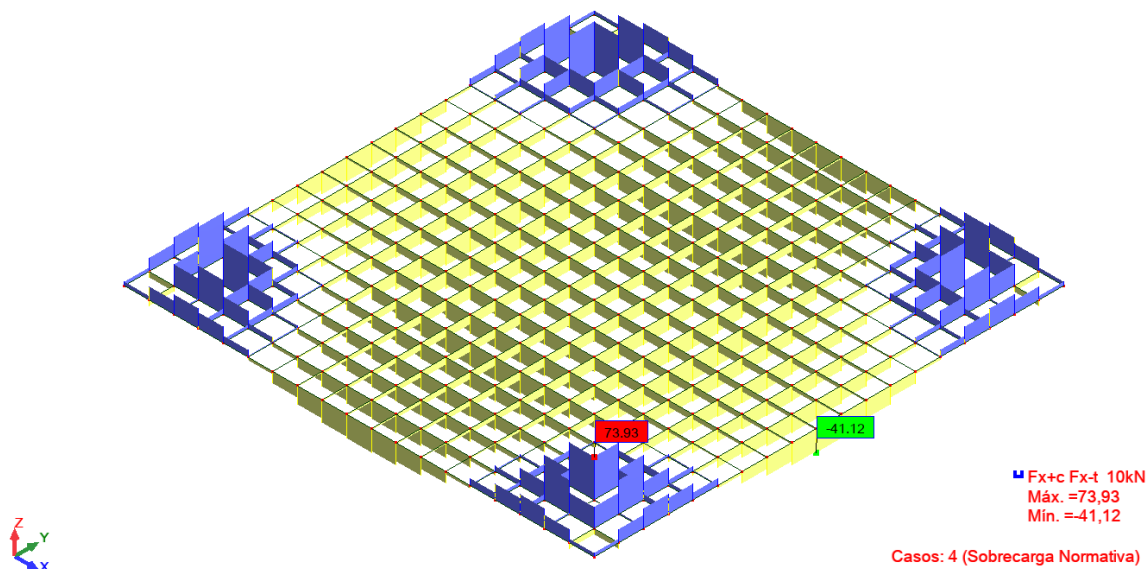
Fonte: Autoria Própria

Figura 50 -Caso 3 - Banzo Inferior



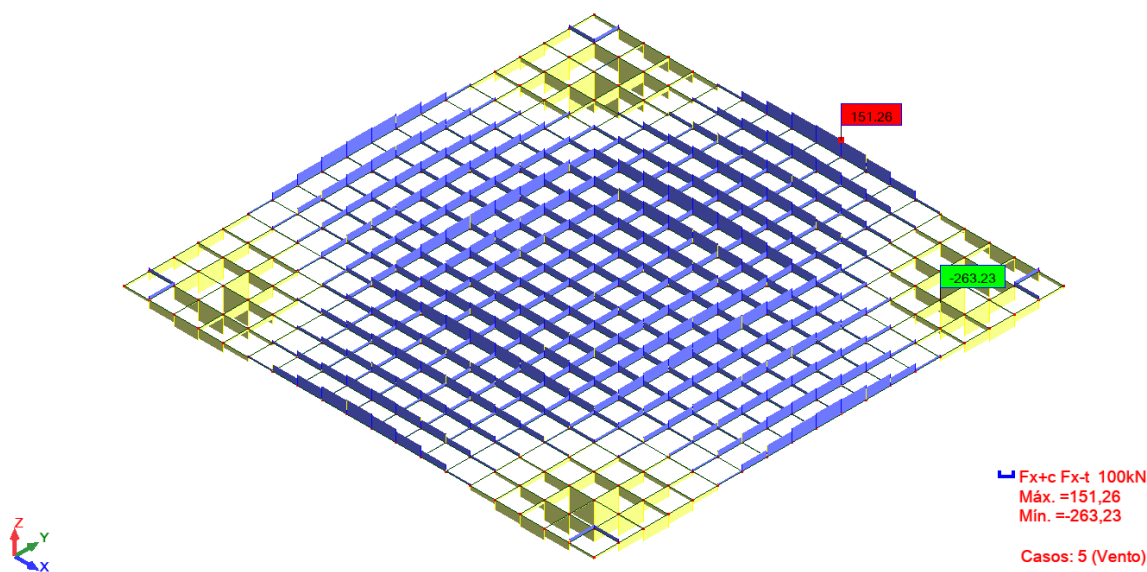
Fonte: Autoria Própria

Figura 51 - Caso 4 - Banzo Inferior



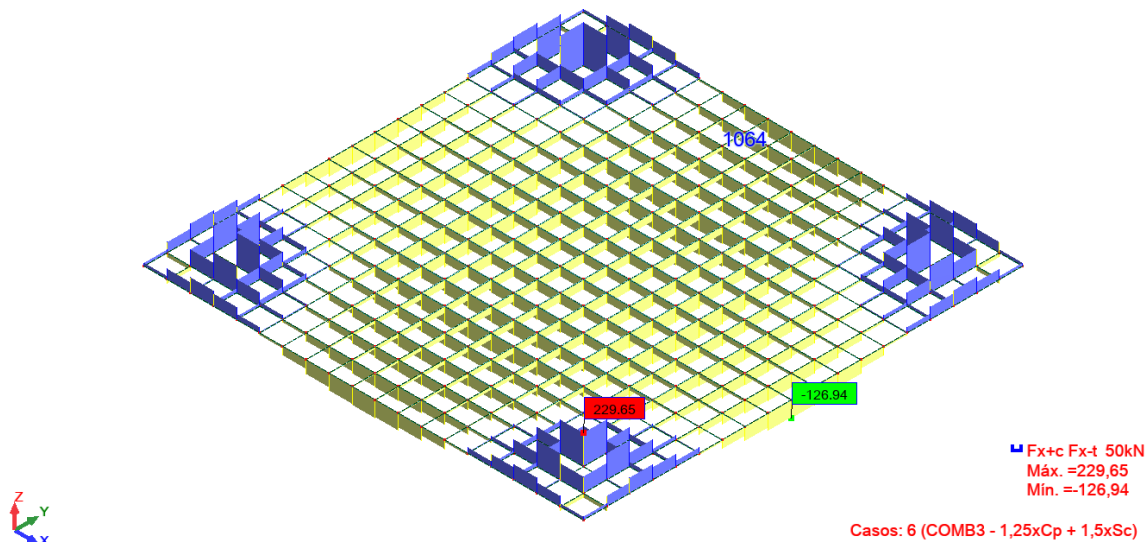
Fonte: Autoria Própria

Figura 52 - Caso 5 - Banzo Inferior



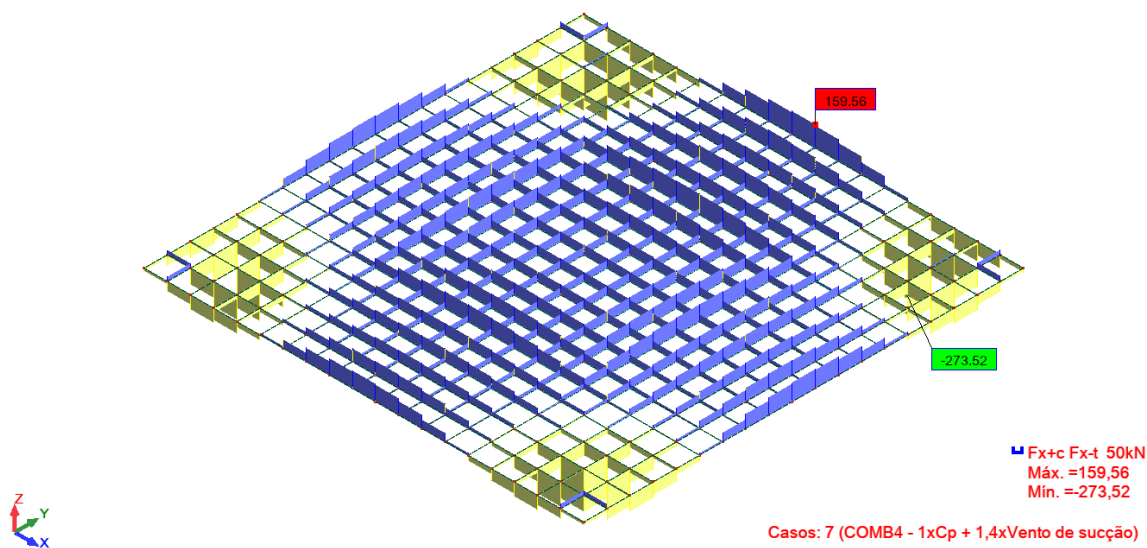
Fonte: Autoria Própria

Figura 53 - Caso 6 - Banzo Inferior



Fonte: Autoria Própria

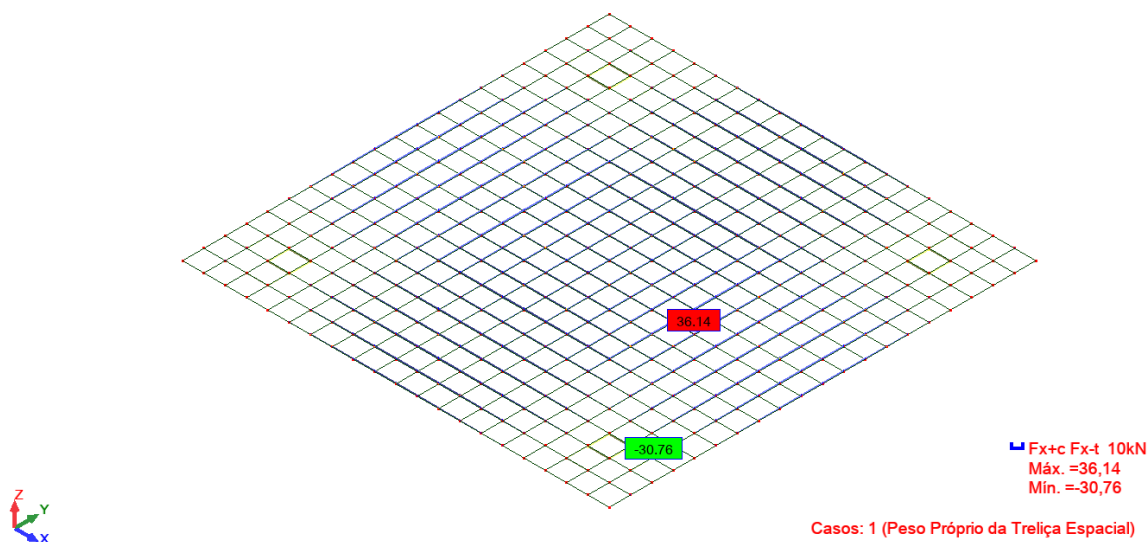
Figura 54 - Caso 7 - Banzo Inferior



Fonte: Autoria Própria

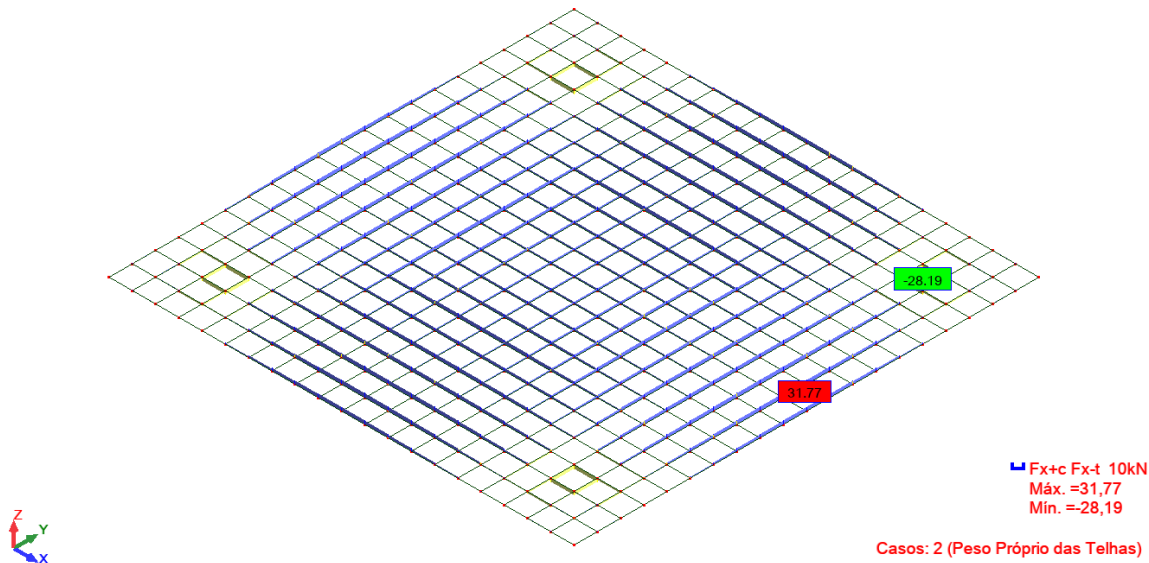
ANEXO B – REAÇÕES NO BANZO SUPERIOR

Figura 55 -Caso 1 - Banzo Superior



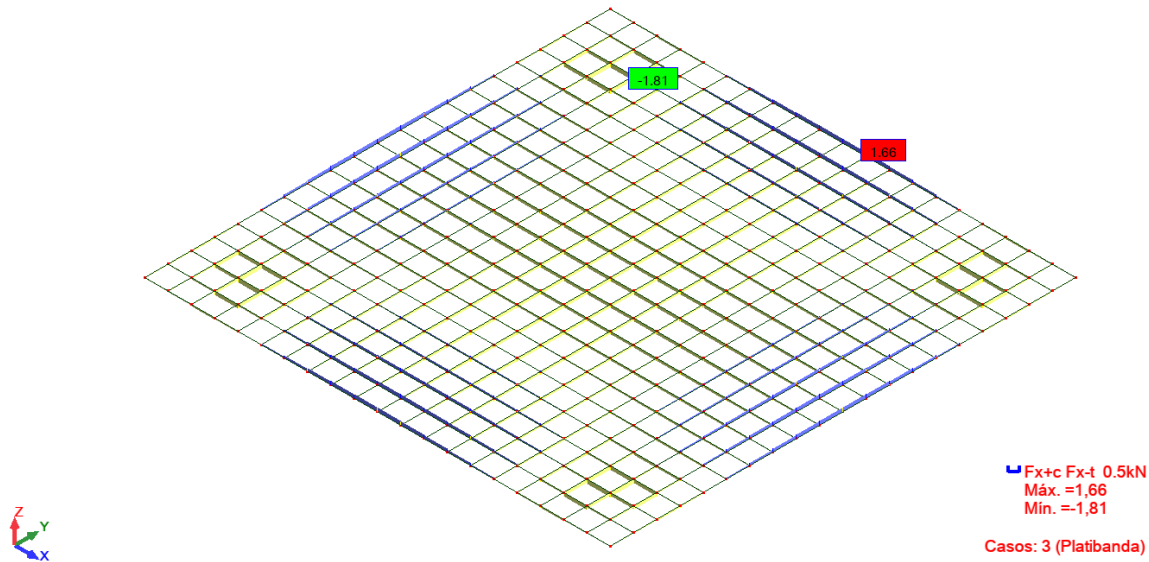
Fonte: Autoria Própria

Figura 56 - Caso 2 - Banzo Superior



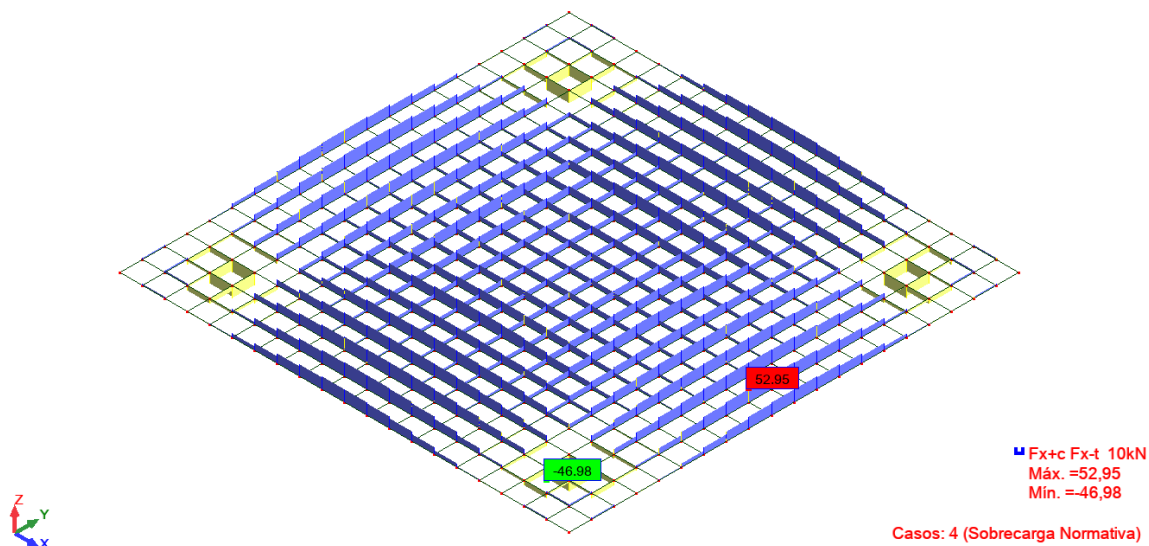
Fonte: Autoria Própria

Figura 57 - Caso 3 - Banzo Superior



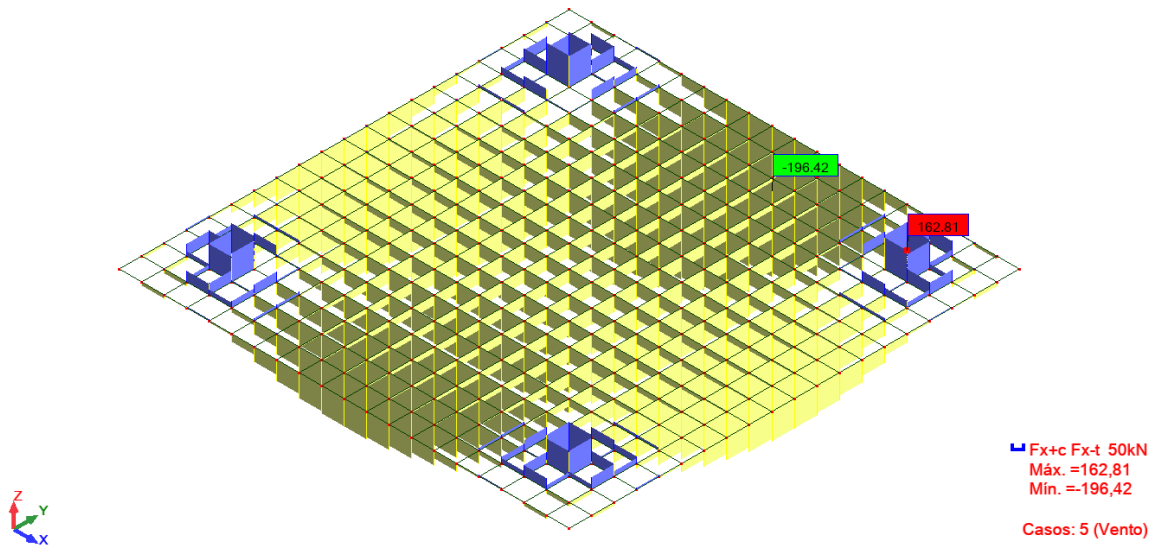
Fonte: Autoria Própria

Figura 58 - Caso 4 - Banzo Superior



Fonte: Autoria Própria

Figura 59 – Caso 5 - Banzo Superior



Fonte: Autoria Própria

Figura 60 - Caso 6 - Banzo Superior

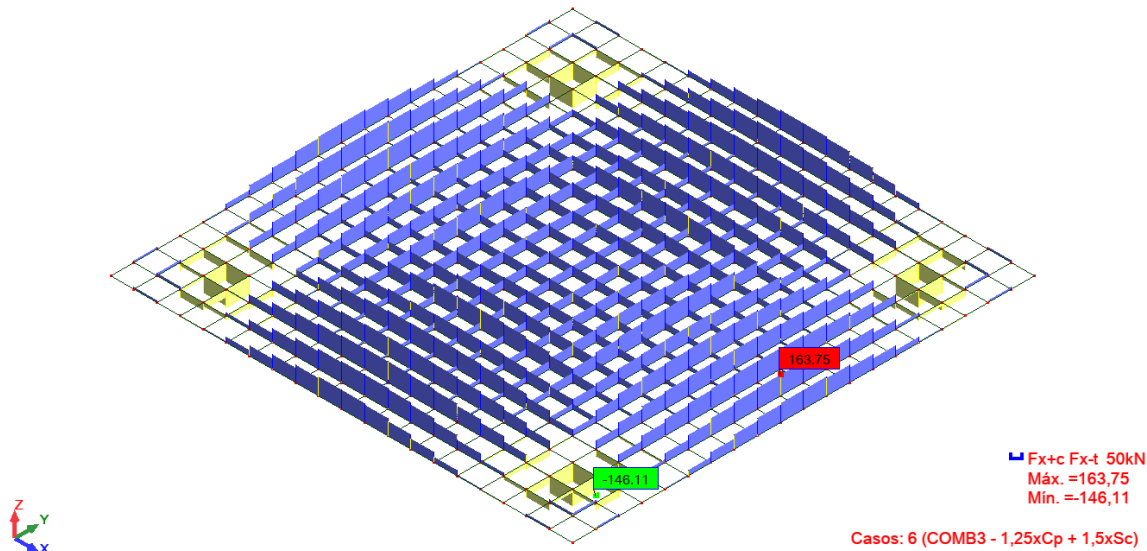


Figura 61 - Caso 7 - Banzo Superior

