

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL

Arielton Vinícius Trindade

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO E
FIXAÇÃO PARA GALPÃO METÁLICO INDUSTRIAL

Passo Fundo

2016

Arielton Vinícius Trindade

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO E
FIXAÇÃO PARA GALPÃO METÁLICO INDUSTRIAL**

Orientador: Prof. Dr. Agenor Dias de Meira Júnior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo
2016

Arielton Vinícius Trindade

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO E
FIXAÇÃO PARA GALPÃO METÁLICO INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 30 de setembro de 2016.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Agenor Dias de Meira Júnior
Orientador

Professor Doutor Márcio Walber
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Gustavo Mezzono
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Ignácio Iturrioz
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*Aos meus pais, Romeo e Salete, minha esposa,
Mônica, e meu filho Miguel*

AGRADECIMENTOS

Agradeço á Deus pela oportunidade de aprendizado.

Agradeço ao meu orientador prof. Agenor Dias de Meira Júnior, pela paciência e dedicação que apresentou.

Agradeço aos colegas e professores do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação, pelos ensinamentos passados os quais são de alta relevância para o crescimento profissional.

Agradeço a banca de Qualificação e Tese, pelas contribuições importantes nesta dissertação.

*Se você pensa que pode, ou se pensa que não
pode, de qualquer modo está certo.*

Henry Ford.

RESUMO

Para aperfeiçoar a utilização de áreas importantes em estaleiros navais e melhorar as condições de trabalho das pessoas que estão expostas á intempéries, as empresas buscam constantemente melhorar o layout de suas fábricas e evitar o custo com mão de obra ociosa. Normalmente são utilizados, na fabricação de peças e montagem de equipamentos de grande porte em estaleiros navais, galpões metálicos tradicionais, ou seja, fixados em determinado local sem a possibilidade de relocação, a menos que haja a sua desmontagem e remontagem no local desejado. Dentro deste contexto, os galpões metálicos móveis com deslocamento linear tornam-se uma opção interessante, pois possibilitam a montagem de componentes de grande porte em um local coberto sem que haja a necessidade de sua desmontagem e remontagem. Através desta necessidade, utilizando-se da metodologia para o desenvolvimento de produto dos autores Pahl e Beitz é concebido uma variante de solução para o deslocamento linear e fixação ao longo de um trajeto determinado para galpão metálico. Por meio desta possível solução do problema de projeto são desenvolvidos os cálculos dos esforços atuantes nas bases do galpão metálico móvel, do acionamento do sistema por métodos tradicionais e a validação estrutural do conjunto de fixação através da análise em elementos finitos, onde a situação mais crítica encontrada nas simulações é a decorrente da aplicação simultânea do momento, esforço cortante e do esforço axial, onde o mecanismo projetado para a solução do problema de projeto, suporta o esforço máximo de 1.141 kN.m antes de entrar em colapso.

Palavras-chave: Galpão móvel. Estrutura metálica. Desenvolvimento de produto.

ABSTRACT

For optimize the use of important areas in shipyards and improve the working conditions of people who are exposed to the weathers, companies are constantly looking to improve the layout of their factories and avoid the cost of idle hand work. Normally used in the manufacture of parts and assembly of large equipment in shipyards, traditional metal sheds, ie fixed in a certain place without the possibility of relocation, unless there disassembly and reassembly at the desired location. Within this context, mobile metal sheds with displacement linear, become an interesting option, as they allow the assembly of large components in a covered place without the need for disassembly and reassembly. Through this need, using a methodology for product development of the authors Pahl and Beitz is conceived a variant solution for displacement linear and fixing along a certain path to metallic shed. Through this possible solution of the problem of the project are develop the calculations of the efforts active in the bases of the moving metallic shed, of the activation of the system by traditional methods and the structural validation of the set of fixation through the analysis in finite elements, where the most critical situation found in the simulations is the result of simultaneous application of the moment, shear effort and axial effort, where the mechanism designed for the solution of the design problem, supports the maximum effort of 1.141 kN.m before collapsing.

Keywords: Mobile shed. Metal structure. Product development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho esquemático de movimentação do galpão metálico móvel.....	18
Figura 2 - (a) Sentido do vento e localização dos coeficientes de pressão, (b) galpão rotacionado.	34
Figura 3 - Galpão industrial típico com colunas e vigas em perfil I.	37
Figura 4 - (a) Colunas simples e tesouras, (b) colunas simples e treliças.	38
Figura 5 - (a) Pórticos para vãos pequenos e médios, (b) pórticos para grande vãos.	39
Figura 6 - Vista do plano da cobertura do hangar retrátil.....	41
Figura 7 - Vista lateral do hangar retrátil.	41
Figura 8 - Corte transversal do hangar retrátil.....	42
Figura 9 - Seção transversal ampliada.	42
Figura 10 - Secção transversal horizontal do hangar retrátil.	43
Figura 11 - Vista da extremidade do hangar retrátil.....	43
Figura 12 - Á esquerda vista em perspectiva e á direita o conjunto em planta.	44
Figura 13 - Vista superior com duas unidades móveis adjacentes e uma vista frontal.	45
Figura 14 - Vista superior e frontal do hangar de aeronaves.....	46
Figura 15 - Vista lateral, vista em perspectiva da guia que estabelece o movimento e uma vista superior.	48
Figura 16 - Batente de rodas de pontes rolantes.....	50
Figura 17 - Interação entre a roda e o trilho e as forças sobre o rodado.....	52
Figura 18 - Critério de descarrilamento de Nadal.	53
Figura 19 - Galpões móveis existentes.....	54
Figura 20 - Vista frontal do galpão móvel.....	55
Figura 21 - Utilização do galpão móvel.	55
Figura 22 - Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto.....	57
Figura 23 - Quatro níveis de abstração referentes a uma estrutura na análise estrutural.	60
Figura 24 - (a) Corte transversal da estrutura (real) de um galpão e (b) modelo estrutural.	61
Figura 25 - Superposição de soluções básicas no método das forças.....	62
Figura 26 - Comportamento elastoplástico.....	65
Figura 27 - Divisão da malha em elementos.	66

Figura 28 - Elementos comumente utilizados de uma, duas e três dimensões em elementos finitos.....	67
Figura 29 - Funções de aproximação dos elementos.....	68
Figura 30 - (a) Elementos sólidos tetraédricos, (b) elementos sólidos hexaédricos.....	69
Figura 31 - Linha mestra do projeto.....	71
Figura 32 - Vista isométrica do galpão metálico.....	72
Figura 33 - Dimensões macro do galpão metálico, medidas em milímetros.....	72
Figura 34 - Função global.....	77
Figura 35 - Desmembramento das funções principais.....	78
Figura 36 - Vista global do galpão metálico.....	83
Figura 37 - Detalhe A, variantes de solução V1 e V3.....	84
Figura 38 - Detalhe A, variantes de solução V2 e V4.....	85
Figura 39 - Organograma dos objetivos para o galpão metálico móvel.....	86
Figura 40 - Distribuição dos coeficientes de pressão externo nas paredes laterais.....	90
Figura 41 - Distribuição dos coeficientes de pressão externa na cobertura.....	91
Figura 42 - Ações resultantes da carga de vento em kN/m.....	91
Figura 43 - (a) combinação de cargas $F_{D,1}$, (b) combinação de cargas $F_{D,2}$	92
Figura 44 - Combinações de carga $F_{D,3}$	93
Figura 45 - Reações nas bases, (a) combinações F_{D1} , (b) combinações F_{D2}	93
Figura 46 - Reações nas bases, combinações de cargas F_{D3}	94
Figura 47 - Esforços máximos atuantes na base dos pilares.....	95
Figura 48 - Organograma das peças que compõem o sistema de movimentação e fixação.....	96
Figura 49 - Vista explodida do sistema de movimentação e fixação.....	97
Figura 50 - Detalhe de fixação do trilho na base de concreto.....	98
Figura 51 - Posicionamento da roda no trilho.....	99
Figura 52 - Posicionamento do perfil de ligação.....	100
Figura 53 - Posicionamento do suporte de fixação.....	100
Figura 54 - Vista lateral do sistema de movimentação.....	101
Figura 55 - Esforços atuantes nos eixos inferiores.....	102
Figura 56 - Localização do sistema de transmissão.....	103
Figura 57 - Relação de transmissão.....	105
Figura 58 - Esquema das cargas atuantes no eixo (4).....	109
Figura 59 - Diagramas dos esforços no eixo (4).....	110
Figura 60 - Esforços atuantes na chaveta.....	111

Figura 61 - Área de esmagamento da chaveta.....	113
Figura 62 - Vista isométrica do sistema de movimentação e fixação.	114
Figura 63 - Modelo para a análise em elementos finitos.....	115
Figura 64 - Discretização da malha.	116
Figura 65- Definição dos materiais e sentido das cargas atuantes.	117
Figura 66 - Sequência de deformação considerando a prescrição de rotação.	118
Figura 67 - Gráfico do momento x rotação.	119
Figura 68 - (a) Folga entre as peças e (b) Contato entre as peças.	120
Figura 69 - Sequência de deformação considerando o esforço cortante.	121
Figura 70 - Gráfico do esforço cortante x deslocamento.....	122
Figura 71 - Sequência de deformação considerando o esforço axial.	123
Figura 72 - Gráfico do esforço axial x deslocamento.....	124
Figura 73 - Sequência de deformação considerando o momento, esforços cortante e axial. .	125
Figura 74 - Gráfico do momento x rotação.	126
Figura 75 - Deslocamento não linear, (a) Folga entre as peças e (b) Contato entre as peças.	127
Figura 76 - Sentido de deslocamento do galpão móvel, cotas em mm.	130
Figura 77 - (a) sistema de movimentação e fixação completo, (b) o sistema de fixação.....	131
Figura 78 - Cotas principais do sistema de movimentação e fixação, medidas em <i>mm</i>	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_f = \gamma_{f1} \gamma_{f3}$	30
Tabela 2 - Coeficientes de pressão externo para as paredes laterais.	34
Tabela 3 - Coeficientes de pressão e forma externos para a cobertura.....	35
Tabela 4 - Peso específico dos metais de construção.	36
Tabela 5 - Vãos entre pórticos.....	39
Tabela 6 - Lista de requisitos do projeto.	73
Tabela 7 - Abstração.....	76
Tabela 8 - Matriz morfológica das possíveis soluções.	79
Tabela 9 - Avaliação das possíveis soluções.	81
Tabela 10 - Seleção das possíveis variantes de soluções.	82
Tabela 11 - Esquema de avaliação para atribuição de valores.	87
Tabela 12 - Avaliação das variantes selecionadas.....	88
Tabela 13 - Fator de rugosidade S_2	89
Tabela 14 - Resumo das ações nas bases do pórtico principal.	94
Tabela 15 - Dimensões das correntes em geral.	108
Tabela 16 - Avaliação do anteprojeto.....	128

LISTA DE ABREVIACÕES

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CLT	Consolidação das Leis do Trabalho
DIN	Deutsches Institut für Normung
ELU	Estado Limite Último
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
MEF	Método dos elementos finitos
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NR	Norma Regulamentadora
SAE	Society of Automotive Engineers
USPTO	Unites States Patent and Trademark Office
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Comprimento do galpão, m
A_t	Área transversal do eixo inferior, m ²
b	Largura do galpão, m
c	Raio do eixo, mm
C_{pe}	Coefficiente de pressão externa
C_{pi}	Coefficiente de pressão interna
d	Diâmetro mínimo do eixo, mm
d_p	Espaçamento entre pórticos, m
E	Módulo de elasticidade, N/mm ²
F	Força na chaveta, N
F _t	Força tangencial, N
F_a	Esforço axial atuante na estrutura, N
F_C	Esforço cortante atuante, N
F_D	Combinações de cargas, N/m
F_{Da}	Esforço axial máximo que a estrutura suporta, N
F_{DC}	Esforço cortante máximo que a estrutura suporta, N
$F_{Gi,k}$	Valor característico das ações permanentes, N
F_k	Ações variáveis, N
$F_{w,k}$	Ação variável devida ao vento, N
$F_{Q1,k}$	Valor característico das ações variáveis, N
$F_{Qj,k}$	Valor característico das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal
F_r	Força resultante, N
F_v	Força de contato vertical entre a roda e o trilho, N
g	Carga permanente, N
g_{ij}	Fator de ponderação
H	Largura do pilar metálico, mm
h	Altura do galpão, m
i	Relação de transmissão
I	Momento de inércia
J	Constante de torção

L_t	Forças laterais, N
L	Altura livre, mm
l	Comprimento da chaveta, mm
M	Momento atuante na estrutura, N.m
M_e	Módulo da relação de transmissão
M_y	Momento máximo que a estrutura suporta, N.m
M^Z	Momento fletor na direção Z, N.m
N_t	Força normal, N
N	Esforço axial, N
n	Rotação por minuto
P	Potência, W
p	Passo da corrente
q	Carga acidental, N
q_k	Pressão dinâmica, N/m ²
R_A	Força de reação no ponto A, N
R_C	Força de reação no ponto C, N
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator da rugosidade do terreno
S_3	Fator estatístico
S_{Sy}	Tensão de resistência ao cisalhamento, N/mm ²
S_y	Tensão de escoamento, N/mm ²
T	Momento torçor, N.m
t	Largura da chaveta, mm
T_1	Torque no eixo do motorreductor, N.m
T_e	Torque no eixo do motorreductor, N.m
V_t	Forças verticais, N
V	Esforço cortante, N
v	Velocidade de deslocamento, km/h
V_k	Velocidade característica do vento, m/s
V_o	Velocidade básica do vento, m/s
V_{tang}	Velocidade tangencial, m/s
W_{ij}	Valores parciais de ponderação
Z_1	Número de dentes da roda dentada condutora

Z_2	Número de dentes da roda dentada conduzida
β	Ângulo formado entre a flange da roda e a face do trilho
γ_f	Coefficiente de ponderação das ações
γ_{f1}	Coefficiente de ponderação das ações que considera a variabilidade das ações
γ_{f2}	Coefficiente de ponderação das ações que considera a simultaneidade das ações
γ_{f3}	Coefficiente de ponderação das ações que considera os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações
Δp	Pressão efetiva, N/m ²
Δp_e	Pressão efetiva externa, N/m ²
Δp_i	Pressão efetiva interna, N/m ²
η	Coefficiente de segurança
μ	Coefficiente de atrito entre a roda e o trilho
σ	Tensão de escoamento, N/mm ²
ΣF_a	Somatório das forças axiais no eixo inferior, N
ΣF_Z	Somatório das forças na direção Z, N
τ	Tensão de cisalhamento, N/mm ²
τ_{inf}	Tensão de cisalhamento no eixo inferior, N/mm ²
Ψ_0	Fator de combinação
ω	Velocidade angular, rad/s
ω_1	Velocidade angular na roda condutora, rad/s

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Contexto.....	18
1.2	Justificativa	19
1.3	Objetivos.....	20
1.3.1	Objetivo geral	20
1.3.2	Objetivos específicos.....	20
1.4	Metodologia da pesquisa	21
1.5	Estrutura do trabalho.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Norma regulamentadora	23
2.1.1	Norma regulamentadora NR 21.....	24
2.2	Normas técnicas	24
2.2.1	Definição	24
2.2.2	Norma brasileira ABNT NBR 8681	25
2.2.3	Norma brasileira ABNT NBR 8800	28
2.2.4	Norma brasileira ABNT NBR 6123	33
2.2.5	Norma brasileira ABNT NBR 6120	36
2.3	Galpão metálico industrial	37
2.4	Sistemas de movimentação para galpão	40
2.4.1	Hangar retrátil.....	40
2.4.2	Hangar de aeronaves.....	44
2.4.3	Batente de rodas de pontes rolantes.....	48
2.5	Forças atuantes no contato entre a roda e o trilho.....	50
2.6	Tipos de galpões móveis.....	54
2.7	Metodologia para projeto e desenvolvimento de produtos.....	56
2.7.1	Especificação do projeto.....	58
2.7.2	Projeto conceitual	58
2.7.3	Anteprojeto	59
2.7.4	Detalhamento.....	59
2.8	Análise estrutural	60
2.8.1	Estruturas com não linearidades geométricas.....	63
2.8.2	Estruturas com não linearidades materiais	64

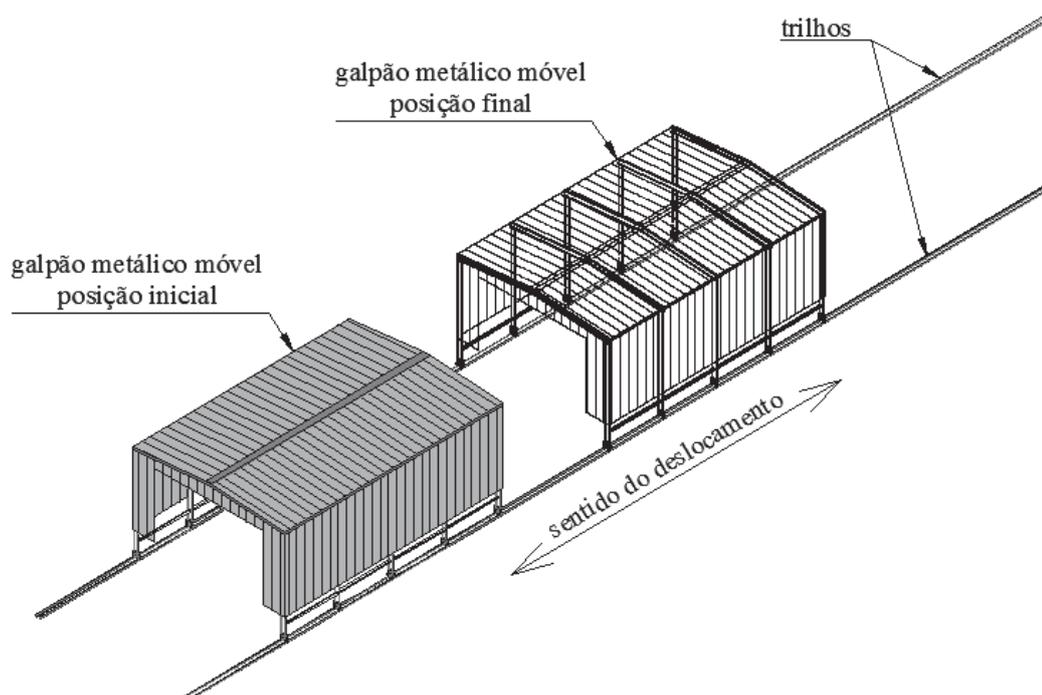
2.8.3	Método dos elementos finitos.....	65
3	PROJETO CONCEITUAL DO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO E FIXAÇÃO PARA O GALPÃO METÁLICO.....	70
3.1	Especificação do projeto	70
3.2	Projeto conceitual	75
3.2.1	Abstração e elaboração da estrutura de funções.....	75
3.2.2	Combinações dos princípios de funcionamento	78
3.2.3	Concretização das variantes de solução.....	83
3.2.4	Análise quantitativa das variantes	85
3.3	Anteprojeto	88
3.3.1	Cargas atuantes na estrutura	89
3.3.2	Análise estrutural do pórtico.....	92
3.3.3	Análise dos componentes	95
3.3.4	Análise estrutural do conjunto.....	114
3.3.5	Avaliação do anteprojeto	127
3.4	Projeto detalhado	129
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	132
4.1	Aplicação de uma metodologia de desenvolvimento de produto	132
4.2	Resultados da análise estrutural	133
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	135
5.1	Análise dos objetivos	135
5.2	Contribuição.....	136
5.3	Trabalhos futuros	137
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
	APÊNDICE A - Cargas atuantes na estrutura	142
	APÊNDICE B - Análise estrutural do pórtico	152

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

Diante do aperfeiçoamento constante das empresas da área naval, na busca pela qualidade e no aumento da produtividade, os galpões metálicos móveis tornam-se uma importante solução a fim de melhorar as condições de trabalho dos trabalhadores e diminuir a perda de produção devido aos fatores climáticos, pois abrangem uma ampla área de cobertura na fabricação de peças e componentes, sendo esta área superior aos galpões metálicos típicos, os quais estão fixados em determinado local sem haver a possibilidade de deslocamento, a menos que sejam desmontados. Também os galpões metálicos tradicionais restringem de certa forma o acesso de guindastes, pontes rolantes, ou outro equipamento em peças com dimensões maiores que as habituais. A Figura 1 apresenta o desenho esquemático de movimento do galpão metálico, onde este é apoiado em trilhos, sendo cada trilho posicionado nas linhas de eixo dos pilares e seguindo uma trajetória definida, conforme a necessidade de cada empresa, possibilitando desta forma a montagem de componentes de grande porte em um local coberto.

Figura 1 - Desenho esquemático de movimentação do galpão metálico móvel.



Fonte: Autor.

Outro fator importante é com relação às condições de trabalho em que as pessoas estão expostas, pois trabalhar em céu aberto acaba comprometendo sua saúde, conforme estudo do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, onde se aponta que milhões de pessoas são vítimas de câncer de pele e cegueira devido à exposição excessiva aos raios ultravioleta. As normas regulamentadoras não restringem o trabalho a céu aberto. Tem-se limites de tolerância para a exposição ao calor em regime de trabalho intermitente com períodos de descanso, porém na prática ficam evidentes as condições críticas em que o trabalhador está sujeito, podendo prejudicar a sua saúde.

Atualmente o galpão metálico móvel é comercializado na área naval para auxílio na montagem e fabricação de peças de grande porte, gerando maior produtividade das equipes de trabalho, devido à redução dos riscos da exposição excessiva ao sol citados anteriormente e na praticidade que se obtém. Também são encontrados em patentes do exterior sistema de movimentação em hangares para aeronaves, que apresentam a mesma finalidade do galpão metálico móvel, que são melhorar as condições e segurança do trabalhador e aumentar a produtividade.

O proposto deste trabalho é desenvolver um sistema de movimentação e fixação para um galpão metálico tipo industrial, com deslocamento linear em trajetória determinada, que seja de fácil fabricação, montagem e acionamento do sistema, também deve resistir aos esforços de vento e outros que podem provocar o movimento ou arranque do galpão metálico móvel da sua posição de trabalho. Para a elaboração deste projeto, é utilizada a metodologia para desenvolvimento de produto de Pahl et al. (2013), conhecimentos na área da mecânica aplicada, elementos de máquinas, resistência dos materiais e a análise estrutural do sistema de fixação através do método de elementos finitos.

1.2 Justificativa

A Constituição Federal, em seu art. 7º, inciso XXII, assegura a todos os trabalhadores a redução dos riscos inerentes ao trabalho, por meio de normas de saúde, higiene e segurança. Recepcionada por esse preceito constitucional, a Consolidação das Leis do Trabalho (“CLT”), em seu art. 155, dispõe que incumbe ao órgão competente - Ministério do Trabalho e Emprego - estabelecer normas sobre a Segurança e a Medicina do Trabalho, que são as chamadas NR, as Normas Regulamentadoras. Para trabalhadores que estão expostos a

intempéries, a norma regulamentadora NR21 dispõe sobre o trabalho a céu aberto. A necessidade de prevenção nas atividades ao ar livre é estabelecida na referida NR no parágrafo 21.2 e tem a seguinte regra: “Serão exigidas medidas especiais que protejam os trabalhadores contra a insolação excessiva, o calor, o frio, a umidade e os ventos inconvenientes”, porém não estão descritos quais são essas medidas.

De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, a cada ano, mais de dois milhões de pessoas são vítimas de câncer de pele não melanoma e 200 mil do tipo melanoma maligno. Entre 12 e 15 milhões de pessoas estão cegas, no mundo inteiro, devido à catarata e, segundo estimativas da OMS – Organização Mundial da Saúde, em cerca de 20% desse total (mais ou menos 3 milhões) a cegueira pode ter tido como causa a exposição excessiva aos raios UV (WHO, 2003).

Outro fator importante é com relação à fabricação e montagem de estruturas de grande porte com dificuldade no manuseio, sejam produzidas em local variado e desta forma tornando o processo mais produtivo, reduzindo os tempos ociosos da manufatura, e buscando uma organização racional do *layout* das fábricas.

1.3 Objetivos

A seguir são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver o projeto do sistema de movimentação e fixação levando em conta os esforços de vento e outros que podem provocar o movimento ou arranque do galpão metálico da sua posição de trabalho.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos propõem-se:

- a) Desenvolver um sistema de movimentação e fixação para um galpão metálico tipo industrial, utilizando-se de uma metodologia de desenvolvimento de produto;
- b) Obter os esforços atuantes no sistema de fixação do galpão metálico móvel;
- c) Dimensionar o sistema de acionamento do galpão metálico móvel para a obtenção do deslocamento linear;
- d) Realizar a análise estrutural do sistema de fixação, através do método de elementos finitos para a validação estrutural do sistema de fixação.

1.4 Metodologia da pesquisa

Para o desenvolvimento deste projeto, utilizou-se da metodologia proposta por Pahl et al. (2013), a qual é composta por quatro fases, sendo a primeira a especificação do produto, a segunda fase o projeto conceitual, a terceira fase o anteprojeto e a quarta fase o detalhamento.

Na primeira fase de especificação do produto, é realizada a linha mestra onde são apresentadas as condições que o produto deve possuir, para atender a sua finalidade, após é elaborada a lista de requisitos que o projeto deve contemplar. Por meio desta lista, tem-se uma visão mais clara do problema do projeto.

Na segunda fase, é desenvolvido o projeto conceitual, onde são definidas as características funcionais do projeto e a solução preliminar. Esta fase começa com a elaboração da abstração que auxilia na estrutura da função global, obtendo o ponto principal do problema. A função global é desmembrada em subfunções de menor complexidade. Após, é realizada a busca por princípios de funcionamento para cada subfunção. Para a escolha de qual variante de solução é a melhor, realiza-se uma análise qualitativa e quantitativa das variantes apresentadas, e também um esboço da solução preliminar de maior relevância.

A terceira fase é o anteprojeto, onde são realizados a escolha dos materiais, a definição das dimensões principais e o exame da compatibilidade espacial e ainda a complementação das consequentes funções auxiliares por meio de subsoluções. Para a definição das dimensões principais dos componentes do sistema de movimentação e fixação, são utilizados cálculos de elementos de máquinas e resistência dos materiais e o modelamento tridimensional. Também é realizada a análise estrutural do sistema montado empregando a análise em elementos finitos. Na escolha dos materiais a serem usados, procurou-se utilizar os comercialmente disponíveis.

A quarta fase é o detalhamento onde se apresenta o conjunto final montado com as cotas e características principais dos componentes do sistema.

1.5 Estrutura do trabalho

No capítulo 1 é apresentada a introdução, justificativa para a elaboração desse trabalho, objetivos gerais e específicos e a metodologia a ser utilizada.

No capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica, onde é feito um levantamento das normas pertinentes a essa dissertação, os trabalhos já realizados sobre galpão metálico móvel ou similar e as metodologias para o desenvolvimento de produto.

No capítulo 3 apresenta-se o desenvolvimento do trabalho, onde é aplicada a metodologia de desenvolvimento do projeto, a qual é subdividida em quatro etapas: especificação do projeto, projeto conceitual, anteprojeto e o projeto detalhado.

No capítulo 4 apresenta-se a discussão dos resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho e as considerações finais.

No apêndice A tem-se o cálculo das cargas atuantes no galpão metálico, onde através destas informações é possível a realização da análise estrutural do pórtico.

No apêndice B é apresentada a análise estrutural do pórtico, cuja finalidade é de obter os esforços atuantes nas bases dos pilares metálicos, onde então será possível o dimensionamento dos componentes e a realização da simulação computacional do sistema de movimentação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo tem-se a revisão bibliográfica, a qual apresenta, como fundamentação teórica, as normas regulamentadoras referentes às condições mínimas de trabalho em que uma pessoa pode ficar exposta. Também são apresentadas como fundamentação teórica, as normas brasileiras para projeto em estruturas de aço e as considerações de cálculo que devem ser levadas em conta durante o dimensionamento das estruturas e é realizada a identificação dos trabalhos elaborados, pertinentes ao sistema de movimentação para galpão metálico.

2.1 Norma regulamentadora

Conforme MTE (2015), as Normas Regulamentadoras (NR) são disposições complementares ao capítulo V da CLT, consistindo em obrigações, direitos e deveres a serem cumpridos por empregadores e trabalhadores com o objetivo de garantir trabalho seguro e sadio, prevenindo a ocorrência de doenças e acidentes de trabalho. A elaboração/revisão das Normas Regulamentadoras (NR) é realizada pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) adotando o sistema tripartite paritário por meio de grupos e comissões compostas por representantes do governo, empregadores e empregados.

As normas regulamentadoras, relativas à segurança e saúde do trabalho, são de observância obrigatória pelas empresas privadas e públicas e pelos órgãos públicos da administração direta e indireta, bem como pelos órgãos dos Poderes Legislativo e Judiciário, que possuam empregados regidos pela Consolidação das Leis do Trabalho. O não cumprimento das disposições legais e regulamentares sobre segurança e saúde no trabalho acarretará ao empregador a aplicação das penalidades previstas na legislação pertinente (MTE, Normalização).

No que se refere à exposição aos fatores climáticos, a norma regulamentadora NR 21 aborda este assunto. Na sequência seguem itens comentados da referida norma, a qual é de interesse neste trabalho.

2.1.1 Norma regulamentadora NR 21

A norma regulamentadora NR 21 - Trabalhos a Céu Aberto(1999) dispõem de itens de observância obrigatória referente à exposição de trabalhadores às intempéries, os quais seguem:

- a) no artigo 21.1 é descrita a seguinte orientação: nos trabalhos realizados a céu aberto, é obrigatória a existência de abrigos, ainda que rústicos, capazes de proteger os trabalhadores contra intempéries;
- b) no artigo 21.2 é expresso o seguinte: serão exigidas medidas especiais que protejam os trabalhadores contra a insolação excessiva, o calor, o frio, a umidade e os ventos inconvenientes.

Demais itens relacionados na NR 21 são referentes as condições sanitárias mínimas e de moradia, em que o trabalhador tem direito durante o período em que exerce o trabalho.

Conforme a norma regulamentadora NR15 (2014), em seu anexo 3, são descritos os limites de tolerância para exposição ao calor, na qual a avaliação é através do índice de bulbo úmido termômetro de globo, onde são relacionadas equações e tabelas para definir o regime de trabalho intermitente e de descanso, porém este método torna-se complicado em executar devido à necessidade de equipamentos e trabalhadores qualificados.

2.2 Normas técnicas

2.2.1 Definição

Conforme ABNT (2015), a normalização é, assim, o processo de formulação e aplicação de regras para a solução ou prevenção de problemas, com a cooperação de todos os interessados, e, em particular, para a promoção da economia global. No estabelecimento dessas regras recorre-se à tecnologia como o instrumento para estabelecer, de forma objetiva e neutra, as condições que possibilitem que o produto, projeto, processo, sistema, pessoa, bem ou serviço atendam às finalidades a que se destinam, sem se esquecer dos aspectos de segurança.

Norma é o documento estabelecido por consenso e aprovado por um organismo reconhecido, que fornece regras, diretrizes ou características mínimas para atividades ou para seus resultados, visando à obtenção de um grau ótimo de ordenação em um dado contexto.

A norma é, por princípio, de uso voluntário, mas quase sempre é usada por representar o consenso sobre o estado da arte de determinado assunto, obtido entre especialistas das partes interessadas.

Na sequência é realizada a pesquisa de normas relacionadas a este trabalho.

2.2.2 Norma brasileira ABNT NBR 8681

A norma brasileira ABNT NBR 8681(2004) ações e segurança nas estruturas - procedimento, tem como objetivo fixar os requisitos exigíveis na verificação da segurança das estruturas usuais da construção e estabelece as definições e os critérios de quantificação das ações e das resistências a serem consideradas no projeto das estruturas de edificações, quaisquer que sejam sua classe e destino, salvo os casos previstos em Normas Brasileiras específicas.

Em seu subitem 4.2.1 são estabelecidas as regras de combinação das ações, estas são classificadas segundo sua variabilidade no tempo em três categorias:

a) ações permanentes normais e indiretas;

As ações permanentes normais são referentes aos pesos próprios dos elementos da construção, incluindo-se o peso próprio da estrutura e de todos os elementos construtivos permanentes, os pesos dos equipamentos fixos e os empuxos devidos ao peso próprio de terras não removíveis e de outras ações permanentes sobre elas aplicadas.

As ações permanentes indiretas são a protensão, os recalques de apoio e a retração dos materiais.

b) ações variáveis normais e especiais;

Consideram-se como ações variáveis as cargas acidentais das construções, bem como efeitos, tais como forças de frenação, de impacto e centrífugas, os efeitos do vento, das variações de temperatura, do atrito nos aparelhos de apoio e, em geral, as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas. Em função de sua probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, as ações variáveis são classificadas em normais ou especiais.

As ações variáveis normais tem a probabilidade de ocorrência suficientemente grande para que sejam obrigatoriamente consideradas no projeto das estruturas de um dado tipo de construção.

As ações variáveis especiais devem ser consideradas nas estruturas em que possam ocorrer certas ações, tais como ações sísmicas ou cargas acidentais de natureza ou de intensidade especiais. As combinações de ações em que comparecem ações especiais devem ser especificamente definidas para as situações especiais consideradas.

c) ações excepcionais.

Consideram-se como excepcionais as ações decorrentes de causas tais como explosões, choques de veículos, incêndios, enchentes ou sismos excepcionais. Os incêndios, ao invés de serem tratados como causa de ações excepcionais, também podem ser levados em conta por meio de uma redução da resistência dos materiais constitutivos da estrutura.

No subitem 4.3 ações-tipo de carregamento e critérios de combinação, em geral um tipo de carregamento é especificado pelo conjunto das ações que têm probabilidade não desprezível de atuarem simultaneamente sobre uma estrutura, durante um período de tempo preestabelecido. Em cada tipo de carregamento, as ações devem ser combinadas de diferentes maneiras, a fim de que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura. Devem ser estabelecidas tantas combinações de ações quantas forem necessárias para que a segurança seja verificada em relação a todos os possíveis estados limites da estrutura. A verificação da segurança em relação aos estados limites últimos é feita em função das combinações últimas de ações. A verificação da segurança em relação aos estados limites de serviço é feita em função das combinações de serviço.

Durante o período de vida da construção, podem ocorrer os seguintes tipos de carregamento: carregamento normal, carregamento especial e carregamento excepcional. Além destes, em casos particulares, também pode ser necessária a consideração do carregamento de construção. Os tipos de carregamento podem ser de longa duração ou transitórios, conforme seu tempo de duração.

O carregamento normal decorre do uso previsto para construção. Admite-se que o carregamento normal possa ter duração igual ao período de referência da estrutura, e sempre deve ser considerado na verificação da segurança, tanto em relação a estados limites últimos quanto em relação a estados limites de serviço.

Um carregamento especial decorre da atuação de ações variáveis de natureza ou intensidade especiais, cujos efeitos superam em intensidade os efeitos produzidos pelas ações consideradas no carregamento normal. Os carregamentos especiais são transitórios, com duração muito pequena em relação ao período de referência da estrutura. Os carregamentos

especiais são em geral considerados apenas na verificação da segurança em relação aos estados limites últimos, não se observando as exigências referentes aos estados limites de serviço. A cada carregamento especial corresponde uma única combinação última especial de ações. Em casos particulares, pode ser necessário considerar o carregamento especial na verificação da segurança em relação aos estados limites de serviço.

Um carregamento excepcional decorre da atuação de ações excepcionais que podem provocar efeitos catastróficos. Os carregamentos excepcionais somente devem ser considerados no projeto de estrutura de determinados tipos de construção, para os quais a ocorrência de ações excepcionais não possa ser desprezada e que, além disso, na concepção estrutural, não possam ser tomadas medidas que anulem ou atenuem a gravidade das consequências dos efeitos dessas ações. O carregamento excepcional é transitório, com duração extremamente curta. Com um carregamento do tipo excepcional, considera-se apenas a verificação da segurança em relação a estados limites últimos, através de uma única combinação última excepcional de ações.

O carregamento de construção é considerado apenas nas estruturas em que haja risco de ocorrência de estados limites, já durante a fase de construção. O carregamento de construção é transitório e sua duração deve ser definida em cada caso particular. Devem ser consideradas tantas combinações de ações quantas sejam necessárias para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados limites que são de se temer durante a fase de construção.

Os critérios gerais de combinação das ações na verificação da segurança em relação aos possíveis estados limites, para cada tipo de carregamento devem ser consideradas todas as combinações de ações que possam acarretar os efeitos mais desfavoráveis nas seções críticas da estrutura.

As ações permanentes são consideradas em sua totalidade. Das ações variáveis, são consideradas apenas as parcelas que produzem efeitos desfavoráveis para a segurança.

As ações variáveis móveis devem ser consideradas em suas posições mais desfavoráveis para a segurança.

A aplicação de ações variáveis ao longo da estrutura pode ser feita de acordo com regras simplificadas, estabelecidas em normas que considerem determinados tipos particulares de construção.

As ações incluídas em cada uma destas combinações devem ser consideradas com seus valores representativos, multiplicados pelos respectivos coeficientes de ponderação das ações.

Devem ser considerados, com relação aos critérios para combinações últimas:

- a) ações permanentes devem figurar em todas as combinações de ações;
- b) ações variáveis nas combinações últimas normais: em cada combinação última, uma das ações variáveis é considerada como a principal, admitindo-se que ela atue com seu valor característico F_k ; as demais ações variáveis são consideradas como secundárias, admitindo-se que elas atuem com seus valores reduzidos de combinação $\Psi_0 F_k$;
- c) ações variáveis nas combinações últimas especiais: nas combinações últimas especiais, quando existirem, a ação variável especial deve ser considerada com seu valor representativo e as demais ações variáveis devem ser consideradas com valores correspondentes a uma probabilidade não desprezível de atuação simultânea com a ação variável especial;
- d) ações variáveis nas combinações últimas excepcionais: nas combinações últimas excepcionais, quando existirem, a ação excepcional deve ser considerada com seu valor representativo e as demais ações variáveis devem ser consideradas com valores correspondentes a uma grande probabilidade de atuação simultânea com a ação variável excepcional.

2.2.3 Norma brasileira ABNT NBR 8800

Segundo a NBR8800 (2008), projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, a qual tem no seu escopo estabelecer os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto à temperatura ambiente de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações. Como critério de segurança é utilizado os estados-limites últimos (ELU), os quais estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional. Os estados-limites de serviço estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização.

O método dos estados-limites utilizado para o dimensionamento de uma estrutura exige que nenhum estado-limite aplicável seja excedido quando a estrutura for submetida a

todas as combinações apropriadas de ações. Se um ou mais estados-limites forem excedidos, a estrutura não atende mais aos objetivos para os quais foi projetada.

As condições usuais de segurança referente aos estados-limites últimos são expressas pela desigualdade da Equação (2.1), para a situação em que é realizada a verificação isolada dos esforços atuantes.

$$R_d \geq S_d \quad (2.1)$$

Onde:

S_d representa os valores de cálculo dos esforços atuantes;

R_d representa os valores de cálculo dos correspondentes esforços resistentes.

No seu item 4.7 Ações e no seu subitem 4.7.1.1 na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a estrutura, levando-se em conta os estados-limites últimos de serviço. No subitem 4.7.1.2 as ações a considerar classificam-se de acordo com a ABNT NBR 8681, em permanentes, variáveis e excepcionais.

Em seu subitem 4.7.6 coeficientes de ponderação das ações, refere-se as ações devem ser ponderadas pelo coeficiente γ_f , dado por:

$$\gamma_f = \gamma_{f1} + \gamma_{f2} + \gamma_{f3} \quad (2.2)$$

Onde:

γ_{f1} é a parcela do coeficiente de ponderação das ações γ_f que considera a variabilidade das ações;

γ_{f2} é a parcela do coeficiente de ponderação das ações γ_f que considera a simultaneidade de atuação das ações;

γ_{f3} é a parcela do coeficiente de ponderação das ações γ_f que considera os possíveis erros de avaliação dos efeitos das ações, seja por problemas construtivos, seja por deficiência do método de cálculo empregado, de valor igual ou superior a 1,10.

No subitem 4.7.6.1 coeficientes de ponderação das ações no estado-limite último (ELU), os valores-base para a verificação dos estado-limite último são apresentados nas tabelas 1 e 2 da referida norma, para o produto $\gamma_{f1}\gamma_{f3}$ e para γ_{f2} , respectivamente. O produto $\gamma_{f1}\gamma_{f3}$ é representado por γ_g ou γ_q . O coeficiente γ_{f2} é igual ao fator de combinação Ψ_0

O valor do coeficiente de ponderação de cargas permanentes de mesma origem, num dado carregamento, deve ser o mesmo ao longo de toda a estrutura.

A Tabela 1 extraída da norma NBR8800 subitem 4.7.6 apresenta os coeficientes de ponderação das ações. Os valores em parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança e ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

^a representa os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança;

^b é o efeito de temperatura;

^c agrupamento das ações permanentes nas combinações normais;

^d agrupamento das ações variáveis nas combinações normais;

^e representa as ações truncadas.

Tabela 1- Valores dos coeficientes de ponderação das ações $\gamma_f = \gamma_{fl} \gamma_{f3}$.

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		

Fonte: (NBR8800, 2008).

Em seu subitem 4.7.7 combinações de ações, um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezáveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período prestabelecido. A combinação das ações deve ser feita

de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura; a verificação dos estados-limites últimos e dos estados-limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e combinações de serviço, respectivamente.

Uma combinação última de ações pode ser classificada em normal, especial, de construção e excepcional.

a) combinações últimas normais

As combinações últimas normais decorrem do uso previsto para a edificação. Devem ser consideradas tantas combinações de ações quantas forem necessárias para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados-limites últimos aplicáveis. Em cada combinação devem estar incluídas as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação.

Para cada combinação de ações F_D , aplica-se a seguinte expressão:

$$F_D = \sum_{i=1}^m (Y_{gi} F_{Gi,k}) + Y_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (Y_{qj} \Psi_{oj} F_{Qj,k}) \quad (2.3)$$

Onde:

$F_{Gi,k}$ representa os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$ representa os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

b) combinações últimas especiais

As combinações últimas especiais decorrem da atuação de ações variáveis de natureza ou intensidade especial, cujos efeitos superam em intensidade os efeitos produzidos pelas ações consideradas nas combinações normais. Os carregamentos especiais são transitórios, com duração muito pequena em relação ao período de vida útil da estrutura.

A cada carregamento especial corresponde uma única combinação última especial de ações, na qual devem estar presentes as ações permanentes e a ação variável especial, com

seus valores característicos, e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezível de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos de combinação.

c) combinações últimas de construção

As combinações últimas de construção devem ser levadas em conta nas estruturas em que haja riscos de ocorrência de estados-limites últimos, já durante a fase de construção. O carregamento de construção é transitório e sua duração deve ser definida em cada caso particular.

Devem ser consideradas tantas combinações de ações quantas sejam necessárias para verificação das condições de segurança em relação a todos os estados-limites últimos que são de se temer durante a fase de construção. Em cada combinação devem estar presentes as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas secundárias, com seus valores reduzidos de combinação.

d) combinações últimas excepcionais

As combinações últimas excepcionais decorrem da atuação de ações excepcionais que podem provocar efeitos catastróficos. As ações excepcionais somente devem ser consideradas no projeto de estrutura de determinados tipos de construção, nos quais essas ações não possam ser desprezadas e que, além disso, na concepção estrutural, não possam ser tomadas medidas que anulem ou atenuem a gravidade das consequências dos seus efeitos. O carregamento excepcional é transitório, com duração extremamente curta.

A cada carregamento excepcional corresponde uma única combinação última excepcional de ações, na qual devem figurar as ações permanentes e a ação variável excepcional, com seus valores característicos, e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezível de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos de combinação, conforme a ABNT NBR 8681(2004).

No anexo B da referida norma subitem item B.5.1 é orientado que deve ser prevista uma sobrecarga característica mínima de $0,25 \text{ kN/m}^2$, em projeção horizontal. Admite-se que essa sobrecarga englobe as cargas decorrentes de instalações elétricas e hidráulicas, de isolamentos térmico e acústico e de pequenas peças eventualmente fixadas na cobertura, até um limite superior de $0,05 \text{ kN/m}^2$.

2.2.4 Norma brasileira ABNT NBR 6123

A ação dos ventos em galpões metálicos é uma das mais importantes e não pode ser negligenciada, sob o risco de colocar a estrutura em colapso. As considerações do vento, bem como sua forma de aplicação, estão dispostas na norma NBR6123 (1988) - forças devidas ao vento em edificações tendo como objetivo fixar às condições exigíveis na consideração das forças devidas a ação estática e dinâmica do vento, para efeitos de cálculo de edificações.

Conforme Bellei (1998), para a análise das forças devidas ao vento em galpões industriais é necessário conhecer três parâmetros: pressão dinâmica, coeficientes de pressão externos e coeficiente de pressão interno.

A pressão dinâmica depende da velocidade básica do vento V_0 , do fator topográfico S_1 , do fator de rugosidade do terreno S_2 e do fator estatístico S_3 . Conforme NBR6123 (1988), a velocidade característica do vento V_k é dada de acordo com a Equação 2.3.

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (2.4)$$

A velocidade básica do vento V_0 , é definida como sendo a velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto. A norma NBR6123 (1988) apresenta o gráfico das isopletras da velocidade básica no Brasil, com intervalos de 5 m/s, tendo como valor mais elevado a velocidade de 50 m/s.

O fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo do terreno, onde para terreno plano ou fracamente acidentado é utilizado $S_1 = 1$.

No fator de rugosidade do terreno S_2 é considerado o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura do terreno e das dimensões do galpão metálico.

O fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil do galpão metálico, onde para as instalações industriais utiliza-se 0,95.

Com a velocidade característica do vento V_k , permite determinar a pressão dinâmica pela expressão:

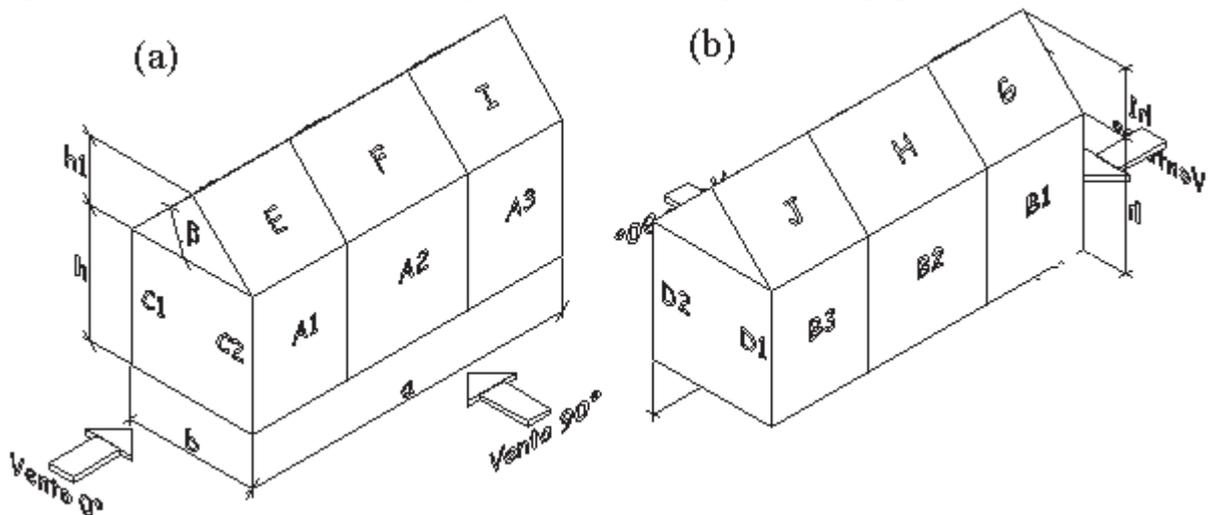
$$q_k = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (2.5)$$

Sendo: q_k em N/m^2 e V_k em m/s

Ao incidir sobre o galpão metálico o vento, provoca pressões ou sucções, estas são apresentadas em forma de tabelas na norma NBR6123 (1988), as quais são subdivididas em coeficientes para cada parte do galpão. Estes coeficientes são denominados de coeficientes de pressão e de forma externos incidentes nas paredes laterais e na cobertura, sendo que os coeficientes com sinal negativo indicam que o galpão está sendo submetido à sucção, e os coeficientes com sinal positivo, se referem à pressão.

A Figura 2 (a) apresenta uma vista isométrica de um galpão típico, com o sentido de incidência do vento, e a Figura 2 (b) mostra o mesmo galpão típico, porém, rotacionado 180° , a fim de exibir a localização dos coeficientes de pressão externos nas paredes e na cobertura.

Figura 2 - (a) Sentido do vento e localização dos coeficientes de pressão, (b) galpão rotacionado.



Fonte: (Pravia, 2016).

Para um galpão metálico típico, conforme Figura 2, com largura (b) de 20 metros, o comprimento (a) de 30 metros, a altura livre (h) de 12 metros e o ângulo β de 5° , os coeficientes de pressão e forma externos são de acordo com as Tabela 2 e 3.

Tabela 2 - Coeficientes de pressão externo para as paredes laterais.

Vento $\alpha = 0^\circ$				Vento $\alpha = 90^\circ$			
A ₁ e B ₁	A ₂ e B ₂	C	D	A	B	C ₁ e D ₁	C ₂ e D ₂
-0,9	-0,5	+0,7	-0,5	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5

Fonte: (NBR6123, 1988).

Tabela 3 - Coeficientes de pressão e forma externos para a cobertura.

β	Vento $\alpha = 90^\circ$		Vento $\alpha = 0^\circ$	
	E - F	G - H	E - G	F - H
5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6

Fonte: (NBR6123, 1988).

Para vento a 0° , nas partes A3 e B3, o coeficiente de forma (C_e) tem os seguintes valores:

- $a/b = 1$: mesmo valor das partes A2 e B2;
- $a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$;
- $1 < a/b < 2$: interpolar linearmente.

O coeficiente de pressão interno depende da permeabilidade das paredes relacionadas com a maior ou menor área de abertura que o galpão possui.

Nos subitens 6.2.5 e 6.2.6 da norma mencionada, são definidos os coeficientes de pressão interna, onde para edificações com paredes internas permeáveis, a pressão interna pode ser considerada uniforme. Neste caso, devem ser adotados os seguintes valores para o coeficiente de pressão interna C_{pi} .

- a) duas faces opostas igualmente permeáveis; as outras faces impermeáveis:
 - vento perpendicular a uma face permeável: $C_{pi} = +0,2$;
 - vento perpendicular a uma face impermeável: $C_{pi} = -0,3$.
- b) quatro faces igualmente permeáveis: $C_{pi} = -0,3$ ou 0 (considerar o valor mais nocivo).

Para edificações efetivamente estanques e com janelas fixas que tenham uma probabilidade desprezível de serem rompidas por acidente, considerar o mais nocivo dos seguintes valores: $C_{pi} = -0,2$ ou 0.

O cálculo das ações resultantes (q_n), para cada pórtico é dado pela Equação (2.5), através da multiplicação do espaçamento entre os pórticos, pela pressão dinâmica e o resultado das combinações dos coeficientes de pressão (BELLEI, 1998).

$$q_n = d_p(m) \times q_k \left(\frac{kN}{m^2} \right) \times coef. \quad (2.6)$$

Onde:

d_p = espaçamento entre os pórticos;

q_k = pressão dinâmica em kN/m^2 .

2.2.5 Norma brasileira ABNT NBR 6120

A norma brasileira ABNT NBR 6120(1980) - cargas para o cálculo de estruturas de edificações, tem como objetivo fixar as condições exigíveis para determinação dos valores das cargas que devem ser consideradas no projeto de estrutura de edificações, qualquer que seja sua classe e destino, salvo os casos previstos em normas especiais.

Para os efeitos desta norma, as cargas são classificadas nas seguintes categorias:

- a) carga permanente (g), é constituído pelo peso próprio da estrutura e pelo peso de todos os elementos construtivos fixos e instalações permanentes. Na falta de determinação experimental, deve ser utilizada a Tabela 4, para adotar os pesos específicos aparentes dos principais metais utilizados em um galpão metálico.

Tabela 4 - Peso específico dos metais de construção.

Materiais		Peso específico aparente (kN/m ³)
5 Metais	Aço	78,5
	Alumínio e ligas	28
	Bronze	85
	Chumbo	114
	Cobre	89
	Ferro fundido	72,5
	Estanho	74
	Latão	85
	Zinco	72

Fonte: (NBR6120, 1980).

- b) carga acidental (q), é toda aquela que pode atuar sobre a estrutura de edificações em função do seu uso (pessoas, móveis, materiais diversos, veículos etc.).

Na referida norma é apresentado ainda tabelas com as cargas verticais que se consideram atuando nos pisos de edificações, além das que se aplicam em caráter especial

referente a carregamentos devidos a pessoas, móveis, utensílios e veículos, e são supostas uniformemente distribuídas.

2.3 Galpão metálico industrial

Segundo Pravia et al. (2010), os galpões ou edifícios industriais simples, são construções em aço geralmente de um único pavimento, constituídos de sistemas estruturais compostos por pórticos regularmente espaçados, com cobertura superior apoiada em sistemas de terças e vigas em perfil I ou treliças. Na Figura 3 são mostradas as partes principais de um galpão industrial simples, com colunas e vigas em perfil I, contraventamentos verticais no fechamento lateral e contraventamentos horizontais na cobertura.

Figura 3 - Galpão industrial típico com colunas e vigas em perfil I.



Fonte: (PRAVIA, DREHMER, & JÚNIOR, 2010).

De acordo com Pfeil (2013), um galpão metálico simples é formado pela associação de elementos lineares e sistemas planos, onde as terças são vigas longitudinais dispostas nos planos da cobertura e destinadas a transferir à estrutura principal as cargas atuantes naqueles planos, tais como peso do telhamento e sobrepessões e sucções devidas ao vento. O sistema portante principal é formado pela associação rígida entre a viga de cobertura e as colunas. Esse sistema deve resistir à ação do vento nas fachadas longitudinais e na cobertura além das

cargas gravitacionais. Os sistemas de contraventamento são feitos por barras associadas geralmente em forma de X compondo sistemas treliçados, esses sistemas são destinados principalmente a fornecer estabilidade espacial ao conjunto, além de distribuir as cargas de vento.

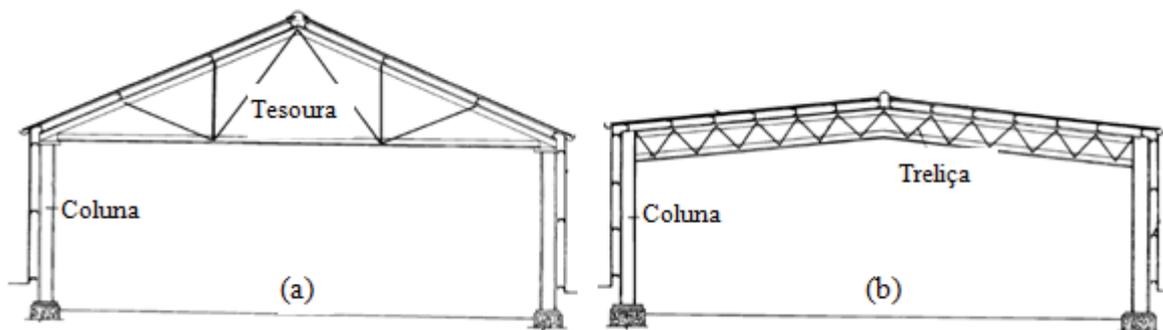
Conforme Bellei (1998), os edifícios industriais são construções, geralmente de um pavimento, que têm por finalidade cobrir grandes áreas destinadas a diversos fins, como fábricas, oficinas, almoxarifados, depósitos, hangares, etc.

Diante das várias configurações de galpões metálicos simples que podem ser executados, as mais usuais são as representadas nas figuras a seguir:

A Figura 4 (a) mostra colunas simples e tesouras, este é um dos tipos mais antigos, possivelmente a configuração mais barata na construção de galpões. O peso por unidade de área é muito baixo, porém para inclinações inferiores a 15° a forma da tesoura torna-se inconveniente.

Na Figura 4 (b) apresenta o galpão com colunas simples e treliça, utilizado quando o vão dos edifícios é muito grande, existem vantagens no uso de menores inclinações da cobertura associadas às vigas treliçadas, ao invés das tesouras.

Figura 4 - (a) Colunas simples e tesouras, (b) colunas simples e treliças.

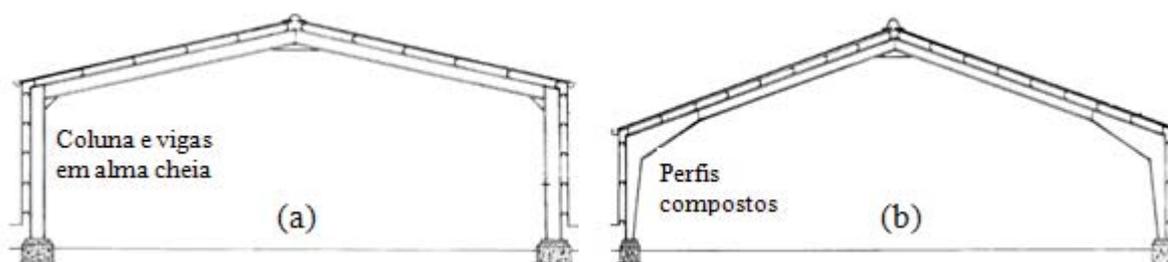


Fonte: (BELLEI, 1998).

A Figura 5 (a) apresenta um pórtico com pilares e vigas de cobertura em alma cheia. Comparado com as vigas treliçadas ou tesouras, as vigas em alma cheia, tem como vantagem a padronização estrutural e construtiva, simplicidade de projeto e detalhamento, rapidez na fabricação e montagem das estruturas.

Na Figura 5 (b) mostra uma solução de configuração de pórtico para grandes vãos, onde podem ser utilizados perfis compostos ou ter a inércia variável para melhorar a eficiência estrutural.

Figura 5 - (a) Pórticos para vãos pequenos e médios, (b) pórticos para grande vãos.



Fonte: (BELLEI, 1998).

Conforme orientação de Bellei (1998), para o espaçamento mais conveniente das estruturas nos diferentes vãos entre pórticos, utiliza-se a relação indicada na Tabela 5.

Tabela 5 - Vãos entre pórticos.

Vão		Espaçamento entre pórticos		
Pequeno:	até 15 m	3	a	5
Médio:	16 a 25 m	4	a	7
	26 a 35 m	6	a	8
Longo:	36 a 45 m	8	a	10
Inércia variável:	46 a 60 m	9	a	12

Fonte: (BELLEI, 1998).

Os pórticos das Figuras 4 e 5 podem ser executados com bases rotuladas, o que simplifica as fundações, ou com bases engastadas, o que requer fundações mais onerosas. Para vãos médios e grandes existe pouca vantagem em se engastar as bases (BELLEI, 1998).

Os galpões industriais podem ser de vãos simples conforme exposto ou múltiplos, quando grandes áreas cobertas são necessárias e também se à necessidade de facilidades para a movimentação de material dentro do galpão, tendo como uma solução a colocação de pontes rolantes. Pode-se construir qualquer tipo de estrutura, desde que haja imposições rígidas.

2.4 Sistemas de movimentação para galpão

Na sequência seguem sistemas de movimentação para estruturas metálicas, onde nos arquivos da USPTO (2015), foram analisados os seguintes documentos: US3248830 (hangar retrátil), US3739537 (hangar de aeronaves), US4152990 (estrutura móvel para dormentes de trilho ferroviário). No Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), analisaram-se os seguintes arquivos: PI0805707-9 A2 (batente para rodas de ponte rolante), PI9606015-8 A (estaleiro móvel). Abaixo, seguem as descrições resumidas dos principais sistemas de movimentação analisados.

2.4.1 Hangar retrátil

O hangar retrátil tem como inventor Maynard (1966), cujo número da publicação é US3248830. Informações pertinentes a esta patente podem ser encontradas em (USPTO U. S., Retractable hangar, 1966). Na sequência, segue a descrição resumida do funcionamento do hangar retrátil.

Esta invenção refere-se a hangares retráteis e estruturas similares, tais como abrigos para armazenamento e mais particularmente, mas não exclusivamente, a hangares para o uso no bordo de navios para o armazenamento de helicópteros.

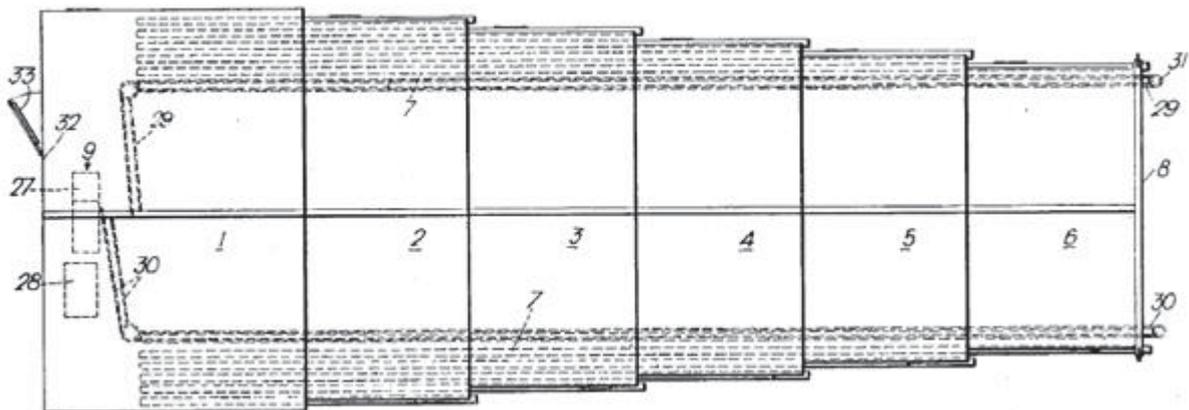
Nos navios, quebra-gelos e outras embarcações marítimas, helicópteros são amplamente empregados e guardados no convés, mas é altamente desejável proteger as aeronaves guardadas contra a exposição às condições atmosféricas que permeiam, tipo água do mar, vapores corrosivos do funil do navio, e outras causas de danos na aeronave. Além disso, é desejável ser capaz de proteger as pessoas que trabalham na aeronave. Helicópteros precisam de um espaço livre para pousar e decolar e o tamanho de tal espaço é governado pelo diâmetro do rotor principal, normalmente, 12,192 metros. Para habitação do helicóptero no convés dos navios o comprimento do hangar é igualmente regido pelo diâmetro do rotor principal, de modo que, embora seja desejável para abrigar o helicóptero em um convés de hangar, o hangar e a plataforma de pouso também ocupam um espaço que não estão disponíveis nas embarcações ou esses espaços são demasiadamente valiosos para colocar inteiramente o helicóptero.

O principal objetivo da presente invenção consiste em proporcionar um hangar retrátil ou estrutura semelhante que possa ser retraída dentro de um espaço mínimo ou alargada de modo a formar uma caixa de armazenamento assim, por exemplo, reduzindo a área de convés de uma embarcação marítima atribuído a um helicóptero e permitindo a manutenção sob a cobertura do helicóptero armazenado, de preferência a uma temperatura confortável para que as pessoas possam trabalhar.

A Figura 6 mostra a vista do plano da cobertura prolongada, onde tende a ser a cabide no convés do navio para um helicóptero. O movimento do hangar retrátil é tipo telescópico ao longo do trajeto tracejado indicado pelo número (7), e as seções (2) á (6) são as partes móveis.

Para mover as seções (2) à (6) de retraída para a posição estendida ou vice-versa, meios operacionais são fornecidos compreendendo o motor (27), que pode ser um motor elétrico ou um mecanismo de acionamento manual.

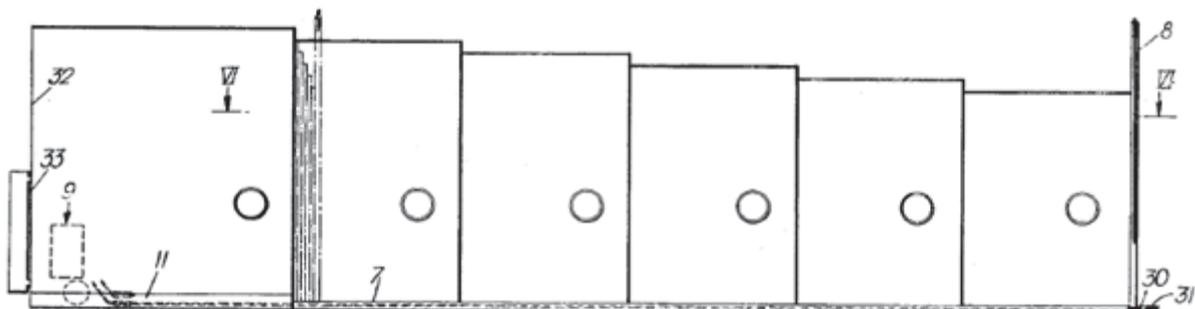
Figura 6 - Vista do plano da cobertura do hangar retrátil.



Fonte: (MAYNARD, 1966).

A Figura 7 mostra a elevação lateral da estrutura do hangar retrátil.

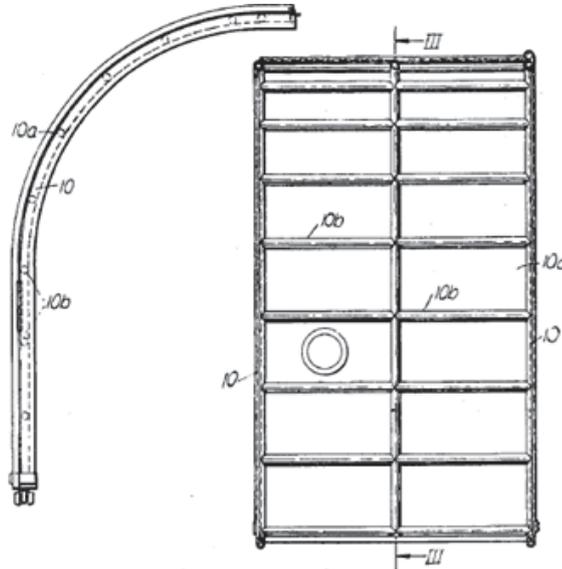
Figura 7 - Vista lateral do hangar retrátil.



Fonte: (MAYNARD, 1966).

A Figura 8 representa a vista lateral de uma secção móvel da estrutura das Figuras 5 e 6 e mostra também um corte transversal da linha III-III.

Figura 8 - Corte transversal do hangar retrátil.

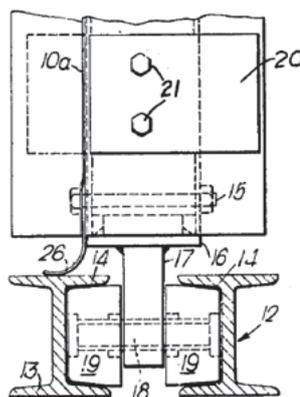


Fonte: (MAYNARD, 1966).

A Figura 9 é a seção transversal ampliada onde o movimento da estrutura ocorre, a qual mostra as rodas posicionadas entre um par de trilhos. O trilho é formado por duas vigas longitudinais indicadas pelo número (13), onde há os canais virados para dentro (14).

A estrutura lateral do hangar retrátil é fixada no suporte (17), por meio da guia (16) e fixados entre si através dos parafusos (15). A parte inferior da peça (17) contém um furo para receber o eixo (18), que se projeta para receber as rodas (19). O diâmetro das rodas (19) são ligeiramente menores que a distância entre os canais (14) para formar o movimento, mas não permitindo que as rodas se movam para fora dos trilhos.

Figura 9 - Seção transversal ampliada.

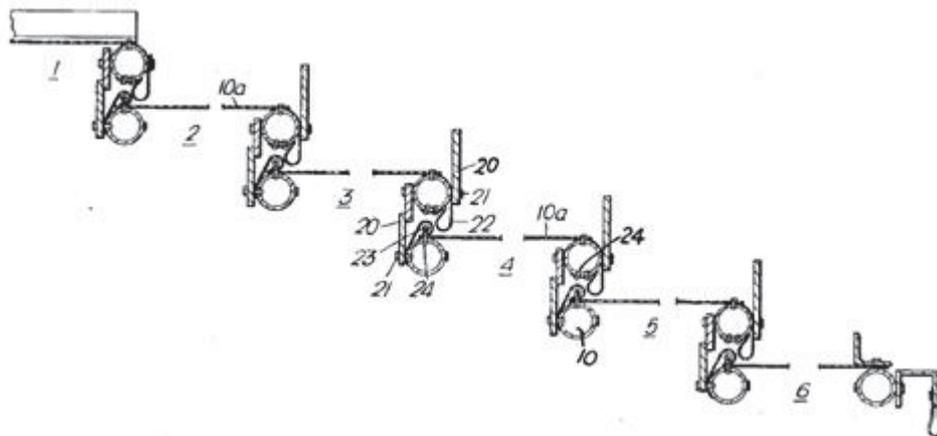


Fonte: (MAYNARD, 1966).

A Figura 10 é uma seção transversal horizontal da linha VI - VI da Figura 6. A estrutura tubular (10) possui a peça (20) fixada, que funciona como um batente, efetuando a parada das seções adjacentes, de modo que o movimento telescópico que se prolonga ao longo das seções, possa acontecer.

O material de vedação flexível (22) é fixado nas extremidades da estrutura (10), para realizar a vedação lateral do hangar.

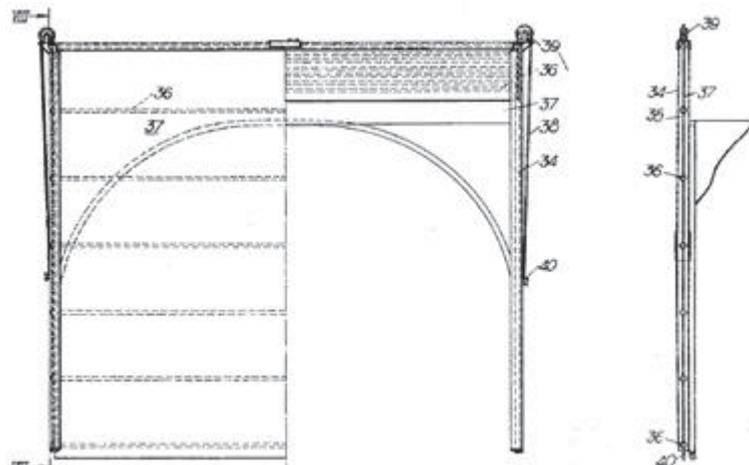
Figura 10 - Seção transversal horizontal do hangar retrátil.



Fonte: (MAYNARD, 1966).

A Figura 11 representa a vista da extremidade exterior da estrutura das Figuras 5 e 6, onde mostra uma parte fechada à esquerda e a outra parte aberta à direita.

Figura 11 - Vista da extremidade do hangar retrátil.



Fonte: (MAYNARD, 1966).

2.4.2 Hangar de aeronaves

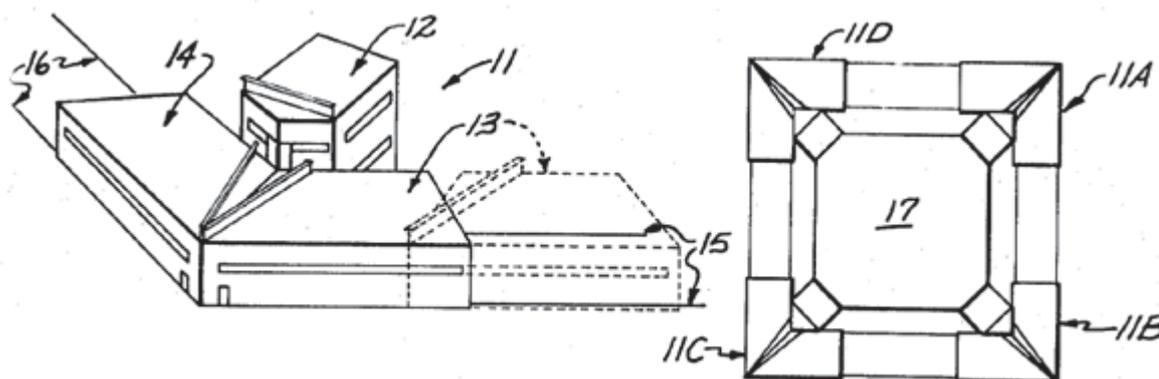
O hangar de aeronaves tem como inventores Barnes e Hamilton (1973), cujo número da publicação é US3739537. Informações pertinentes a esta patente podem ser encontradas em (USPTO U. S., Aircraft hangar, 1973). Abaixo, segue descrição resumida do hangar de aeronaves.

Para o armazenamento de aeronaves extremamente grandes e modernas, tais como o Boeing 747, o Boeing 747 estendido e o Lockheed 1011, a presente invenção compreende um prédio central estático e duas estruturas móveis, incluindo guias principais para estabelecer o movimento ao longo dos trilhos.

A Figura 12 à esquerda, ilustra em perspectiva o hangar de aviões (11) que inclui um edifício estático central (12) e duas unidades de hangares móveis (13), (14). Através das guias (15), (16) são fornecidos, respectivamente, para as unidades de construção móveis (13), (14), meios de movimentação, sendo as linhas pontilhadas indicando os locais de deslocamento e as linhas em contorno completo a estrutura integral.

Como mostrado na Figura 12 à direita, pode haver um agrupamento dos hangares disposto conforme ilustrado no desenho. Por exemplo, nesse desenho é ilustrado um agrupamento que inclui quatro dos presentes hangares de aviões, os quais são 11A, 11B, 11C e 11D dispostos em um formato quadrado. Cada um dos hangares 11A até 11D é apresentado em um dos quatro cantos, onde se tem um edifício central (17), o qual pode compreender vários andares para os escritórios e oficinas de manutenção.

Figura 12 - À esquerda vista em perspectiva e à direita o conjunto em planta.

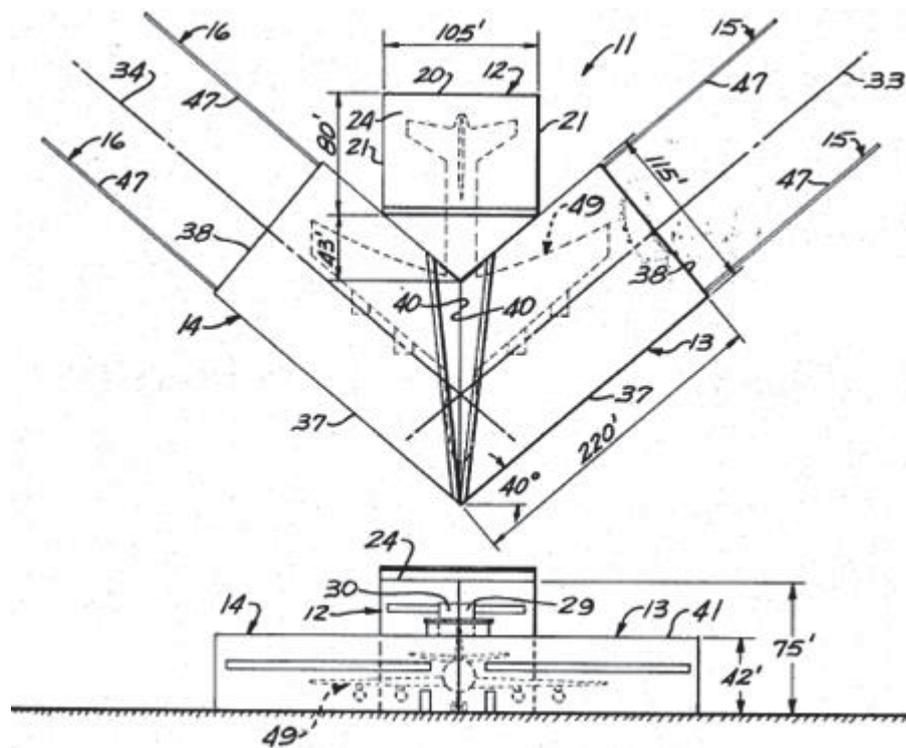


Fonte: (BARNES & HAMILTON, 1973).

A Figura 13 apresenta uma vista superior do presente hangar com duas unidades móveis adjacentes e uma vista frontal, a fim de obter-se uma ideia das dimensões macro do presente hangar (11). Todas as dimensões pertinentes das unidades de construção (12), (13), (14) estão indicadas na referida figura.

Deve-se notar, na Figura 12, que a aeronave (49) está completamente fechada dentro do hangar (11), a fim de que as operações de manutenção de rotina ou reparos de emergência sejam realizadas dentro do hangar (11).

Figura 13 - Vista superior com duas unidades móveis adjacentes e uma vista frontal.



Fonte: Autor.

A Figura 14 representa a vista superior do presente hangar e uma vista frontal. Como alternativa, o hangar (11) pode ser posicionado adjacente ao edifício de serviço existente (18), e com ele ligado por meio do corredor (19).

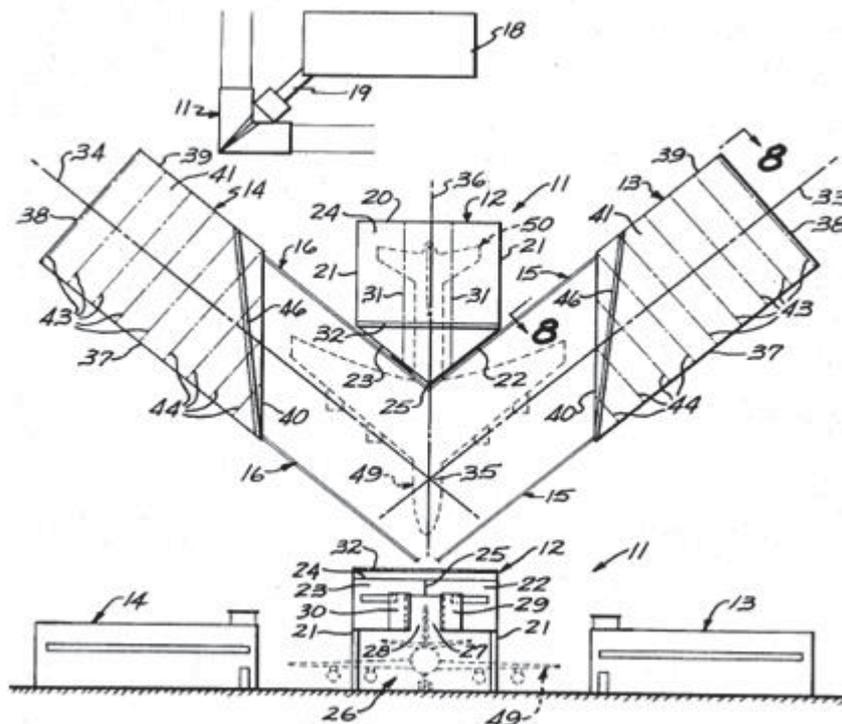
A unidade de construção estática central (12), inclui uma parede (20) e paredes laterais (21) as quais se estendem a partir do nível do solo ao nível do telhado (24), também inclui duas paredes frontais (22), (23) que convergem a partir das bordas frontais das paredes laterais (21) á uma linha vertical (25). O edifício central estático (12) inclui uma abertura frontal (26), cuja superfície superior é definida pela borda inferior das paredes (22), (23). As

aberturas (27), (28) são fornecidas nas paredes frontais (22), (23). As porta (29), (30) estão montados nas paredes frontais (22), (23), o movimento deslizante entre as posições aberta e fechada são em relação às aberturas (27), (28). Ainda com relação ao edifício central estático (12), pode incluir elementos da estrutura principal rígidos ou treliças indicado pela linha (31). A treliça (32) se estende uma certa distância das paredes laterais (21) conforme mostrado na Figura 13.

Referindo-se a vista superior e a vista frontal da Figura 13, as guias (15), (16), estabelecem o movimento das duas unidades de construção móvel (13), (14) ao longo das linhas de interseção correspondentes, ou seja, para os eixos longitudinais (33), (34) das unidades de construção móvel (13), (14). O ponto de interseção (35) está disposto na frente da unidade de construção estática central (12) e que coincide com o eixo longitudinal (36) da referida unidade.

Ainda na Figura 14 é ilustrado, em linha pontilhada, um avião (49) corresponde ao Boeing 747. Um acionamento externo tipo trator (não ilustrado) pode ser utilizado para mover a aeronave (49). A cauda (50) deve ser posicionada em primeiro lugar, entre as seções móveis (13), (14) na unidade de construção estática central (12). Na sequência, as unidades de construção móvel (13), (14) são movidas ao longo das guias (15), (16).

Figura 14 - Vista superior e frontal do hangar de aeronaves.



Fonte: (BARNES & HAMILTON, 1973).

A configuração e a construção apropriada da unidade de construção móvel (13) serão agora descritas com referência às Figuras 13 e 14. Esta descrição é aplicável igualmente para a unidade de construção móvel (14).

A Figura 15 mostra uma vista lateral de uma das duas unidades dos hangares móveis, visto a partir da linha 8-8 da Figura 13. Apresenta também uma vista em perspectiva fragmentada da guia que estabelece o movimento das duas unidades móveis do hangar e uma vista superior, semelhante a Figura 12, ilustrando uma forma de configuração alternativa do presente hangar adaptado para incluir uma aeronave maior.

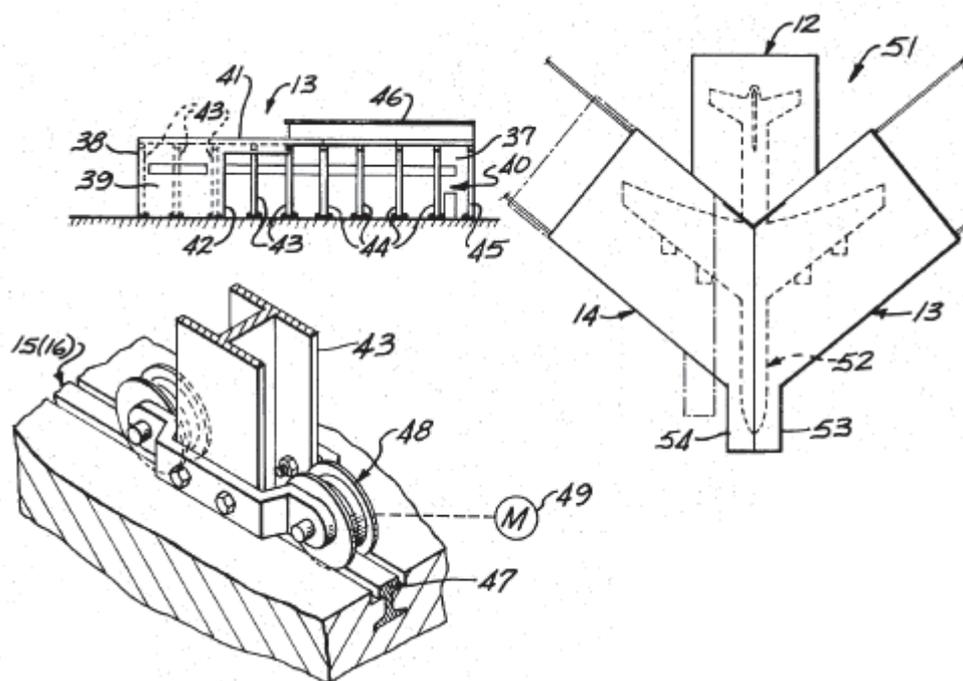
A unidade de construção móvel (13) inclui uma parede frontal (37), uma parede na extremidade (38), uma parede traseira (39) oposta à parede frontal (37), uma extremidade aberta (40) oposta a parede da extremidade (38), e uma cobertura (41). A parede traseira (39) está dotada de uma abertura (42) indicada na Figura 14, que corresponde essencialmente a uma metade da abertura (26) mostrada na Figura 13, da unidade central estática (12). A sobreposição deve ser suficiente na abertura da periferia (42), com a finalidade de vedação da área de contato entre a parede traseira (39) e da parede frontal (22) da unidade central estática (12).

Também com relação a unidade de construção móvel (13), podem ser incluso quadros principais em treliças rígidas em forma de U invertido (43), que se prolongam transversalmente em relação à unidade (13). Os quadros (43) têm segmentos paralelos com o telhado (41), e paredes frontal e traseira (37), (39) respectivamente. Além disso, a unidade (13) inclui quadros rígidos em forma de L ou treliças (44), tendo segmentos verticais paralelos com a parede frontal (37) e segmentos horizontais paralelos com o telhado (41). Uma coluna de canto (45) mostrada na Figura 14 pode ser instalada no canto, onde a parede frontal (37) termina. Um conjunto de treliças (46) é posicionado a uma distância entre a extremidade superior da coluna (45) e a extremidade superior do quadro principal (43), adjacente à parede traseira (39).

Como mostrado na Figura 15, cada um dos trilhos (47) são rebaixados no solo, de modo que a sua superfície superior fique no nível de topo do piso acabado. Cada um dos perfis principais (43) é fixado no suporte que interliga as rodas (48). O dispositivo de acionamento, tipo um motor elétrico, é ilustrado esquematicamente em (49), o qual tem como propósito mover cada uma das unidades de construção móvel (13), (14) ao longo das guias (15), (16), respectivamente.

Uma disposição alternativa do presente hangar é ilustrada na Figura 15 e designada pelo número (51). O hangar (51) está adaptado para incluir uma aeronave (52), por exemplo, um Boeing 747 estendido. O hangar (51) compreende uma versão modificada do hangar (11) da Figura 12. As modificações incluem o aumento do comprimento da unidade de construção estática central (12), para atender a seção da cauda mais longa e o aumento do comprimento longitudinal de cada uma das unidades de construção móvel (13), (14) para atender o aumento da envergadura da asa da aeronave (52) e também a adição de extensões (53), (54) nas unidades de construção móveis (13), (14), respectivamente, para adaptar a fuselagem da aeronave (52).

Figura 15 - Vista lateral, vista em perspectiva da guia que estabelece o movimento e uma vista superior.



Fonte: Autor.

2.4.3 Batente de rodas de pontes rolantes

O batente de rodas para pontes rolantes tem como inventores Souza e Santana (2010), cujo número da publicação é PI0805707-9 A2. Informações pertinentes a esta patente podem ser encontradas no INPI (2010). A seguir descrição resumida do batente de rodas.

Pontes rolantes são equipamentos de médio e grande porte, destinados à movimentação de cargas suspensas, que se deslocam longitudinalmente no alto dos galpões

industriais, apoiadas pelas extremidades em rodas que se movimentam sobre trilhos fixados em vigas de rolamentos na estrutura do galpão, constituindo um conjunto móvel similar ao de rodas-trilhos do sistema ferroviário tradicional.

Na parada de uma ponte rolante para manutenção, é feito um procedimento de segurança no qual se utilizam batentes de rodas que são fixados nos trilhos, com o objetivo de proteger a ponte em manutenção contra o impacto acidental de outras pontes do mesmo galpão que estejam em operação, movimentando-se nos mesmos trilhos da ponte que se encontra em movimentação.

Procurando proporcionar melhores condições de segurança, humana e operacional, e maior rapidez no procedimento de fixação do batente no trilho, foi idealizado o representado na Figura 16. Na sequência segue a descrição das funções de cada componente do batente.

- Chapa de impacto (1) é destinada a receber o impacto da roda da ponte rolante que se movimenta em direção à ponte parada para manutenção, evitando a colisão dos dois equipamentos.

- Alça de transporte (5) a qual se destina a transportar manualmente o batente para o ponto do trilho onde será instalado.

- Lado horizontal (6) que possui uma superfície horizontal de fixação do batente que se apoia sobre o trilho da ponte rolante.

- Lado vertical (7) que contém uma superfície lateral que se prolonga verticalmente do lado horizontal (6), formando um ângulo de 90° .

- Sapata móvel (8) é o dispositivo de fixação lateral do batente no trilho, possuindo movimentos de abertura para permitir o posicionamento do dispositivo no ponto desejado.

- Sapata fixa (9), soldada no lado vertical (7) do batente, situa-se em posição oposta à sapata móvel 8, complementando com esta a fixação do batente sobre o trilho.

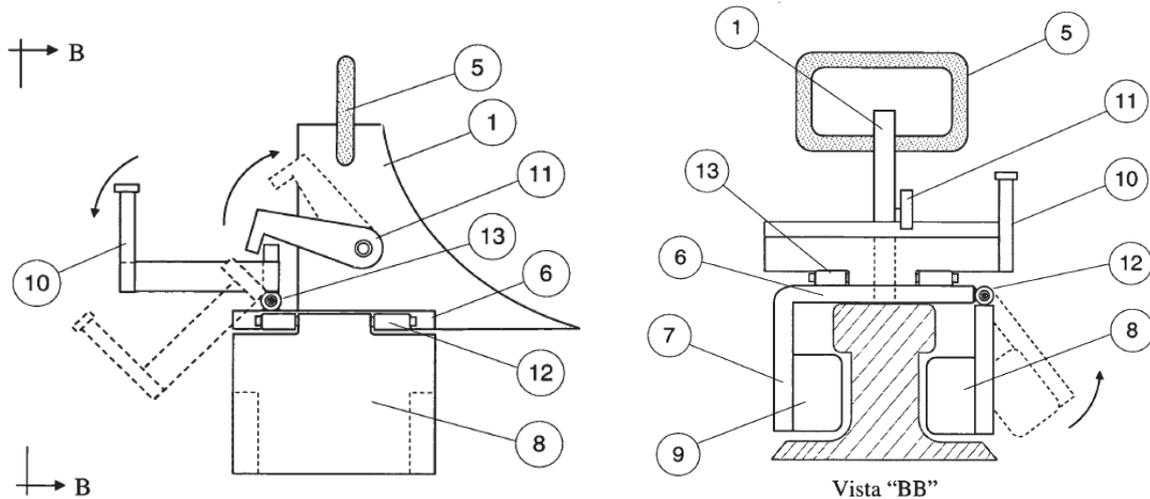
- Trava de segurança (10), dispositivo móvel destinado a impedir o movimento de abertura da sapata móvel (8), garantindo a segurança da fixação do batente sobre o trilho.

- Gatilho (11), dispositivo móvel fixado numa das laterais da chapa de impacto (1), destinado a segurar a trava de segurança (10) em posição suspensa para permitir a abertura da sapata móvel (8).

- Dobradiça lateral (12) é o ponto de articulação da sapata móvel (8).

- Dobradiça transversal (13) é o ponto de articulação da trava de segurança (10).

Figura 16 - Batente de rodas de pontes rolantes.



Fonte: (SOUZA & SANTANA, 2010).

O procedimento de fixação do batente no trilho segue as seguintes etapas:

- Levanta-se o gatilho (11) que se encontra fixado numa das laterais da chapa de impacto (1);
- Levanta-se a trava de segurança (10);
- Abaixa-se o gatilho (11), prendendo-o contra a trava de segurança (10), que dessa forma fica suspensa, liberando o movimento de abertura da sapata móvel (8), articulada na dobradiça lateral (12);
- Abre-se lateralmente a sapata móvel (8);
- Apoia-se o batente sobre o trilho pelo lado horizontalmente (6) e pela sapata fixa (9);
- Fecha-se a sapata móvel (8), ajustando-a contra a lateral do trilho;
- Levanta-se o gatilho (11), liberando a trava de segurança (10) que, articulada na dobradiça transversal (13), cai pela ação de seu peso, posicionando-se rente à sapata móvel (8) e impedindo seu movimento de abertura, travando o batente no trilho.

2.5 Forças atuantes no contato entre a roda e o trilho

Na sequência, seguem pesquisas realizadas referentes ao coeficiente de atrito e as forças de adesão, durante o deslocamento de rodas em trilhos.

Conforme descrito por Zeng e Wu (2008), o requisito básico para a segurança do sistema de transporte ferroviário é que o descarrilamento durante a execução do movimento nunca deva ser permitido. A subida do flange da roda é um tipo importante de descarrilamento que pode ser causado por uma grande força lateral no conjunto roda / trilho ou a redução da carga na roda. O processo de subida do flange da roda pode ser considerado como estado estacionário em que o efeito de inércia do rodado pode ser negligenciado, ou seja, ocorre a perda do contato entre a roda e o trilho. A fórmula de Nadal é o limite mais amplamente utilizado para a avaliação do descarrilamento de subida do flange da roda, mas é um critério de descarrilamento muito conservador.

A fórmula de Nadal é uma equação na concepção de trens que relaciona a força vertical exercida nas rodas sobre o trilho, com a força lateral da roda contra a face do trilho. Esta relação é significativa no projeto ferroviário, como um descarrilamento de subida da roda pode ocorrer, se as forças laterais e verticais não forem devidamente consideradas no projeto. A equação de Nadal é representada por:

$$\left(\frac{L_t}{V_t}\right) = \left(\frac{\tan(\beta) - \mu}{1 + \mu \tan(\beta)}\right) \quad (2.7)$$

Nesta equação, L_t e V_t referem-se às forças laterais e verticais respectivamente, conforme ilustrado na Figura 17 as quais atuam sobre o trilho e a roda, β é o ângulo formado quando o flange da roda está em contato com a face do trilho, e μ é o coeficiente de atrito entre a roda e o trilho. Tipicamente, a carga no eixo do rodado deve ser tal que as forças laterais das rodas contra o trilho não devem exceder 50% da força vertical do veículo sobre o trilho. Dito de outra forma, deve haver duas vezes mais força vertical, segurando a roda no trilho do que a força lateral, pois a força lateral existente tende a fazer a roda subir. Esta relação é conseguida combinando as rodas com o perfil adequado do trilho para atingir a relação L_t / V_t desejada. Se a razão entre a força lateral e a força vertical ficar muito alta, o flange da roda irá ser pressionado contra a face do trilho, e durante o movimento isto fará com que a roda suba, ocorrendo o descarrilamento do vagão.

A Figura 17 mostra a interação entre a roda e o trilho e as forças atuantes sobre o rodado.

Onde:

V_t : representa a força vertical;

L_t : representa a força lateral;

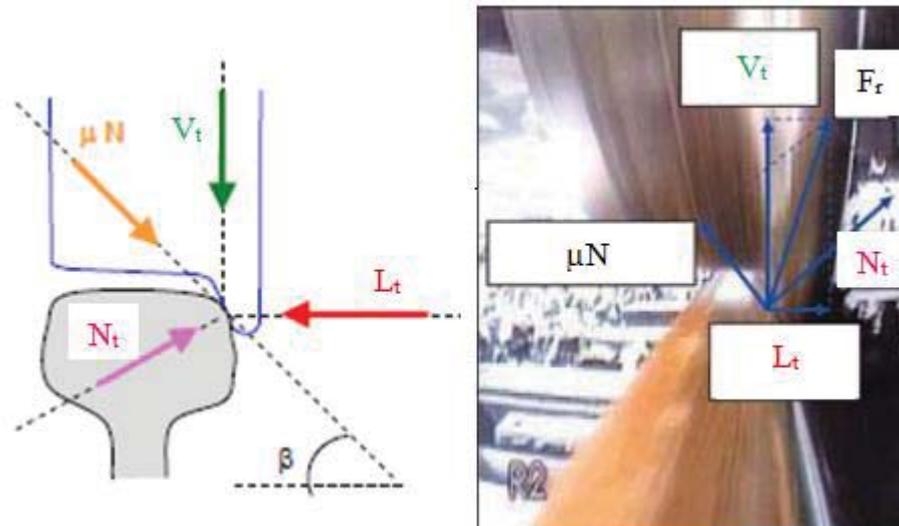
β : é o ângulo formado entre a o flange da roda e o trilho;

N_t : é a força normal;

μN : força de atrito;

F_r : força resultante.

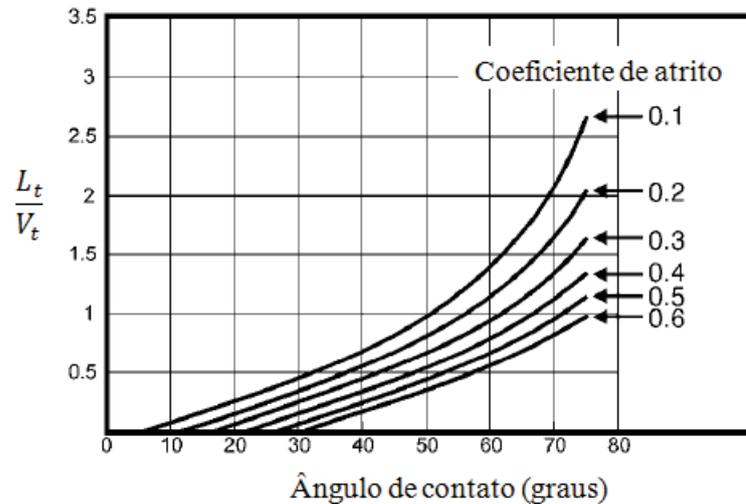
Figura 17 - Interação entre a roda e o trilho e as forças sobre o rodado.



Fonte: (PORTO, 2011).

Deve-se observar que quanto maior o ângulo β , a possibilidade de ocorrência do descarrilamento é maior. Por exemplo, para uma situação típica onde se tem um coeficiente de atrito μ igual a 0,4 e o ângulo β igual a 46° a relação L_t / V_t será de 0,45 e alterando o ângulo β para 70° , a relação da força lateral com a força vertical será de 1,1, ou seja, pode ocorrer o descarrilamento da roda no trilho. Segue na sequência a Figura 18 onde é apresentado um gráfico onde são relacionados o ângulo de contato β , o coeficiente de atrito μ e a relação entre a força lateral com força vertical que ocorre entre a roda e o trilho.

Figura 18 - Critério de descarrilamento de Nadal.



Fonte: (PORTO, 2011).

Conforme descrito por Wang, Zeng e Luo (2014), a força de adesão entre a roda e o trilho é o produto da força do contato vertical e o coeficiente de aderência, o qual pode ser calculado pela Equação 2.5. O coeficiente de aderência está relacionado a diversos fatores, como a condição da superfície da roda e do trilho, a velocidade do veículo, a carga na roda e assim pode ser relacionado conforme as Equações 2.7 e 2.8, onde geralmente é tomado como a equação de cálculo do coeficiente de aderência. Esta equação está relacionada ao trilho seco ou molhado e a velocidade em que está ocorrendo o deslocamento. Se o estado da superfície dos trilhos e a velocidade do deslocamento são constantes, as variações da força de contato vertical se refletem na força de aderência e variações na força de adesão entre a roda e o trilho.

$$F_{\mu} = V_t \mu \quad (2.8)$$

Onde:

F_{μ} representa a força de atrito;

μ é o coeficiente de adesão ou atrito;

v é a velocidade de deslocamento em km/h.

$$\mu = 0,0624 + \frac{45,6}{v + 260} \text{ (trilho seco)} \quad (2.9)$$

$$\mu = 0,0405 + \frac{13,5}{v + 120} \text{ (trilho molhado)} \quad (2.10)$$

A variação da força de contato vertical na roda é afetada pelas forças aerodinâmicas, as quais estão relacionadas com a velocidade do vento e a velocidade do veículo. Observa-se que a força mínima média de contato entre a roda e o trilho reduz com o aumento da velocidade do veículo e da velocidade do vento lateral. Assim, as cargas aerodinâmicas devem ser consideradas como um fator que afeta a variação da força de aderência.

2.6 Tipos de galpões móveis

A utilização de galpões móveis, principalmente na área naval tem como função melhorar as condições de trabalho das pessoas e, como consequência, aumentar o processo produtivo das construções de embarcações de pequeno, médio e grande porte e equipamentos que necessitam serem produzidos, próximo das embarcações. Dentro deste contexto, algumas empresas apresentam soluções de galpões móveis conforme ilustrado nas figuras que seguem. A Figura 19 mostra diversos galpões móveis sendo utilizados para a fabricação de plataformas e componentes de embarcações.

Figura 19 - Galpões móveis existentes.



Fonte: (Dagnese, 2012).

As Figuras 20 (a) e (b) apresentam a vista frontal do galpão móvel, com pessoas trabalhando na construção de equipamentos em seu interior e, desta forma, sendo protegidas da irradiação. Conforme Dagnese (2012), o galpão móvel é composto por uma estrutura treliçada a qual é formada por perfis metálicos conformados á frio e a estabilização espacial

do galpão se dá por meio de vigas de travamento, contraventamentos horizontais e verticais. Também possuem um dispositivo de ventilação natural e iluminação natural através de placas translúcidas, ambas instaladas na cobertura.

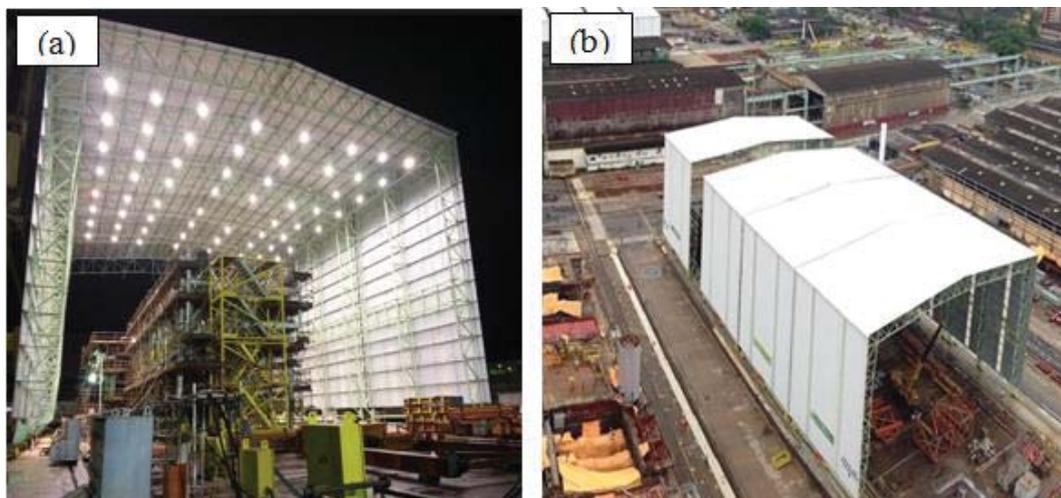
Figura 20 - Vista frontal do galpão móvel.



Fonte: (Dagnese, 2012).

A Figura 21 (a) apresenta a utilização do galpão móvel durante a noite, ampliando desta maneira a sua aplicação. A Figura 21 (b) mostra o galpão móvel sendo utilizado na fabricação de equipamentos. Os pilares e vigas do galpão móvel são em estruturas treliçadas e as terças do fechamento lateral e a cobertura são em perfil metálico dobrado, onde as telhas são fixadas.

Figura 21 - Utilização do galpão móvel.



Fonte: (Pietrauno, 2014).

Por meio da pesquisa realizada de galpões móveis existentes, observou-se a significativa relevância na sua aplicação, porém os sistemas de fixação e movimentação dos galpões móveis não são expostos pelas empresas.

2.7 Metodologia para projeto e desenvolvimento de produtos

Devido à pesquisa ser referente ao desenvolvimento de um sistema de movimentação e fixação para galpão metálico industrial, ou seja, um projeto mecânico, existem diferentes metodologias para auxiliar no desenvolvimento do projeto de produto, dentre as quais se destacam as descritas a seguir.

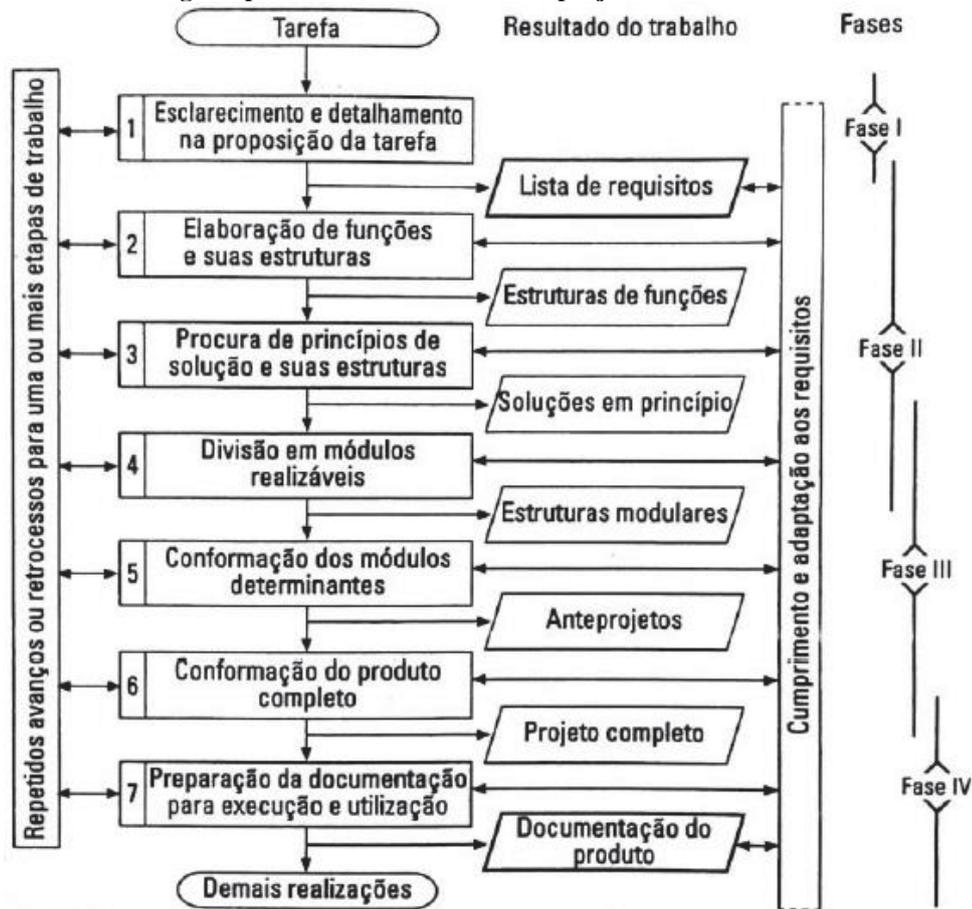
A metodologia de Baxter (2011), a qual tem o enfoque maior no designer industrial empregando o funil de decisões, se inicia com um alto grau de risco e incerteza e, ao longo das etapas, este risco de fracasso é minimizado. O desenvolvimento do produto proposto pelo autor é composto por cinco fases: especificação do produto, projeto conceitual, projeto de configuração, projeto detalhado e projeto para fabricação.

Na metodologia de Back et al. (2008), o desenvolvimento do produto é mais detalhado, engloba desde o planejamento até a validação do produto e, é dividida em oito fases: planejamento do produto, projeto informal, projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, preparação da produção, lançamento e validação. Devido ao fato desta metodologia possuir fases em todos os setores da empresa, contribui para diminuir a possibilidade de fracasso do produto, porém em algumas situações poderá ser muito extensivo utilizar todas as fases.

Já Stemmer (1979), utiliza um processo metódico para a solução de problemas com um enfoque maior na fabricação de peças.

A metodologia de Pahl et al. (2013) tem uma grande área de aplicação devido a estar baseada na norma alemã VDI2221. É dividida em quatro fases sendo elas a especificação do produto, projeto conceitual, o anteprojeto e o detalhamento. A Figura 22 apresenta o procedimento geral para o desenvolvimento do projeto, proposto por pelo autor.

Figura 22 - Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto.



Fonte: Pahl et al. (2013).

Conforme ilustrado na Figura 22, o procedimento para o desenvolvimento de produto é formado por quatro fases macro, as quais são subdivididas em subfases com o objetivo de dividir o problema de projeto em problemas menores e desta maneira facilitar a busca por princípios de solução. A primeira fase começa com o esclarecimento e detalhamento da tarefa, para obter a real necessidade do projeto. Após é realizada a lista de requisitos de acordo com as vontades e exigências do produto. A segunda fase é referente à busca por princípios de solução embasados em aplicações existentes. A terceira fase é o anteprojeto onde após a escolha da variante de solução mais promissora, é realizada a definição básica e quantitativa da solução do problema de projeto. Por último tem-se o detalhamento, na qual é realizada a configuração do produto. Os itens a seguir explicam mais detalhadamente as quatro fases.

2.7.1 Especificação do projeto

É a parte inicial no desenvolvimento do produto, onde é idealizada primeiramente a linha mestra onde são apresentadas as características que o produto deve possuir. Após a elaboração da linha mestra é gerada a lista de requisitos contendo os itens que são desejáveis e exigíveis, os quais podem ser qualitativos ou quantitativos. As afirmações e determinações da lista de requisitos estão ajustadas e sintonizadas às necessidades do desenvolvimento do projeto e às etapas de trabalho subsequentes. A lista de requisitos tem que estar sempre atualizada, pois dela poderá recorrer à liberação para a conceituação e à liberação dos demais trabalhos (PAHL et al., (2013).

De acordo com Stemmer (1979), na formulação do problema de projeto, quanto mais claramente forem determinadas as condições e exigências, tanto mais claro se apresentará o caminho a seguir para a solução do problema.

2.7.2 Projeto conceitual

É a parte do projeto na qual, após esclarecimento da tarefa por meio da abstração dos principais problemas, formação de estruturas de funções, procura de princípios de trabalho adequados e sua combinação numa estrutura de trabalho, se define a solução preliminar. Conceber é a definição preliminar de solução (PAHL et al., 2013).

Todas as etapas deverão ser executadas para que, desde o início, fique assegurada a construção da, aparentemente, melhor solução preliminar possível, já que o subsequente trabalho de projeto e detalhamento não, ou dificilmente, compensará deficiências básicas do princípio de solução. Uma solução de projeto duradoura e bem-sucedida nasce na seleção do princípio mais adequado e não da supervalorização de requintes de projeto. Esta constatação não contradiz o fato de que, mesmo com princípios aparentemente adequados ou suas respectivas combinações, possam surgir dificuldades que podem estar localizadas nos detalhes (PAHL et al., 2013).

As variantes de solução elaboradas precisam ser avaliadas. As variantes que não satisfazem as exigências da lista de requisitos são eliminadas, as restantes são avaliadas por critérios, neste contexto uma análise quantitativa deve ser realizada onde, tem-se duas maneiras distintas, sendo a análise de valor de benefício a qual estabelece uma escala gradual

de valores de 0 á 10 e a que segue a diretriz VDI2225 com escala gradual de 0 á 4 pontos. A análise de valor tem como vantagem de estar baseada em um sistema decimal baseado em porcentagens que facilita a correlação e subseqüente avaliação. Já a escala de 0 á 4 pontos tem a favor o fato de ser possível uma análise grosseira, devido a um conhecimento frequentemente precário da características das variantes (PAHL et al., 2005).

2.7.3 Anteprojeto

Conforme Pahl et al.(2013), o anteprojeto é a parte do projeto que, partindo da estrutura de funcionamento ou da solução preliminar, determina, de forma clara e completa, a estrutura da construção de um produto técnico segundo critérios técnicos e econômicos. Partindo de ideias qualitativas, o anteprojeto é a definição básica e quantitativa da solução. Já o detalhamento é a parte do projeto que contempla a estrutura de construção de um produto técnico por meio de prescrições definitivas sobre a forma, dimensionamento e acabamento superficial de todas as peças, definição de todos os materiais. O resultado do detalhamento é a definição da tecnologia de produção da solução.

Para auxiliar no desenvolvimento desta fase do anteprojeto, utiliza-se para o modelamento do produto *software* bidimensional e tridimensional a fim de compatibilizar a variante de solução escolhida, também para o dimensionamento dos componentes individuais e do conjunto dos componentes, é utilizado os conhecimentos da resistência dos materiais, mecânica aplicada e elementos de máquinas que podem ser realizados manualmente, porém cálculos mais complexos há necessidade de recorrer a *software* específicos, tipo análise 2D para pórticos planos o qual calcula o deslocamento, os esforços axiais, cortantes e os momentos fletores que atuam em estruturas e do método de elementos finitos para uma análise mais completa do conjunto.

2.7.4 Detalhamento

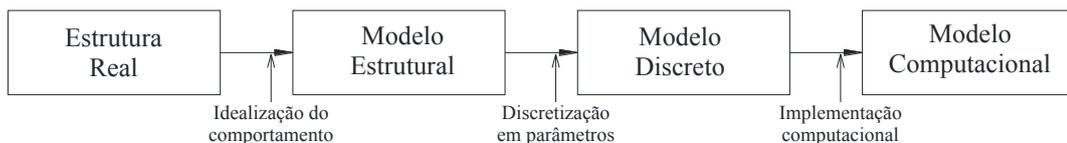
O detalhamento é a quarta e última fase da metodologia de desenvolvimento de produto proposto pelo autor Pahl et al.(2013), é a parte do projeto que contempla a estrutura de construção de um produto técnico por meio de prescrições definitivas sobre a forma, dimensionamento e acabamento superficial de todas as peças, definição de todos os materiais.

A utilização de uma metodologia para o desenvolvimento de produto, não é garantia de que o produto final terá sucesso, porém onde não é utilizada uma maneira metódica para desenvolver um produto, diversos estudos mostram que o custo com retrabalhos, protótipos, ferramentas e mão de obra entre outros, acabam se tornando muito onerosos para as empresas, e que o custo para a implantação de uma maneira metódica para o desenvolvimento de produto, se torna muito inferior comparado com os benefícios que a metodologia proporciona.

2.8 Análise estrutural

A análise estrutural tem como objetivo a determinação dos esforços internos e externos (cargas e reações de apoio), e das tensões correspondentes, bem como a determinação dos deslocamentos e as correspondentes deformações da estrutura que está sendo projetada. A análise estrutural trabalha com quatro níveis de abstração com relação à estrutura que está sendo analisada, como indicado na Figura 23, sendo o primeiro nível o mundo físico, isto é, o nível que representa a estrutura real tal como é construída. Essa visão de caráter geral sobre a análise de estruturas trata essencialmente da transformação do modelo estrutural, no modelo discreto, para o modelo computacional (Martha, 2010).

Figura 23 - Quatro níveis de abstração referentes a uma estrutura na análise estrutural.

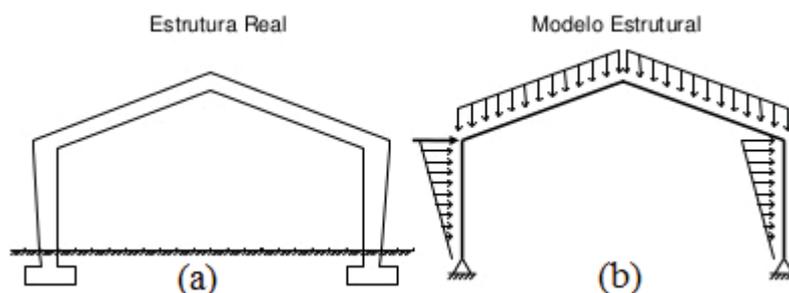


Fonte: (Martha, 2010).

O segundo nível é o modelo analítico utilizado para representar matematicamente a estrutura que está sendo analisada. Esse modelo é chamado de modelo estrutural ou modelo matemático e incorpora todas as teorias e hipóteses elaboradas para descrever o comportamento da estrutura em função das diversas solicitações. Essas hipóteses são baseadas em leis da física, tais como o equilíbrio entre forças e tensões, as relações de compatibilidade entre deslocamentos e deformações, e as leis constitutivas dos materiais que compõem a estrutura.

As Figuras 24 (a) e (b) mostram um corte transversal da estrutura real de um galpão e seu modelo estrutural, onde a representação das solicitações (cargas permanentes, cargas acidentais, etc.) pode envolver alto grau de simplificação ou pode ser muito próximo da realidade.

Figura 24 - (a) Corte transversal da estrutura (real) de um galpão e (b) modelo estrutural.



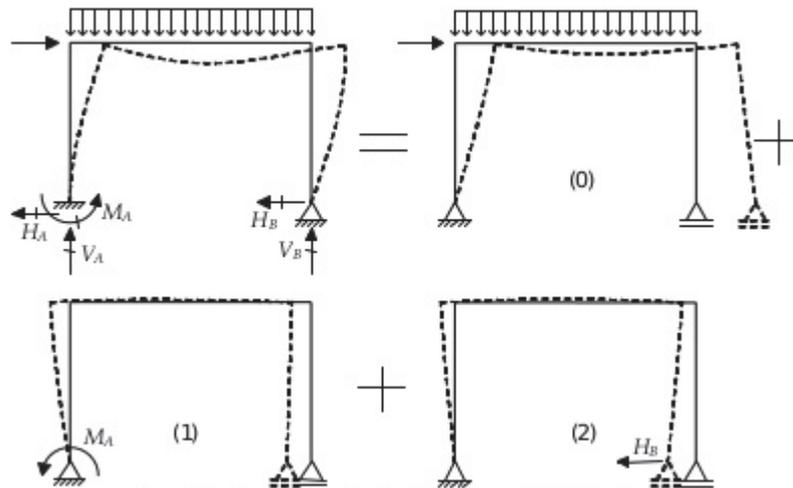
Fonte: (Martha, 2010).

No exemplo da Figura 24 (b), a ligação da estrutura com o solo foi modelada por apoios que impedem os deslocamentos horizontais e verticais, mas permitem o giro da base das colunas.

O terceiro nível de abstração utilizado na análise estrutural é o do modelo discreto (Figura 23), que é concebido dentro das metodologias de cálculo dos métodos de análise. De forma geral, os métodos de análise utilizam um conjunto de variáveis ou parâmetros para representar o comportamento da estrutura. Nesse nível de abstração, o comportamento analítico do modelo estrutural é substituído por um comportamento discreto, em que soluções analíticas contínuas são representadas pelos valores discretos de parâmetros adotados. A passagem do modelo matemático para o modelo discreto é denominado discretização.

Por exemplo, a Figura 25 mostra a discretização utilizada na solução de um pórtico plano. A solicitação externa atuante, denominada carregamento, é constituída de uma força lateral (horizontal) e uma força vertical uniformemente distribuída na viga (barra horizontal). Na figura, as setas indicadas com um traço no meio são as reações de apoio.

Figura 25 - Superposição de soluções básicas no método das forças.



Fonte: (Martha, 2010).

No exemplo da Figura 25, os hiperestáticos adotados são as reações de apoio M_A (reação momento no apoio da esquerda), H_B (reação horizontal no apoio da direita). A configuração deformada do pórtico, indicada pela linha tracejada, é obtida pela superposição de soluções básicas dos casos (0), (1) e (2) ilustrados na figura. Cada solução básica isola um determinado efeito ou parâmetro: o efeito da solicitação externa (carregamento) é isolado no caso (0), o efeito do hiperestático M_A é isolado pelo caso (1), e o efeito do hiperestático H_B é isolado no caso (2). Dessa forma, a solução do problema fica parametrizada (discretizada) pelos hiperestáticos M_A e H_B .

No quarto nível é o modelo computacional, no caso de estruturas contínuas (que não são compostas por barras), comumente é utilizado na análise estrutural o método de elementos finitos com formulação em deslocamentos (Zienkiewicz & Taylor, 2000). Nesse método, o modelo discreto é obtido pela subdivisão do domínio da estrutura em subdomínios, chamados de elementos finitos. Essa subdivisão é denominada malha de elementos finitos, e os parâmetros que representam a solução discreta são valores de deslocamento nos nós (vértices) da malha.

Para estruturas formadas por barras, os nós são identificados naturalmente no encontro ou nas extremidades das barras, enquanto para modelos contínuos os nós são obtidos pela discretização do domínio da estrutura em uma malha. Conforme (Martha, 2010), uma importante diferença entre os modelos discretos de estruturas reticuladas e de estruturas contínuas é que a discretização de uma malha de elementos finitos introduz simplificações em relação à idealização matemática feita para o comportamento da estrutura. Isso ocorre porque

as funções de interpolação que definem a configuração deformada de uma malha de elementos finitos não são, em geral, compatíveis com a idealização matemática do comportamento do meio contínuo, feita pela teoria da elasticidade. Dessa forma, a solução do modelo discreto de elementos finitos é uma aproximação da solução analítica da teoria da elasticidade, ao passo que a solução do modelo discreto de uma estrutura com barras prismáticas é igual à solução analítica da mecânica dos sólidos.

2.8.1 Estruturas com não linearidades geométricas

Conforme Dias de Meira Júnior (2010), não linearidades geométricas referem-se a não linearidades na estrutura ou componentes da mesma em razão da mudança na geometria que ocorre à medida que ela se deforma. Esta mudança ocorre porque a forma muda e/ou o material rotaciona. Não linearidades geométricas podem ser do tipo:

a) Grandes deformações: assume-se que as deformações são finitas. A forma muda (por exemplo, área, espessura, etc.). Defleções e rotações podem ser arbitrariamente grandes.

b) Grandes rotações: assume-se que as rotações são grandes, mas as deformações mecânicas (aquelas que causam tensões) são calculadas utilizando-se expressões lineares. A estrutura é assumida como não alterando a forma. Elementos para essa classe de problema referem-se à configuração original.

c) Enrijecimento por tensão: assume-se que ambas as deformações e rotações são pequenas. Também chamado de enrijecimento geométrico, ou enrijecimento incremental, ou enrijecimento por tensão inicial, é o enrijecimento (ou enfraquecimento) de uma estrutura devido ao seu estado de tensões. Esse efeito de enrijecimento normalmente precisa ser considerado para estruturas delgadas com rigidez à flexão muito pequena, quando comparado à rigidez axial, tais como cabos, vigas esbeltas e cascas.

d) Amolecimento por rotação: assume-se que ambas as deformações e rotações são pequenas. Nesta situação leva-se em conta que o movimento radial da massa da estrutura está sujeito a uma velocidade angular. Dessa forma, esse é um tipo de grandes deflexões, mas pequenas rotações. A vibração de um corpo em rotação pode causar movimentos circunferenciais relativos, os quais mudam a direção da força centrífuga, que, por sua vez, tende a desestabilizar a estrutura. Como uma análise de pequenas deflexões não leva

diretamente em conta as mudanças na geometria, este efeito pode ser levado em conta pelo ajuste da matriz de rigidez, chamado amolecimento por rotação.

2.8.2 Estruturas com não linearidades materiais

Segundo Dias de Meira Júnior (2010) apud Ansys (1994) as não linearidades materiais são devidas ao relacionamento não linear entre tensão e deformação, isto é, a tensão é uma função não linear da deformação. O relacionamento é também dependente da trajetória (exceto para o caso de elasticidade não linear e hiperelasticidade), de forma que a tensão depende também da história das deformações, bem como da própria deformação. Existem muitos tipos de não linearidades materiais, tais como:

(a) Plasticidade independente de taxa de deformação é caracterizada pela deformação instantânea e irreversível que ocorre no material.

b) Plasticidade dependente da taxa de deformação permite que deformações plásticas se desenvolvam sobre um intervalo de tempo. Isto é também chamado viscoplasticidade.

c) Deformação (*creep*) é também uma deformação irreversível que ocorre no material e é dependente da taxa de deformação, de tal forma que a deformação se desenvolve sobre o tempo. O intervalo de tempo para *creep* é usualmente muito maior do que para plasticidade com dependência de taxa de deformação.

d) Elasticidade não linear permite um relacionamento não linear entre tensão e deformação que pode ser especificado. Toda deformação é reversível.

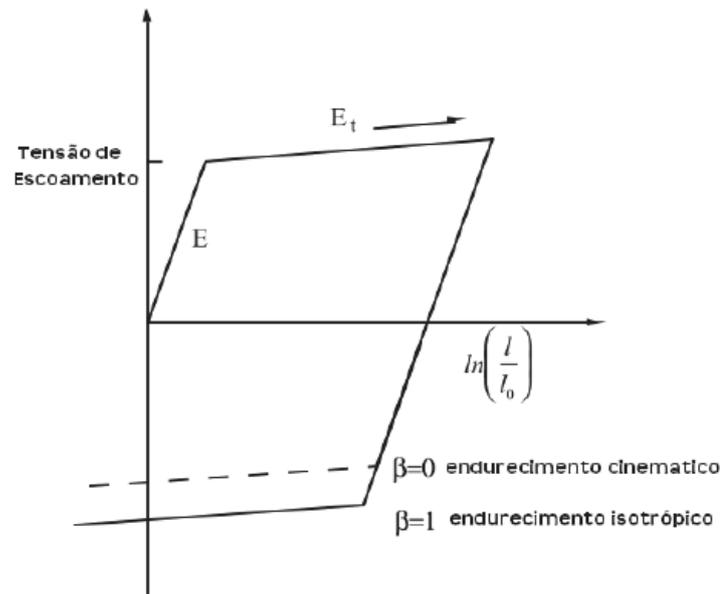
e) Hiperelasticidade é definida pelo potencial de densidade de energia de deformação que caracteriza elastômeros e materiais tipo espuma. Toda deformação é reversível.

f) Viscoelasticidade é caracterização de um material dependente de taxa de deformação que inclui a contribuição viscosa da deformação elástica.

g) Materiais concretos incluem capacidades de progressão de trinca e amassamento.

A Figura 26 apresenta o comportamento de um material com endurecimento cinemático, o que pode ser obtido pela utilização de material plástico cinemático (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC) da biblioteca de materiais do *software* de análise em elementos finitos Ls-Dyna (2003). Os comprimentos indeformado l_0 e deformado l são de um corpo de prova de tração, E e E_t são as inclinações da curva de tensões bilinear.

Figura 26 - Comportamento elastoplástico.



Fonte: (LS-DYNA, 2003).

Conforme estudo realizado por Ribeiro (1998) onde se constatou que para o tipo de aço ASTM A572 GR50 com tensão de escoamento 345 MPa e tensão de ruptura 450 MPa , a inclinação da curva tensão x deformação na fase de escoamento é aproximadamente igual a 1% da inclinação da curva na fase elástica, ou seja, para o módulo de elasticidade E de 205 GPa , o módulo tangente E_t é de 2050 MPa .

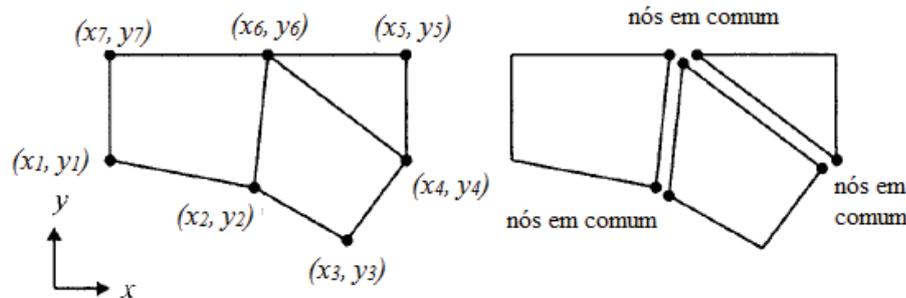
2.8.3 Método dos elementos finitos

Conforme (Alves Filho, 2007) o método dos elementos finitos é um método aproximado de cálculo de sistemas contínuos, onde a estrutura, o componente mecânico ou, de forma geral, o corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes (os elementos), conectados entre si pelos pontos discretos, que são chamados de nós. A montagem de elementos, que constitui o modelo matemático, tem seu comportamento especificado por um número finito de parâmetros. Em particular de análise estrutural, os parâmetros são os deslocamentos nodais, que são as incógnitas do problema.

a) Nós

Conforme ilustrado na Figura 27, a transformação de um problema prático de engenharia, em uma representação matemática é conseguida discretizando a malha de interesse em elementos. Esses elementos são conectados entre si pelos seus nós em comum. Um nó especifica o local da coordenada no espaço onde existem graus de liberdade e ações do problema físico. As variáveis nodais atribuídas a um elemento são chamadas graus de liberdade do elemento, as quais são ditadas pela natureza física do problema e pelo tipo de elemento, no caso de o problema ser estrutural / sólido, os graus de liberdade são o deslocamento e o vetor da força a forças mecânicas (Madenci & Guven, 2006).

Figura 27 - Divisão da malha em elementos.

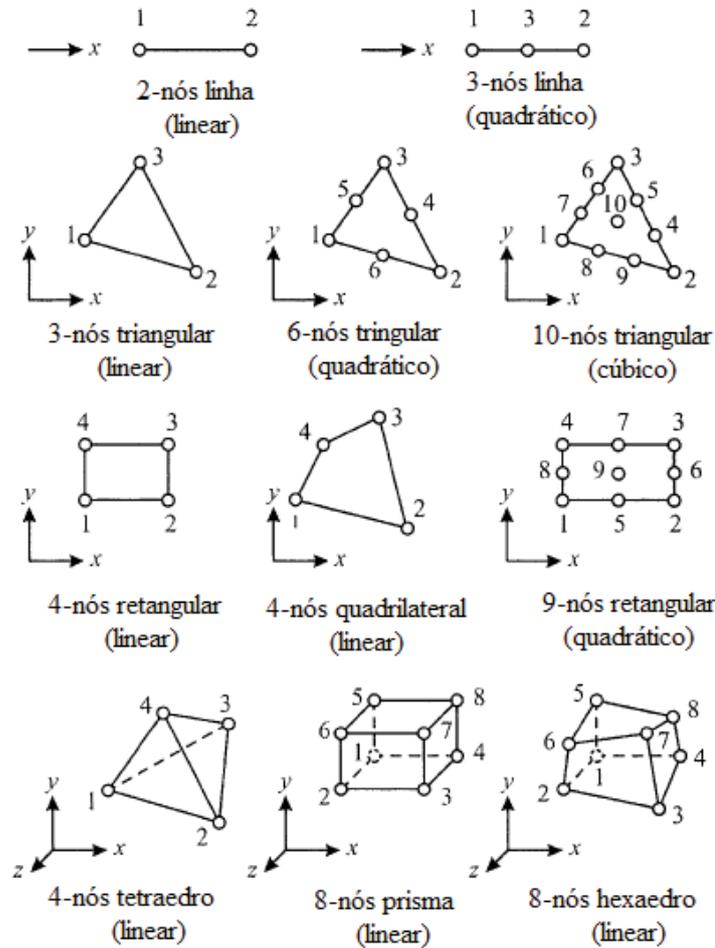


Fonte: (Madenci & Guven, 2006).

b) Elementos

Segundo (Madenci & Guven, 2006), dependendo da geometria e da natureza física do problema, a malha de interesse pode ser discretizada empregando elementos de linha, área ou volume. Alguns dos elementos comuns na análise em elementos finitos são mostrados na Figura 28. Cada elemento, identificado por um número de elemento, é definido por uma sequência específica de números de nós globais. A sequência específica de numeração (geralmente no sentido anti-horário) é baseada na numeração do nó no nível do elemento.

Figura 28 - Elementos comumente utilizados de uma, duas e três dimensões em elementos finitos.



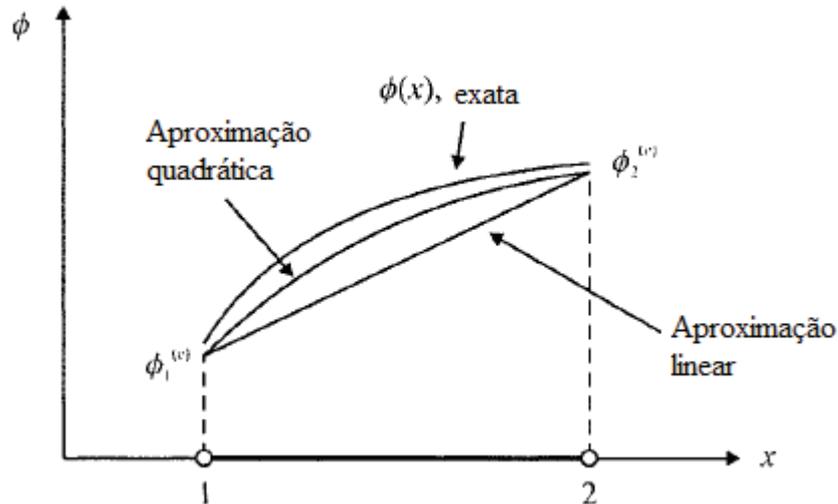
Fonte: (Madenci & Guven, 2006).

Conforme (Alves Filho, 2007) nos elementos unidimensionais, o deslocamento depende da posição em que o ponto se encontra no elemento (vigas, treliça), portanto apenas com uma coordenada x essa posição é definida, então, a função é de uma variável. Nos elementos bidimensionais, o deslocamento depende da posição em que o ponto se encontra no elemento (chapas), portanto as coordenadas x e y são necessárias, e a função é de duas variáveis. Nos elementos tridimensionais, o deslocamento depende da posição em que se encontra no elemento (sólidos), sendo necessárias três coordenadas x , y e z , a função é de três variáveis.

Como ilustrado na Figura 29 a variação da variável de campo, $\phi^{(e)}$, sobre um elemento é aproximada por uma escolha apropriada de funções. A seleção dessas funções é o núcleo do método dos elementos finitos. As funções de aproximação devem ser confiáveis no sentido de que à medida que a malha se torna mais refinada, a solução aproximada deve convergir para a

solução exata. As funções comuns de aproximação são geralmente polinomiais, uma vez que a sua diferenciação e integração são bastante simples em comparação com outras funções.

Figura 29 - Funções de aproximação dos elementos.



Fonte: (Madenci & Guven, 2006).

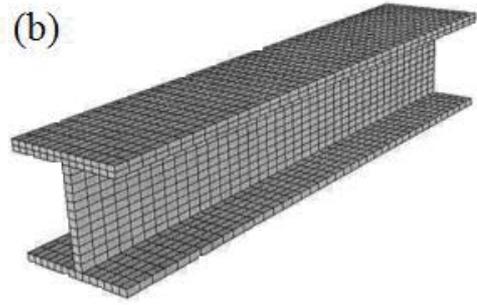
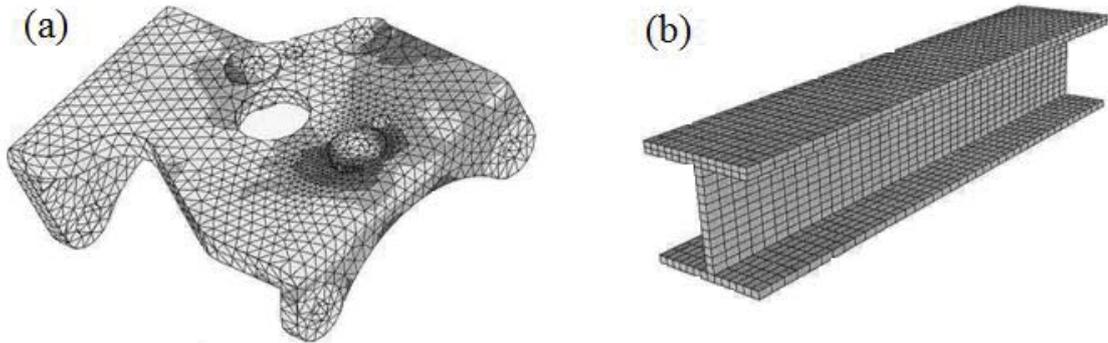
c) Elementos estruturais conectados continuamente

Para componentes que apresentam características bastante diferentes das estruturas constituídas apenas por vigas, por exemplo, a caixa estrutural completa de um veículo, os componentes de chassi, etc. Nestes casos, o corpo contínuo é subdividido artificialmente em certo número finito de elementos, conectados apenas por nós. A Figura 30 representa modelos em elementos finitos de componentes mecânicos, em que é possível observar a subdivisão da estrutura em elementos. Dois aspectos iniciais chamam atenção e são as características básicas do método dos elementos finitos:

- A subdivisão da estrutura em elementos, isto é, a malha de elementos finitos;
- A escolha do elemento apropriado para modelar uma dada situação física.

A Figura 30 (a) o componente é o sólido "montado" a partir de elementos sólidos tetraédricos. Na Figura 30 (b) a montagem do sólido é feita a partir de elementos sólidos hexaédricos, semelhantes a um paralelepípedo.

Figura 30 - (a) Elementos sólidos tetraédricos, (b) elementos sólidos hexaédricos.



Fonte: (Alves Filho, 2007).

Do ponto de vista prático, os *softwares* de elementos finitos oferecem uma biblioteca de elementos do programa, contendo diversos elementos, cada qual tentando representar um diferente comportamento físico conhecido da mecânica estrutural (estado plano de tensões, placas, cascas, membranas, sólidos, etc.) (Alves Filho, 2007).

Com base nos itens abordados na revisão bibliográfica, referente às normas regulamentadoras e técnicas, sistemas de movimentação para galpão, metodologias para projeto e desenvolvimento de produto e da análise estrutural, é desenvolvido no capítulo 3 o projeto conceitual do sistema de movimentação e fixação para galpão metálico.

3 PROJETO CONCEITUAL DO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO E FIXAÇÃO PARA O GALPÃO METÁLICO

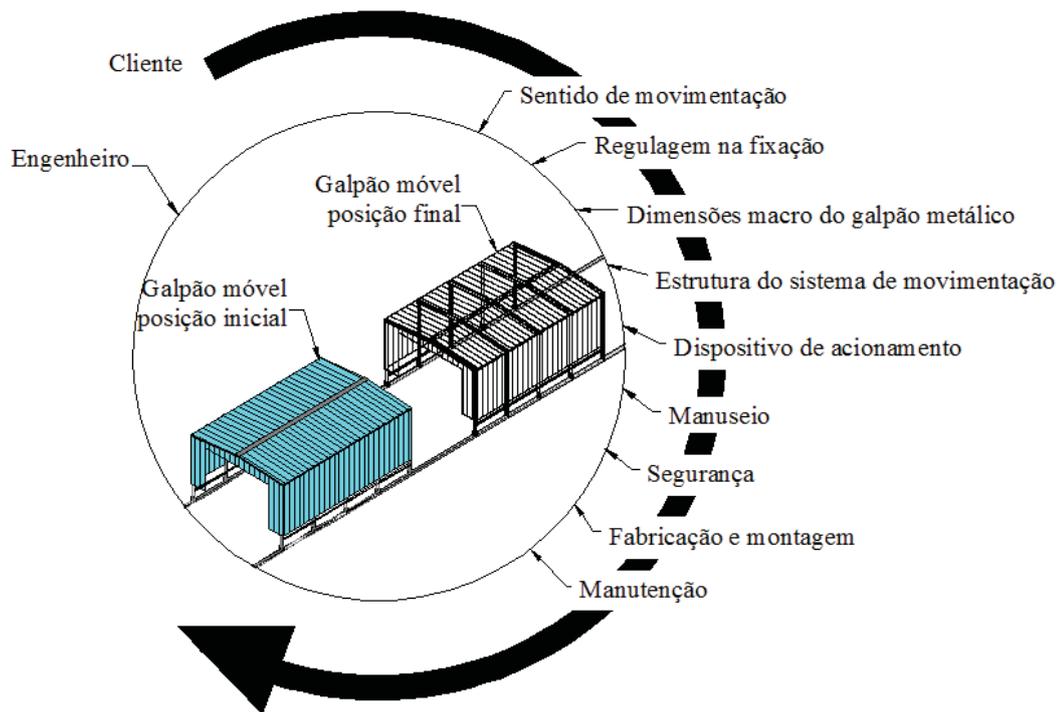
A metodologia adotada para o desenvolvimento deste projeto é o método de Pahl et al. (2013), devido ao fato de ser mais compacta e tendo maior relevância as características envolvidas em um projeto mecânico. Já as metodologias de Baxter (2011) e Back (2008) estão mais direcionadas as questões de gerenciamento do produto e a de Stemmer (1979) mais voltada à fabricação de peças.

Este capítulo está dividido nas quatro fases proposta por Pahl et al. (2013), onde a primeira parte é referente à especificação do produto, na qual estão a elaboração da linha mestra e a lista de requisitos a fim de esclarecer as atividades do projeto. A segunda parte se refere ao projeto conceitual, a qual está dividida na abstração para a identificação dos problemas essenciais, elaboração da estrutura da função global e subfunções, procura de princípios de trabalho para atendimento das subfunções, combinação dos princípios de trabalho para a estrutura de funções, seleção de combinações apropriadas e a concretização de variantes de soluções iniciais. A terceira fase é o anteprojeto, onde é realizada a concepção do produto por meio da análise estrutural dos componentes e do modelamento 3D, a fim de validar estruturalmente o sistema de movimentação e fixação. A quarta fase é o detalhamento, sendo apresentado o conjunto final com todas as peças que compõem o sistema de movimentação e fixação e as principais dimensões.

3.1 Especificação do projeto

A primeira fase da metodologia de desenvolvimento de produto de Pahl et al. (2013) é a especificação do produto, onde é realizada como atividade primária, a elaboração da linha mestra, essencial nesta etapa do projeto, onde são apresentadas as condições que o produto deve possuir, para atender a sua finalidade, onde quanto mais claramente forem determinadas as condições e as exigências, tanto mais claro se apresentará o caminho para a solução do problema de projeto. Conforme ilustrada na Figura 31, o desenvolvimento do produto é de responsabilidade do engenheiro, tendo como meta de atender as necessidades do cliente, onde neste trabalho, o galpão deve possuir deslocamento linear, regulagem na fixação com o trilho, simples manuseio e manutenção, garantindo a segurança estrutural do galpão.

Figura 31 - Linha mestra do projeto.

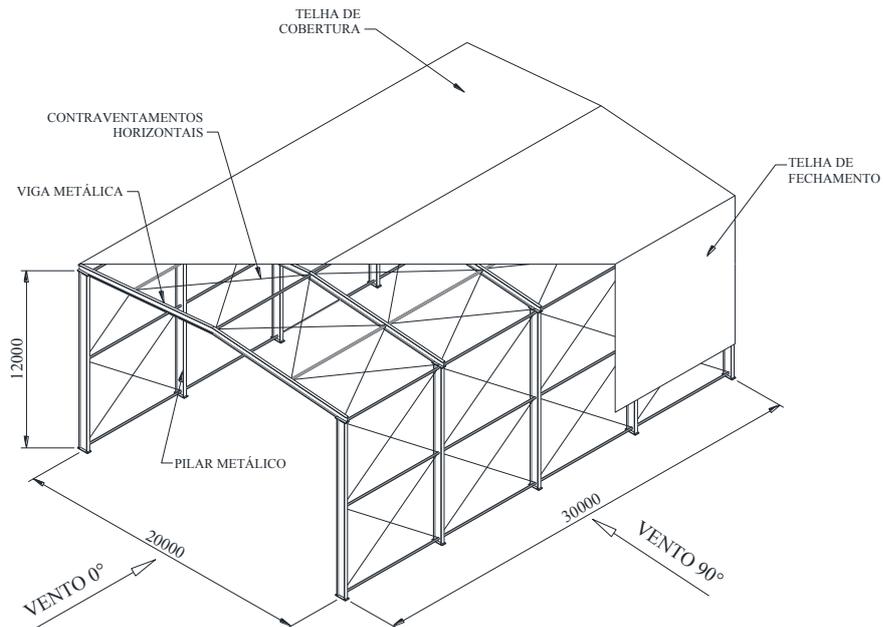


Fonte: Autor.

Para este projeto, é considerada a estrutura do galpão metálico em aço ASTM A572 Grau 50, com tensão de escoamento 345 MPa e tensão de ruptura 450 MPa , as demais características do galpão metálico industrial é mostrada na Figura 32 e listadas na sequência.

- Vão entre os eixos das colunas de 20 m ;
- Comprimento total 30 m ;
- Altura livre de 12 m ;
- Espaçamento entre os pilares de $7,5 \text{ m}$;
- Inclinação da cobertura de 5° ;
- Cobertura em chapa zincada trapezoidal;
- Tapamentos frontais somente na largura das colunas com chapa zincada trapezoidal;
- Tapamentos laterais acima de $2,5 \text{ m}$ com chapa zincada trapezoidal.

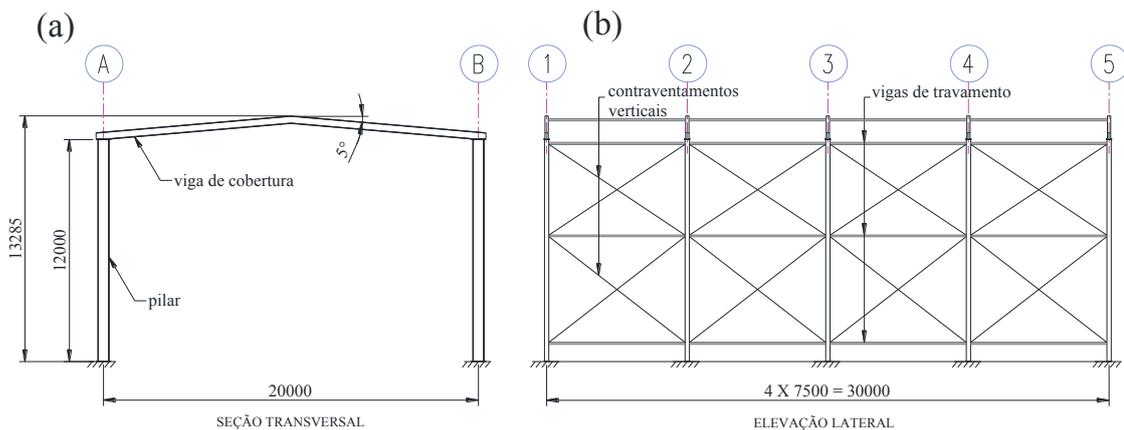
Figura 32 - Vista isométrica do galpão metálico.



Fonte: Autor.

Na Figura 33 (a) é ilustrada a seção transversal do galpão com as dimensões entre os pilares, a altura livre e a inclinação da cobertura. A Figura 33 (b) mostra a elevação lateral com o espaçamento entre os pórticos e a largura total.

Figura 33 - Dimensões macro do galpão metálico, medidas em milímetros.



Fonte: Autor.

Através da elaboração da linha mestra, é desenvolvida a Tabela 6 contendo a lista dos requisitos que o projeto deve contemplar. Nesta tabela estão apresentados os itens da linha mestra com o respectivo requisito que cada item deve possuir, também é representado através da letra D o item que é desejável e a letra E o item que é exigido, como pode ser visto na primeira coluna.

Tabela 6 - Lista de requisitos do projeto.

E/D	Lista de requisitos para o sistema de movimentação e fixação para galpão metálico		
	Data: 10/01/16	Página: 1/1	Folha: 1/1
	Requisitos		Resp.
E	1. Sentido de movimentação — Deslocamento aproximado de 100 metros no sentido longitudinal do galpão metálico.		Arielton
E	2. Regulagem na fixação — A fixação entre o sistema de movimentação e o trilho, deve possuir uma regulagem na altura, a fim de atender as tolerâncias da montagem.		
D	3. Dimensões macro do galpão metálico — Vão livre entre colunas de 20m (sentido transversal);		
D	— Espaçamento de 7,5m entre colunas (sentido longitudinal);		
D	— Comprimento total de 30m;		
D	— Altura livre (pé direito) de 12m.		
E	4. Estrutura do sistema de movimentação — Resistir aos esforços atuantes no galpão metálico.		
E	5. Dispositivo de acionamento — Controlar o deslocamento do galpão metálico;		
E	— Atender a norma de instalação elétrica NBR5410.		
D	6. Manuseio — Acionamento simples do sistema;		
D	— Posição cômoda para o acionamento do sistema;		
D	— Aplicação da norma regulamentadora NR-12.		
E	7. Segurança — Atender as normas vigentes no dimensionamento das peças;		
E	— Evitar possíveis causas de acidentes;		
E	— Atender a norma regulamentadora de segurança em instalações e serviços em eletricidade NR10.		
D	8. Fabricação e montagem — Padronização de peças e tipos de parafusos;		
D	— Utilizar processo de simples fabricação;		
D	— Facilidade na instalação do sistema.		
D	9. Manutenção — Número mínimo de tipos de peças e parafusos;		
D	— Facilidade no acesso das peças.		

Fonte: Autor.

Segue na sequência a explanação dos itens referentes à lista de requisitos:

1. Sentido de movimentação

O sistema de movimentação proposto neste projeto é o deslocamento longitudinal, ao longo de aproximadamente 100 metros, a fim de abranger uma boa área de trabalho;

2. Regulagem na fixação

Uma das principais características deste projeto é que a fixação entre o sistema de movimentação e os trilhos tenha a possibilidade de uma regulagem na altura, para poder atender às variações dimensionais na montagem da estrutura metálica e à variação durante a instalação dos trilhos, que pode ocorrer;

3. Dimensões macro do galpão metálico

As dimensões do galpão metálico proposto neste trabalho são referentes a um galpão metálico típico para uso industrial. Os cálculos dos esforços atuantes nesta estrutura estão conforme as normas brasileiras NBR8681, NBR8800, NBR6123 e a NBR6120, estes esforços gerados serão transmitidos para o sistema de movimentação, o qual deverá resistir às cargas;

4. Estrutura do sistema de movimentação

O conjunto estrutural do sistema de movimentação deve resistir aos esforços que atuam na estrutura metálica e as decorrentes do acionamento;

5. Dispositivo de acionamento

O dispositivo de acionamento deve possuir a força necessária para a movimentação do galpão metálico e o controle adequado para o deslocamento;

6. Manuseio

Como a finalidade deste galpão é de uso industrial e, portanto, será exigido o seu deslocamento com certa intensidade, o manuseio deve ser simples, cômodo e seguro para o usuário;

7. Segurança

Na segurança devem ser evitadas possíveis causas de acidentes devido aos acionamentos elétricos, os componentes mecânicos e a utilização de normas vigentes para o dimensionamento das peças;

8. Fabricação e montagem

Uma definição importante é a padronização das peças e fixadores, para evitar que porventura possam ocorrer problemas estruturais devido á troca de peças ou fixadores durante a montagem ou manutenção do sistema. Também devem ser de fácil processo produtivo, ou seja, prever a utilização de máquinas convencionais para a fabricação das peças;

9. Manutenção

Na manutenção do produto o acesso aos componentes deve ser relativamente fácil.

Após a elaboração da linha mestra e a lista de requisitos, dá-se início a segunda fase no desenvolvimento de produto proposta por Pahl et al. (2013), que é a fase do projeto conceitual.

3.2 Projeto conceitual

O projeto conceitual é a segunda fase no desenvolvimento do produto, onde, após o esclarecimento do problema, por isolamento dos problemas principais, elaboração de estruturas da função e busca por princípios de funcionamento apropriados e sua combinação na estrutura de funcionamento, define-se a solução preliminar. A concepção é a definição preliminar de uma solução conforme Pahl et al. (2013).

A etapa começa com a elaboração da abstração e posterior busca por princípios de funcionamento para cada subfunção.

3.2.1 Abstração e elaboração da estrutura de funções

A abstração tem como função auxiliar na elaboração da estrutura da função, obtendo o ponto principal do problema. Segundo Pahl et al. (2013) é apropriado o seguinte procedimento:

- a) Primeiro: suprimir as vontades mentalmente;
- b) Segundo: somente considerar requisitos que afetam diretamente as funções principais;
- c) Terceiro: converter requisitos quantitativos em qualitativos;
- d) Quarto: os requisitos do passo anterior devem ser ampliados de forma adequada;
- e) Quinto: formular o problema de forma neutra relacionado diretamente a solução.

A Tabela 7 apresenta o resultado das cinco etapas que auxiliam na elaboração da estrutura da função.

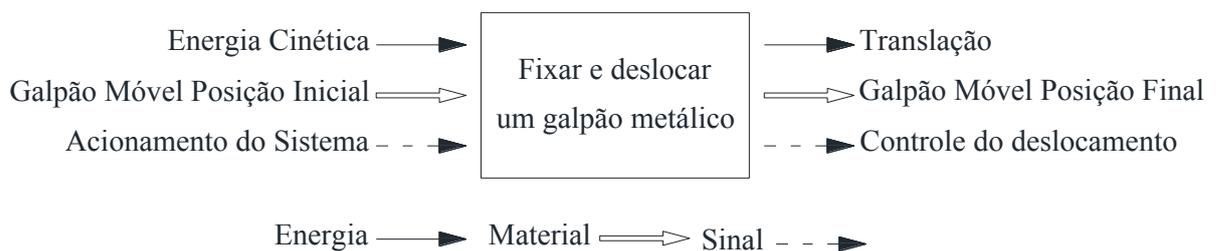
Tabela 7 - Abstração.

<p>Resultado da 1ª e 2ª etapas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deslocamento linear de 100 metros no sentido longitudinal do galpão metálico. • Galpão industrial com 20 metros de largura no sentido transversal. • Galpão industrial com 30 metros de comprimento e pilares espaçados a cada 7,5 metros. • Altura livre do galpão industrial de 12 metros. • Regulagem na fixação em pelo menos 20 mm. • Acionamento e controle elétrico, pneumático ou hidráulico do sistema. • O sistema deve resistir aos esforços atuantes no galpão metálico. • As dimensões macro, aproximadas do sistema são: largura 700 mm, comprimento 300 mm, altura 500 mm. • Projeto de simples fabricação. • Manuseio e manutenção simples para o usuário.
<p>Resultado da 3ª etapa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dimensões macro do galpão metálico industrial. • Sistema de movimentação deve resistir aos esforços. • Acionamento e controle. • Regulagem na fixação do sistema no trilho. • Dimensões macro do sistema de movimentação. • Peças do sistema de movimentação simétricas.
<p>Resultado da 4ª etapa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Forma geral do galpão metálico industrial. • Resistência mecânica do sistema de movimentação. • Ajuste na fixação do sistema no trilho. • Dispositivo de controle. • Forma geral do sistema de movimentação. • Componentes do sistema de movimentação simétricas.
<p>Resultado da 5ª etapa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fixar, movimentar e controlar o deslocamento linear de um galpão metálico tipo industrial típico, com dimensões definidas e peças simétricas, resistindo aos esforços atuantes na estrutura.

Fonte: Autor.

Após a formulação do problema obtida por abstração, encerra-se a inter-relação funcional, ou seja, o objetivo visado. Portanto, o núcleo da tarefa global está formulado, então a função global pode ser indicada, a qual aponta mediante utilização de blocos, a inter-relação entre variáveis de entrada e de saída com referência à conversão de energia, material e/ou sinal, de forma neutra com relação a solução. Na Figura 34 é apresentada a estrutura da função global.

Figura 34 - Função global.



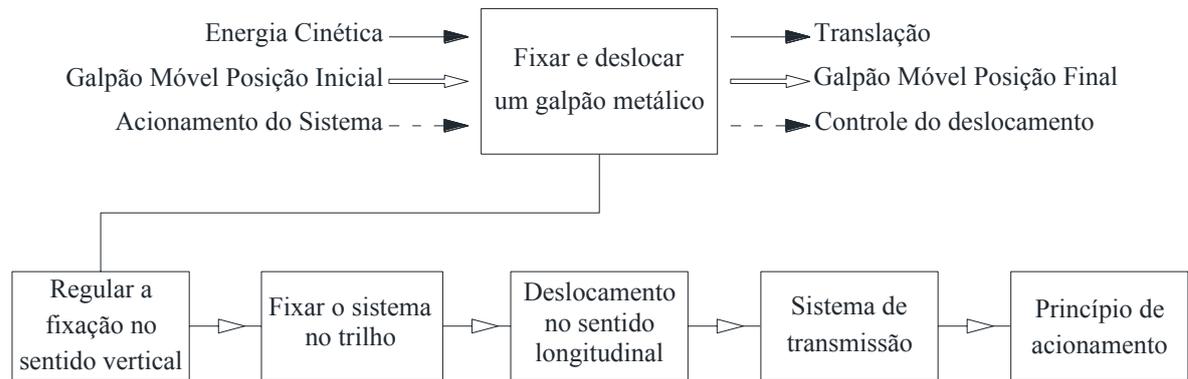
Fonte: Autor.

Segundo Pahl et al.(2013), a função global pode ser desdobrada em subfunções de menor complexidade. A interligação das subfunções resulta na estrutura da função, que representa função global. Na interligação das funções, formula-se por meio de funções específicas da tarefa.

O objetivo desta etapa principal é a simplificação do desdobramento da função global para a subsequente busca da solução e a interligação destas subfunções numa estrutura de função simples e não ambígua.

As subfunções apresentadas na Figura 35 estão elaboradas conforme a sequência de funcionamento do galpão metálico móvel, onde a primeira etapa consiste na regulagem do sistema de movimentação no galpão metálico no trilho, a fim de absorver variações dimensionais no trilho, a segunda etapa visa à fixação do sistema no trilho, a terceira etapa contempla o deslocamento do galpão metálico, a quarta etapa o sistema de transmissão a ser adotado, o qual conecta o galpão metálico no acionamento, e por fim, a quinta etapa que é o princípio de acionamento que fornece a força e o controle da velocidade necessário para o movimento linear do galpão metálico.

Figura 35 - Desmembramento das funções principais.



Fonte: Autor.

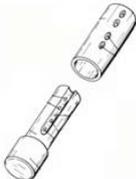
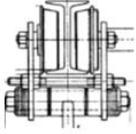
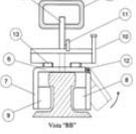
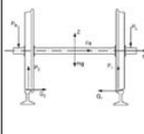
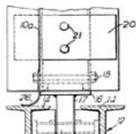
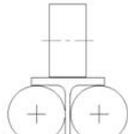
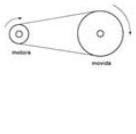
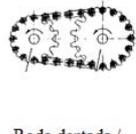
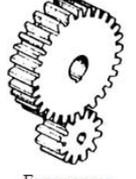
Através do desmembramento das funções, é necessária a busca por soluções que atendam a função global do sistema. Partindo de cada item das subfunções apresentadas, são identificados os princípios de funcionamento e analisada cada possível solução.

3.2.2 Combinações dos princípios de funcionamento

Na elaboração dos princípios de funcionamento de cada subfunção, foram pesquisadas pelo menos três opções para solucionar a necessidade do projeto. Nesta etapa são consideradas as possibilidades de execução que podem funcionar, embasadas em aplicações existentes.

A Tabela 8 apresenta a matriz morfológica das possíveis soluções, a qual é composta por cinco linhas e seis colunas, onde são apresentadas as possibilidades de solução para atender a função global do projeto. Na sequência, é realizado o descritivo das linhas e colunas que compõem as possíveis concepções.

Tabela 8 - Matriz morfológica das possíveis soluções.

SUBFUNÇÕES		POSSÍVEIS CONCEPÇÕES					
		A	B	C	D	E	F
1	Regulagem no sentido vertical	 Furos oblongos	 Atrito	 Múltiplos furos	 Barra roscada	 Tipo sanfona	
2	Fixar o sistema de movimentação no trilho	 Tipo trole	 Tipo carro de montanha russa	 Na alma do trilho			
3	Deslocamento no sentido longitudinal do galpão	 Tipo roda/trilho ferroviário	 Rodas laterais verticais e horizontais	 Rodas entre trilhos	 Roda superior e esferas laterais	 Esferas recirculantes	 Roda central
4	Sistema de transmissão	 Polia / correia	 Roda dentada / corrente	 Engrenagens			
5	Princípio de acionamento	 Motor elétrico acoplado a um redutor	 Motor elétrico acionado por Inversor de Frequência	 Motor hidráulico	 Motor pneumático		

Fonte: Autor.

A seguir explanação dos itens referente às possíveis soluções para o problema do projeto, apresentadas na Tabela 8.

1. Para a regulagem no sentido vertical do sistema de movimentação, têm-se na linha um, cinco opções de solução sendo a primeira indicada na coluna A, onde é utilizado parafuso com porca, similar ao utilizado em esticadores de correia. Na segunda opção, é indicada na coluna B uma fixação por atrito. Na terceira opção, múltiplos furos, na quarta opção, barra roscada com porca e, na quinta opção um mecanismo articulado.

2. Na fixação do sistema no trilho são apresentadas na segunda linha, três opções de solução, sendo, na primeira coluna a fixação por rodas as quais são fixadas nas mesas dos perfis metálicos, tipo trole de ponte rolante. Na coluna dois tem-se a fixação na parte inferior do trilho similar ao sistema adotado em carro de montanha russa e na terceira coluna, há opção de fixação na alma do perfil metálico.

3. Para atender uma das principais características do projeto, o qual é o deslocamento no sentido longitudinal do galpão, na terceira linha são apresentadas seis possibilidades de solução, as quais estão embasadas em aplicações conhecidas e outras adaptadas. Na intersecção da linha três com as colunas, obtêm-se as seguintes possibilidades. Na coluna A, tem-se o sistema de rodas apoiadas na parte superior dos trilhos, similar ao utilizado em transporte ferroviário. Na coluna B são mostradas rodas que são posicionadas entre as mesas internas de um trilho, o qual possui um perfil tipo I. As rodas inferiores são apoiadas na mesa interna inferior do trilho e as rodas superiores posicionadas tangenciando a alma do perfil I e entrando em contato com a roda inferior. A coluna C apresenta rodas duplas posicionadas entre as mesas dos trilhos que possuem perfil tipo I. Essa solução é encontrada em Maynard (1966). Na coluna D, tem-se uma roda posicionada na mesa superior do trilho e esferas entre as mesas internas do trilho. Na coluna E, é utilizado o sistema de esferas recirculantes, para deslocamento linear, onde a fixação no trilho acontece na parte superior e na alma do trilho. A coluna F mostra uma roda central guiada por um trilho tipo cartola e a fixação é realizada na parte superior dos trilhos laterais.

4. O sistema de transmissão, indicado na linha quatro, tem como função a conexão entre o galpão metálico e o princípio de acionamento, transmitindo o torque e a velocidade necessária para o deslocamento linear do galpão metálico. Na coluna A, é sugerida a utilização de polia e correia, na coluna B é proposta a utilização de roda dentada e corrente e, na coluna C, a utilização de engrenagens.

5. Na linha cinco são apresentadas as possibilidades de acionamento, sendo na coluna A mostrada a possibilidade de acionamento através de motor elétrico com caixa de redução acoplada, na coluna B a utilização de motor elétrico com inversor de frequência, a coluna C a utilização de acionamento pneumático e na coluna E a possibilidade de acionamento hidráulico.

Na escolha da concepção final, uma análise quantitativa deve ser realizada, onde somente as soluções mais relevantes devem ser analisadas.

Como o número de variáveis para a solução global é elevado, uma análise qualitativa deve ser feita, a fim de eliminar as soluções que não atendam aos requisitos básicos. Também as possíveis variantes de soluções devem ser compatíveis entre si segundo Pahl et al. (2013).

A Tabela 9 lista a seleção das variantes de solução, onde é utilizado como critério de seleção o símbolo de positivo (+) quando a solução atende as exigências, o sinal negativo (-) quando não atende a um ou mais itens das exigências e o sinal de interrogação (?) onde se requer maior número de informações para tomar a decisão. Os quesitos de avaliação foram determinados de acordo com a necessidade do projeto, considerando a questão da fabricação, montagem e a realização em princípio.

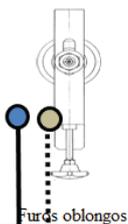
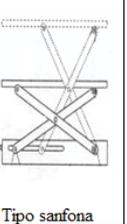
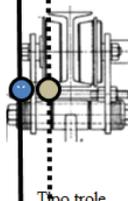
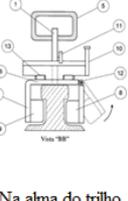
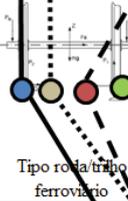
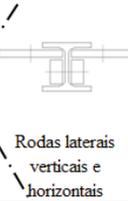
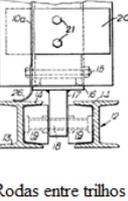
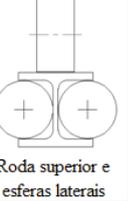
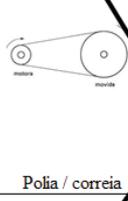
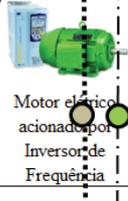
Tabela 9 - Avaliação das possíveis soluções.

Lista de Seleção das Variantes de Solução							Pág.: 1	
		Projeto: Sistema de movimentação e fixação para Galpão Metálico Industrial						
Subfunções	Lista de variáveis	Avaliar alternativas de solução de acordo com os critérios de seleção				Decidir		
		Simbologia:				Simbologia:		
		(+) Sim				(+) Prosseguir com o desenvolvimento da solução.		
		(-) Não				(-) Descartar solução.		
		(?) Escassez de informações				(?) Conseguir informação.		
		As exigências da lista de requisitos foram satisfeitas						Decisão
		Realizáveis em princípio						
		Baixa precisão na fabricação						
		Praticidade na montagem e desmontagem						
		Observações (referências, justificativas)						
1 Regulagem vertical	L1CA	+	+	+	+	+		
	L1CB	-	+	+	+	Necessidade de peças muito robustas		
	L1CC	+	+	+	+	+		
	L1CD	+	+	+	+	+		
	L1CE	-	-	+	-	Quantidade elevada de componentes		
2 Fixar o sistema no trilho	L2CA	+	+	+	+	+		
	L2CB	+	+	+	+	+		
	L2CC	-	+	+	+	Não possibilita a fixação constante, segurança		
3 Deslocamento no sentido longitudinal	L3CA	+	+	+	+	+		
	L3CB	-	+	+	-	Falta de praticidade na manutenção		
	L3CC	-	+	+	-	Não possibilita regulagem vertical		
	L3CD	+	+	-	+	Alta precisão na fabricação		
	L3CE	-	+	-	-	Alta precisão na fabricação		
4 Sistema de transmissão	L4CA	+	-	+	+	Necessidade de alta rotação do sistema		
	L4CB	+	+	+	+	+		
	L4CC	+	+	-	-	Alta precisão na fabricação e montagem		
5 Princípio de acionamento	L5CA	+	+	+	+	+		
	L5CB	+	+	+	+	+		
	L5CC	-	+	+	+	Quantidade elevada de componentes		
	L5CD	-	+	+	+	Quantidade elevada de componentes		

Fonte: Autor.

Através da análise qualitativa de cada subfunção conforme mostrado na Tabela 9, é possível identificar as possíveis soluções mais promissoras, ou seja, as que obtêm como decisão o sinal positivo. A fim de facilitar o entendimento das soluções, é apresentada na Tabela 10 a seleção das possíveis variantes de solução, as quais possuem compatibilidade entre si.

Tabela 10 - Seleção das possíveis variantes de soluções.

SUBFUNÇÕES		POSSÍVEIS CONCEPÇÕES					
		A	B	C	D	E	F
1	Regulagem no sentido vertical	 Furos oblongos	 Atrito	 Múltiplos furos	 Barra roscada	 Tipo sanfona	
2	Fixar o sistema de movimentação no trilho	 Tipo trole	 Tipo carro de montanha russa	 Na alma do trilho			
3	Deslocamento no sentido longitudinal do galpão	 Tipo roda/trilho ferroviário	 Rodas laterais verticais e horizontais	 Rodas entre trilhos	 Roda superior e esferas laterais	 Esferas recirculantes	 Roda central
4	Sistema de transmissão	 Polia / correia	 Roda dentada / corrente	 Engrenagens			
5	Princípio de acionamento	 Motor elétrico acoplado a um redutor	 Motor elétrico acionado por Inversor de Frequência	 Motor hidráulico	 Motor pneumático		
		V1	V2	V3	V4		

Fonte: Autor.

Para a variante de solução V1, tem-se a regulagem vertical com furo oblongo, a fixação no trilho similar ao utilizado em trole, o deslocamento longitudinal tipo roda/trilho

ferroviário, sistema de transmissão por meio de corrente e o princípio de acionamento através do motor elétrico acoplado a um redutor.

A variante de solução V3 é similar a variante de solução V1, porém é utilizado como princípio de acionamento o motor elétrico acionado pelo inversor de frequência.

Na variante de solução V2, é utilizada como regulagem vertical o sistema com múltiplos furos, a fixação no trilho sendo pela parte inferior, o deslocamento longitudinal tipo roda/trilho ferroviário, o sistema de transmissão por corrente e o princípio de acionamento por meio do motor elétrico acoplado a um redutor.

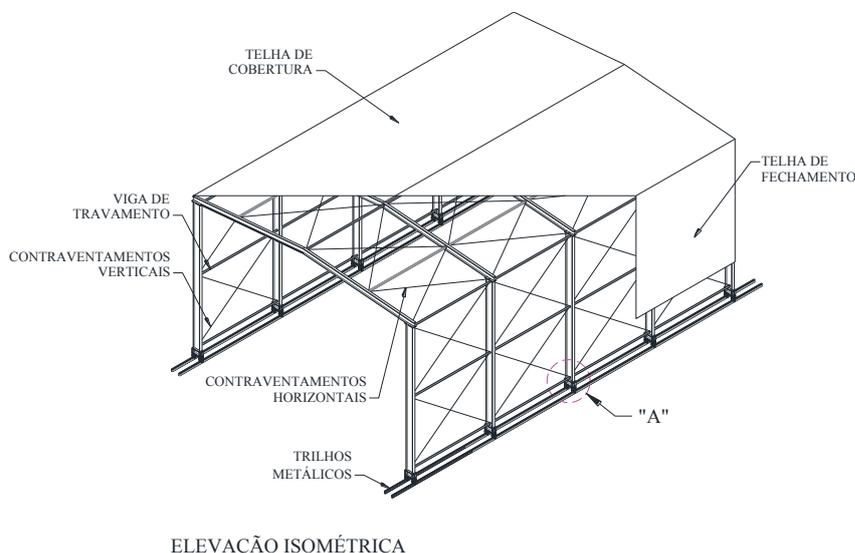
A variante de solução V4 é similar a variante de solução V2, porém apresenta como princípio de acionamento o motor elétrico acionado pelo inversor de frequência.

Na próxima etapa as quatro variantes de solução mais promissoras, V1, V2, V3, e V4, serão submetidas a uma análise quantitativa, a fim de obter a possível melhor solução.

3.2.3 Concretização das variantes de solução

Para auxiliar na visualização das combinações possíveis, são realizados esboços das concepções. Na Figura 36 é apresentado o galpão metálico completo e a indicação do detalhe A, que mostra o local em que o sistema de movimentação e fixação estará atuando. Também através do detalhe A, são expostos as quatro combinações resultantes que poderão ser utilizadas para resolver o problema do projeto.

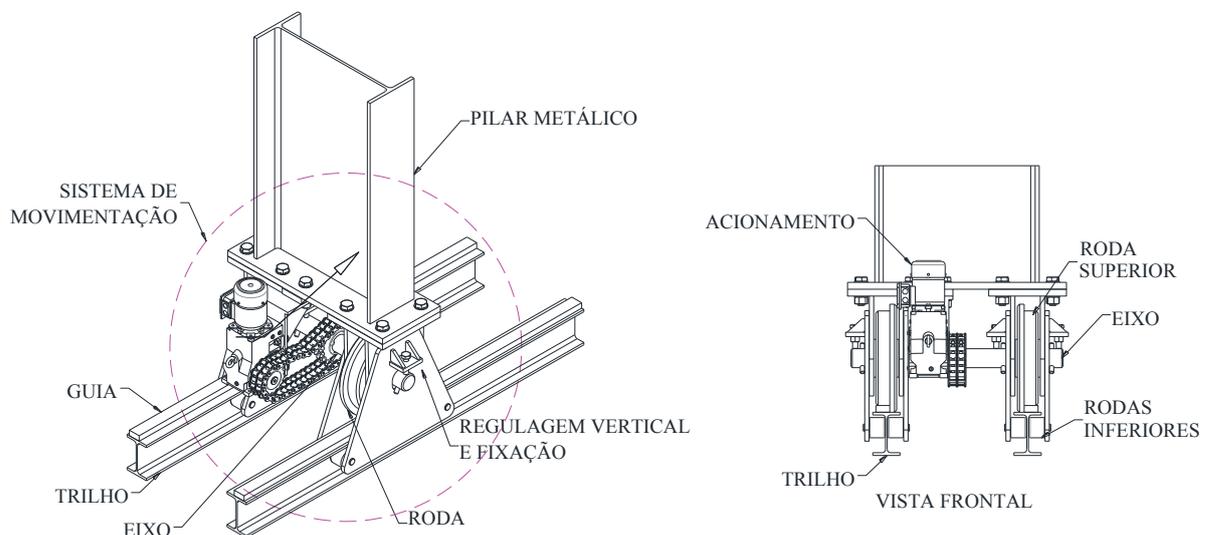
Figura 36 - Vista global do galpão metálico.



Fonte: Autor.

Na Figura 37, são apresentados o esboço da variante de solução V1 e V3, as quais tem como diferença o princípio de acionamento. Nesta variante de solução, o sistema é fixado nos pilares metálicos por meio de ligação parafusada, onde cada pilar terá dois trilhos e um eixo central que interliga as duas rodas. O eixo central tem uma roda dentada centralizada a qual recebe a corrente que transmite o torque recebido pelo motorreductor ou do inversor de frequência. A regulagem vertical é através de furo oblongo e parafuso, similar ao utilizado em esticadores de esteiras.

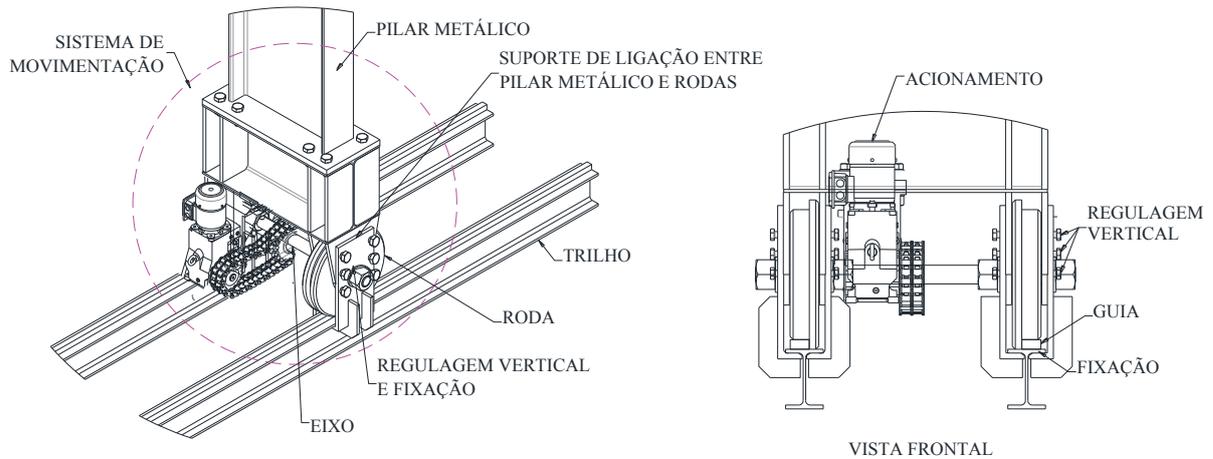
Figura 37 - Detalhe A, variantes de solução V1 e V3.



Fonte: Autor.

A Figura 38 mostra as variantes de solução V2 e V4. A diferença entre essas variantes de solução é o princípio de acionamento, ou seja, na variante V2 é utilizado motorreductor e na variante V4 um inversor de frequência. A ligação parafusada do pilar no sistema de movimentação é feita por meio de um suporte. Cada pilar tem dois trilhos e um eixo central que interliga as rodas. A regulagem vertical é através de múltiplos furos nas chapas laterais externas e internas. O acionamento é realizado através de corrente, onde é transmitido o torque para o eixo central. A fixação do eixo central nas chapas de regulagem vertical é por meio de arruelas e porcas.

Figura 38 - Detalhe A, variantes de solução V2 e V 4.



Fonte: Autor.

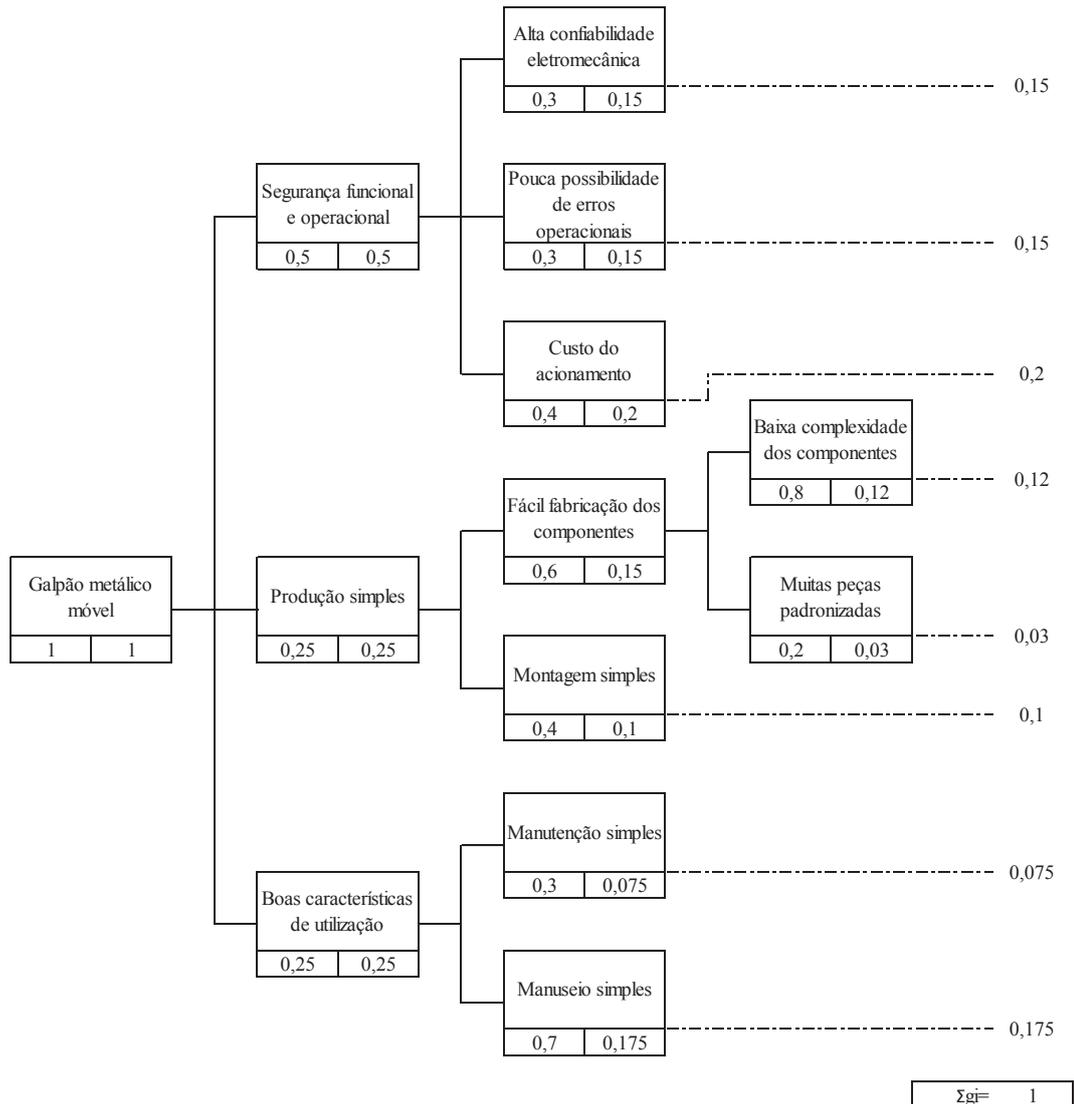
Para identificar qual a variante de solução é a mais promissora, a análise quantitativa é realizada. Na sequência segue a análise.

3.2.4 Análise quantitativa das variantes

Para auxiliar na decisão de qual combinação é a melhor para prosseguir com o desenvolvimento, utilizou-se uma análise quantitativa através do método de comparação de pontos, onde é listadas as exigências e as condições que o projeto deve preencher e, para cada solução, dá-se um certo número de pontos, dependendo da maior ou menor perfeição com que a solução se aproxima da ideal. Os critérios de avaliação e pesos utilizados estão baseados na lista de requisitos do projeto e intuitivos.

Na análise de valores, pondera-se com fatores entre 0 e 1. Além disso, a soma dos fatores de todos os critérios de avaliação ou metas deve ser igual a 1, visando a uma ponderação percentual das metas. Na Figura 39, é elaborado o organograma dos objetivos, onde é ordenado em quatro níveis de objetivos de complexidade decrescente dotados de fatores ponderais. A avaliação progride por etapas, caminhando do nível de objetivos de maior complexidade para o nível contíguo de menor complexidade. Assim, os três critérios do projeto mais relevantes, os quais são, a segurança funcional e operacional, produção simples e boas características de utilização, e referente ao segundo nível, serão primeiramente ponderadas em relação à meta do primeiro nível, ou seja, galpão metálico móvel. Esta analogia é seguida para os níveis três e quatro.

Figura 39 - Organograma dos objetivos para o galpão metálico móvel.



Fonte: Autor.

No esquema de avaliação conforme mostrado na Tabela 11, os parâmetros dos critérios de avaliação estão indicados de acordo com a sua funcionalidade teórica, em que são atribuídos escalonadamente valores por atribuição de pontos. O esquema de pontuação de valores é seguido á análise de valor, segundo a diretriz VDI2225. A magnitude dos valores está de acordo com o organograma dos objetivos.

Tabela 11 - Esquema de avaliação para atribuição de valores.

Escala de valores		Magnitude dos parâmetros							
Análise de valor Pontos	VDI 2225 Pontos	Alta confiabilidade eletromecânica	Pouca possibilidade de erros operacionais	Custo do acionamento	Baixa complexidade dos componentes	Muitas peças padronizadas	Montagem simples	Manutenção simples	Manuseio simples
0	0	bem baixo	muito elevado	bem elevado	bem elevado	bem baixo	muito complicado	muito complicado	muito complicado
1									
2	1	baixo	elevado	elevado	elevado	baixo	complicado	complicado	complicado
3									
4	2	médio	médio	médio	médio	médio	médio	médio	médio
5									
6	3	elevado	pouco	baixo	baixo	elevado	simples	simples	simples
7									
8	4	bem elevado	muito pouco	bem baixo	bem baixo	bem elevado	muito simples	muito simples	muito simples
9									
10									

Fonte: Autor.

Depois de estabelecidos os critérios de avaliação e definida a relevância, é realizada a avaliação das variantes, conforme mostra a Tabela 12, em que os parâmetros são correlacionados com estes critérios. Cada variante é avaliada com base nos oito critérios de avaliação.

Para a avaliação das variantes de solução consolidou-se a somatória dos subvalores que, a rigor, só é válida com a clara independência dos valores atribuídos pelos critérios de avaliação. Mesmo que esse pressuposto seja atendido apenas parcialmente, a adoção de uma estrutura aditiva para o valor global parece justificada (PAHL et al., 2013).

O valor global de uma variante não ponderado será então calculado conforme a Equação 3.1 e a ponderação global de acordo com a Equação 3.2, onde:

W_{ij} representa os valores apurados para cada uma das variantes de solução, ou seja, valores parciais;

g_{ij} é o fator de ponderação.

$$GW_j = \sum_{i=1}^n W_{ij} \quad (3.1)$$

$$GWg_j = \sum_{i=1}^i g_i \cdot W_{ij} = \sum_{i=1}^n Wg_{ij} \quad (3.2)$$

Tabela 12 - Avaliação das variantes selecionadas.

Critérios de avaliação		Parâmetros			Variante V1			Variante V2			Variante V3			Variante V4		
N	fator		Unid.	Propriedades ei1	Valor wi1	Valor ponderado wg1	Propriedades ei2	Valor wi2	Valor ponderado wg2	Propriedades ei3	Valor wi3	Valor ponderado wg3	Propriedades ei4	Valor wi4	Valor ponderado wg4	
1	Alta confiabilidade eletromecânica	0,15	Segurança esperada	-	elevado	3	0,45	elevado	3	0,45	elevado	3	0,45	elevado	3	0,45
2	Pouca possibilidade de erros operacionais	0,15	Possibilidade de erros operacionais	-	médio	2	0,3	elevado	1	0,15	médio	2	0,3	elevado	1	0,15
3	Custo do acionamento	0,2	Valor financeiro	-	baixo	3	0,6	baixo	3	0,6	elevado	1	0,2	elevado	1	0,2
4	Baixa complexidade dos componentes	0,12	Simples processo de fabricação	-	baixo	3	0,36	baixo	3	0,36	baixo	3	0,36	baixo	3	0,36
5	Muitas peças padronizadas	0,03	Peças padronizados	-	bem elevado	4	0,12	bem elevado	4	0,12	bem elevado	4	0,12	bem elevado	4	0,12
6	Montagem simples	0,1	Simplicidade de montagem	-	simples	3	0,3	simples	3	0,3	simples	3	0,3	simples	3	0,3
7	Manutenção simples	0,075	Simplicidade na manutenção	-	médio	2	0,15	complicado	1	0,075	médio	2	0,15	complicado	1	0,075
8	Manuseio simples	0,175	Simplicidade no manuseio	-	simples	3	0,525	médio	2	0,35	simples	3	0,525	médio	2	0,35
$\Sigma g1 = 1$						23	2,81		20	2,41		21	2,41	18	2,01	
						Gw1	Gwg1		Gw2	Gwg2		Gw3	Gwg3	Gw4	Gwg4	

Fonte: Autor.

Analisando a Tabela 12, observa-se que a variante de solução V1 é a que obteve o maior valor global e o maior valor ponderado global, ou seja, a melhor escolha para prosseguir na próxima etapa a qual é o anteprojeto.

As variantes de solução V2 e V3 obtiveram o mesmo valor ponderado global, mesmo tendo princípios de acionamentos e regulagem de altura diferentes. Já a variante de solução V4 obteve a pior avaliação.

3.3 Anteprojeto

De acordo com Pahl et al. (2013), uma vez que na etapa de concepção, a solução básica foi essencialmente elaborada a partir de informações sobre a estrutura de funcionamento, a configuração concreta dessa ideia básica figura agora em primeiro plano. A terceira fase, a qual é o anteprojeto, dá-se início a escolha dos materiais, a definição das

dimensões principais e o exame da compatibilidade espacial e ainda a complementação das consequentes funções auxiliares por meio de subsoluções.

Para a definição das dimensões principais dos componentes do sistema de movimentação e fixação, são utilizados cálculos de elementos de máquinas e resistência dos materiais, o modelamento tridimensional, também a realização da análise estrutural do sistema montado empregando a análise em elementos finitos para obter o coeficiente de segurança do projeto. Na escolha dos materiais a serem usados, procurou-se utilizar os comercialmente disponíveis.

Para o dimensionamento das peças e do conjunto montado do sistema de movimentação e fixação para o galpão metálico, faz-se necessário a realização dos cálculos que identificam as cargas que estarão atuando nos componentes. Na sequência, segue o descritivo destas cargas.

3.3.1 Cargas atuantes na estrutura

As ações e combinações de ações atuantes no sistema de fixação e movimentação do galpão metálico estão de acordo com as normas NBR8681, NBR8800, NBR6123 e a NBR6120. São as ações provenientes do peso próprio da estrutura, carga de vento, a carga acidental e as combinações existentes entre estas cargas. Na sequência segue o resumo das ações e as combinações de ações. Os desenvolvimentos dos cálculos, que originaram este resumo estão descritos nos apêndices A e B deste trabalho.

a) Carga de vento

As considerações para o cálculo da carga de vento, listadas a seguir, são para o galpão descrito no item 3.1 - Especificação do projeto e conforme a norma NBR6123 (1988).

- Velocidade básica do vento $V_o = 50\text{m/s}$;
- Fator topográfico $S_1 = 1$ terreno plano;
- Fator de rugosidade $S_2 =$ categoria I adotada - classe B.

Tabela 13 - Fator de rugosidade S_2 .

H	< 5m	10m	15m
S_2	1,04	1,09	1,12

Fonte: (NBR6123, 1988).

— Fator estatístico $S_3 = 0,95$;

Através da velocidade básica do V_o , do fator topográfico S_1 , do fator de rugosidade do terreno S_2 e do fator estatístico S_3 , é calculada a velocidade característica do vento (V_k), e determinada a pressão dinâmica (q_k) devida ao vento, que irá atuar no galpão metálico. A seguir os valores calculados da velocidade característica do vento e da pressão dinâmica, de acordo com as diferentes alturas nas paredes do galpão, conforme Tabela 13 e utilizando-se das Equações 2.3 e 2.4.

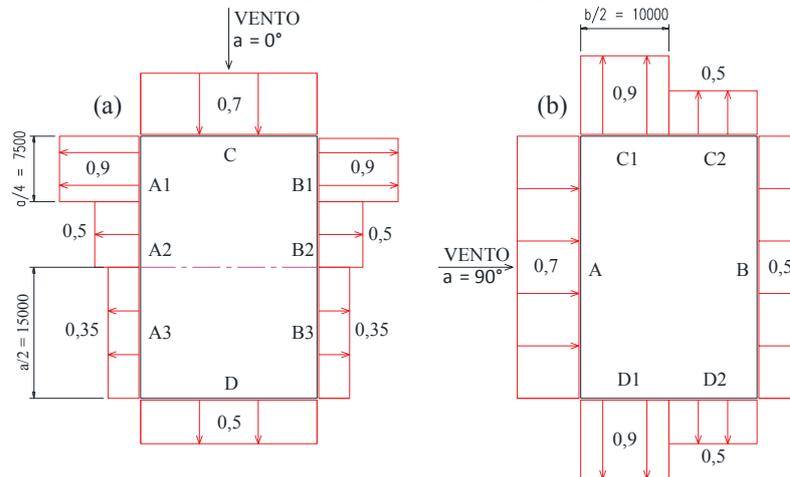
$$V_{k5} = 50 \times 1 \times 1,04 \times 0,95 = 49,4 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad q_5 = 0,613 \times (49,4)^2 = 1,5 \frac{kN}{m^2}$$

$$V_{k5} = 50 \times 1 \times 1,09 \times 0,95 = 51,8 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad q_5 = 0,613 \times (51,8)^2 = 1,65 \frac{kN}{m^2}$$

$$V_{k15} = 50 \times 1 \times 1,12 \times 0,95 = 53,2 \frac{m}{s} \quad \therefore \quad q_{15} = 0,613 \times (53,2)^2 = 1,73 \frac{kN}{m^2}$$

A Figura 40 apresenta a distribuição dos coeficientes de pressão externo, nas paredes laterais do galpão, sendo, a Figura 40 (a) considerando o vento incidente no galpão a 0° e na Figura 40 (b), o vento incidente a 90° .

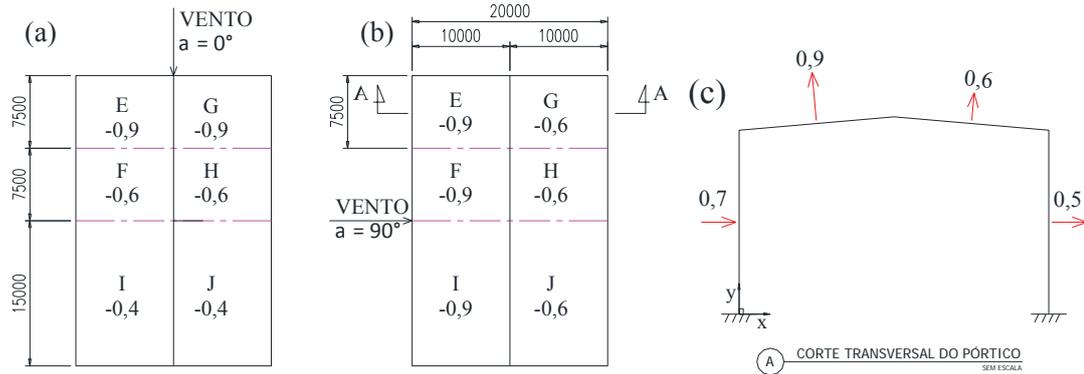
Figura 40 - Distribuição dos coeficientes de pressão externo nas paredes laterais.



Fonte: Autor.

Para a distribuição dos coeficientes de pressão externos, na cobertura do galpão, as Figuras 41 (a) e (b) apresentam os ventos incidentes a 0° e a 90° , respectivamente. A Figura 41 (c), tem-se um corte transversal do pórtico que mostra os coeficientes de pressão nas paredes laterais e na cobertura.

Figura 41 - Distribuição dos coeficientes de pressão externa na cobertura.

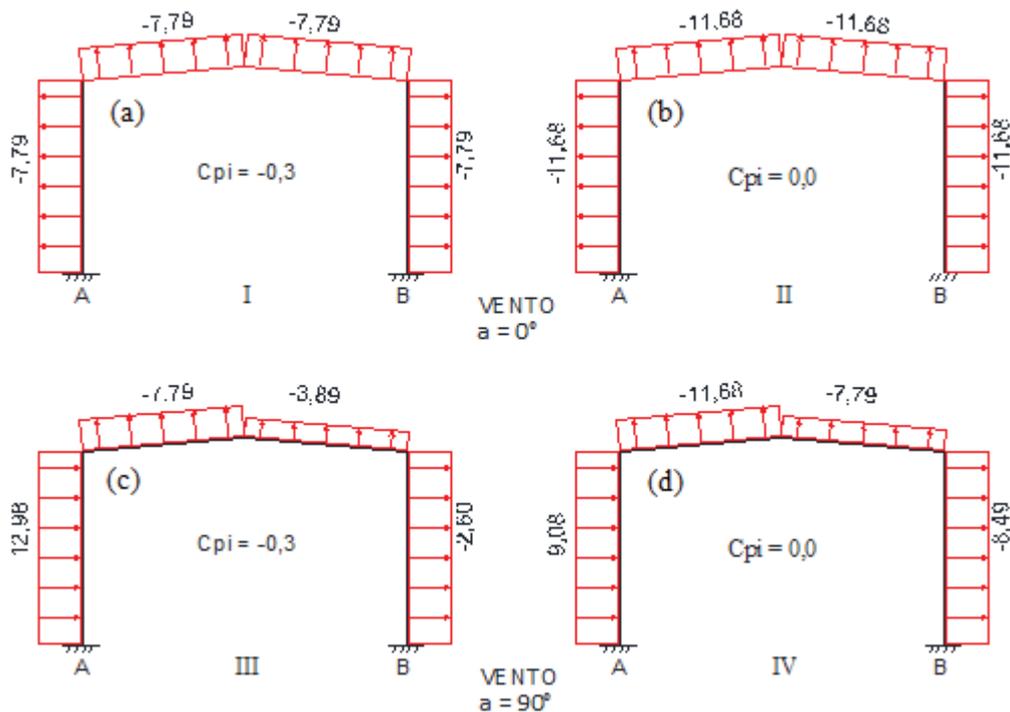


Fonte: Autor.

Após a definição dos coeficientes de pressão externos, é selecionado os coeficientes de pressão interno (C_{pi}) de -0,3 e 0,0 devido as quatro paredes serem igualmente permeáveis. A Figura 42 ilustra o resumo das combinações dos coeficientes de pressão externos e interno, onde por meio da Equação (2.5) são obtidas as ações resultantes no pórtico.

Nas Figuras 42 (a) e (b) considerou-se na análise, o vento incidente de 0° no pórtico e nas Figura 42 (c) e (d) é considerado o vento atuante na estrutura a 90° .

Figura 42 - Ações resultantes da carga de vento em kN/m.



Fonte: Autor.

b) Carga permanente

A carga permanente ($F_{Gi,k}$) estimada para a estrutura metálica é de $0,45 \text{ kN/m}^2$, onde multiplicado pelo espaçamento entre os pórticos (Figura 33), tem-se a carga por metro, ou seja, $3,375 \text{ kN/m}$.

c) Carga acidental

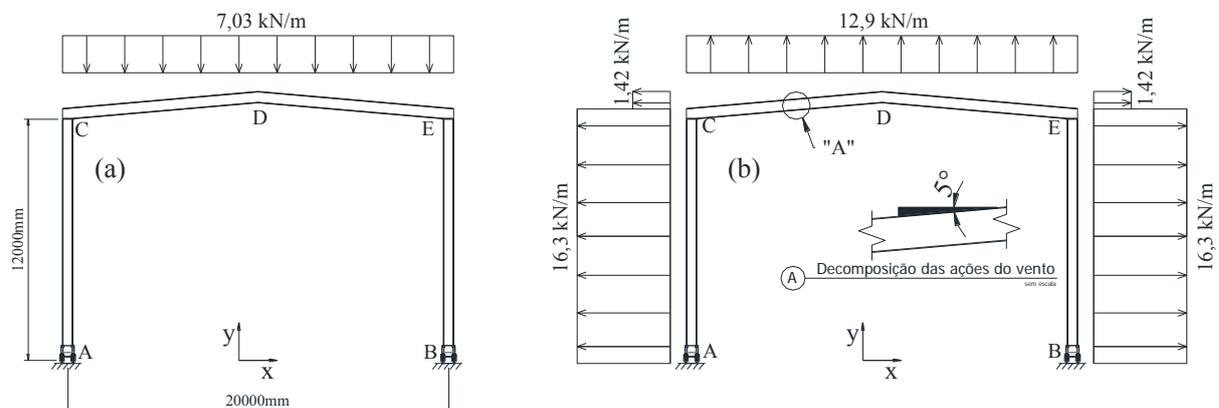
A carga acidental ($F_{Qi,k}$), conforme a norma NBR8800 (2008) anexo B, não deve ser menor que $0,25 \text{ kN/m}^2$. Portanto para se obter o carregamento linear distribuído, é multiplicado o valor da carga acidental pelo espaçamento entre os pórticos (Figura 33), portanto o valor da carga acidental em um pórtico é de $1,875 \text{ kN/m}$.

3.3.2 Análise estrutural do pórtico

Através do cálculo das cargas atuantes no galpão metálico, que compreende as cargas variáveis do vento, permanente e acidental, são realizadas as combinações destas cargas atuantes na estrutura, as quais são denominadas de $F_{D,1}$, $F_{D,2}$ e $F_{D,3}$ e são mostradas nas figuras que seguem.

Na Figura 43 (a), tem-se a combinação das cargas $F_{D,1}$ a qual são utilizados os coeficientes de ponderação referente ao peso próprio da estrutura metálica e as ações variáveis. A Figura 43 (b) mostra a combinação $F_{D,2}$ onde é utilizado a hipótese II das ações resultantes da carga de vento, sendo as forças devido ao vento decompostas segundo os eixos globais para a montagem das combinações finais.

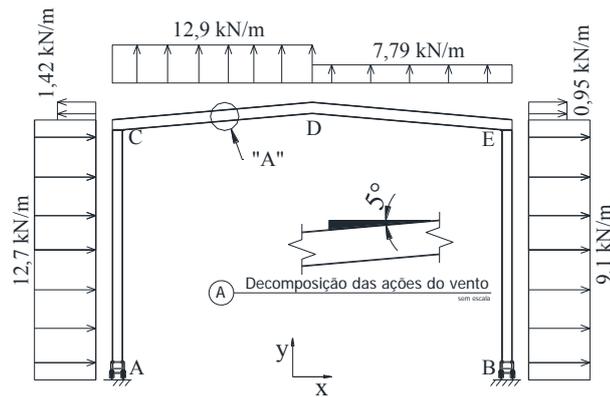
Figura 43 - (a) combinação de cargas $F_{D,1}$, (b) combinação de cargas $F_{D,2}$.



Fonte: Autor.

A Figura 44 apresenta as combinações de cargas $F_{D,3}$ onde é utilizado a hipótese IV dos esforços resultantes da carga de vento, sendo as forças devido ao vento decompostas segundo os eixos globais para a montagem das combinações finais. Para o cálculo destas combinações, utilizam-se os coeficientes de ponderação previstos na norma NBR8800 (2008).

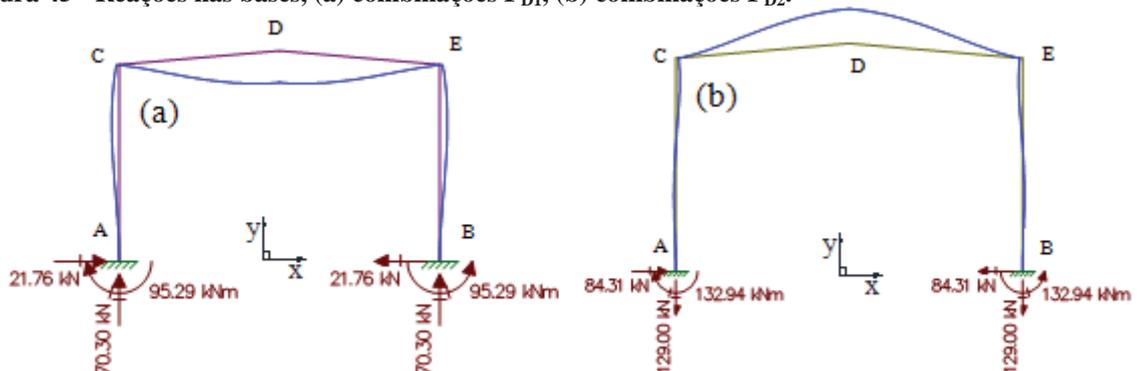
Figura 44 - Combinações de carga $F_{D,3}$.



Fonte: Autor.

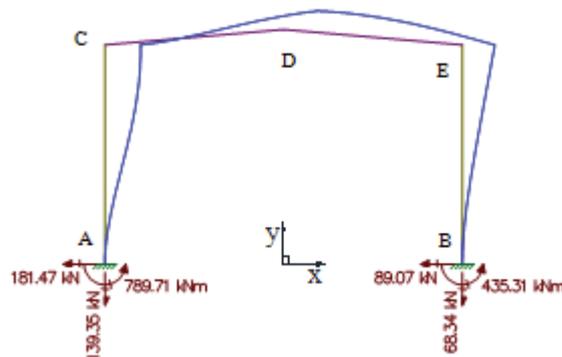
Na análise do comportamento estrutural do galpão metálico, é utilizado o programa computacional Ftool (2015), o qual calcula o deslocamento, os esforços axiais, cortantes e os momentos fletores que atuam na estrutura. Utilizou-se a ligação engastada na base das colunas nos modelos gerados, por ser a situação que possibilita as reações de momento e as forças horizontais e verticais, na pior condição, não considerando o efeito da rigidez parcial dos vínculos. Nas Figuras 45 e 46 são apresentadas os diagramas das reações nas bases, juntamente com a geometria deformada dos pórticos analisados nas três combinações de cargas previstas $F_{D,1}$, $F_{D,2}$ e $F_{D,3}$.

Figura 45 - Reações nas bases, (a) combinações $F_{D,1}$, (b) combinações $F_{D,2}$.



Fonte: Autor.

Figura 46 - Reações nas bases, combinações de cargas F_{D3} .



Fonte: Autor.

Para simplificar a apresentação dos esforços no pórtico, é apresentada a Tabela 14 contendo os valores dos esforços na base A e na base B do pórtico, onde:

N é o esforço axial em kN;

M é o momento fletor em kN.m, sendo o sentido horário com sinal negativo e o sentido anti-horário sinal positivo;

V é o esforço cortante em kN.

Tabela 14 - Resumo das ações nas bases do pórtico principal.

Bases	Tipos de esforços	Combinação FD,1	Combinação FD,2	Combinação FD,3
A	N (axial)	-70,3	129,0	139,4
	M (momento)	95,3	132,9	-789,7
	V (cortante)	-21,8	-84,3	181,5
B	N (axial)	-70,3	129,0	68,3
	M (momento)	-95,3	-132,9	-435,3
	V (cortante)	21,8	84,3	89,1

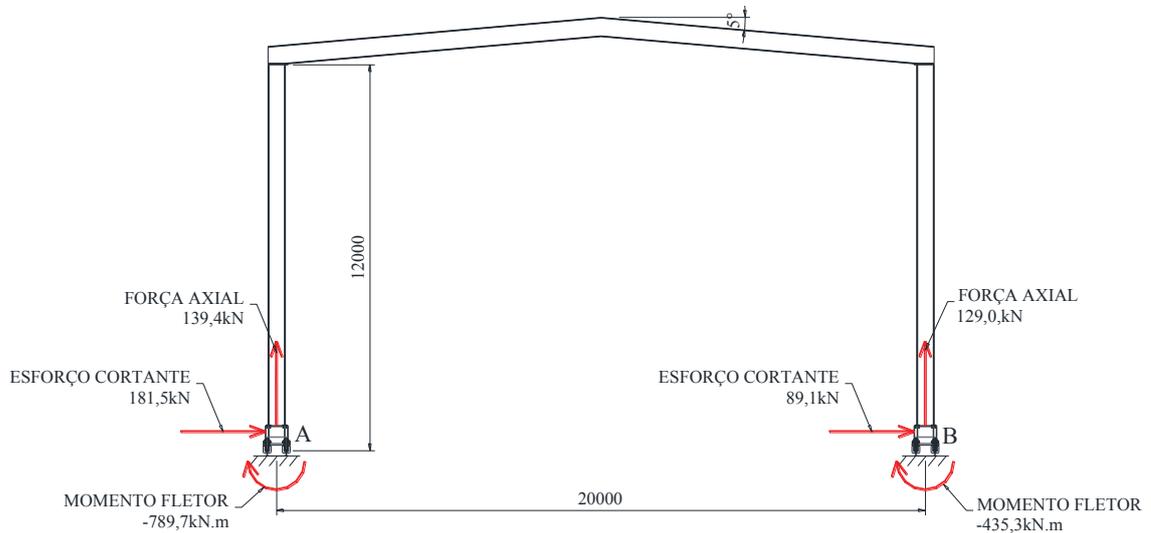
Fonte: Autor.

Através dos dados informados na Tabela 14, conclui-se que os maiores esforços axiais, esforços cortantes e momentos atuantes no centro geométrico das bases A e B dos pilares metálicos, são os seguintes:

- esforços axiais de $139,4$ kN na base A e $129,0$ kN na base B;
- esforços cortantes de $181,5$ kN na base A e $89,1$ kN na base B;
- o momento fletor de $-789,7$ kN.m na base A e $-435,3$ kN.m na base B.

Para melhor entendimento a Figura 47 apresenta os esforços máximos previstos que poderão atuar na base dos pilares metálicos da estrutura.

Figura 47 - Esforços máximos atuantes na base dos pilares.



Fonte: Autor.

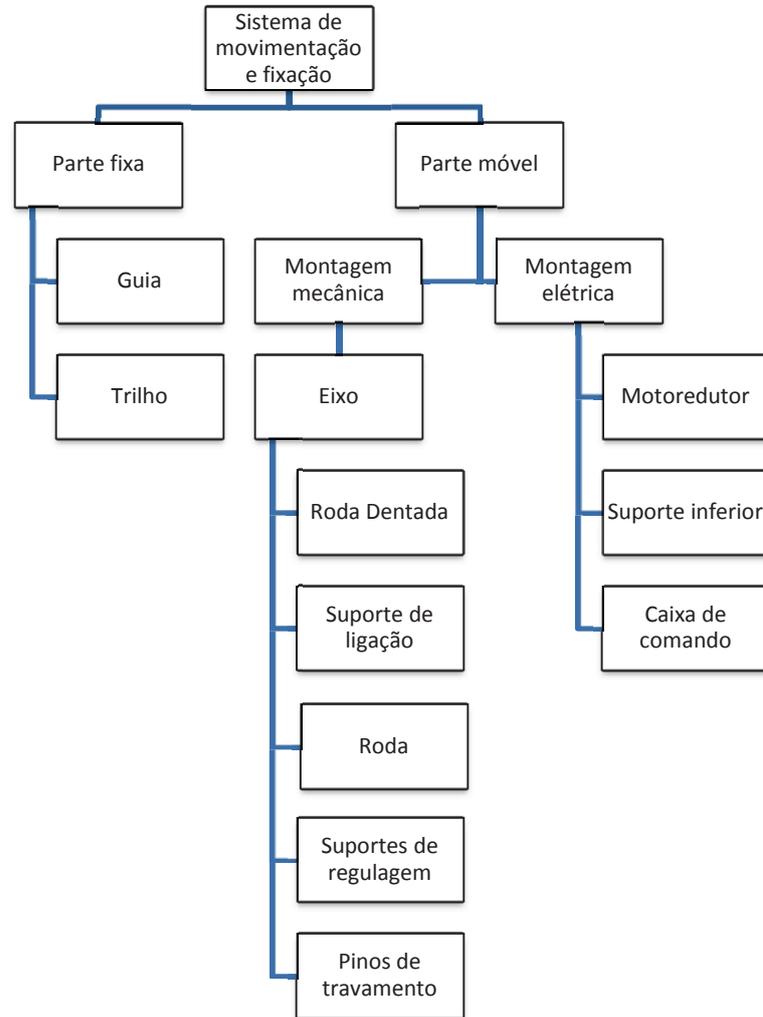
Através destes resultados é possível analisar os componentes e o conjunto do sistema de movimentação e fixação do galpão metálico móvel.

3.3.3 Análise dos componentes

Na análise individual dos componentes que fazem parte do sistema de movimentação e fixação do galpão metálico, são descritas as funções de cada peça e o dimensionamento das principais peças, utilizando-se dos conhecimentos em elementos de máquinas e resistência dos materiais.

A Figura 48 apresenta o organograma das peças que compõem o projeto, o qual é dividido em duas fases principais, sendo a primeira fase referente à parte fixa composta pelo trilho e o guia que são fixados na base de concreto e a segunda fase referente à parte móvel a qual é subdividida em montagem mecânica e montagem elétrica.

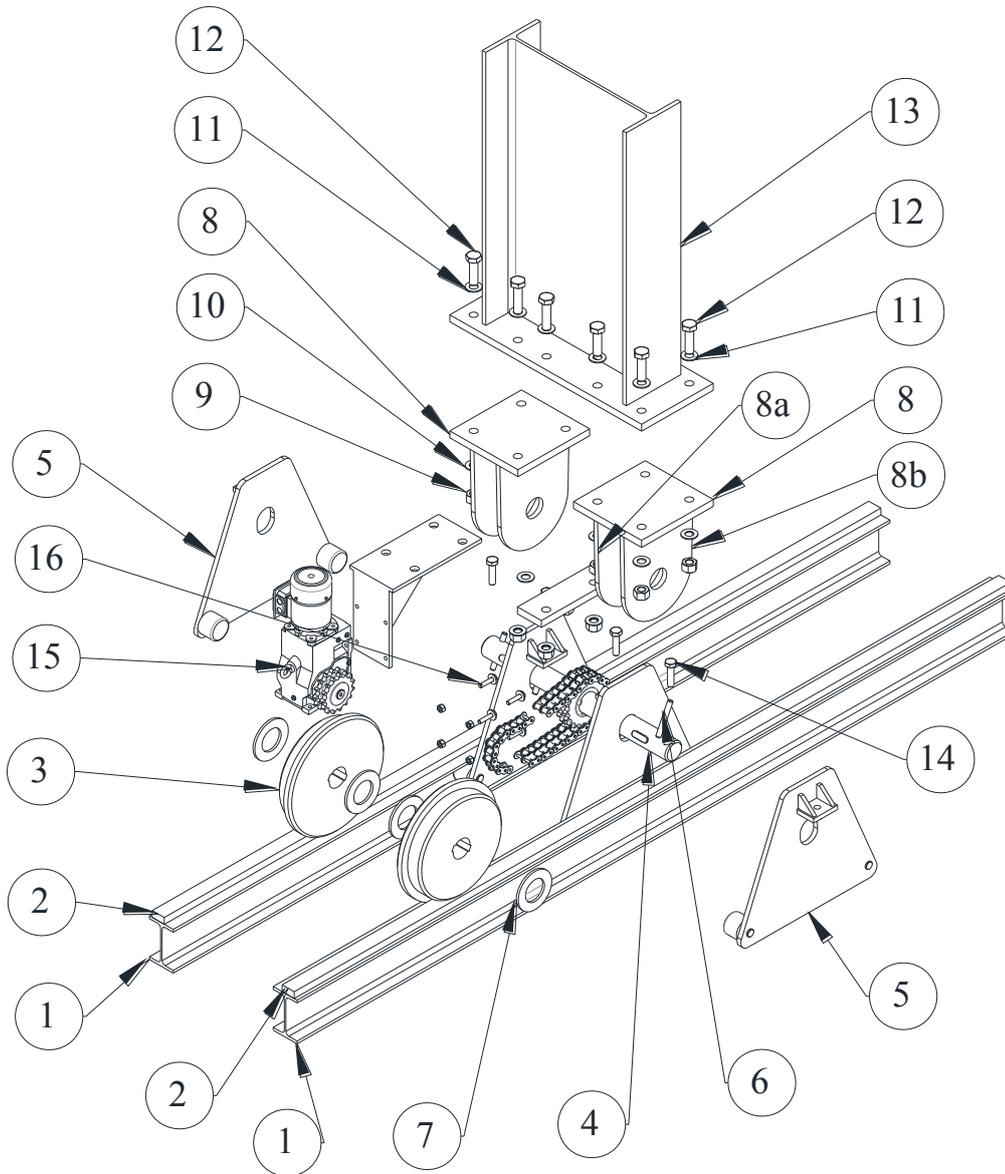
Figura 48 - Organograma das peças que compõem o sistema de movimentação e fixação.



Fonte: Autor.

A Figura 49 mostra uma vista explodida do sistema de movimentação e fixação, na qual apresentam-se todas as peças que compõem o sistema e os fixadores que montam o conjunto e interligam o pilar metálico no conjunto. Também mostra a indicação numérica das peças que compõem o conjunto.

Figura 49 - Vista explodida do sistema de movimentação e fixação.

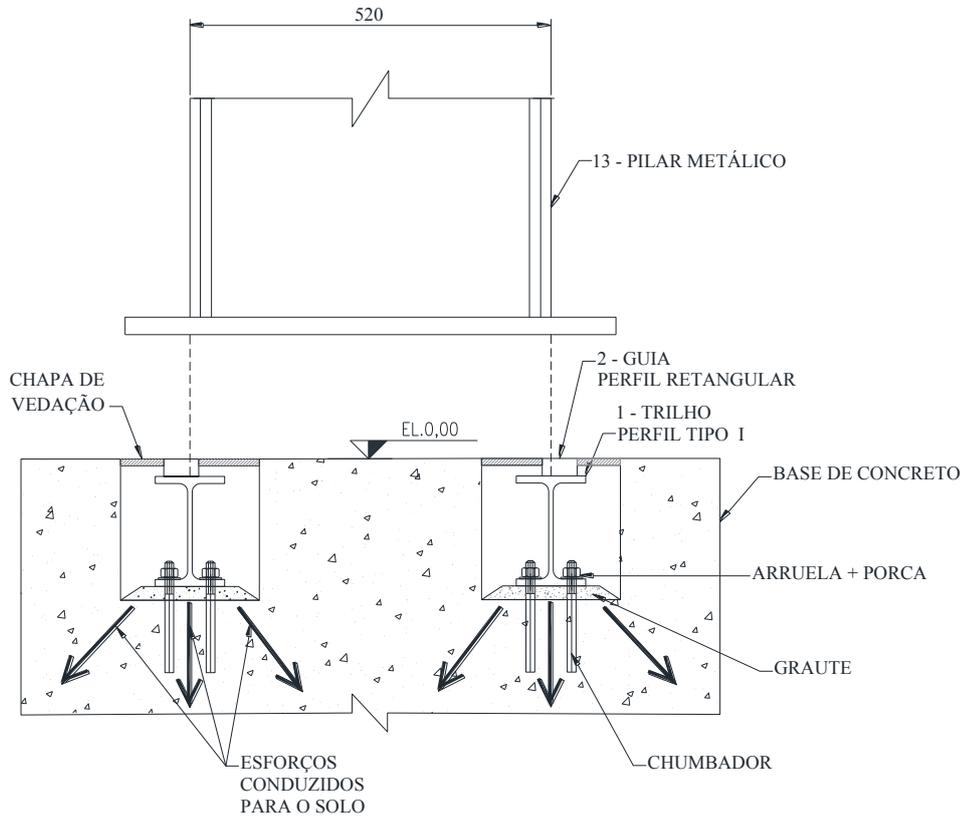


Fonte: Autor.

Na Figura 50, tem-se a guia (2), que possui perfil metálico retangular, o qual é soldado na mesa superior do perfil I do trilho de apoio (1), onde esta união tem as funções de evitar o descarrilamento da roda durante a movimentação do galpão, corrigir pequenas imperfeições no alinhamento longitudinal do trilho de apoio (1) e também receber a carga total do galpão metálico e transmiti-la para a base de concreto. A fixação do trilho de apoio (1) na base de concreto pode ser realizada através de chumbadores metálicos conforme, Bellei (1998). A Figura 50 ilustra esta situação de fixação e também é possível visualizar que o nível do conjunto trilho (1) e a guia (2) está coincidindo com o nível da base de concreto, a fim de

evitar acidentes ou transtornos decorrentes da posição elevada do trilho e a utilização de chapas para vedação.

Figura 50 - Detalhe de fixação do trilho na base de concreto.



Fonte: Autor.

A cota entre os eixos dos trilhos inicial é de 520 mm, conforme indicado na Figura 50, é devido ao pré-dimensionamento do pilar metálico conforme Bellei (1998), onde tem-se a seguinte relação.

$$H = \frac{L}{20} a \frac{L}{30}$$

$$H = \frac{12m}{23} = 520 \text{ mm}$$

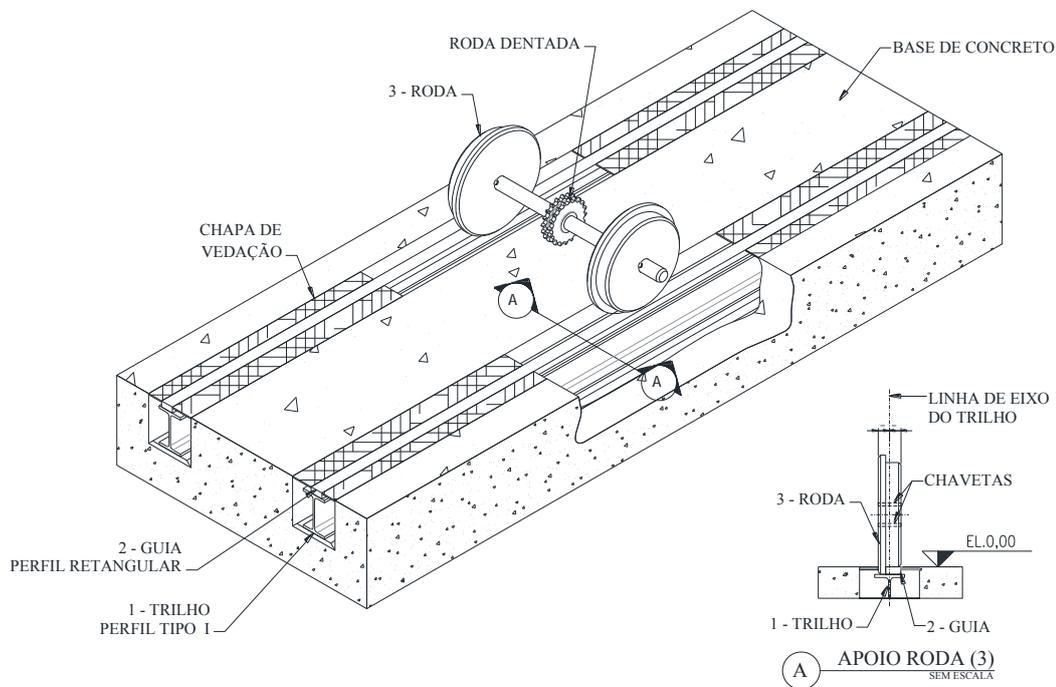
Onde:

H é a largura do pilar metálico;

L é a altura livre do pilar metálico (pé direito).

A Figura 51 mostra a roda (3) posicionada simetricamente em relação à linha de eixo do trilho. Esta simetria é possível devido à descentralização da guia (2) no trilho (1). O flange lateral da roda (3) é situado na parte interna do sistema, adotando o mesmo princípio do trilho / roda utilizada em transporte ferroviário. Esta configuração é proposta a fim de evitar o descarrilamento da roda durante a movimentação do galpão metálico. O eixo (4) contém chavetas, onde são acopladas as rodas (3) e a roda dentada, a fim de facilitar a manutenção. O eixo (4) tem a função de interligar as rodas direita e esquerda (3), possibilitando o movimento simultâneo entre si.

Figura 51 - Posicionamento da roda no trilho.

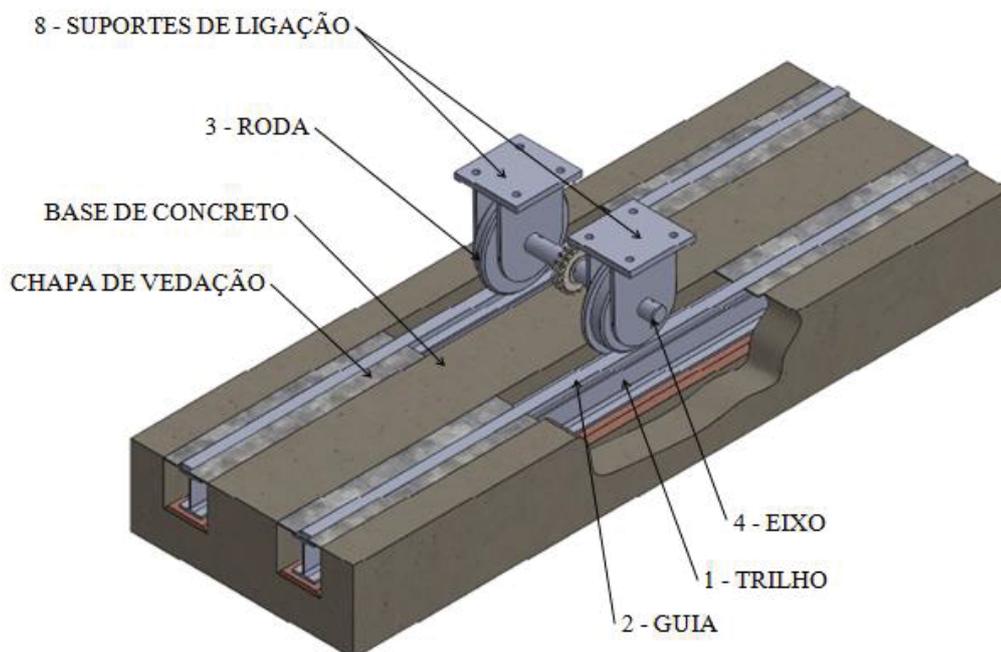


Fonte: Autor.

A Figura 52 apresenta os suportes de ligação (8) sendo posicionado na linha de eixo das rodas (3), através dos flanges internos (8a) e externos (8b). Também possui furações prévias na parte superior a fim de receber o pilar metálico (13).

Os suportes de ligação (8) têm a função de unir o pilar metálico (13), com o eixo (4), e como consequência transmitir a carga da estrutura para o eixo (4).

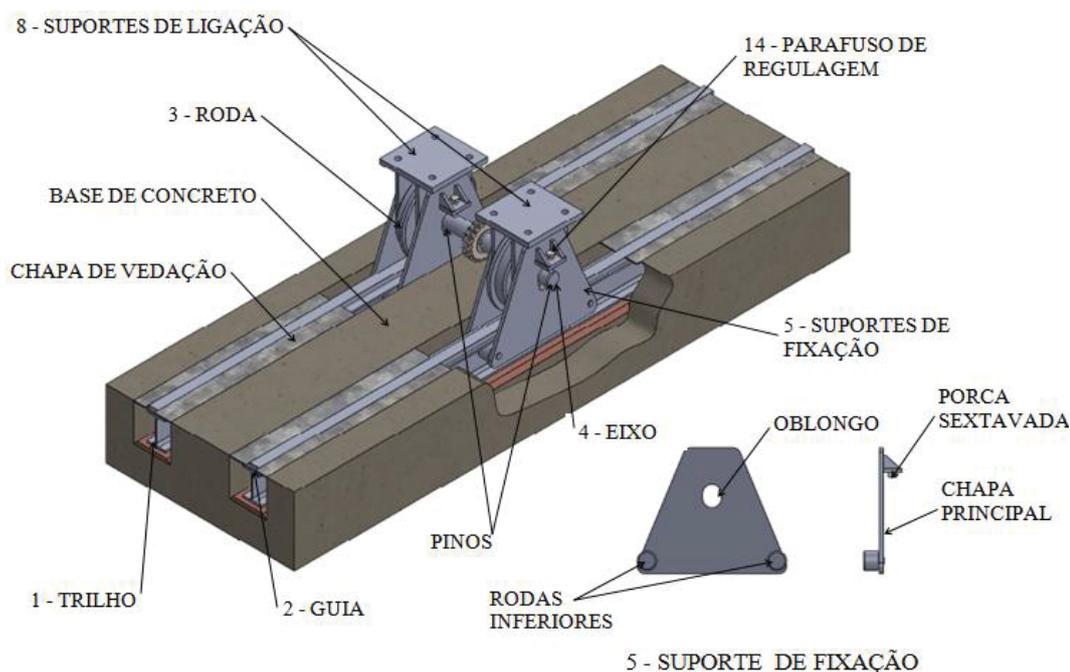
Figura 52 - Posicionamento do perfil de ligação.



Fonte: Autor.

A Figura 53 mostra o suporte de fixação interno e externo (5) sendo posicionado paralelo aos flanges dos suportes de ligação (8), o qual é fixado no eixo (4) através dos pinos metálicos e na mesa superior do trilho (1) por meio das rodas inferiores.

Figura 53 - Posicionamento do suporte de fixação.

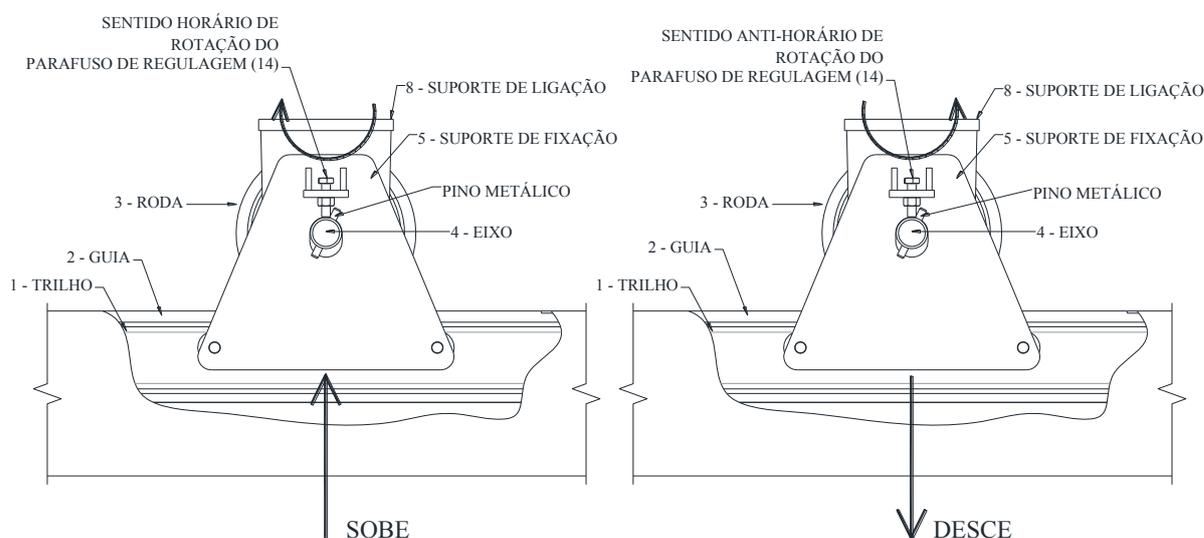


Fonte: Autor.

O suporte de fixação (5) é formado, através do processo de soldagem, das seguintes peças: chapa frontal, reforços, porca sextavada e rodas inferiores. As rodas inferiores contêm rolamentos que são acoplados no eixo inferior a fim de facilitar o deslocamento do galpão devido à diminuição do atrito. A chapa frontal possui um oblongo para permitir o ajuste vertical necessário para a fixação do galpão metálico, possui também uma porca sextavada soldada no reforço metálico para permitir que o parafuso de regulagem (14) seja acoplado (Figura 53).

Na Figura 54, tem-se a vista lateral do sistema de movimentação e fixação, que apresenta o esquema de regulagem do galpão metálico, onde a porca do suporte de fixação (5) recebe o parafuso de regulagem (14) e, ao rotacionar o parafuso no sentido horário conforme Figura 54 à esquerda, a extremidade do parafuso entra em contato com o eixo (4), e aumentando o torque permite que o suporte de fixação (5) se desloque verticalmente para cima até entrar em contato com a mesa superior do trilho (1), onde é aplicado o torque de aperto necessário, e desta forma travando o galpão metálico. Para realizar o destravamento do galpão metálico, a fim de manutenção ou reajuste, o processo é o inverso, conforme mostra na Figura 54 à direita, sendo que ao girar o parafuso de regulagem (14) no sentido anti-horário de rotação, faz com que o suporte de fixação (5) se desloque verticalmente para baixo, liberando desta forma o suporte de fixação, este esquema de regulagem é similar ao utilizado em esticadores de correia.

Figura 54 - Vista lateral do sistema de movimentação.

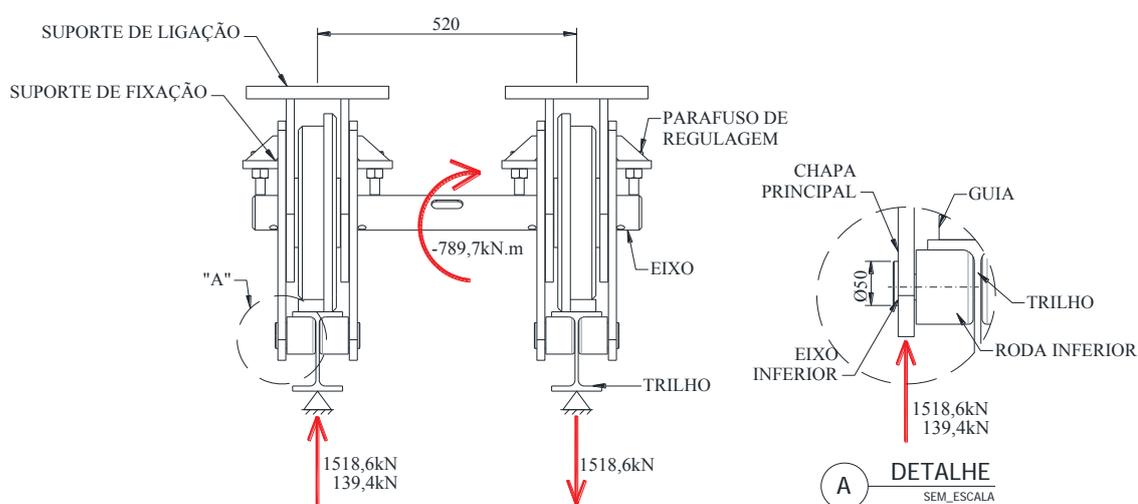


Fonte: Autor.

Na sequência segue a análise do esforço de cisalhamento do eixo inferior, o qual está acoplado na roda inferior. As cargas atuantes no eixo inferior são as referentes ao momento fletor máximo e a carga axial de tração máxima, conforme mostra a Tabela 14.

A Figura 55 apresenta os esforços atuantes nos eixos inferiores do suporte de fixação, sendo o momento de $789,7 \text{ kNm}$ decomposto em binário e a utilização do esforço axial de $139,4 \text{ kN}$ conforme Tabela 14.

Figura 55 - Esforços atuantes nos eixos inferiores.



Fonte: Autor.

Na sequência segue a Equação (3.3), a qual é utilizada para o cálculo da tensão ao cisalhamento τ_{inf} no eixo inferior, e a Equação (3.4) que relaciona a resistência ao cisalhamento τ , conforme a teoria da energia de distorção, e a tensão de cisalhamento τ_{inf} atuante. O material do eixo é aço padrão SAE1045 repuxado à frio cuja tensão de escoamento é de 530 MPa e tensão de ruptura 630 MPa , onde:

ΣF_a é o somatório das forças axiais atuantes no eixo inferior;

A_t é a área transversal do eixo inferior;

η é o coeficiente de segurança.

$$\tau_{inf} = \frac{\Sigma F_a}{A_t} \quad (3.3)$$

$$\tau_{inf} = \frac{1}{4} \left\{ \frac{139,4kN + (789,7kNm \div 0,520m)}{\frac{\pi(50)^2}{4} mm^2} \right\} = 211,1 MPa$$

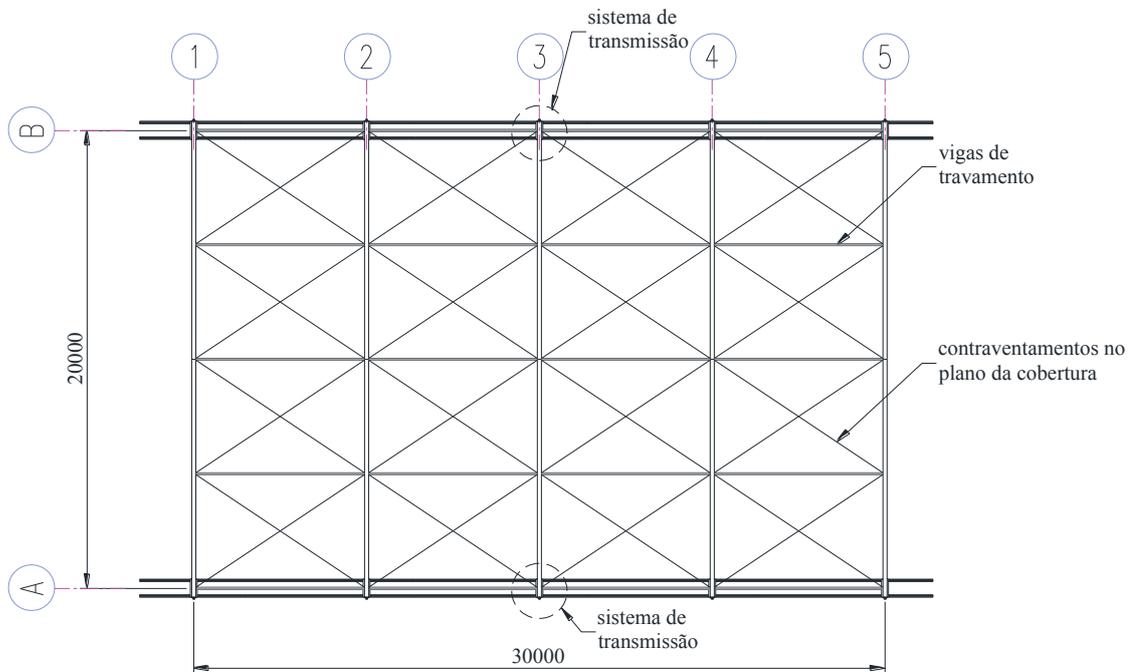
$$\eta = \frac{0,577 \times S_y}{\tau_{inf}} \quad (3.4)$$

$$\eta = \frac{0,577 \times 530MPa}{211,1MPa} = 1,4$$

Através do resultado da Equação (3.4), o coeficiente de segurança da roda inferior do suporte de fixação é de 1,4 atendendo assim a necessidade do projeto.

A próxima análise é referente à seleção do sistema de transmissão mecânica a ser adotado. Para o posicionamento do acionamento do galpão metálico, inicialmente está previsto a utilização do sistema de transmissão centralizado em cada linha de eixos longitudinais do galpão metálico, na Figura 56 mostra uma vista superior do galpão metálico onde está indicado na intersecção do eixo 3 com o eixo A e com o eixo B, o ponto de fixação do sistema de transmissão.

Figura 56 - Localização do sistema de transmissão.



Fonte: Autor.

Conforme Shigley et al. (2005), para se obterem os melhores resultados, uma correia trapezoidal deve trabalhar com velocidade relativamente elevada, cerca de 1200 m/min. Alguns problemas poderão surgir se a velocidade for muito maior do que 1500 m/min ou muito menor do que 300 m/min. Portanto, quando possível, deve-se dimensionar as polias para obterem-se velocidades para a correia nas vizinhanças de 1200 m/min.

Devido o galpão metálico possuir dimensões relativamente grandes, a fim de garantir maior segurança no seu deslocamento, a velocidade proposta é de 1 km/h ou $16,7 \text{ m/min}$, sendo esta velocidade muito inferior a sugerida por Shigley et al. (2005) para o bom funcionamento da transmissão por correia.

O sistema de tração adotado é através da transmissão por corrente, pois apresenta algumas características melhores em relação à transmissão por correia e à transmissão por engrenagens, que seguem:

- a) Fácil manutenção;
- b) Maior confiabilidade que as correias, mas menos que as engrenagens;
- c) Rendimento entre 97 % a 98 %;
- d) Montagem fácil;
- e) Custo intermediário entre as correias e as engrenagens.

Abaixo, seguem os cálculos de potência, torque e rotação que atuam no motorreductor (15), os quais devem atender as necessidades do projeto. Como o deslocamento do galpão ocorre com ventos em torno de 1 km/h , devido a questão da segurança, é considerado no dimensionamento do motorreductor somente a carga permanente de $0,45 \text{ kN/m}^2$ do galpão metálico, conforme previsto no item 3.3.1. Esta carga é multiplicada pelo comprimento do galpão (30 metros) e pela metade da largura (10 metros), a fim de obter a carga em um único ponto de fixação.

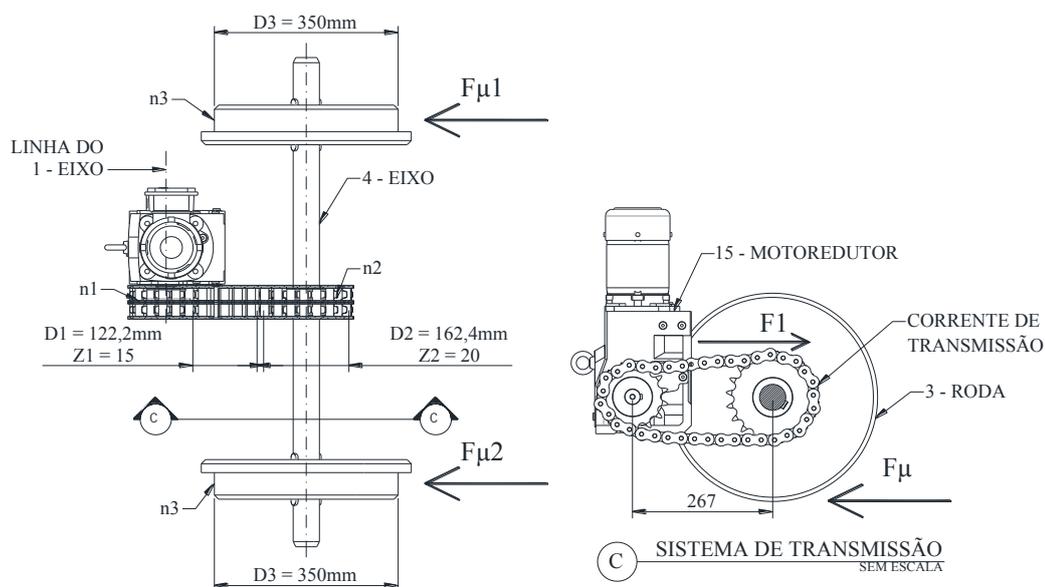
Na Figura 57 é indicada a posição onde estão atuando as forças $F_{\mu 1}$ e $F_{\mu 2}$. Utilizando-se da Equação (2.8) que determina a força necessária para iniciar o movimento e da Equação (2.9) que gera o valor do coeficiente de atrito, tem-se os seguintes valores:

$$\mu = 0,0624 + \frac{45,6}{1 + 260} = 0,237$$

$$F_{\mu 1} + F_{\mu 2} = \left(0,45 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 30\text{m} \times \frac{20}{2} \text{m} \right) \times 0,237 = 32 \text{ kN}$$

A Figura 57 representa o esquema da relação de transmissão do sistema de movimentação do galpão metálico, a qual é designada pela letra i e a identificação das forças de atrito.

Figura 57 - Relação de transmissão.



Fonte: Autor.

Para o cálculo da relação de transmissão é utilizado a Equação (3.5), a qual relaciona o número de dentes da roda dentada Z_2 com o número de dentes da roda dentada Z_1 , e o torque no eixo (4) com o torque no eixo do motorreductor (15).

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{T_{eixo4}}{T_{eixo1}} \quad (3.5)$$

$$i = \frac{20}{15} = 1,33$$

O torque no eixo (4) é dado pela Equação (3.6), em que R_3 é o raio da roda (3).

$$T_{eixo4} = (F_{\mu1} + F_{\mu2}) \times R_3 \quad (3.6)$$

$$T_{eixo4} = 32kN \times 0,175m = 5,6 kNm$$

Para o cálculo do torque no eixo do motorreductor é utilizado a Equação (3.5) e o resultado da Equação (3.6). Segue resolução.

$$T_1 = \frac{5,6kNm}{1,33} = 4,2 kNm$$

A velocidade tangencial V_t de deslocamento do galpão metálico proposta é de $1 km/h$ ou $0,28 m/s$ tomando por base a questão da segurança, conforme mencionado anteriormente. Na sequência segue a Equação (3.7) a qual é utilizada para obter a velocidade angular da roda (3) e conseqüentemente do galpão metálico.

$$V_t = \omega \times r \quad (3.7)$$

$$\omega_2 = \omega_3 = \frac{0,28 \frac{m}{s}}{\frac{0,350}{2} m} = 1,6 \frac{rad}{s}$$

A rotação por minuto n é dado pela Equação (3.8), que segue.

$$n = \frac{\omega \times 30}{\pi} \quad (3.8)$$

$$n_2 = n_3 = \frac{1,6 \frac{rad}{s} \times 30}{\pi} = 15,3 rpm$$

Utilizando-se do valor da relação de transmissão e da rotação no eixo (4), tem-se a rotação do motorreductor e a velocidade angular, conforme sequência.

$$n_1 = 15,3rpm \times 1,33 = 20,4 rpm$$

$$\omega_1 = 1,6 \times 1,33 = 2,13 \frac{rad}{s}$$

Para o cálculo da potência necessária para o deslocamento do galpão metálico, é utilizada a Equação (3.9), onde:

P é a potência em kW ;

T_1 é o torque no eixo do motorreductor em kNm ;

ω_1 é a velocidade angular na roda dentada $D1$ que está acoplada no motorreductor em rad/s .

$$P = T_1 \omega_1 \quad (3.9)$$

$$P = 4,2kNm \times 2,13 \frac{rad}{s} = 8,95 kW$$

Logo, para o acionamento do sistema de movimentação linear do galpão metálico, o motorreductor deverá apresentar potência de $8,95 kW$, torque de $4,2 kNm$ e rotação de $20,4 rpm$.

Conforme mostrado na Figura 57, a qual é a tentativa inicial no dimensionamento do sistema de transmissão por corrente, a roda dentada condutora apresenta número de dentes $Z1$ igual a 15 e a roda dentada conduzida número de dentes $Z2$ igual a 20 . Para o cálculo do diâmetro primitivo das rodas dentadas, é utilizada a Equação 3.10, conforme Shigley et al. (2005).

$$D = \frac{p}{\text{sen}\left(\frac{180}{Z}\right)} \quad (3.10)$$

$$D_1 = \frac{25,4}{\text{sen}\left(\frac{180}{15}\right)} = 122,167$$

$$D_2 = \frac{25,4}{\text{sen}\left(\frac{180}{20}\right)} = 162,368$$

Onde:

D é o diâmetro primitivo da roda dentada;

p é o passo da corrente;

Z é o número de dentes da roda dentada.

Para que ocorra o engrenamento, o valor do módulo M_e de ambas as engrenagens deve ser o mesmo. Segue abaixo a verificação do módulo das rodas dentadas, conforme a Equação (3.11).

$$M_e = \frac{D_1}{Z_1} = \frac{D_2}{Z_2} \quad (3.11)$$

$$M_e = \frac{122,2}{15} = \frac{162,4}{20} = 8,1$$

A força tangencial F_t , a qual é aplicada na roda dentada D_1 , é dada pela Equação (3.12) que segue.

$$F_t = \frac{T_1}{R_1} \quad (3.12)$$

$$F_t = \frac{4,2 \text{ kNm}}{\frac{0,1222}{2} \text{ m}} = 68,7 \text{ kN}$$

A norma utilizada na seleção da corrente para ser empregada no sistema de transmissão do galpão metálico e a norma americana ANSI B29.1 (2011), na sequência segue a Tabela 15, a qual foi extraída da referida norma para a escolha da corrente. A corrente selecionada é o padrão número 80, esta escolha é devido a capacidade de resistência a tração F_r que a corrente possui, onde conforme a Tabela 15 é de $55,6 \text{ kN}$, portanto deve-se utilizar duas correntes em cada linha de eixo para realizar a transmissão e atender a necessidade do projeto que é de $68,7 \text{ kN}$. Segue a Equação (3.13) demonstrando o mencionado acima.

$$F_t < F_r \quad (3.13)$$

$$68,7 \text{ kN} < 111,2 \text{ kN}$$

Tabela 15 - Dimensões das correntes em geral.

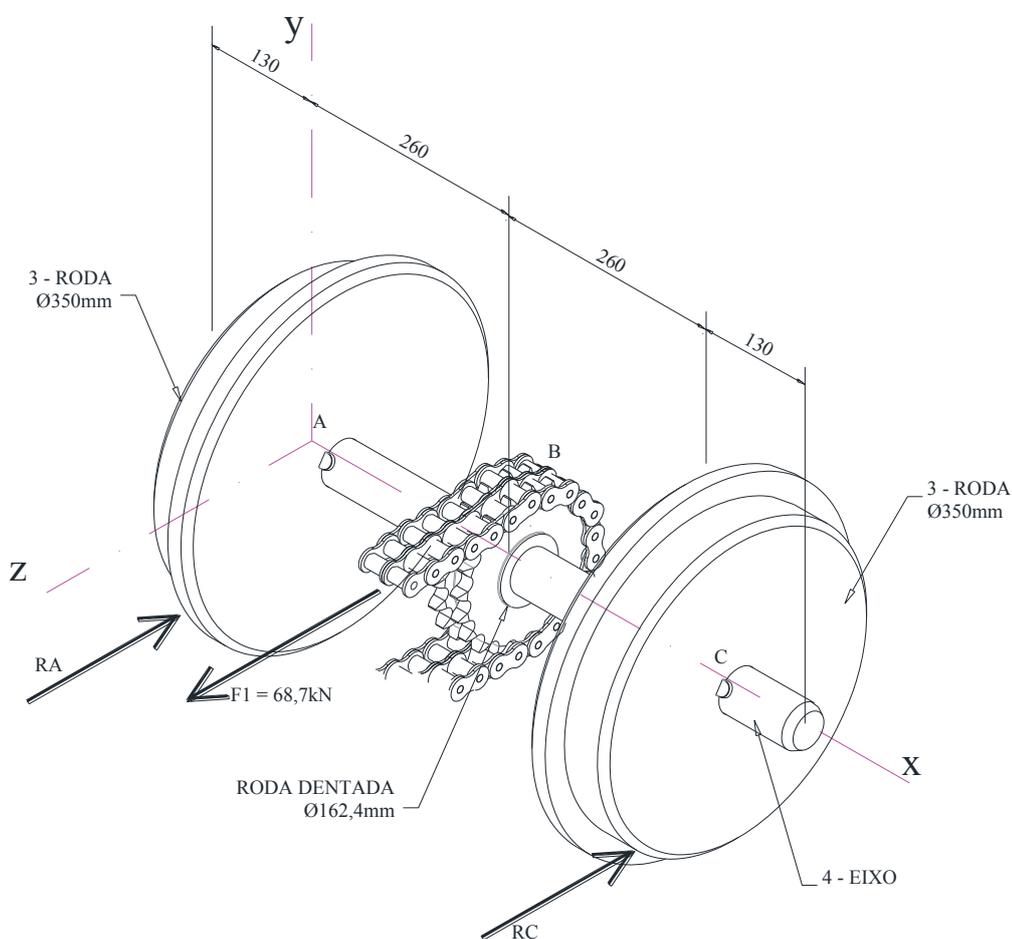
Número padrão da corrente	Dimensões (mm)						Limite mínimo de resistência á tração (kN)
	Passo	Distância entre placas	Diâmetro máximo do rolo	Placas laterais		Diâmetro máximo do pino	
				Altura máxima	Espessura		
60	19,1	12,7	11,9	18,1	2,4	5,9	31,2
80	25,4	15,9	15,9	24,1	3,2	7,9	55,6
100	31,8	19,1	19,1	30,2	4,0	9,5	86,8
120	38,1	25,4	22,2	36,2	4,8	11,1	124,6

Fonte: (ANSI B29.1, 2011).

Através dos valores calculados anteriormente, é possível dimensionar o eixo (4), utilizando a teoria da energia de distorção para materiais dúcteis.

O material do eixo é em aço padrão SAE1045 repuxado a frio cuja tensão de escoamento é de 530 MPa e a tensão de ruptura 630 MPa . A Figura 58 apresenta as cargas atuantes no eixo (4), o diâmetro das rodas e as cotas principais, para o cálculo do diâmetro mínimo do eixo (4).

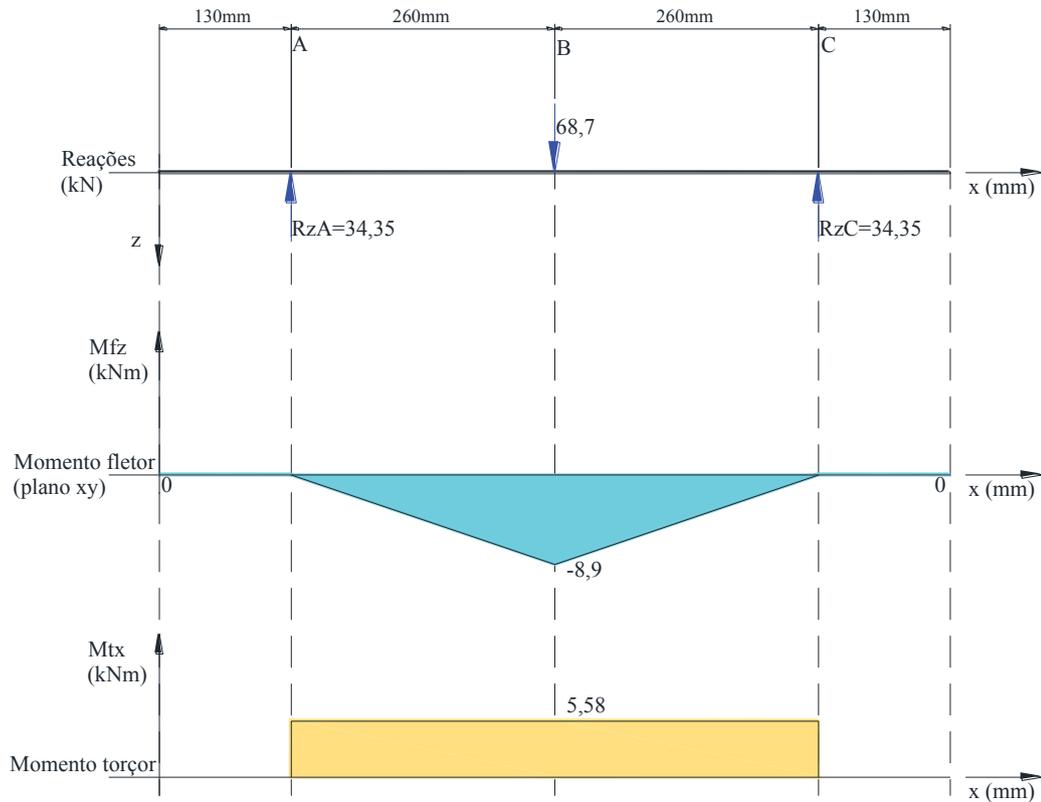
Figura 58 - Esquema das cargas atuantes no eixo (4).



Fonte: Autor.

Na Figura 59 são apresentados os diagramas dos esforços atuantes no eixo (4), onde as reações nos apoios A e C são de $34,35 \text{ kN}$, devido à carga de $68,7 \text{ kN}$ ser centralizada. A seção crítica do eixo é a situada na posição B, pois apresenta o maior momento fletor, ou seja, $-8,9 \text{ kNm}$. O momento torçor calculado, de acordo com a carga no eixo, e do raio da roda dentada, é de $5,58 \text{ kNm}$.

Figura 59 - Diagramas dos esforços no eixo (4).



Fonte: Autor.

Conforme a teoria da energia de distorção ou teoria de Von Mises, o diâmetro mínimo do eixo (4), para resistir aos esforços, pode ser calculada de acordo com a Equação (3.14).

Onde:

d é o diâmetro mínimo do eixo (4) em mm ;

M^z é o máximo momento fletor em $kN.m$;

T é o momento torçor em $kN.m$.

$$d = \left[\frac{16n}{\pi S_y} (4(M^z)^2 + 3T^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.14)$$

$$d = \left[\frac{16}{\pi \times 530 \text{MPa}} (4 \times (8,9 \text{kNm})^2 + 3 \times (5,58 \text{kNm})^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

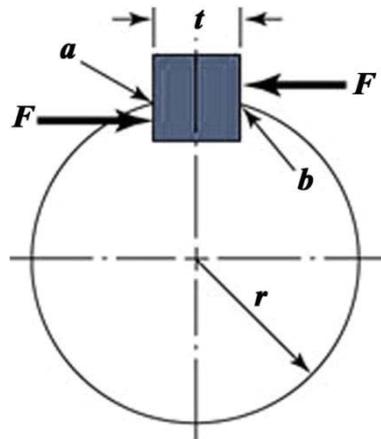
$$d = \left[0,0096 \frac{\text{mm}^2}{\text{N}} (20,25 \times 10^6 \text{Nmm}) \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 57,9 \text{ mm}$$

Portanto, o diâmetro mínimo do eixo (4) para resistir aos esforços é de $57,9 \text{ mm}$, como esta não é uma dimensão padrão de mercado, utiliza-se o diâmetro de 75 mm .

Na sequência, segue o dimensionamento das chavetas da roda (3) e da roda dentada acoplada no eixo (4), as quais são utilizadas para habilitar a transmissão de torque do eixo para a roda. A Figura 60 ilustra os esforços atuantes na chaveta.

Figura 60 - Esforços atuantes na chaveta.



Fonte: (SHIGLEY, Mischke, & BUDYNAS, 2005),

A Equação (3.15) apresenta a força F que ocorre na superfície do eixo, T é o momento torçor calculado anteriormente e r é o raio do eixo (4) conforme Equação (3.14), onde o valor do diâmetro do eixo é arredondado para cima, devido ao padrão comercial.

$$F = \frac{T}{r_{\text{eixo4}}} \quad (3.15)$$

$$F = \frac{5,58 \times 10^3 \text{ kNmm}}{\frac{75}{2} \text{ mm}} = 148,8 \text{ kN}$$

Pela teoria da energia de distorção, a resistência ao cisalhamento é conforme a Equação (3.16), segundo Shigley et al. (2005). A norma das chavetas utilizada é a norma DIN6885, onde para eixo com diâmetro de 75 mm prevê a seção da chaveta com largura de 20 mm e altura de 12 mm . O material da chaveta é o SAE 1045 laminado a quente, o qual possui a tensão de escoamento de 310 MPa .

Onde:

S_{sy} é a tensão de resistência ao cisalhamento em N/mm^2 ;

S_y é a tensão de escoamento do material em N/mm^2 .

$$S_{sy} = 0,577S_y \quad (3.16)$$

$$S_{sy} = 0,577 \times 310 \text{ MPa} = 178,9 \text{ MPa}$$

O comprimento da chaveta l é obtido através da Equação (3.17), a qual é utilizada para o cálculo da falha por cisalhamento através da área a, b , ilustrada na Figura 60. O coeficiente de segurança n é igual a 1 .

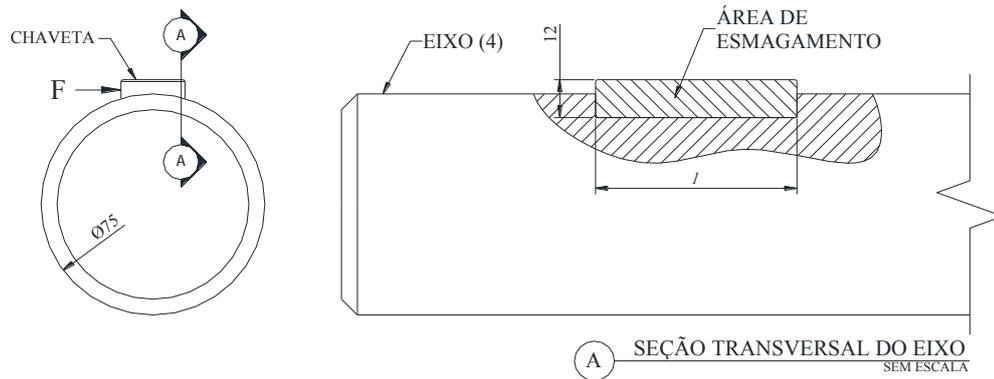
$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{tl} \quad (3.17)$$

$$178,9 \frac{N}{mm^2} = \frac{148,8 \times 10^3 N}{20 \text{ mm} \times l}$$

$$l = 41,6 \text{ mm}$$

Para resistir ao esmagamento é utilizada a Equação (3.18), onde a área de uma metade da face da chaveta é usada, conforme mostrado na Figura 61. O coeficiente de segurança n utilizado é 1 .

Figura 61 - Área de esmagamento da chaveta.



Fonte: Autor.

$$\frac{S_y}{n} = \frac{F}{\frac{t}{2} \times l} \quad (3.18)$$

$$310 \frac{N}{mm^2} = \frac{148,8 \times 10^3 N}{20mm \times l/2}$$

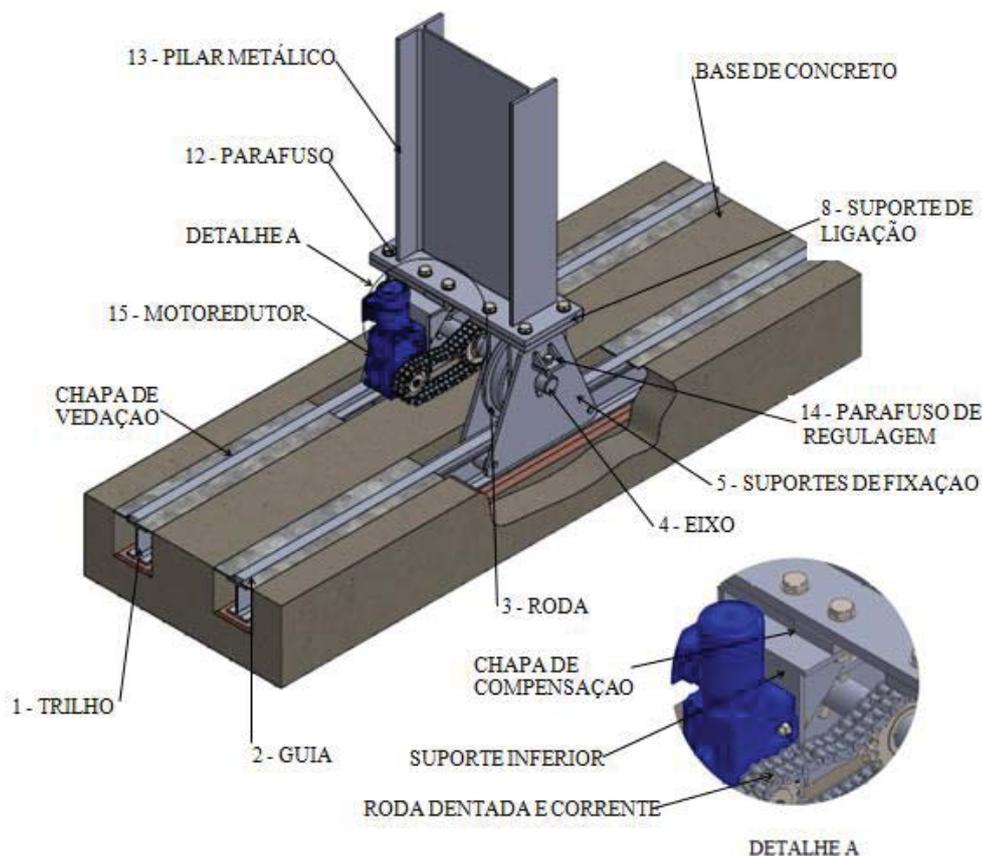
$$l = 48 \text{ mm}$$

Portanto, o comprimento mínimo da chaveta, que faz o acoplamento das rodas (3) e da roda dentada com o eixo (4), para poder transmitir o torque é de 48 mm.

A seguir na Figura 62, é apresentada a ligação parafusada do pilar metálico (13) no suporte de ligação (8), através dos parafusos (12) e também a fixação do motorreductor (15), no pilar metálico (13) por meio do suporte inferior e da chapa de compensação. Na fixação do suporte inferior são utilizados parafusos na ligação do pilar metálico no suporte de ligação, devido ao pouco espaço.

Desta maneira o dimensionamento do sistema mecânico de acionamento para a movimentação linear e fixação do galpão metálico está concluído.

Figura 62 - Vista isométrica do sistema de movimentação e fixação.



Fonte: Autor.

A fim de validar estruturalmente o sistema, é realizada a análise em elementos finitos do conjunto do sistema de movimentação e fixação do galpão metálico, que segue.

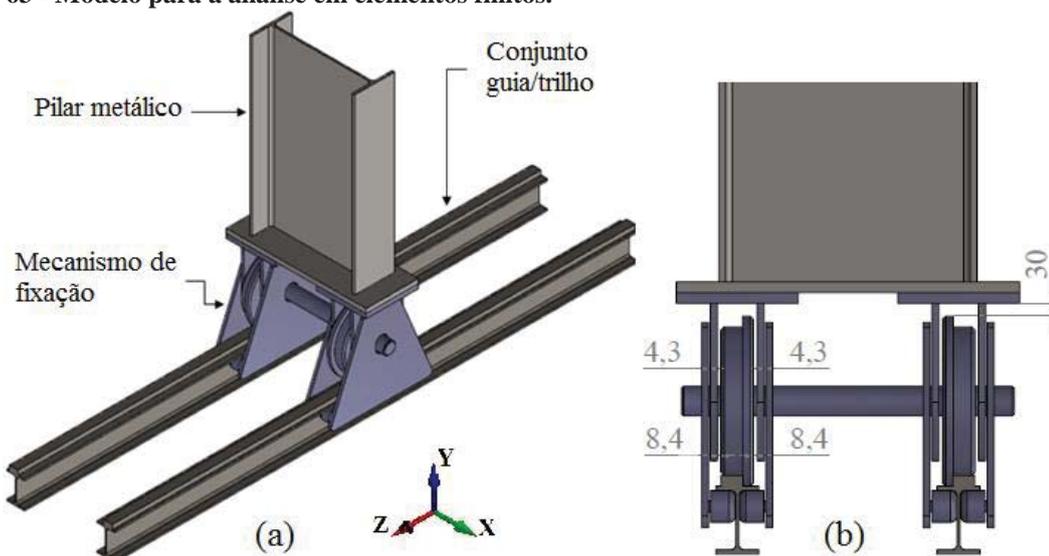
3.3.4 Análise estrutural do conjunto

Para realizar a análise estrutural do conjunto montado, utilizou-se o *software* de elementos finitos Ls-Dyna em uma análise plástica, para simular uma condição extrema no mancal, através da prescrição de deslocamento de rotação e/ou de translação, provocado pela ação do vento, com o colapso total do mecanismo de fixação/translação do galpão metálico, por meio da plastificação das chapas que constituem o mecanismo. O objetivo é determinar a carga de colapso plástico do mecanismo de fixação/translação do galpão metálico e compará-la com as ações (Figura 47), originada pelos carregamentos atuantes na base do galpão. Desta forma, determina-se a segurança da estrutura referente à falha por colapso por sobrecarga do mecanismo.

Neste trabalho não estão sendo medidas as tensões e deformações nos componentes estruturais do mecanismo de fixação projetado, realizou-se uma verificação das cargas de colapso global da estrutura por grandes rotações e/ou deslocamentos horizontais e verticais, comparando com os dados obtidos das reações de apoios, durante a análise estrutural do pórtico.

Primeiramente para realizar a análise, desenvolveu-se o modelamento 3D no *software* Solidworks, onde foi possível gerar o modelo de maneira confiável, eliminando possíveis falhas de compatibilização entre as peças que compõe o conjunto, mantendo a folga entre os componentes (Figura 63 (b)), a qual é prevista para facilitar o manuseio, também é mantida somente às peças que possuem função estrutural (Figura 63 (a)).

Figura 63 - Modelo para a análise em elementos finitos.



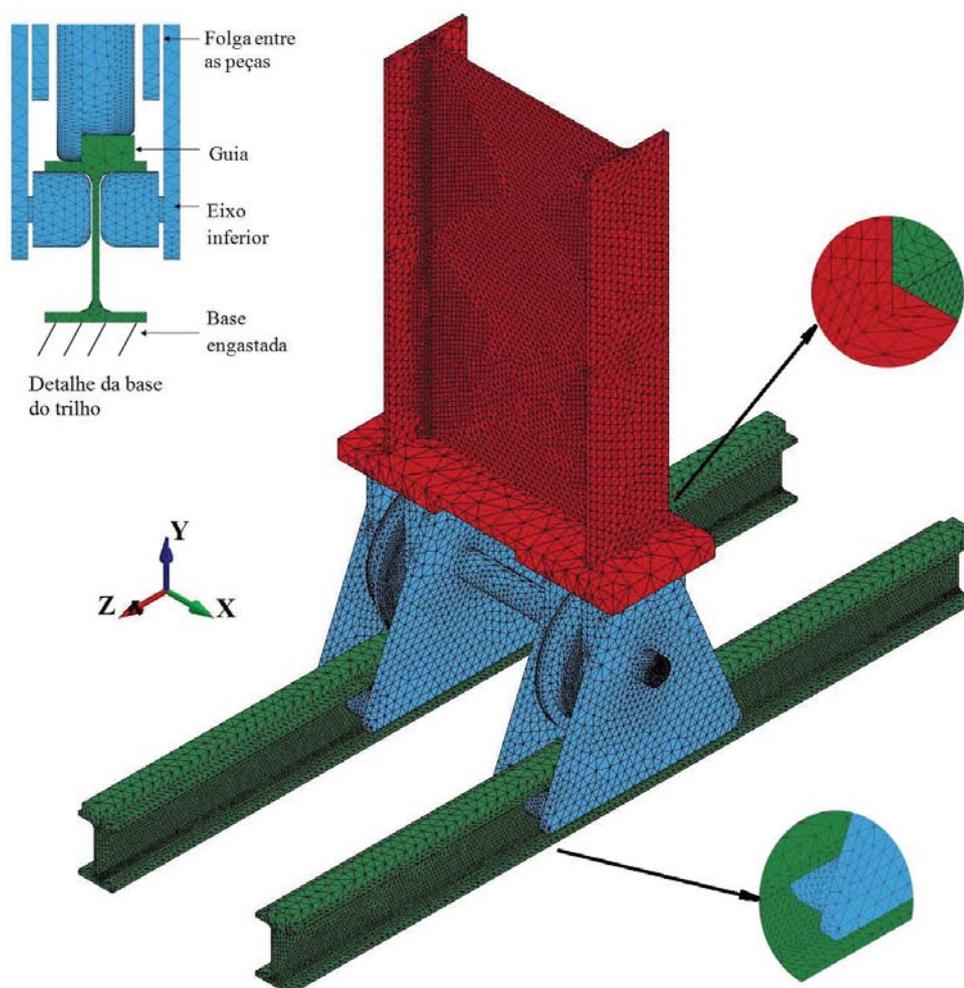
Fonte: Autor.

O modelo 3D é então importado para o *software* Ansys/Ls-Dyna, sendo como passo inicial da análise, a definição do tipo de elemento a ser utilizado. Optou-se pelo elemento `section_solid_3` da biblioteca de elementos finitos do Ls-Dyna (2003), o qual é um elemento de oito nós quadrático de integração cheia e com rotações nodais, pois apresenta resultados melhores se comparado com o elemento linear (Figura 29). Para realizar o refino da malha seguiu-se o modo de refino automático do Ansys/Ls-Dyna, sendo o tamanho da malha 1, considerado pelo *software* como malha fina. Como o que está sendo medido são as forças e momentos de reação, os quais são obtidos à partir do corpo rígido (viga I vertical), o refino da malha não precise ser levado em consideração, uma vez que não influencia nos resultados obtidos, ou seja, poderia se utilizar malhas grosseiras que o resultado seria o mesmo.

O tamanho do elemento varia em função das dimensões das diferentes peças do modelo sólido, totalizando 354223 elementos e 90402 nós. Como se utiliza um elemento de segundo grau, o refino da malha como fina, entende-se que o refino de malha está adequado ao que se propõe na análise.

A Figura 64 apresenta a discretização da malha utilizada, onde é possível visualizar os diferentes tamanhos dos elementos e o detalhe da base engastada do trilho.

Figura 64 - Discretização da malha.

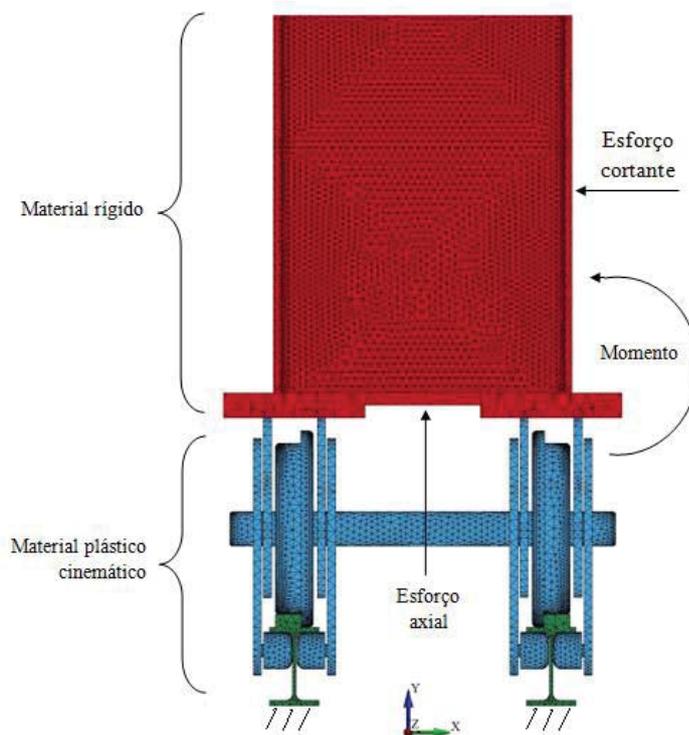


Fonte: Autor.

As propriedades dos materiais utilizados na simulação são do aço ASTM A572 GR50, com tensão de escoamento 345 MPa, tensão de ruptura 450 MPa, módulo de elasticidade E de 205 GPa, módulo tangente E_t de 2050 MPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e densidade de 7850 kg/m^3 .

Para simular a condição extrema em que o mecanismo de fixação e movimentação está sendo solicitado, foram prescritos rotações e deslocamentos como condições de contorno, utilizando o comando `*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_LOCAL` do *software* Ls-Dyna. Foram prescritos rotação em torno do eixo Z para simular o momento, translação em torno do eixo X com rotação em torno no eixo Z para simular o esforço cortante e translação na direção positiva de Y para simular o esforço axial. O conjunto sistema de fixação e movimentação e o pilar metálico são divididos em duas partes, a fim de simular o comportamento real em que o sistema estará sendo submetido, conforme mostrado na Figura 65, sendo o pilar metálico definido como material rígido e para os trilhos e o mecanismo de fixação e movimentação à definição de material plástico cinemático.

Figura 65- Definição dos materiais e sentido das cargas atuantes.



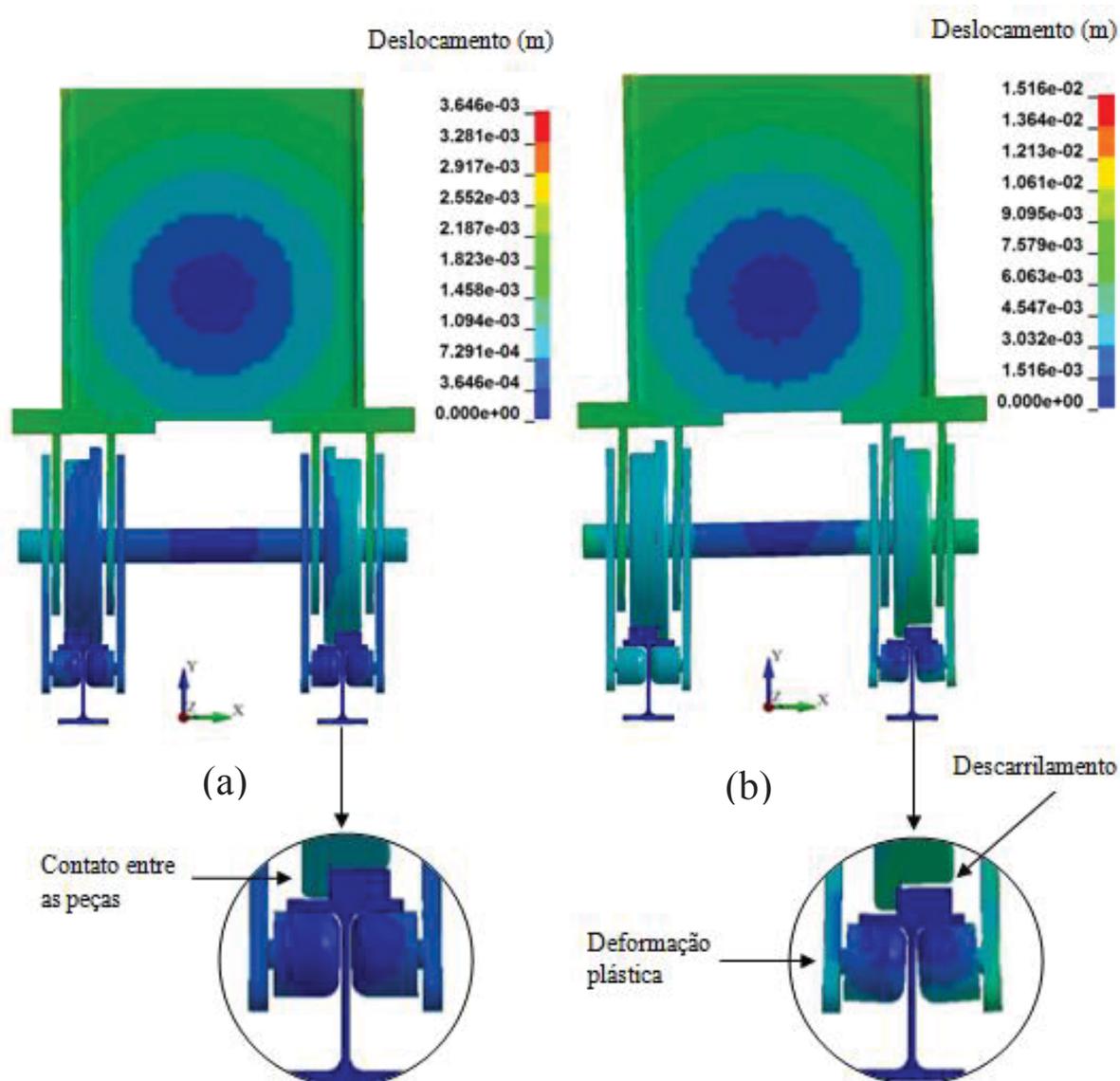
Fonte: Autor.

Realizam-se quatro tipos de análises numéricas a fim de verificar estruturalmente o conjunto de fixação do galpão metálico, sendo a primeira análise considerando somente o momento, a segunda análise utilizando somente o esforço cortante, na terceira análise considerando apenas o esforço axial e a quarta análise agrupando o momento e os esforços cortante e axial, que podem atuar simultaneamente na estrutura. Obtiveram-se como resultados os valores de momento e forças ao longo do tempo e de rotações e deslocamentos

ao longo do tempo. Com estes dados foram obtidos os valores de momento e forças versus rotações e deslocamentos.

Na primeira análise é utilizada somente a prescrição de rotação em torno do eixo Z, para simular a ação do momento, conforme ilustrado na Figura 65. A Figura 66 ilustra a deformação da estrutura diante desta prescrição e o nível escalonado do deslocamento resultante, que a estrutura suporta antes de entrar em colapso. Na Figura 66 (a) mostra que o contato entre a roda/trilho manteve-se para o momento de 2.670 kN.m e na Figura 66 (b) tem-se a deformação plástica do eixo inferior e o início do descarrilamento para o momento de 3.021 kN.m .

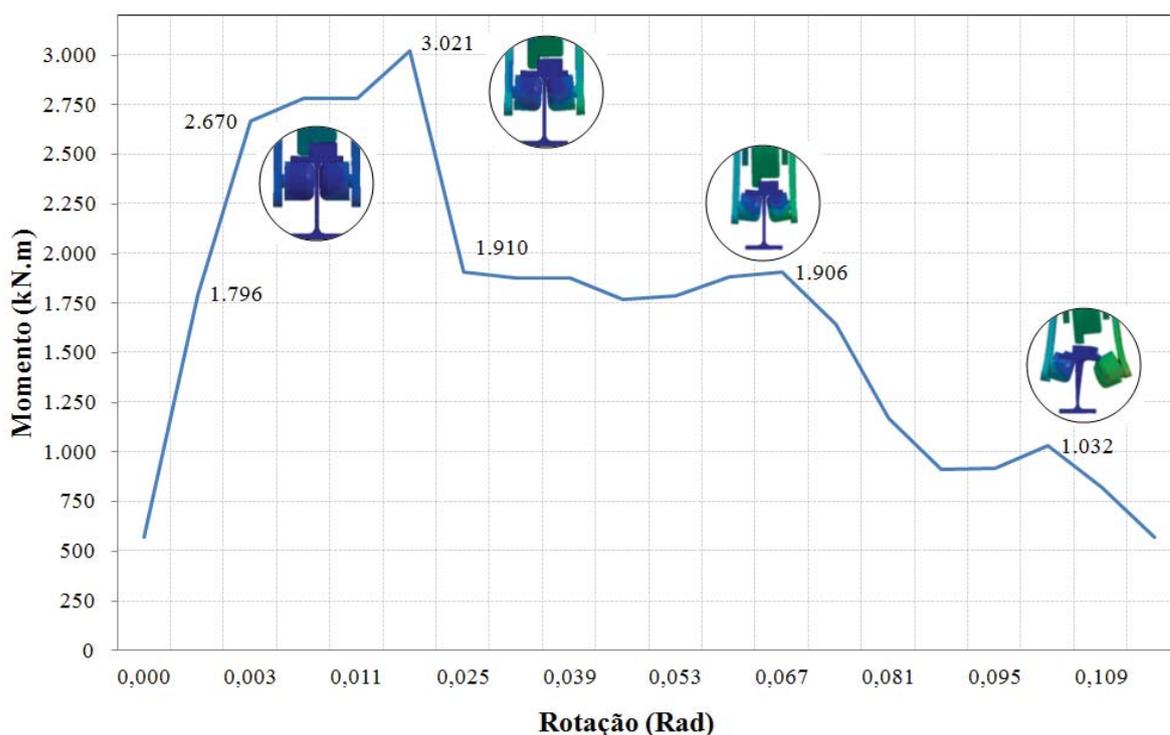
Figura 66 - Sequência de deformação considerando a prescrição de rotação.



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 67 apresenta o momento/rotação, referente à simulação de prescrição por rotação, onde é possível observar que a estrutura apresentou uma deformação linear até atingir o momento de 2.670 kN.m com rotação de $0,003 \text{ rad}$ (Figura 66 (a)). No intervalo de momento de 2.670 kN.m e 3.021 kN.m (Figura 66 (b)), ocorreu a deformação não linear da estrutura devido ao aumento do contato entre as peças (Figura 68), após este ponto a estrutura entra em colapso.

Figura 67 - Gráfico do momento x rotação.

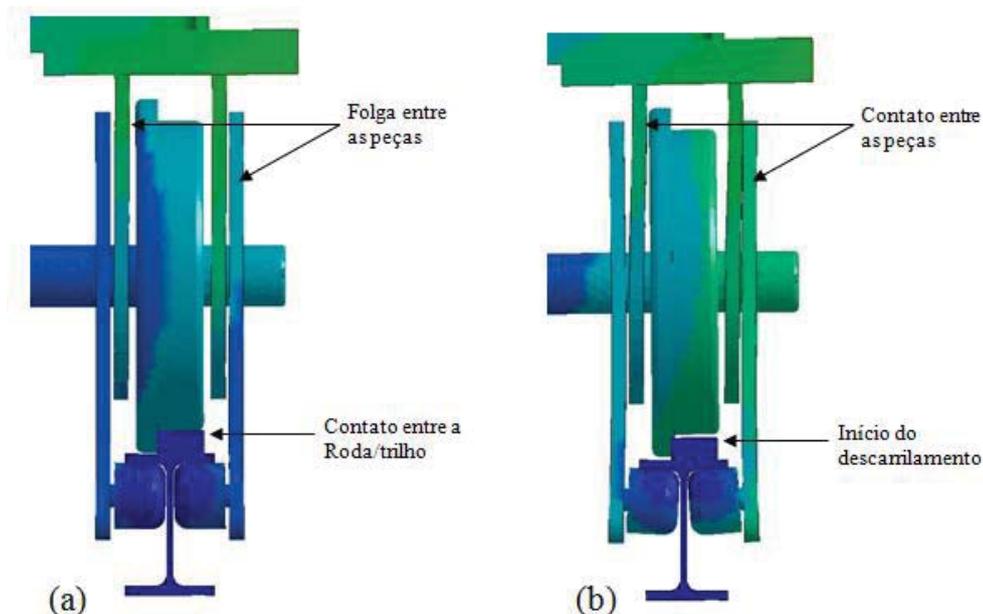


Fonte: Autor.

A Figura 68 apresenta uma seção do mecanismo de fixação, para realizar o comparativo da deformação da estrutura, durante a deformação não linear, sendo na

Figura 68 (a) ilustrada à deformação da estrutura para o carregamento de 2.670 kN.m , onde é possível verificar que a folga entre as peças, prevista durante o modelamento 3D, manteve-se. A Figura 68 (b) mostra à deformação da estrutura para o carregamento de 3.021 kN.m , sendo que para este carregamento, ocorre o contato entre as peças e o início do descarrilamento.

Figura 68 - (a) Folga entre as peças e (b) Contato entre as peças.



Fonte: Autor.

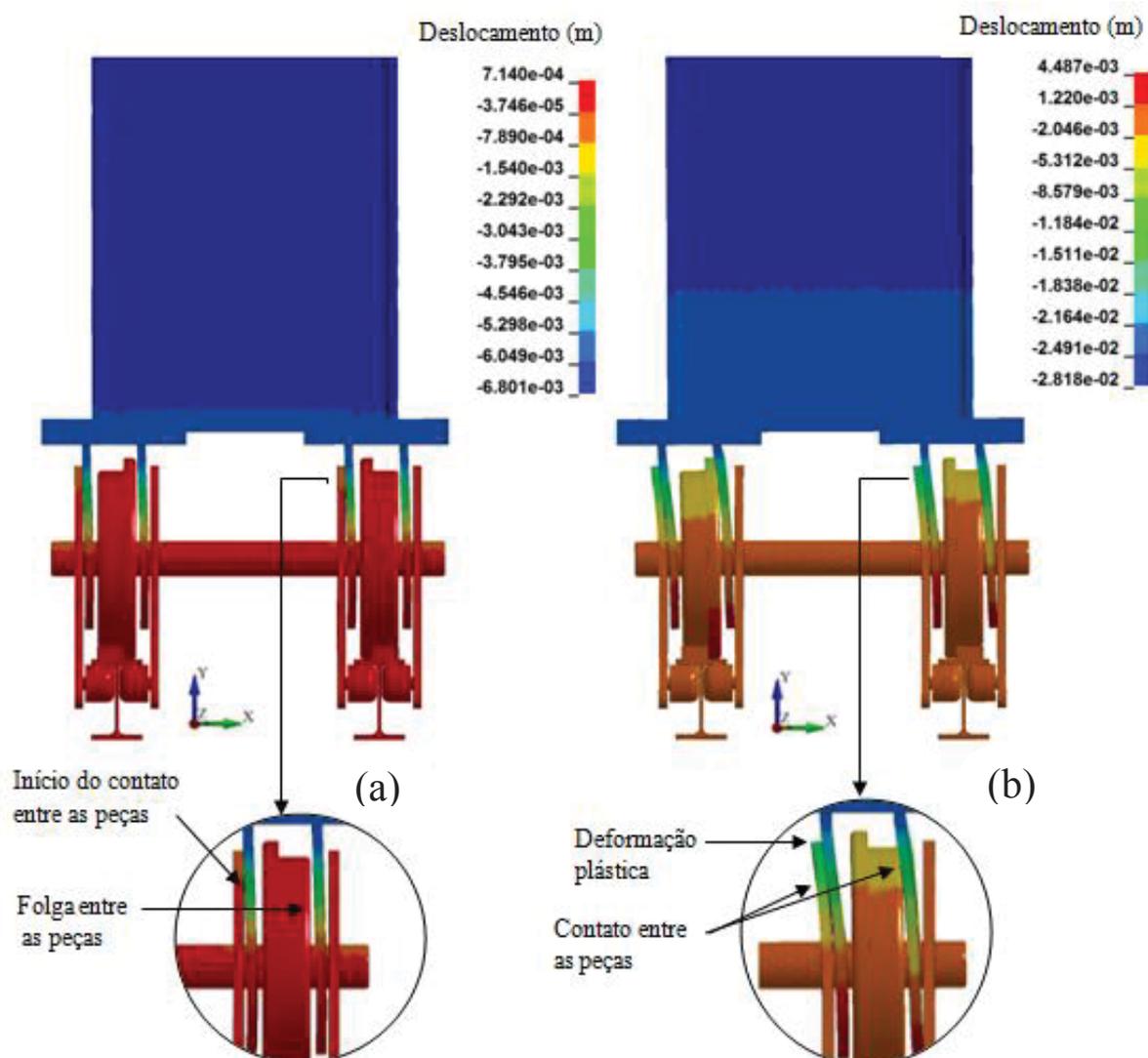
Para o cálculo da segurança da estrutura considerando somente o momento, é utilizado os dados da Tabela 14 cujo maior momento atuante na estrutura é de $789,7 \text{ kN.m}$ e o momento de carregamento de 2.670 kN.m , utilizou-se este carregamento, por ser o ponto máximo de deformação linear da estrutura. Por meio da Equação (2.1) é possível verificar a condição de segurança da estrutura, onde:

$$2.670 \text{ kNm} \geq 789,7 \text{ kNm}$$

Através desta avaliação, a estrutura projetada atende aos requisitos de segurança previstos em norma, para a situação de aplicação de somente o momento na estrutura de fixação.

Na segunda análise é utilizada somente a prescrição de translação da estrutura no sentido do eixo X, para simular o esforço cortante atuante na estrutura, conforme ilustrado na Figura 65. A Figura 69 (a) ilustra o deslocamento da estrutura decorrente da prescrição da translação, onde se inicia o contato entre as peças e a folga entre as peças previstas durante o modelamento 3D é diminuída, também apresenta através da variação de cores, o deslocamento da estrutura ao longo do eixo X. Na Figura 69 (b) devido à continuação da prescrição de translação, ocorre o aumento do contato entre as peças e à deformação plástica do suporte de ligação.

Figura 69 - Sequência de deformação considerando o esforço cortante.

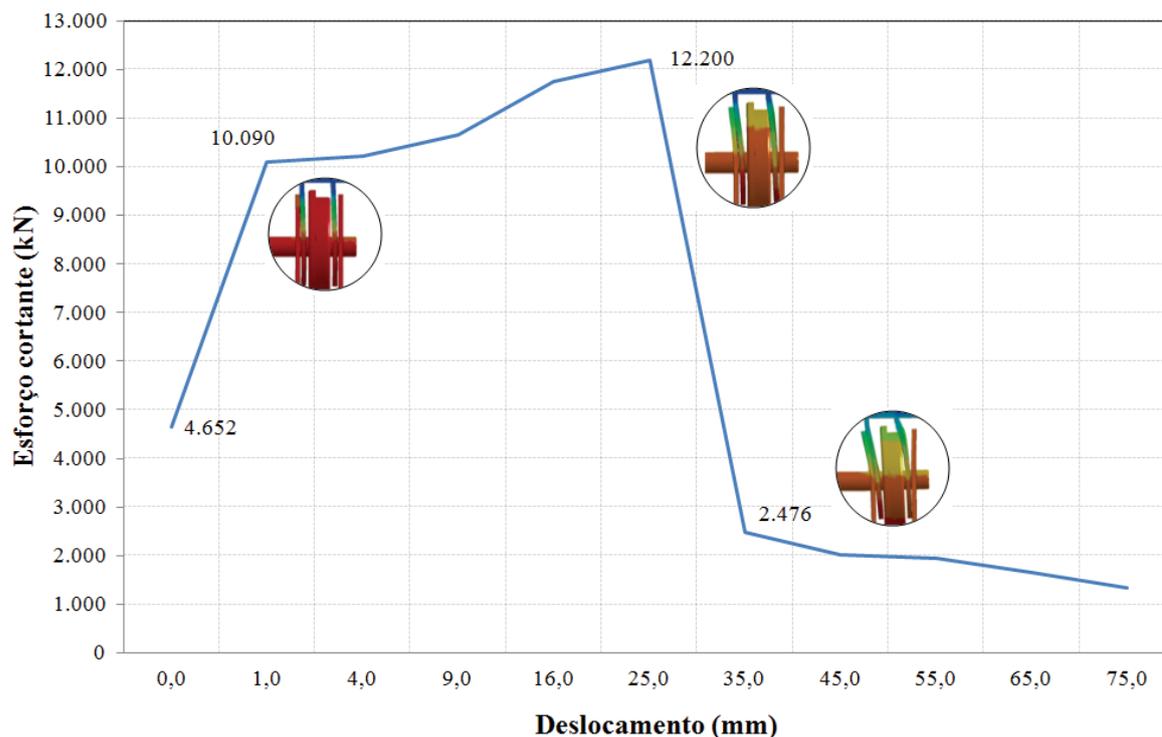


Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 70 mostra o resultado do esforço cortante, ou seja, força no sentido do eixo X, em função do deslocamento, onde é possível verificar que a estrutura apresenta um comportamento linear de deformação durante o intervalo de carregamento de 4.652 kN e 10.090 kN com o deslocamento de $1,0\text{ mm}$.

Para o intervalo de carregamento de 10.090 kN (Figura 69 (a)) à 12.200 kN (Figura 69 (b)) a estrutura apresentou deformação não linear, devido ao aumento do contato entre as peças e à deformação plástica que o suporte de ligação e o suporte de fixação sofreram. Após este intervalo de carregamento não linear a estrutura entra em colapso.

Figura 70 - Gráfico do esforço cortante x deslocamento.



Fonte: Autor.

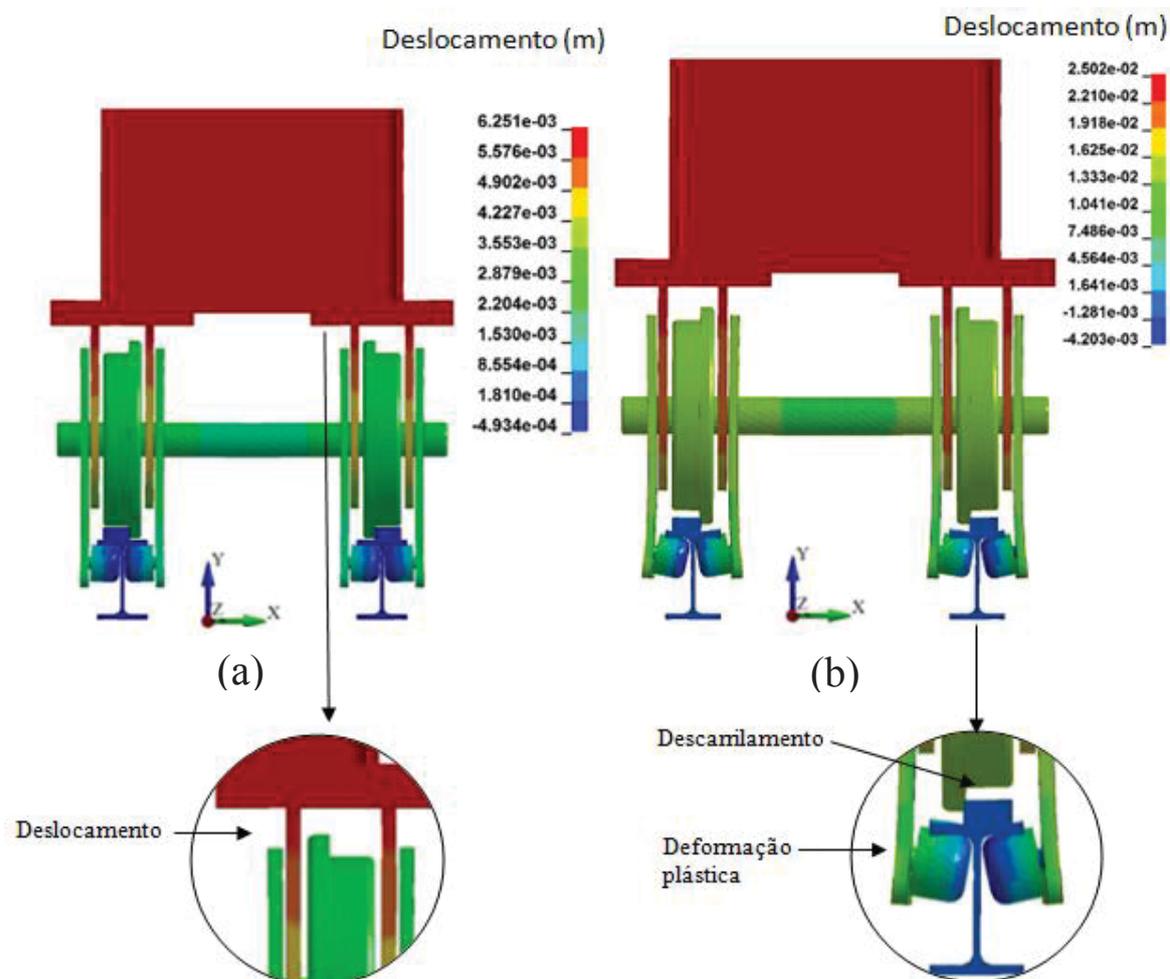
No cálculo da segurança da estrutura considerando somente a força no sentido do eixo X, é utilizada os dados da Tabela 14 cujo maior esforço atuante na estrutura é de $181,5 \text{ kN}$ na base do eixo A (Figura 47). Por meio da Equação (2.1) é verificada à condição de segurança da estrutura, onde:

$$10.090 \text{ kN} \geq 181,5 \text{ kN}$$

Através desta avaliação, a estrutura projetada atende aos requisitos de segurança previstos em norma, para a situação de aplicação da força no sentido do eixo X.

Na terceira análise é utilizada a prescrição de translação no sentido do eixo Y, para simular a atuação do esforço axial, conforme ilustrado na Figura 65. A Figura 71 (a) ilustra o deslocamento do suporte de ligação, o qual interliga o pilar metálico ao eixo, em aproximadamente $6,2 \text{ mm}$, este deslocamento ocorreu decorrente da folga entre as peças, previstas durante o modelamento. A Figura 71 (b) apresenta a continuidade da prescrição de translação no eixo Y, onde ocorre à deformação plástica do eixo inferior e a falta de contato entre o trilho e a roda.

Figura 71 - Sequência de deformação considerando o esforço axial.

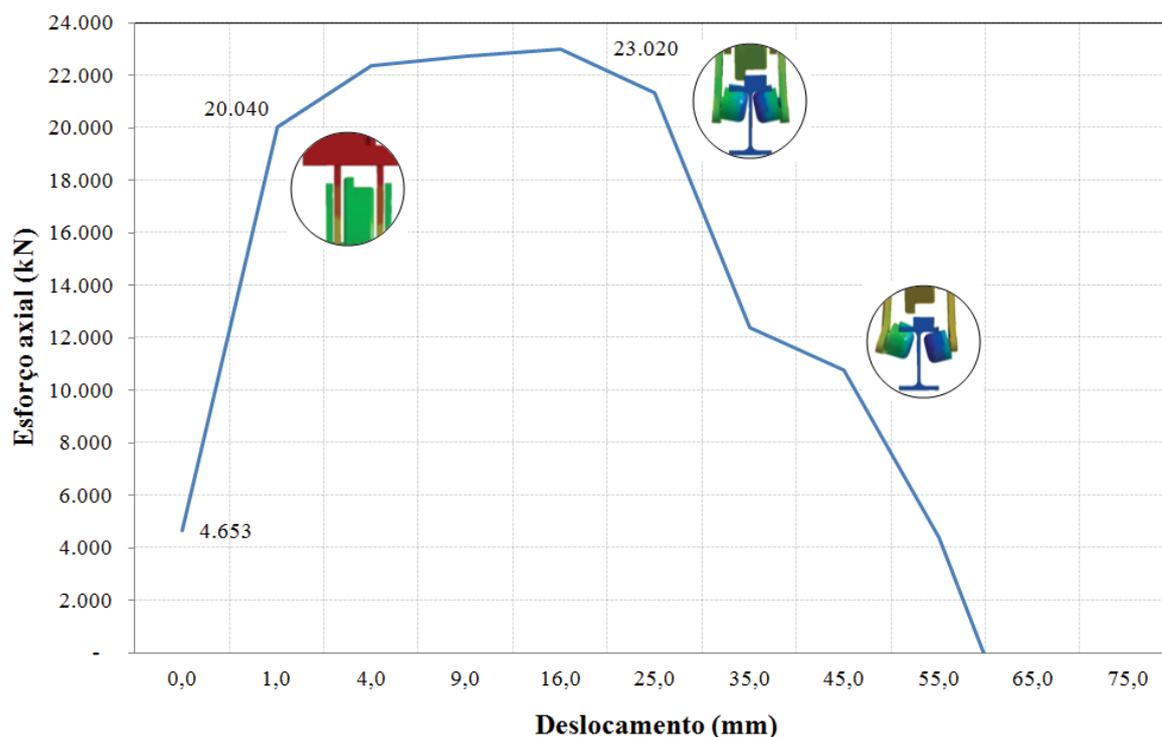


Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 72 ilustra o comportamento da estrutura diante da prescrição de deslocamento ao longo do eixo Y, pelo esforço axial. Conforme apresentado no gráfico, a estrutura obteve um comportamento linear de deformação até atingir o carregamento de 20.040 kN .

No intervalo de carregamento de 20.040 kN (Figura 71 (a)) à $23,020 \text{ kN}$ (Figura 71 (b)), a estrutura obteve deformação não linear devido a deformação plástica dos eixos inferiores e ocorre a falta de contato entre o trilho e roda. Após este intervalo de carregamento a estrutura entra em colapso.

Figura 72 - Gráfico do esforço axial x deslocamento.



Fonte: Autor.

No cálculo da segurança da estrutura considerando somente a força no sentido do eixo Y, e utilizando os dados da Tabela 14 cujo maior esforço atuante na estrutura é de $139,4 \text{ kN}$ na base do eixo A (Figura 47). Por meio da Equação (2.1) é verificada a condição de segurança da estrutura, onde:

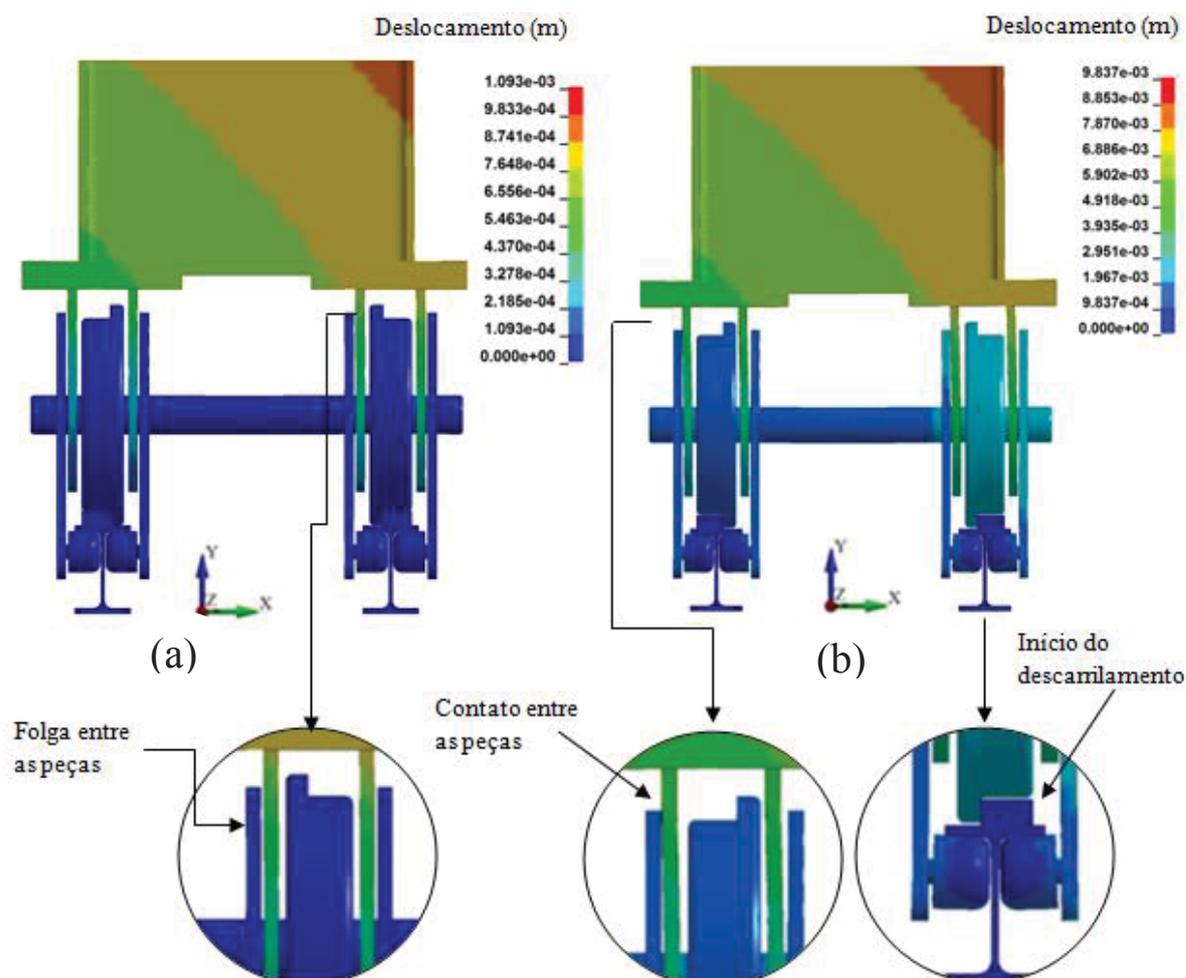
$$20.040 \text{ kN} \geq 139,4 \text{ kN}$$

Por meio desta avaliação, a estrutura projetada atende aos requisitos de segurança previstas em norma, para a situação de aplicação da força no sentido do eixo Y.

Na quarta análise é realizada a simulação considerando a prescrição de rotação em torno do eixo Z, translação nos eixos X e Y, atuando simultaneamente na estrutura, conforme ilustrado na Figura 65.

A Figura 73 apresenta a deformação da estrutura diante desta prescrição e o nível escalonado do deslocamento. A Figura 73 (a) ilustra a folga entre peças, previstas durante o modelamento da estrutura e na Figura 73 (b) mostra o início do descarrilamento entre a roda/trilho e o contato entre o suporte de ligação e o suporte de fixação, decorrente da continuidade do carregamento na estrutura.

Figura 73 - Sequência de deformação considerando o momento, esforços cortante e axial.

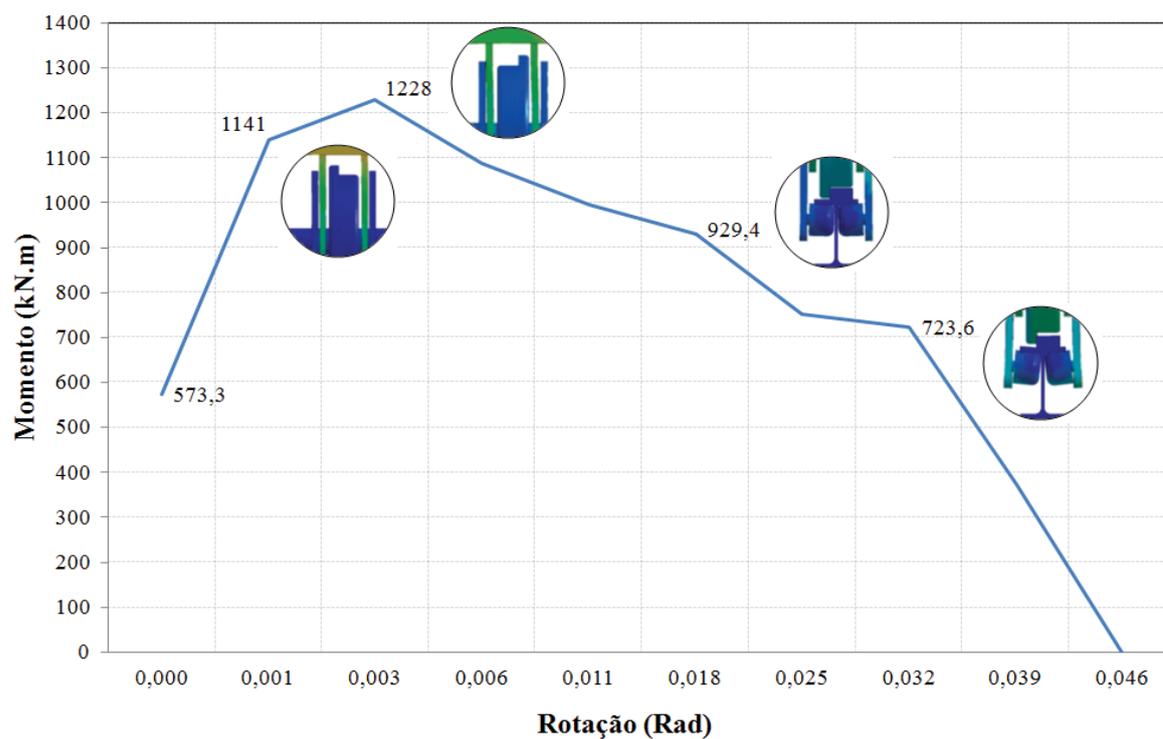


Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 74 mostra o resultado do carregamento do momento e dos esforços cortante e axial em função da rotação, onde é possível verificar que a estrutura apresenta um comportamento linear de deformação até atingir o momento de 1.141 kN.m , com a rotação de $0,001 \text{ rad}$.

Para o intervalo de carregamento de 1.141 kN.m (Figura 73 (a)) e 1.228 kN.m (Figura 73 (b)), a estrutura obteve uma deformação não linear antes de entrar em colapso.

Figura 74 - Gráfico do momento x rotação.

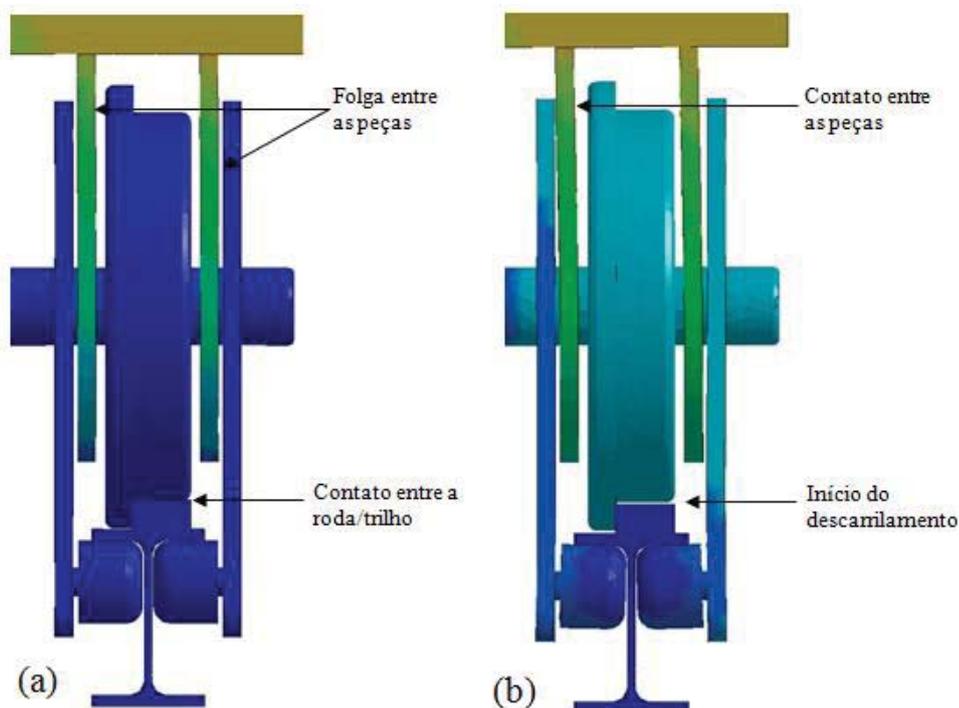


Fonte: Autor.

A Figura 75 apresenta uma seção do mecanismo de fixação, para realizar o comparativo da deformação da estrutura, durante a deformação não linear, sendo na Figura 75 (a) ilustrada a deformação da estrutura para o carregamento de 1.141 kN.m , onde é possível verificar que a folga entre as peças, prevista durante o modelamento 3D, manteve-se.

Na Figura 75 (b) mostra a deformação da estrutura para o carregamento de 1.228 kN.m , sendo que, para este carregamento, ocorre o contato entre as peças e o início do descarrilamento.

Figura 75 - Deslocamento não linear, (a) Folga entre as peças e (b) Contato entre as peças.



Fonte: Autor.

No cálculo da segurança da estrutura é considerada a atuação simultânea da prescrição de rotação em torno do eixo X e da translação nos eixos Y e Z, e utilizando os dados da Tabela 14 cujo maior momento atuante na estrutura é de $789,7 \text{ kN.m}$ na base do eixo A (Figura 47). Por meio da Equação (2.1) é verificada a condição de segurança da estrutura, onde:

$$1.141 \text{ kN} \geq 789,7 \text{ kNm}$$

Por meio desta avaliação, a estrutura projetada atende aos requisitos de segurança previstos em norma, para a situação de aplicação simultânea dos esforços na estrutura.

Através da análise em elementos finitos, o sistema de fixação atende aos requisitos de segurança, na situação de carregamento conforme Tabela 14.

3.3.5 Avaliação do anteprojeto

De acordo Pahl et al. (2013) uma avaliação do anteprojeto deve ser realizada. O significado não é selecionar, porém julgar o atual projeto, de acordo com os critérios

concretos relacionados aos requisitos, com o objetivo de identificar e corrigir eventuais pontos fracos.

Os critérios de avaliação e os parâmetros são os mesmos adotados na avaliação do anteprojeto durante a análise das variantes da concepção, porém neste caso é realizada a análise entre a variante de solução adotada V1 e o projeto concebido conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Avaliação do anteprojeto.

N	Critérios de avaliação		Parâmetros		Variante V1			Projeto concebido		
		fator		Unid.	Propriedades ei1	Valor wi1	Valor ponderado wg1	Propriedades ei2	Valor wi2	Valor ponderado wg2
1	Alta confiabilidade eletromecânica	0,15	Segurança esperada	-	elevado	3	0,45	bem elevado	4	0,6
2	Pouca possibilidade de erros operacionais	0,15	Possibilidade de erros operacionais	-	médio	2	0,3	médio	2	0,3
3	Custo do acionamento	0,2	Valor financeiro	-	baixo	3	0,6	médio	2	0,4
4	Baixa complexidade dos componentes	0,12	Simple processo de fabricação	-	baixo	3	0,36	baixo	3	0,36
5	Muitas peças padronizadas	0,03	Peças padronizados	-	bem elevado	4	0,12	elevado	3	0,09
6	Montagem simples	0,1	Simplicidade de montagem	-	simples	3	0,3	simples	3	0,3
7	Manutenção simples	0,075	Simplicidade na manutenção	-	médio	2	0,15	médio	2	0,15
8	Manuseio simples	0,175	Simplicidade no manuseio	-	simples	3	0,525	simples	3	0,525
$\Sigma g1 = 1$						23	2,81		22	2,73
						Gw1	Gwg1		Gw2	Gwg2

Fonte: Autor.

Analisando o resultado dos valores ponderados e dos valores não ponderado, observa-se que o projeto concebido está com os valores um pouco abaixo em relação à variante de solução V1. Esta diferença é devido aos seguintes critérios:

Item 1 - alta confiabilidade eletromecânica: através do cálculo do eixo (4) e das rodas inferiores do suporte de ligação (5), observou-se a necessidade de substituir o material do aço de ASTM A588 para SAE1045 repuxado a frio a fim de aumentar o coeficiente de segurança;

Item 3 - custo do acionamento: acréscimo no valor financeiro devido à utilização de cabos elétricos para interligar os dois motorreductores, pois devem ser acionados

simultaneamente e dos componentes de segurança tipo botoeira, relés, contactores, disjuntores, fusíveis, ou seja, a caixa de comando.

Item 5 - muitas peças padronizadas: aumento no número de componentes, tipo as arruelas (7), a fim de reduzir o atrito entre as peças, chapas de compensação e suporte inferior para receber o motorreductor.

Os demais itens relacionados na coluna de critérios de avaliação da Tabela 16 não tiveram alteração. Portanto, o projeto concebido atende satisfatoriamente os requisitos do projeto e também apresentou melhorias, referente à segurança estrutural e de acionamento.

3.4 Projeto detalhado

Conforme Pahl et al. (2013), a fase de detalhamento é a parte do projeto que complementa a estrutura de construção de um produto técnico por meio de prescrições definitivas sobre a forma, dimensionamento e acabamento superficial de todas as peças, definição de todos os materiais, verificação das possibilidades de produção. É realizada a configuração do produto com a definição definitiva da microgeometria. Portanto, são determinadas em detalhes as operações de fabricação.

Para atender a lista de requisitos do projeto, referente à fabricação e a montagem, buscou-se simplificar de forma eficaz o projeto, padronizando peças e materiais, projetando para facilitar a fabricação e a montagem. O projeto do sistema de movimentação e fixação apresenta:

Na simplificação do projeto, buscou-se uma geometria simples, tipo o suporte de ligação (8), o suporte de fixação (5), o suporte do motorreductor, o eixo (4) e a roda (3).

Na padronização das peças e dos materiais, apresentam os seguintes itens: o suporte de fixação interno e externo (5), as rodas direita e esquerda (3), o suporte de ligação (8) e as fixações, porém o eixo (4) e o eixo das rodas inferiores utilizam material diferente das demais peças, devido a necessidade do cálculo.

Projetando para facilitar a fabricação, o projeto elaborado utiliza máquinas convencionais na fabricação das peças, cantos arredondados foram utilizados sempre que possível a fim de evitar concentradores de tensão.

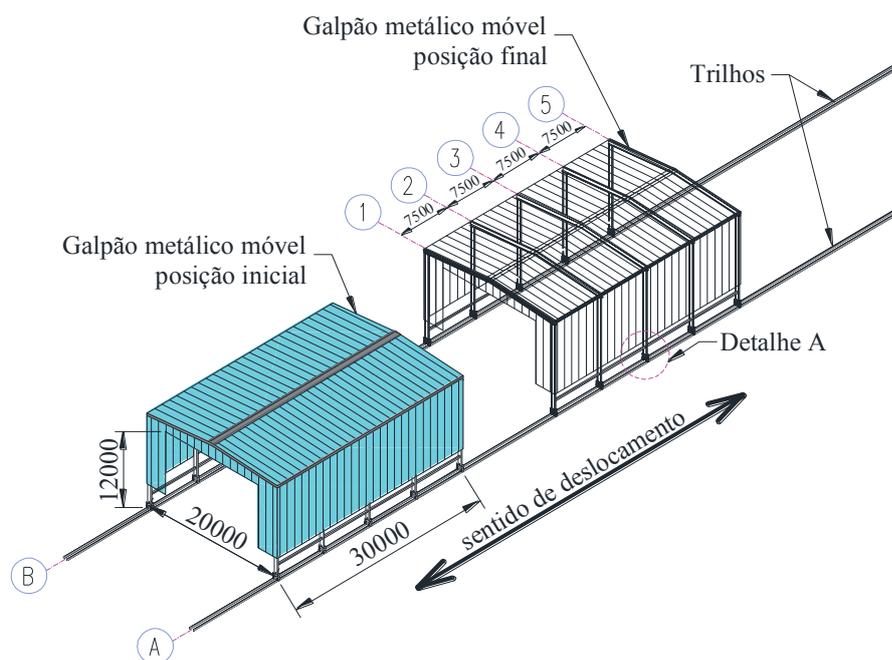
Na facilidade da montagem, o projeto desenvolvido é simples para a montagem e a manutenção, porém exige mão de obra treinada, a fim de evitar erros que possam comprometer estruturalmente o sistema de movimentação e fixação e a segurança das pessoas, tais como o alinhamento do trilho (1) e da guia (2), centralização da transmissão no eixo (4) e a regulagem do suporte de fixação (5).

Na análise do processo de fabricação e montagem, o projeto desenvolvido apresentou como ponto negativo, a dificuldade na desmontagem do sistema para a realização de manutenção da roda dentada do eixo (4), onde requer a desmontagem do suporte de regulagem (5), suporte de ligação externo e interno (8) e a roda (3). Como ponto positivo, referente ao projeto, padronizou-se as fixações e boa parte dos componentes evitando peças direita e esquerda, referente à produção através dos processos convencionais de fabricação é possível produzir todos os componentes.

Devido ao fato de que neste trabalho não foi realizada a execução de protótipo, o detalhamento compreende a determinação das dimensões macro do sistema de movimentação e fixação.

A Figura 76 mostra a vista global do galpão metálico móvel com o sentido de deslocamento, também as cotas macro do galpão indicadas em milímetros.

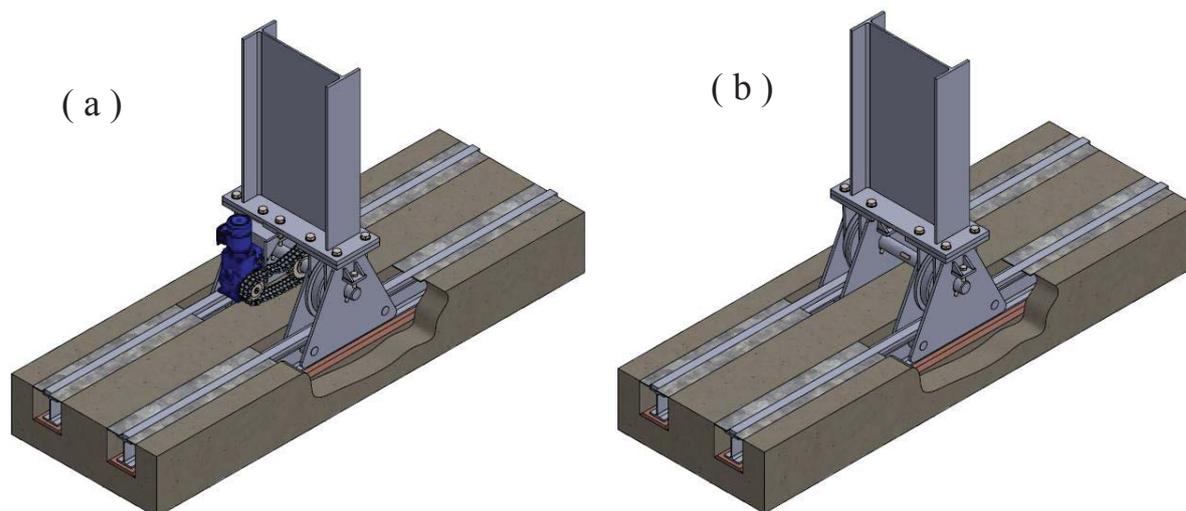
Figura 76 - Sentido de deslocamento do galpão móvel, cotas em mm.



Fonte: Autor.

A Figura 77 (a) mostra o sistema de movimentação e fixação completo, instalado nas linhas de eixo A e B, na interseção com a linha de eixo 3, conforme indicado na Figura 76 - detalhe A. Para os demais eixos do galpão, é instalado somente o sistema de fixação conforme apresentado na Figura 77 (b).

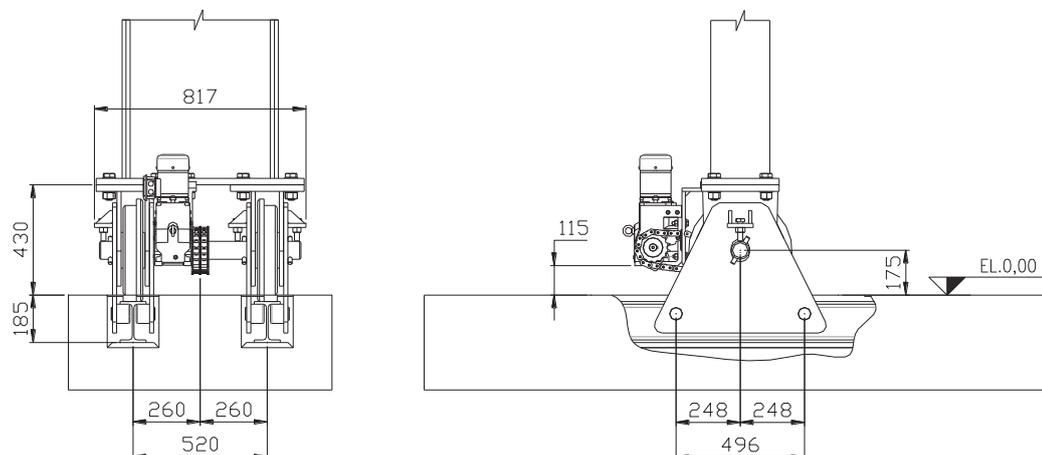
Figura 77 - (a) sistema de movimentação e fixação completo, (b) o sistema de fixação.



Fonte: Autor.

As principais cotas do projeto estão indicadas na Figura 78. Observa-se que a cota da altura do trilho com o guia está 185 mm abaixo do piso acabado, ou seja, nível 0.00 m , a fim de evitar acidentes. A cota de 115 mm é referente a altura livre de trabalho entre o piso acabado e o motorreductor. As cotas de 259 mm mostram que o sistema de transmissão está centralizado no eixo, para que as forças transmitidas nas rodas sejam simétricas.

Figura 78 - Cotas principais do sistema de movimentação e fixação, medidas em mm .



Fonte: Autor.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos no capítulo 3, onde primeiramente é discutido o método utilizado para o desenvolvimento do produto de Pahl et al. (2013). A segunda discussão é referente aos cálculos de dimensionamento por meio de elementos de máquinas, resistência dos materiais e da análise em elementos finitos.

4.1 Aplicação de uma metodologia de desenvolvimento de produto

A metodologia de desenvolvimento de produto utilizada neste projeto atendeu as necessidades do produto. As quatro fases utilizadas - especificação do produto, projeto conceitual, anteprojeto e detalhamento - fazem com que o desenvolvimento do projeto seja elaborado de forma metódica e organizado, fazendo com que o produto final tenha mais chance de obter sucesso.

Na especificação do produto ao gerar a linha mestra e a lista de requisitos, é possível obter uma análise geral da real necessidade que o produto deverá atender. Embora esta fase seja curta, é de vital importância que seja realizada, pois compromete todo o desenvolvimento das outras fases, e conseqüentemente, o produto final.

Na fase do projeto conceitual foi possível chegar ao princípio do problema de projeto, por meio da abstração e na elaboração das funções e subfunções. Ao desmembrar o problema principal em problemas parciais, fez-se com que a análise da solução do problema de projeto se tornasse mais simples. Na concretização das variantes de solução, chegou-se a quatro possíveis soluções sendo que o fator determinante na escolha da variante foi o custo do acionamento, ou seja, a utilização de motorreductor ao invés de inversor de frequência e o princípio de solução referente à regulagem na altura do suporte de fixação, onde através do parafuso de regulagem tem-se uma maior precisão comparada com a proposta dos múltiplos furos. Vale ressaltar, que para o perfeito deslocamento do galpão metálico, o acionamento dos motorredutores deve ser rigorosamente simultâneo.

A fase do anteprojeto teve como início a obtenção das cargas atuantes no sistema de movimentação e fixação. Após realizou-se a análise estrutural dos componentes e do conjunto. O modelamento 2D e 3D auxiliaram na obtenção da geometria final da variante de solução escolhida. Na fase do detalhamento as dimensões macro do projeto são definidas.

4.2 Resultados da análise estrutural

A análise estrutural do projeto teve como início a obtenção das cargas atuantes no sistema de movimentação e fixação, onde, através da aplicação das normas referentes ao dimensionamento de edificações e com o auxílio do programa Ftool (2015) na análise estrutural do pórtico, chegou-se as cargas atuantes no sistema de movimentação e fixação. Na seleção do vento atuante na estrutura adotou-se a maior velocidade de vento que consta na norma NBR6123 (1988), ou seja, 50 m/s ou 180 km/h e dos coeficientes de rugosidade categoria I, sendo esta a mais severa condição para a estrutura. Sendo assim, o projeto desenvolvido atende a qualquer região do território nacional. No dimensionamento dos componentes utilizaram-se conhecimentos de elementos de máquinas e resistência dos materiais, onde durante a análise do eixo (4) e do eixo inferior do suporte de fixação (5), detectou-se a necessidade de utilização de um aço com propriedades mecânicas superiores ao do restante da estrutura, a fim de aumentar o coeficiente de segurança.

A análise em elementos finitos fez-se necessária para analisar como o conjunto final se comporta diante dos carregamentos, originados da análise do pórtico. Os resultados apresentados mostraram-se satisfatórios, atendendo a segurança estrutural referente ao estado limite último (ELU) da norma NBR8800 (2008).

Na realização de todas as simulações a estrutura apresentou um comportamento linear de deformação até atingir determinado carregamento, onde este limite de deformação linear foi utilizado para realizar a análise da segurança da estrutura, devido à estrutura não apresentar deformação plástica. Dando continuidade no carregamento, a estrutura mostrou um comportamento não linear de deformação antes de entrar em colapso, devido ao contato entre as peças e a deformação plástica, como pode ser observado nas Figuras 68, 69, 71 e 75.

Durante a primeira análise, ao utilizar a prescrição de rotação em torno do eixo Z, a fim de simular a atuação do momento na estrutura, os resultados mostram que o sistema de fixação suportou um carregamento de 2.607 kN.m , sendo este carregamento em torno de três vezes maior, comparado com o carregamento em que a estrutura poderá estar sendo submentida.

Na segunda análise, utilizou-se a prescrição de translação no sentido do eixo X, para simular o esforço cortante atuando na estrutura. Nesta análise, a estrutura suportou um carregamento de 10.090 kN durante a deformação linear (Figura 70), onde comparado com a

carga que poderá atuar na estrutura de $181,5 \text{ kN}$ na linha de eixo A do pórtico (Tabela 14), a estrutura atende a necessidade do projeto.

Na terceira análise é utilizada a prescrição de translação no sentido do eixo Y, para simular o esforço axial atuando na estrutura, ou seja, o efeito de sucção do galpão. Para esta simulação, a estrutura suportou o carregamento de 20.040 kN durante a deformação linear, sendo este carregamento superior ao previsto no cálculo das ações na base do pórtico (Tabela 14), atendo assim o proposto pelo projeto.

A quarta análise considerou-se a hipótese mais crítica a que a estrutura poderá estar sendo submetida, ou seja, atuação simultânea dos esforços cortante, axial e momento, através da prescrição de rotação em torno do eixo Z, translação nos eixos X e Y. Para esta situação de carregamento, a estrutura suportou o carregamento de 1.141 kN.m , com a rotação de $0,001 \text{ rad}$ durante a deformação linear da estrutura, onde comparado com a carga de $789,7 \text{ kN.m}$ (Tabela 14), que poderá atuar na estrutura, o sistema de fixação atende a necessidade do projeto.

Os pontos críticos observados para os casos de rotação em torno do eixo Z, translação no eixo X e atuação simultânea dos carregamentos, durante a deformação não linear da estrutura, são os suportes de ligação (8), os quais entram em contato com o suporte de fixação (5) e inicia-se a deformação plástica. Também os eixos das rodas inferiores do suporte de fixação (5) durante a deformação não linear da estrutura, apresentam deformação plástica no caso da atuação de carregamento no eixo Y. Para obter melhores resultados, pode-se aumentar a espessura das chapas dos suportes de ligação ou substituir o tipo de aço.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo refere-se à conclusão do trabalho com relação aos objetivos estabelecidos, contribuição e trabalhos futuros.

5.1 Análise dos objetivos

Como objetivo geral deste trabalho, o qual é desenvolver o projeto do sistema de movimentação e fixação levando em conta os esforços de vento e outros que podem provocar o movimento ou arranque do galpão da sua posição de trabalho e de dimensionar o sistema de acionamento para obtenção da translação, o trabalho desenvolvido atende satisfatoriamente.

Dentre os vários aspectos importantes deste projeto, o sistema para a fixação do galpão móvel se destaca, devido a sua simplicidade e robustez, a qual é avaliada através dos cálculos e da análise em elementos finitos, onde se utilizam esforços relativamente elevados atuando na estrutura.

O objetivo específico de desenvolver o projeto utilizando-se uma metodologia de desenvolvimento de produto, a fim de encontrar uma solução para o problema do projeto, mostrou-se eficiente. Na elaboração do projeto, a metodologia utilizada fez com que o projeto desenvolvido seguisse uma ordem lógica e eficiente e desta forma diminuindo o tempo de projeto e principalmente aumentando a chance de sucesso do produto.

Desde as metodologias mais antigas até as mais recentes, todas tem em comum o princípio de organizar o desenvolvimento do produto, para obter uma solução de projeto adequada, reduzindo os tempos ociosos de projeto e fabricação. Porém, cada metodologia tem um foco diferente, sendo na área fabril, de projeto, gerenciamento, etc. Cabe o responsável pelo desenvolvimento do produto a escolha do tipo de metodologia a utilizar, a qual se adapta melhor ao produto que será desenvolvido.

No objetivo específico de obter os esforços atuantes no sistema de fixação do galpão metálico móvel, considerou-se no cálculo da pressão dinâmica a velocidade máxima do vento que pode ocorrer no território nacional, o coeficiente de rugosidade categoria I e o fator topográfico S1 (Apêndice A). Porém, utilizando estas considerações no cálculo, é possível a padronização das peças e desta forma diminuir o número de componentes, pois o projeto desenvolvido pode ser utilizado em qualquer local do território nacional, não havendo

necessidade de dimensionamento específico dos componentes, para atender determinada região. Nas combinações de cargas, utilizaram-se as cargas mais nocivas que podem atuar no sistema de fixação, porém a carga permanente estimada deve ser revista após o dimensionamento completo do galpão metálico. Através do modelo simplificado do pórtico na análise estrutural com o auxílio do *software* ftool (Apêndice B), foi possível obter os esforços atuantes no sistema de fixação.

O objetivo de realizar a análise estrutural do sistema de fixação por meio do método de elementos finitos foi alcançado. Nesta análise simularam-se as combinações de cargas mais prejudiciais que podem atuar no sistema de fixação. Através do *software* LS Dyna (2003) conseguiu-se obter a carga máxima que a estrutura suporta antes de entrar em colapso, ou seja, o máximo momento, esforço cortante, esforço axial e a combinação das três ações. Na análise do sistema de movimentação, utilizaram-se os conhecimentos da resistência dos materiais e elementos de máquinas, no dimensionamento dos componentes e para obter a potência, o torque e a rotação que o motorreductor deve apresentar. A análise em elementos finitos e o dimensionamento por métodos tradicionais não eliminam a necessidade de executar um protótipo a fim observar possíveis falhas, melhorias ou considerações equivocadas no dimensionamento.

De maneira geral, os objetivos propostos foram alcançados, onde se projetou um sistema de movimentação e fixação simples, resistente aos esforços que podem atuar na sua estrutura, tendo em vista o processo fabril e de montagem.

5.2 Contribuição

A principal contribuição deste trabalho foi de desenvolver o projeto de um galpão móvel o qual pode ser executado, a fim de melhorar a condição de trabalho, referente à exposição ao sol, dos trabalhadores da indústria e como consequência aumentar a produtividade das empresas.

5.3 Trabalhos futuros

As sugestões para o trabalhos futuros estão descritos abaixo:

- Realizar a montagem do protótipo do sistema de fixação, a fim de verificar interferências e o teste de carga;
- Executar o teste do acionamento do sistema de movimentação, verificando o acionamento simultâneo dos motorreductores e projetar o sistema elétrico de acordo com a norma NBR5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão, das normas regulamentadoras NR12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos e da NR10 - Segurança em instalações e serviços em eletricidade;
- Durante a execução do teste de movimentação do galpão móvel, verificar o espaço mínimo de frenagem necessário para que não ocorra o descarrilamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, A. B. (2015). *Normalização*. Acesso em 30 de Dezembro de 2015, disponível em <http://www.abnt.org.br/normalizacao/o-que-e/o-que-e>
- Alves Filho, A. (2007). *Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE 5ª edição*. São Paulo: Érica.
- ANSI B29.1, A. (2011). Precision power transmission Roller Chains, Attachments, and Sprockets.
- ANSYS, I. (1994). *Theory Manual. Release 5.7.0011369*. Twelfth Edition. SAS IP, Inc.,.
- ASTM A572/A572M, A. S. (2015). Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel.
- ASTM A588/A588M, A. S. (2005). Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel, up to 50 ksi [345 MPa] Minimum Yield Point, with Atmospheric Corrosion Resistance.
- Azevedo, Á. F. (2003). *Método dos Elementos Finitos*. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- BACK, N. (2008). *Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem*. Barueri: Manole.
- BARNES, W., & HAMILTON. (1973). *Patente N° US 3739537*. Canadá.
- BAXTER, M. (2011). *Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos. Tradução Itiro Iida*. São Paulo: Blucher.
- BELLEI, I. (1998). *Edifícios Industriais em Aço*. São Paulo: PINI.
- Dagnese. (2012). *Obras/Segmentos*. Acesso em 11 de Dezembro de 2015, disponível em http://www.dagnese.com.br/site/content/obra_ver.php?obra_id=53&segmento_id=6
- Dias de Meira Junior, A. (2010). *Avaliação do Comportamento da Estrutura de Ônibus Rodoviário Solicitado a Impacto Frontal*. Porto Alegre.
- DIN 6885, I. A. (1968). Chavetas paralelas retangulares ou quadradas - Características dimensionais.
- INPI, I. N. (24 de Agosto de 2010). *Batente de rodas de pontes rolantes*. Acesso em 08 de Setembro de 2015, disponível em <https://gru.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedido=793220&SearchParameter=PI%200805707-9>
- INPI, I. N. (8 de Setembro de 1998). *Estaleiro móvel*. Acesso em 8 de setembro de 2015, disponível em <https://gru.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedido=483020&SearchParameter=pi%209606015-8>

LS-DYNA. (Abril de 2003). User Manual - Non linear Dynamic Analysis of Structures - Version 970. Livermore Software Technology Corporation 7374, Las Pocitas Road Livermore.

Madenci, E., & Guven, I. (2006). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using Ansys*. Arizona: Springer.

Martha, L. F. (2010). *Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos*. Rio de Janeiro: Elsevier.

MARTHA, L. F. (2015). FTOOL - Versão 3.01. Rio de Janeiro.

MAYNARD, M. R. (1966). *Patente N° US 3248830*. Canadá.

MTE, M. D. (s.d.). *Normalização*. Acesso em 11 de Fevereiro de 2016, disponível em <http://www.mte.gov.br/index.php/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras>

MTE, M. D. (14 de Setembro de 2015). *Normalização*. Acesso em 29 de Dezembro de 2015, disponível em <http://portal.mte.gov.br/index.php/seguranca-e-saude-no-trabalho/2015-09-14-19-18-40>

NBR 8681, A. B. (30 de Abril de 2004). *Ações e segurança nas estruturas - procedimento*. Rio de Janeiro.

NBR6120, A. B. (1980). *Cargas para o cálculo de estruturas em edificações*. Rio de Janeiro.

NBR6123, A. B. (1988). *Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro.

NBR8800, A. B. (2008). *Projetos de Estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro.

NR 15, N. R. (agosto de 2014). *Atividades e Operações Insalubres - Anexo 3: Limites de Tolerância para Exposição ao calor*. Acesso em 29 de Dezembro de 2015, disponível em <http://portal.mte.gov.br/index.php/seguranca-e-saude-no-trabalho/2015-09-14-19-18-40/2015-09-14-19-23-50/2015-09-29-20-46-53>

NR 21, N. R. (15 de Dezembro de 1999). *Trabalhos a Céu Aberto - Procedimento 21.1*. Acesso em 29 de Dezembro de 2015, disponível em <http://portal.mte.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR-21atualizada.pdf>

PAHL Gerhard et al. (2013). *Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações*. São Paulo: Edgard Blücher.

PFEIL, W., & PFEIL, M. (2013). *Estruturas de aço: dimensionamento prático de acordo com a NBR8800:2008* (8ª Edição [reimpr.] ed.). Rio de Janeiro: LTC.

Pietrauno. (2014). Acesso em 11 de Dezembro de 2015, disponível em <http://www.pietrauno.com.br/?link=modulos/galerias/galeria.php&id=11>

PORTO, T. G. (21 de Junho de 2011). *Transporte Ferroviário*. Acesso em 28 de Fevereiro de 2016, disponível em <http://www.stt.eesc.usp.br/index.php/material-didatico/category/33-stt0605-transporte-ferroviario>

Pravia, Z. M. (2016). *Visualventos*. Acesso em 2016, disponível em <http://www.ertools.upf.br>

PRAVIA, Z. M., DREHMER, G. A., & JÚNIOR, E. M. (2010). *Galpões para usos gerais*. Rio de Janeiro: CBCA.

RATZ, J. (1998). *Patente N° PI 9606015-8 A*. Brasil.

Ribeiro, L. F. (1998). *Estudo do Comportamento Estrutural de Ligações Parafusadas Viga-Coluna com Chapa de Topo: Análise Teórico Experimental*. São Carlos.

SHIGLEY, J. E., Mischke, C. R., & BUDYNAS, R. G. (2005). *Projeto de Engenharia Mecânica*. São Paulo: Bookman.

SOUZA, G. d., & SANTANA, O. T. (2010). *Patente N° PI0805707-9 A2*. Brasil.

STEMMER, C. E. (1979). *Projeto e construção de máquinas*. Porto Alegre: Globo.

THEURER, J., & BRUNNINGER, M. (1979). *Patente N° US 4152990*. Áustria.

USPTO. (2015). Acesso em 20 de Abril de 2015, disponível em United States Patent and Trademark Office: <http://patft.uspto.gov/>

USPTO, U. S. (19 de Junho de 1973). *Aircraft hangar*. Acesso em 27 de Abril de 2015, disponível em <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/3739537>

USPTO, U. S. (8 de Maio de 1979). *Mobile track tie transport apparatus*. Acesso em 27 de Abril de 2015, disponível em <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/4152990>

USPTO, U. S. (3 de Maio de 1966). *Retractable hangar*. Acesso em 28 de Abril de 2015, disponível em <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/3248830>

VDI2221, R. (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI.

VDI2225, R. (1977). *Technisch-wirtschaftliches Konstruieren*. Düsseldorf: VDI.

WANG, H., ZENG, J., & LUO, R. (2014). Study on wheel / rail adhesion force and its control of high-speed trains considering aerodynamic loads and track excitations. *Wear*, 299-304.

WHO, W. H. (2003). *Protection Against Exposure to Ultraviolet Radiation*. Acesso em Dezembro de 2015, disponível em <http://www.who.int/uv/publications/proUVrad.pdf?ua=1>

ZENG, J., & WU, P. (2008). Study on the wheel/rail interaction and derailment safety. *Wear* , 1452-1459.

Zienkiewicz, O., & Taylor, R. (2000). *The Finite Element Method-v.1:The Basis 5.ed.* Oxford, Massachusetts: Butterworth-Heinemann.

APÊNDICE A - Cargas atuantes na estrutura

Para o dimensionamento do sistema, iniciou-se pelo levantamento das cargas de vento, permanente e acidental nas bases do galpão metálico. Utilizando-se das normas ABNT NBR8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, ABNT NBR6123/88 - Forças devido ao vento em edificações, ABNT NBR6120/80 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações e tendo como material auxiliar os livros (PRAVIA, DREHMER, & JÚNIOR, 2010) e (BELLEI, 1998).

De acordo com a norma NBR8800:2008 item 4.7, as cargas atuantes no galpão a ser projetado são as seguintes:

- Carga permanente são as que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda a vida útil da construção, ou seja, o peso próprio da estrutura;
- Carga acidental, para coberturas comuns deve ser previsto uma sobrecarga no telhado em projeção horizontal, a fim de englobar as cargas decorrentes de instalações elétricas e hidráulicas, térmico e acústico e de pequenas peças eventualmente fixadas na cobertura;
- Carga variável devido o vento, deve ser calculada de acordo com a ABNT NBR6123/88 - "Forças devidas ao vento em edificações".

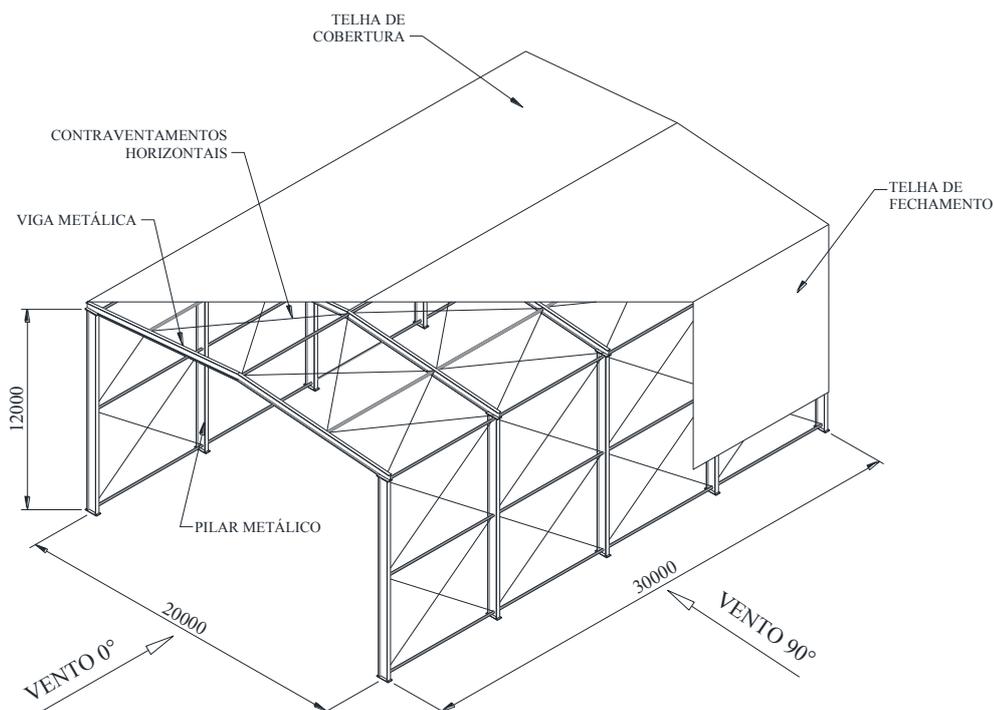
Características do galpão metálico:

Toda a estrutura considerada é em aço ASTM A572 Grau 50, com tensão de escoamento *345 MPa* e tensão de ruptura *450 MPa*, as demais características do galpão metálico industrial são as seguintes:

- Vão entre eixos das colunas de 20 m;
- Comprimento total 30 m;
- Altura livre de 12 m;
- Espaçamento entre colunas de 7,5 m;
- Inclinação do telhado de 5°;
- Cobertura em chapa zincada trapezoidal;
- Tapamentos frontais somente na largura das colunas com chapa zincada trapezoidal;
- Tapamentos laterais acima de 2,5 m com chapa zincada trapezoidal.

A Figura A.1 ilustra o galpão metálico composto pelo sistema portante principal que é formado pelos pilares metálicos e vigas metálicas da cobertura e o sistema de contraventamento constituído por contraventos horizontais na cobertura, contraventos verticais na elevação lateral e vigas de travamento.

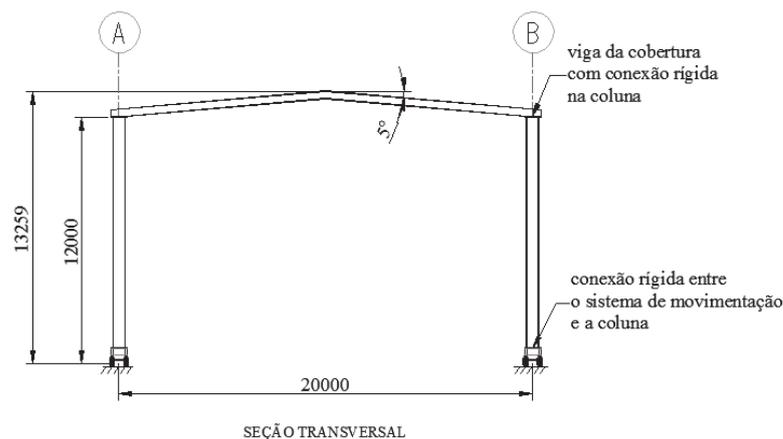
Figura A.1 - Elevação isométrica do galpão metálico.



Fonte: Autor

O sistema estrutural da seção transversal é formada por pórticos em perfil tipo I soldado, a ligação entre a viga de cobertura e a coluna e a ligação entre a coluna e o sistema de movimentação é através de ligação rígida, a Figura A.2 apresenta o desenho da seção transversal com as cotas da distância entre os eixos das colunas e a altura livre.

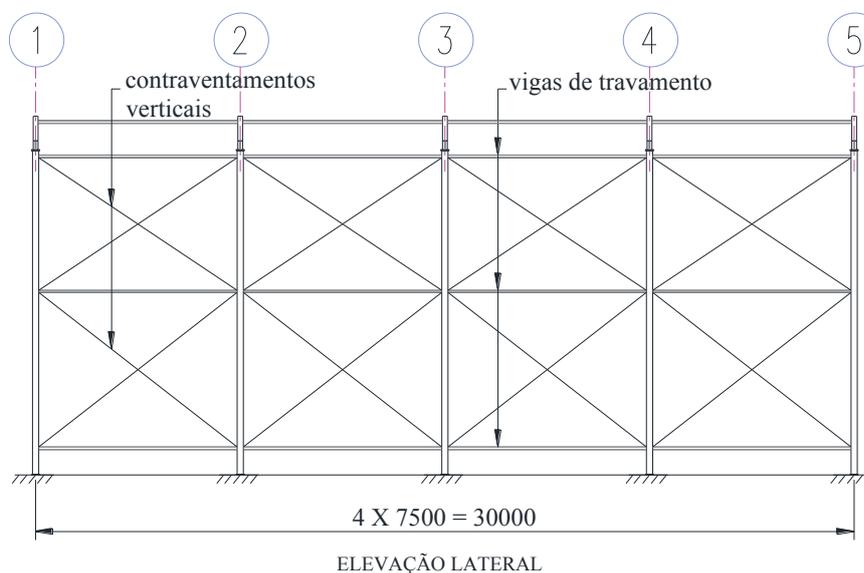
Figura A.2 - Seção transversal típica do pórtico.



Fonte: Autor

A Figura A.3 mostra o desenho da elevação lateral do galpão metálico, onde na estrutura é utilizado contraventamentos verticais e vigas de travamento, a fim de oferecer rigidez na direção longitudinal do conjunto e para absorver as cargas de vento atuantes nas fachadas transversais e transferi-las para às fundações.

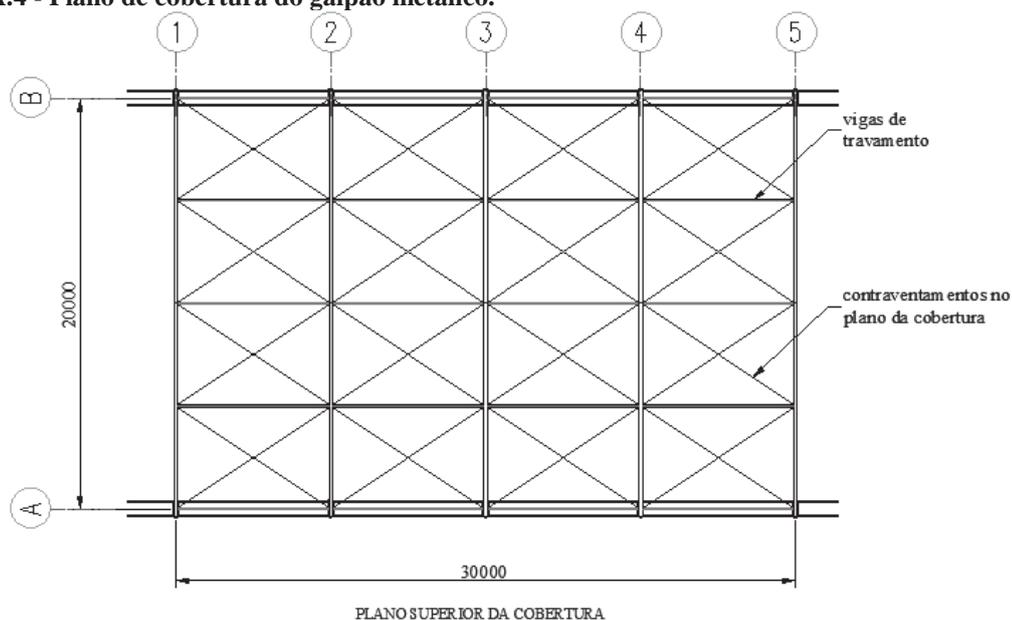
Figura A.3 - Elevação lateral do galpão metálico.



Fonte: Autor

Na Figura A.4 tem-se o plano de cobertura do galpão metálico, onde são mostrados os contraventamentos e as vigas de travamento, tendo como função de dar a estrutura estabilidade espacial além de distribuir as cargas de vento.

Figura A.4 - Plano de cobertura do galpão metálico.



Fonte: Autor

Na sequência segue o cálculo da carga de vento, a carga permanente e a carga acidental.

1 Cálculo da carga de vento:

Para o cálculo da carga de vento, de acordo com a NBR 6123/88, deve-se seguir o procedimento abaixo:

1.1 Pressão dinâmica

A pressão dinâmica que atua no galpão metálico é definida pela Equação A.1, abaixo:

$$q_k = 0,613 \cdot V_k^2 \quad V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (\text{A.1})$$

Considerações para o cálculo:

- Velocidade básica do vento considerada $V_0 = 50\text{m/s}$;
- Fator topográfico $S_1 = 1$ terreno plano (item 5.2a da ABNT NBR 6123);
- Fator de rugosidade $S_2 =$ categoria I adotada - classe B (item 5.3.1 e 5.3.2 da ABNT NBR 6123).

Tabela A.1 - Fator da rugosidade.

H	< 5m	10m	15m
S ₂	1,04	1,09	1,12

Fonte: Autor

— Fator estatístico S₃ = 0,95;

Através dos valores encontrados, é possível determinar a pressão dinâmica devido ao vento, que irá atuar no galpão metálico. Abaixo seguem os valores calculados da pressão dinâmica, referente às diferentes alturas nas paredes do galpão, conforme Tabela A.1 e utilizando-se da equação A.1:

$$V_{k5} = 50.1.1,04.0,95 = 49,4 \text{ m/s} \quad \therefore q_5 = 1,5 \text{ kN/m}^2$$

$$V_{k10} = 50.1.1,09.0,95 = 51,8 \text{ m/s} \quad \therefore q_{10} = 1,65 \text{ kN/m}^2$$

$$V_{k15} = 50.1.1,12.0,95 = 53,2 \text{ m/s} \quad \therefore q_{15} = 1,73 \text{ kN/m}^2$$

1.2 Coeficientes de pressão e de forma externos

Os coeficientes de pressão e de forma externos para as paredes laterais, são extraídos da norma ABNT NBR6123/88 - Tabela 4, e utilizando as dimensões do galpão metálicos, obtêm-se os coeficientes.

$$a = 30\text{m} \quad b = 20\text{m} \quad h = 12\text{m}$$

$$\frac{h}{b} = \frac{12}{20} = 0,6 \quad \frac{a}{b} = \frac{30}{20} = 1,5$$

$$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2} \quad 1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$$

Tabela A.2 - Valores de C_e para as paredes laterais.

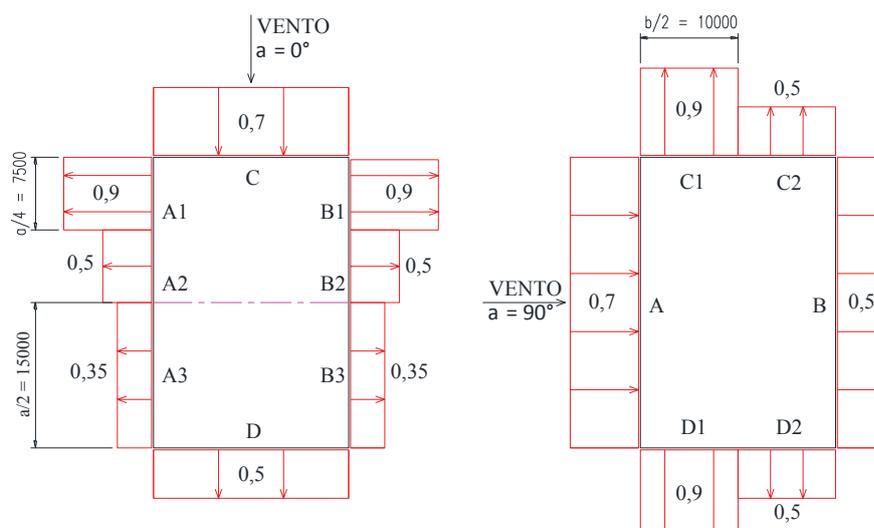
$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$				C _{pe} médio
A ₁ e B ₁	A ₂ e B ₂	C	D	A	B	C ₁ e D ₁	C ₂ e D ₂	
-0,9	-0,5	+0,7	-0,5	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,1

A₃ e B₃ = -0,35 interpolado linearmente

Fonte: ABNT NBR6123/88 - Tabela 4

A Figura A.5 mostra as cargas atuantes nas laterais da estrutura do galpão metálico.

Figura A.5 - Distribuição dos Cpe nas paredes laterais.



Fonte: Autor.

1.3 Coeficientes de pressão e de forma externos na cobertura

Os coeficientes de pressão e de forma externos para a cobertura, são retirados da norma ABNT NBR6123/88 - Tabela 5, e através da relação da altura livre (h) pela distância transversal entre pilares (b), tem-se o valor de referência que é utilizado na determinação dos coeficientes de pressão.

$$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2} = 0,6$$

Tabela A.3 - Coeficientes de pressão e forma externos para a cobertura.

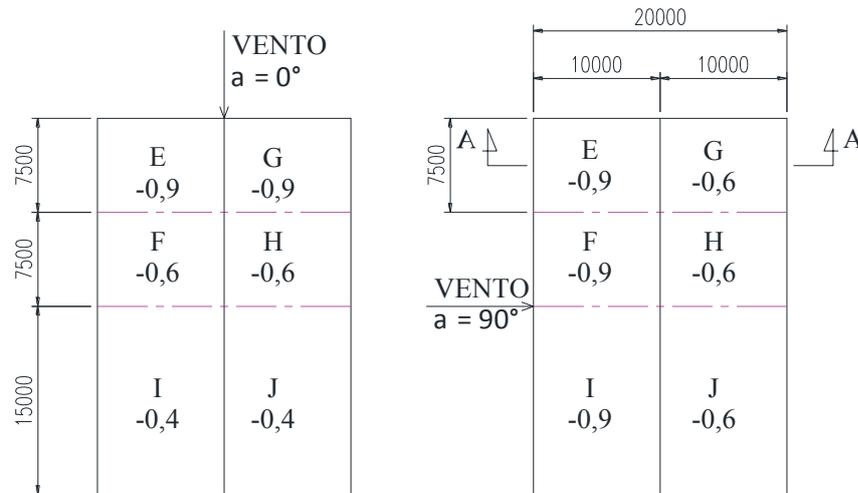
θ	C_e				C_{pe} Médio			
	$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 0^\circ$		Ações Localizadas			
	E - F	G - H	E - G	F - H	1	2	3	4
5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0

$$y = (0,15).b = 3$$

Fonte: ABNT NBR6123/88 - Tabela 5.

A Figura A.6 abaixo, mostra a distribuição do coeficiente de pressão externo no telhado.

Figura A.6 - Distribuição dos Cpe no telhado.



Fonte: Autor.

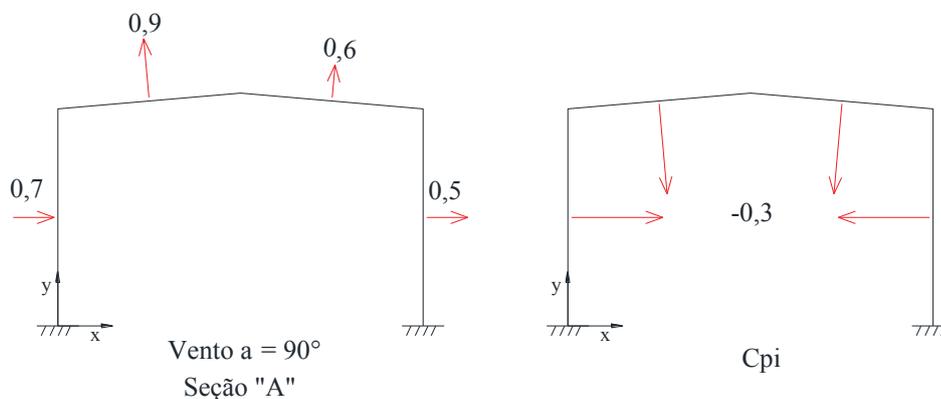
1.4 Coeficiente de pressão interno

Os coeficientes de pressão interno (C_{pi}) que estão atuando no galpão metálico, são dados de acordo com a norma NBR6123 item 6.2.5b. Como as quatro paredes são igualmente permeáveis, tem-se os seguintes coeficientes: $C_{pi} = -0,3$ e $0,0$.

Seções transversais:

Abaixo segue Figura A.7 onde mostra as seções transversais, com os coeficientes de pressão externo nas paredes laterais e cobertura e os coeficientes de pressão interna, atuantes no galpão metálico.

Figura A.7 - Coeficientes de pressão.

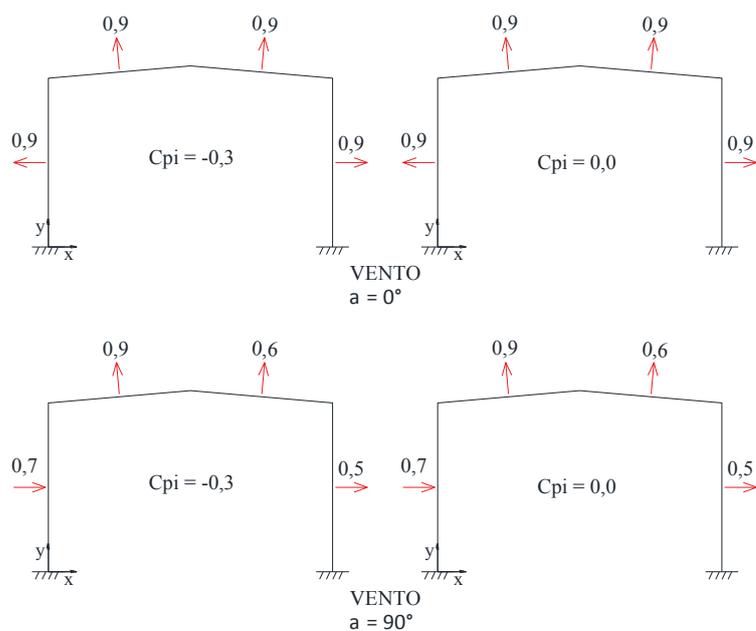


Fonte: Autor.

1.5 Combinações dos coeficientes de pressão

A Figura A.8 abaixo apresenta as combinações dos coeficientes de pressão externos e interno, onde é possível analisar a situação mais crítica em que o galpão metálico está sujeito.

Figura A.8 - Combinações dos coeficientes de pressão.



Fonte: Autor.

1.5 Ações resultantes

O cálculo das ações resultantes (q_n) para cada pórtico é dado pela Equação (A.2), onde através da multiplicação do espaçamento entre os pórticos de 7,5 metros, pela pressão dinâmica máxima de $1,73 \text{ kN/m}^2$ e o resultado das combinações dos coeficientes de pressão, tem-se as ações resultantes em kN/m .

$$q_n = d_p(m) \times q_k \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) \times coef. \quad (\text{A.2})$$

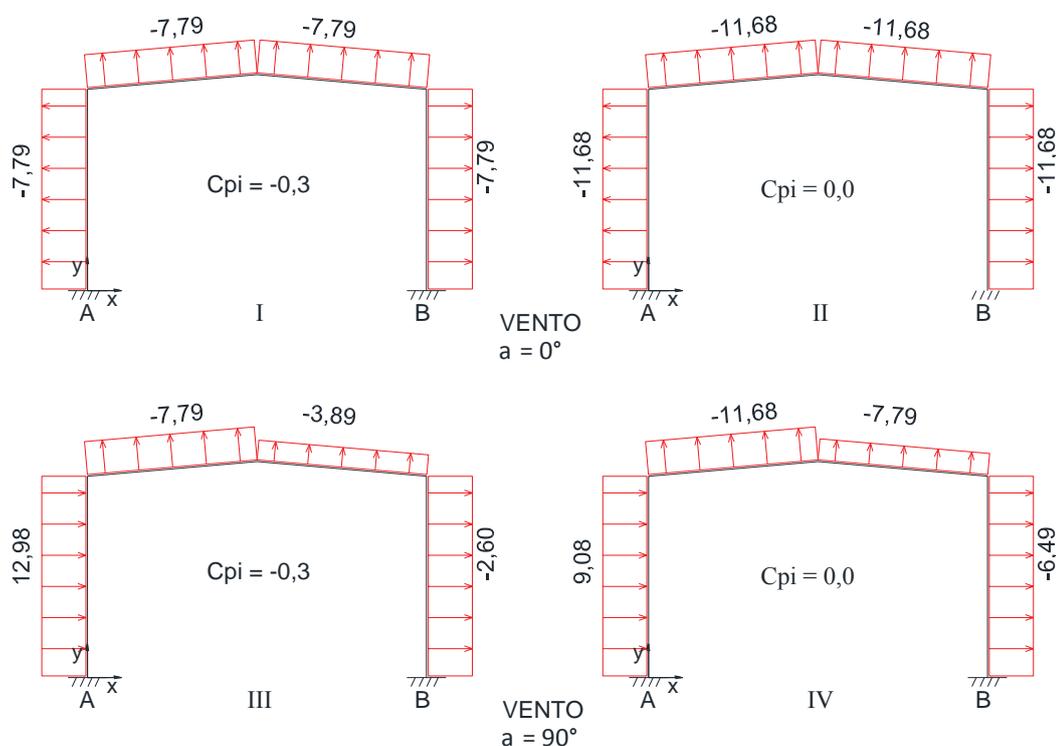
Onde:

d_p = espaçamento entre pórticos;

q_k = pressão dinâmica em kN/m^2 .

A Figura A.9 que segue apresenta o resultado das ações em kN/m atuantes no galpão. Assim sendo, é possível analisar a situação mais crítica a que o galpão metálico está sujeito.

Figura A.9 - Ações resultantes em kN/m .



Fonte: Autor.

2 Carga permanente:

A carga permanente ($F_{Gi,k}$) estimada para a estrutura metálica é de $0,10 kN/m^2$ para as telhas, $0,05 kN/m^2$ para os contraventos, $0,10 kN/m^2$ para as terças e tirantes e de $0,20 kN/m^2$ para as vigas e colunas, totalizando $0,45 kN/m^2$ e, de acordo com Bellei (1998), se classifica como um galpão leve. Este valor total de carga permanente multiplicado pelo espaçamento entre os pórticos fornece a carga por metro. A equação abaixo apresenta o resultado da carga permanente atuante no galpão metálico.

$$F_{Gi,k} = 0,45 \frac{kN}{m^2} \times 7,5m = 3,375 \frac{kN}{m} \quad (A.3)$$

3 Carga acidental:

A carga acidental ($F_{Q1,k}$), conforme norma ABNT NBR8800 anexo B, não deve ser menor que $0,25 \text{ kN/m}^2$. Portanto, para se obter o carregamento linear distribuído, é multiplicado o valor da carga acidental pelo espaçamento entre os pórticos, conforme equação que segue.

$$F_{Q1,k} = 0,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \times 7,5\text{m} = 1,875 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

APÊNDICE B - Análise estrutural do pórtico

Através do cálculo das cargas atuantes no galpão metálico, deve-se realizar a análise estrutural do galpão metálico, a fim de obter os esforços para cada situação em que a estrutura está sujeita.

As combinações normais das cargas para estados limites últimos em função dos valores característicos das cargas permanentes e variáveis atuantes no galpão metálico, a fim de garantir a segurança da estrutura, são dadas conforme a Equação (B.1), de acordo com a norma NBR8800 item 4.7.7.2.1 e com os valores dos coeficientes de ponderação e combinação das Tabelas 1 e 2 da referida norma.

$$F_D = \sum_{i=1}^m (Y_{gi} F_{Gi,k}) + Y_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (Y_{qj} \Psi_{oj} F_{Qj,k}) \quad (\text{B.1})$$

1 Combinação das cargas $F_{D,1}$

Abaixo segue a Equação (B.2) para a combinação de cargas $F_{D,1}$, na qual é utilizado os coeficientes de ponderação referente ao peso próprio da estrutura metálica de 1,25 e para as ações variáveis 1,5.

$$F_{D,1} = 1,25 F_{Gi,k} + 1,5 F_{Qi,k} \quad (\text{B.2})$$

$$F_{D,1} = 1,25(3,375) \frac{kN}{m} + 1,5(1,875) \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,1} = 7,03 \frac{kN}{m}$$

2 Combinação das cargas $F_{D,2}$

Através da análise da carga variável do vento, conclui-se que as combinações menos favoráveis à segurança da estrutura são as considerações II e IV indicadas na Figura A.9.

Para o cálculo da combinação das cargas $F_{D,2}$ é utilizada a hipótese II, sendo a ação variável devida ao vento ($F_{w,k}$) decomposta segundo os eixos globais para a montagem das combinações finais (Figura B.1-b). Na Equação (B.3) são empregados os coeficientes de ponderação de 1,0 para o peso próprio da estrutura e de 1,4 para a ação variável do vento, os quais estão previstos na norma NBR8800 (2008).

A Figura B.1 (b) apresenta o local onde a combinação de cargas $F_{D,2}$ estão atuando.

$$F_{D,2} = 1,00(F_{Gi,k}) - 1,4(F_{w,k}) \quad (\text{B.3})$$

Assim sendo,

$$F_{D,2} = 1,00(3,375) \frac{kN}{m} - 1,4(11,68 \times \cos(5^\circ)) \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,2} = -12,9 \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,2} = -1,4(11,68 \times \text{sen}(5^\circ)) \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,2} = -1,42 \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,2} = -1,4(11,68) \frac{kN}{m} = -16,3 \frac{kN}{m}$$

3 Combinação das cargas $F_{D,3}$

No cálculo da combinação das cargas $F_{D,3}$ é utilizada a hipótese IV, sendo a ação devida ao vento ($F_{w,k}$) decompostas segundo os eixos globais para a montagem das combinações finais (Figura B.2). Para o cálculo dessas combinações utiliza-se da Equação (B.3).

A Figura B.2 apresenta o local onde a combinação de cargas $F_{D,3}$ estão atuando.

$$F_{D,3} = 1,00(3,375) \frac{kN}{m} - 1,4(11,68 \times \cos(5^\circ)) \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,3} = -12,91 \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,3} = 1,00(3,375) \frac{kN}{m} - 1,4(7,79 \times \cos(5^\circ)) \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,3} = -7,49 \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,3} = -1,4(11,68 \times \text{sen}(5^\circ)) \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,3} = -1,42 \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,3} = -1,4(7,79 \times \text{sen}(5^\circ)) \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,3} = -0,95 \frac{kN}{m}$$

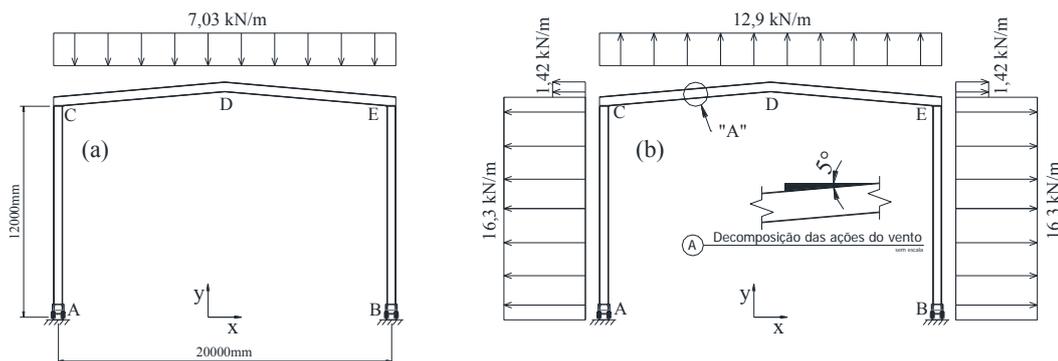
$$F_{D,3} = 1,4(9,08) \frac{kN}{m} = 12,7 \frac{kN}{m}$$

$$F_{D,3} = -1,4(6,49) \frac{kN}{m} = -9,1 \frac{kN}{m}$$

Resumo das combinações de cargas:

As combinações dos esforços atuantes no galpão metálico, que compreendem as cargas variáveis do vento, permanente e acidental, foram calculadas e denominadas de $F_{D,1}$, $F_{D,2}$ e $F_{D,3}$, e são mostradas nas figuras que seguem. Na Figura B.1 (a), tem-se as combinações das cargas $F_{D,1}$ e a Figura B.1 (b) as combinações $F_{D,2}$.

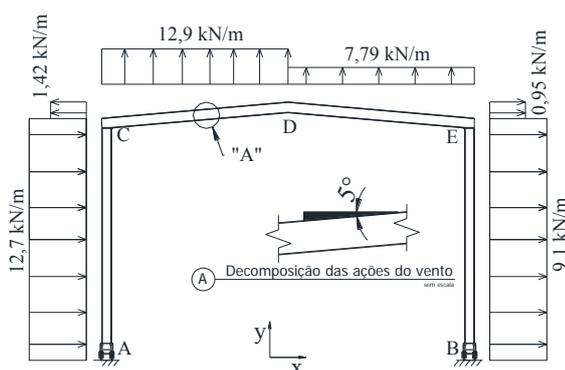
Figura B.1 - (a) combinações de cargas $F_{D,1}$, (b) combinações de cargas $F_{D,2}$.



Fonte: Autor.

A Figura B.2 apresenta as combinações de cargas $F_{D,3}$ e o detalhe com a decomposição da ações devida ao vento.

Figura B.2 - Combinações de cargas $F_{D,3}$.



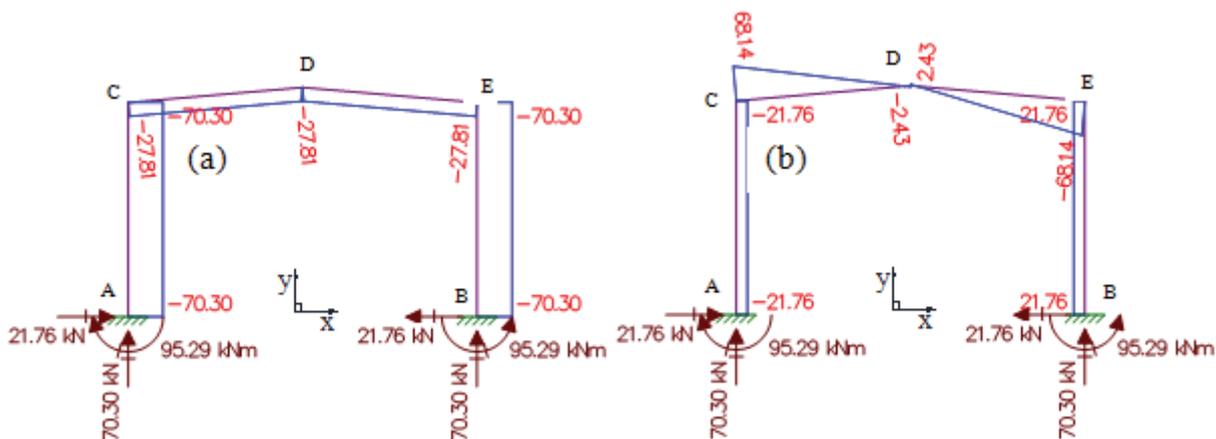
Fonte: Autor.

4 Cálculo dos esforços

Na análise do comportamento estrutural do galpão metálico, é utilizado o programa computacional Ftool (MARTHA, 2015), o qual calcula o deslocamento, os esforços axiais, cortantes e os momentos fletores que atuam no pórtico. A seguir os diagramas de esforços, juntamente com a geometria deformada dos pórticos analisados nas três combinações de cargas previstas $F_{D,1}$, $F_{D,2}$ e $F_{D,3}$.

As Figuras B.3 (a) e (b) apresentam os esforços axiais e cortantes resultantes da combinação de carga $F_{D,1}$ no pórtico, também as reações que ocorrem nas bases do pórtico.

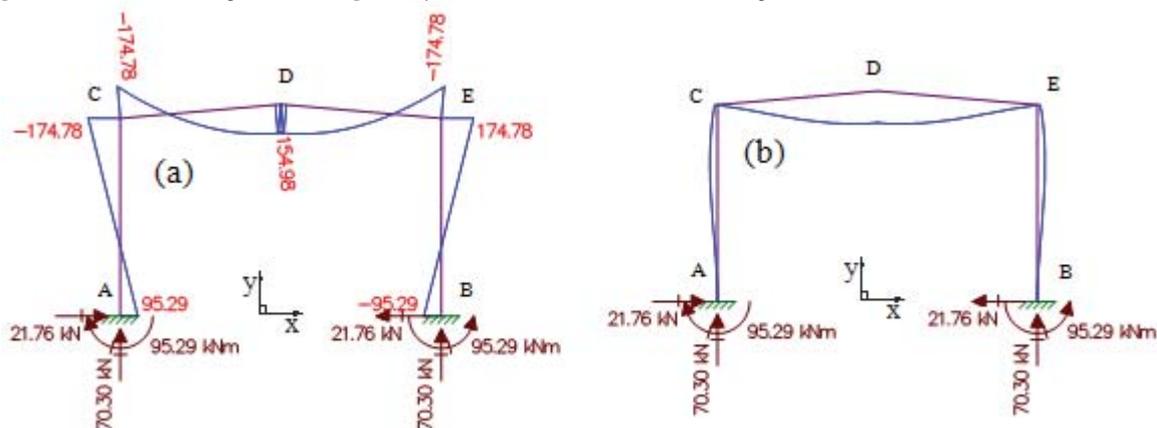
Figura B.3 - Combinações de cargas $F_{D,1}$, (a) esforço axial e (b) esforço cortante.



Fonte: Autor.

As Figuras B.4 (a) e (b) mostram os diagramas de momento e a deformação do pórtico, para a combinação de carga $F_{D,1}$.

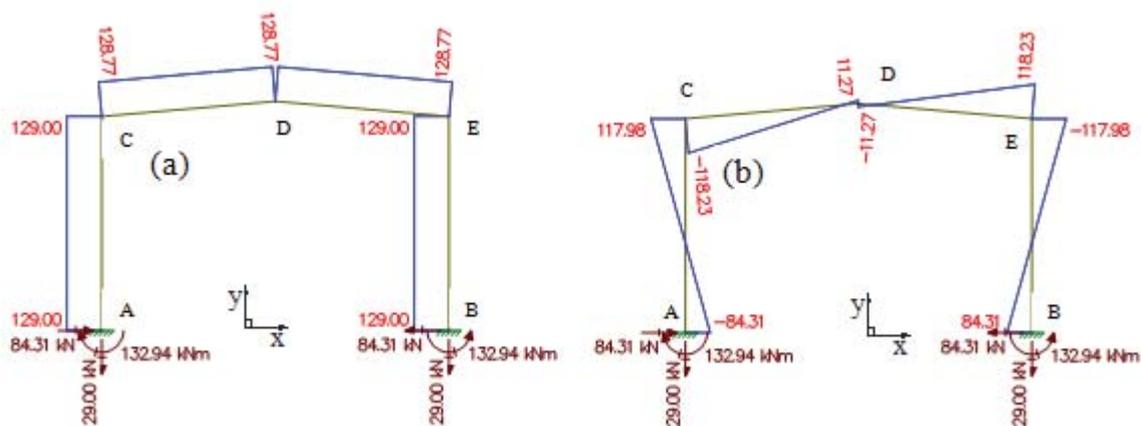
Figura B.4 - Combinações de cargas $F_{D,1}$, (a) momento e (b) deformação.



Fonte: Autor.

Nas Figuras B.5 (a) e (b), tem-se os esforços axial e cortante resultantes das combinações de cargas $F_{D,2}$ e apresentam as reações nas bases do pórtico.

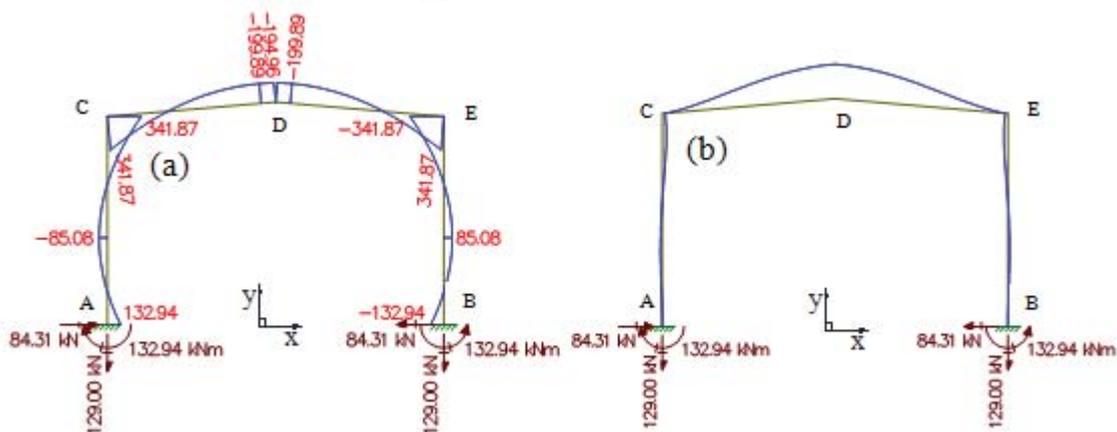
Figura B.5 - Combinações de cargas $F_{D,2}$, (a) esforço axial e (b) esforço cortante.



Fonte: Autor.

As Figuras B.6 (a) e (b) apresentam o momento resultante da combinação de cargas $F_{D,2}$ e a deformação do pórtico.

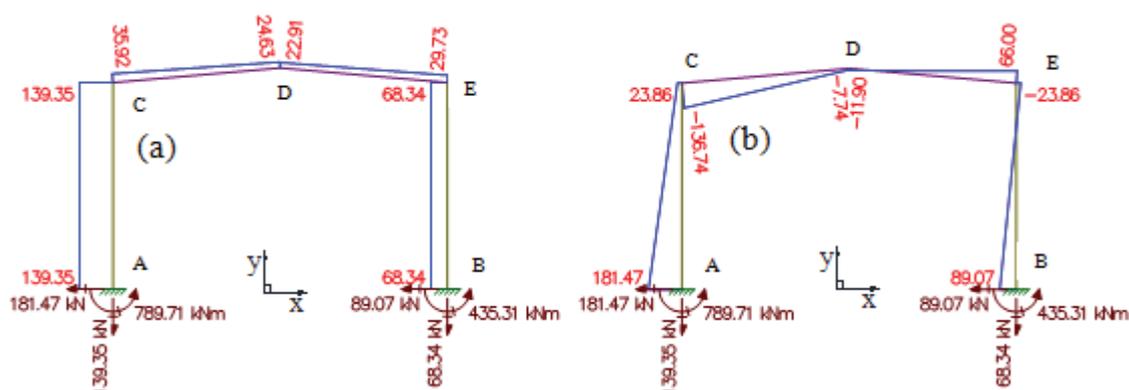
Figura B.6 - Combinações de cargas $F_{D,2}$, (a) momento e (b) deformação.



Fonte: Autor.

Abaixo seguem as Figuras B.7 (a) e (b) que apresentam os esforços axial e cortante, respectivamente, atuantes no pórtico devido á combinação de cargas $F_{D,3}$, também mostram as reações nas bases do pórtico.

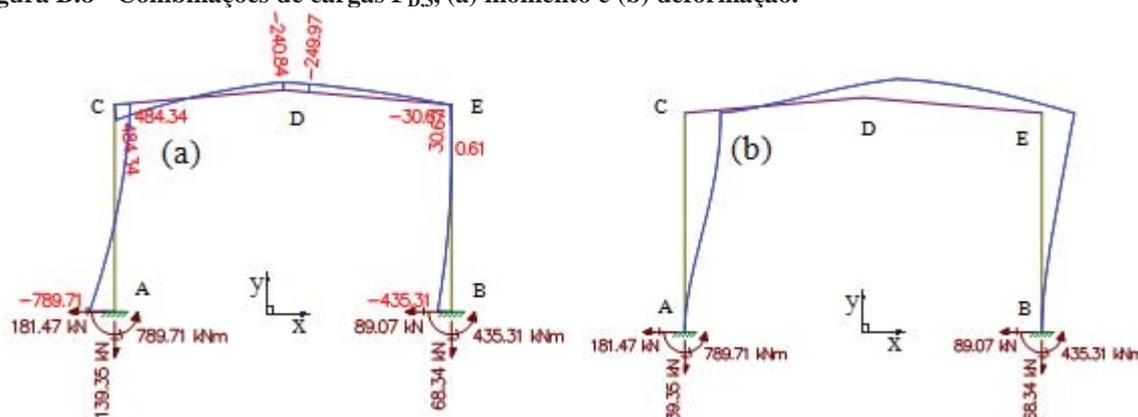
Figura B.7 - Combinações de cargas $F_{D,3}$, (a) esforço axial e (b) esforço cortante.



Fonte: Autor.

Nas Figuras B.8 (a) e (b) tem-se o resultado do momento devido à combinação de carga $F_{D,3}$ e o diagrama da deformação do pórtico.

Figura B.8 - Combinações de cargas $F_{D,3}$, (a) momento e (b) deformação.



Fonte: Autor.

Para simplificar a apresentação das ações no pórtico, é apresentada a Tabela B.1 - Resumo dos esforços nas bases do pórtico principal, contendo os valores dos esforços nas bases (A) e (B) do pórtico, onde:

N = esforço axial em kN;

M = momento fletor em kN.m, sendo o sentido horário com sinal negativo e o sentido anti-horário sinal positivo;

V = esforço cortante em kN.

Tabela B.1 - Resumo dos esforços nas bases do pórtico principal.

Bases	Tipos de esforços	Combinação FD,1	Combinação FD,2	Combinação FD,3
A	N (axial)	-70,3	129,0	139,4
	M (momento)	95,3	132,9	-789,7
	V (cortante)	-21,8	-84,3	181,5
B	N (axial)	-70,3	129,0	68,3
	M (momento)	-95,3	-132,9	-435,3
	V (cortante)	21,8	84,3	89,1

Fonte: Autor.

Através dos dados informados na Tabela B.1, conclui-se que os maiores esforços axiais, esforços cortantes e momentos atuantes no centro geométrico das bases A e B dos pilares metálicos, são os seguintes:

- a) esforços axiais de $139,4 \text{ kN}$ na base A e $129,0 \text{ kN}$ na base B;
- b) esforços cortantes de $181,5 \text{ kN}$ na base A e $89,1 \text{ kN}$ na base B;
- c) o momento fletor de $-789,7 \text{ kN.m}$ na base A e $-435,3 \text{ kN.m}$ na base B.

Utilizando-se destes dados, é realizado o cálculo dos componentes e do conjunto do sistema de movimentação do galpão metálico.