

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



ANDRÉ GUILHERME ALVES AMORIM

PROJETO DE ELEVADOR RESIDENCIAL

VITÓRIA – ES
JUNHO/2016

ANDRÉ GUILHERME ALVES AMORIM

PROJETO DE ELEVADOR RESIDENCIAL

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **André Guilherme Alves Amorim**, apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador:

Prof. Dr. Fernando César Meira
Menandro

VITÓRIA – ES
JUNHO/2016

ANDRÉ GUILHERME ALVES AMORIM

PROJETO DE ELEVADOR RESIDENCIAL

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **André Guilherme Alves Amorim**, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 23 de Junho de 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando César Meira Menandro
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Guilherme Fabiano Mendonça dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. Dr. Carlos Friedrich Loeffler Neto
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

A Jesus, porque dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas.

Agradeço a Deus, pois Ele é tudo que tenho e que sou. Sem a graça e a misericórdia Dele eu nada poderia fazer.

Sou muito grato aos meus pais, Marcelo e Elvira, pelo amor, exemplo, investimento e dedicação fundamentais para minha educação.

Ao meu irmão Arthur, pela amizade, companheirismo e orientação.

Agradeço às minhas avós, Eliza e Eni, por todo cuidado e apoio.

À minha namorada, Júlia, pelo amor, carinho, suporte e orações.

Aos meus familiares, tios, tias e primos de perto e de longe.

Sou muito grato aos amigos que tenho em Vitória e em Barra de São Francisco pelos bons momentos e maus momentos que passamos juntos.

Aos irmãos da Igreja Batista Viva, em especial ao GC Vitória e Pr. Elias, pelas orações, conselhos e amparo.

Aos colegas da turma 2011-1 pelos muitos momentos estudo durante toda a graduação e pelos momentos de descontração entre as aulas.

Sou muito grato aos meus colegas da Engenharia Ferroviária da Vale pela experiência, conhecimento e vivência de engenharia que me passaram durante o período do estágio.

Agradeço a Marilene, Nick e Carol pela amizade. Aprendi muito com vocês aqui em Vitória.

Ao meu orientador, professor Menandro, pelas ideias, conselhos, conhecimento que me transmitiu e pela disponibilidade durante a orientação desse trabalho.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os tipos de elevador, seus sistemas mecânicos e particularidades para seu uso residencial. São abordados, também, os fundamentos necessários para dimensionamento dos elementos do projeto, tanto de resistência dos materiais quanto os critérios para seleção de um motor elétrico. Além disso, foram estudadas as principais normas referentes ao tema para concepção de um projeto seguro e respaldado.

As etapas que estruturaram e pautaram o desenvolvimento do projeto foram descritas na metodologia apresentada no texto. Definiu-se o problema, objetivos, métricas e identificou-se as restrições. Ademais, foram determinadas funções, requisitos e meios para as funções, selecionando ao final dessa etapa o meio mais adequado.

Foram dimensionados e especificados os principais elementos estruturais e mecânicos para o funcionamento do elevador. A partir da especificação, calculou-se o custo total do equipamento e comparou-se com o preço de mercado de equipamentos semelhantes fabricados por empresas especializadas. Por fim, foram gerados desenhos de fabricação e uma montagem tridimensional geral do equipamento.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ELEVADOR A VÁCUO	24
FIGURA 2 - ELEVADORES HIDRÁULICOS	25
FIGURA 3 - ELEVADOR ELÉTRICO SEM CASA DE MÁQUINAS	26
FIGURA 4 - PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM ELEVADOR ELÉTRICO	27
FIGURA 5 - ESBOÇO DE UM ELEVADOR ELÉTRICO COM CASA DE MÁQUINAS	28
FIGURA 6 - ESBOÇO DE UM ELEVADOR SEM CASA DE MÁQUINAS.....	29
FIGURA 7 - ELEVADOR ELÉTRICO SEM CASA DE MÁQUINAS	30
FIGURA 8 -ELEVADOR RESIDENCIAL LEVITÂ	31
FIGURA 9 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO ELEVADOR RESIDENCIAL GEN2 ..	32
FIGURA 10 - ELEVADOR RESIDENCIAL EL H3.....	34
FIGURA 11 - DOMUSLIFT, O ELEVADOR RESIDENCIAL DA LIFTECH.....	35
FIGURA 12 - VIGA SIMPLEMENTE APOIADA COM CARGA CONCENTRADA EM SEU CENTRO	37
FIGURA 13 - VIGA SIMPLEMENTE APOIADA COM CARGAS CONCENTRADAS SIMÉTRICAS	37
FIGURA 14 - SELEÇÃO DE MOTOR CONSIDERANDO O CONJUGADO RESISTENTE DA CARGA.....	38
FIGURA 15 – ESTRUTURA DA CABINA.....	52
FIGURA 16 - NUMERAÇÃO DAS PEÇAS DA ESTRUTURA DA CABINA.....	56
FIGURA 17 - CROQUI DA VISÃO GERAL DO ELEVADOR	62
FIGURA 18 - CONTRAPESO	63
FIGURA 19 - DIAGRAMA DE CORPO LIVRE DA POLIA MOTRIZ.....	69
FIGURA 20 - W22 MOTOFREIO IR2 DA WEG.....	70
FIGURA 21 - DADOS ELÉTRICOS DO W22 MOTOFREIO IR2 DA WEG	71
FIGURA 22 - CFW100 - MINI INVERSOR DE FREQUÊNCIA	72
FIGURA 23 - CROQUI DE MODELAGEM DO GUIAMENTO DO CARRO.....	74
FIGURA 24 - FORÇAS NAS GUIAS LATERAIS DURANTE A OPERAÇÃO NORMAL	75
FIGURA 25 - DESIGN DA CAIXA DO ELEVADOR.....	79
FIGURA 26 - RESULTADO DE TENSÕES NA CAIXA EM MPA	80
FIGURA 27 - RESULTADOS DE DEFORMAÇÃO NA CAIXA EM MILÍMETROS	81

FIGURA 28 - DETALHE DAS TENSÕES NO SUPORTE DO MOTOR ELÉTRICO .	82
FIGURA 29 - DETALHE DAS DEFORMAÇÕES NO SUPORTE DO MOTOR ELÉTRICO.....	82
FIGURA 30 - DETALHE DAS TENSÕES NAS VIGAS DE SUPORTE DAS GUIAS.	83
FIGURA 31 - DETALHE DAS DEFORMAÇÕES NAS VIGAS DE SUPORTE DAS GUIAS	83
FIGURA 32 - LIMITADOR DE VELOCIDADE	84
FIGURA 33 - FREIO DE SEGURANÇA INSTANTÂNEO	85
FIGURA 34 - MONTAGEM DA CABINA E CONTRAPESO NA CAIXA	90
FIGURA 35 – MODELO TRIDIMENSIONAL COMPLETO	91
FIGURA 36 - DESENHO DE FABRICAÇÃO DA CABINA.....	100
FIGURA 37 - DESENHO DE FABRICAÇÃO DA ESTRUTURA DO CONTRAPESO	101
FIGURA 38 - DESENHO DE FABRICAÇÃO DA ESTRUTURA DA CAIXA	102
FIGURA 39 - DESENHO DA MONTAGEM GERAL DO ELEVADOR.....	103

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS ELEVADOR RESIDENCIAL LEVITÀ	32
TABELA 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ELEVADOR RESIDENCIAL GEN2	33
TABELA 3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ELEVADOR RESIDENCIAL EL H3	34
TABELA 4 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ELEVADOR RESIDENCIAL DOMUSLIFT	35
TABELA 5 - MATRIZ DE AVALIAÇÃO NUMÉRICA	48
TABELA 6 - RESULTADO DA MATRIZ DE AVALIAÇÃO NUMÉRICA.....	48
TABELA 7 - NÚMEROS DE PENALIZAÇÃO SELECIONADOS	54
TABELA 8 - DIMENSÕES PRINCIPAIS DA ESTRUTURA DA CABINA	55
TABELA 9 - VIGA 1 - CANTONEIRA DE ABAS IGUAIS	57
TABELA 10 - VIGA 2 - CANTONEIRA DE ABAS IGUAIS	58
TABELA 11 - VIGA 6 - TUBO QUADRADO	58
TABELA 12 - PEÇA 3 - CANTONEIRA DE ABAS IGUAIS	59
TABELA 13 - PEÇA 4 - CANTONEIRA DE ABAS IGUAIS	60
TABELA 14 - PEÇA 5 - CANTONEIRA DE ABAS IGUAIS	60
TABELA 15 - VIGA 7 - TUBO QUADRADO	61
TABELA 16 - VIGAS DA BASE DO CONTRAPESO.....	64
TABELA 17 - PEÇAS SOB TRAÇÃO DO CONTRAPESO.....	64
TABELA 18 - DIMENSIONAMENTO DOS CABOS DE AÇO	65
TABELA 19 - VERIFICAÇÃO DAS EXIGÊNCIAS DE ATRITO	67
TABELA 20 - POTÊNCIA DA MÁQUINA DE TRAÇÃO	70
TABELA 21 - DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS DE SUPORTE DO MOTOR.....	72
TABELA 22 – VERIFICAÇÃO DE FLAMBAGEM	76
TABELA 23 - PROPRIEDADES DO PERFIL T 50/A.....	77
TABELA 24 - CÁLCULO DA FORÇA DE FRENAGEM	77
TABELA 25 - VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA SOB TENSÃO COMBINADA	78
TABELA 26 - CÁLCULO DAS DEFORMAÇÕES	78
TABELA 27 - LISTA DE MATERIAIS ESPECIFICADOS.....	86
TABELA 28 - COTAÇÕES COM FABRICANTES ESPECIALIZADOS.....	88
TABELA 29 - CUSTO DE UTILIZAÇÃO MENSAL DO MOTOR ELÉTRICO	89

TABELA 30 - CUSTO DE UTILIZAÇÃO MENSAL DAS LÂMPADAS 89

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - MEIOS PARA AS FUNÇÕES.....	45
QUADRO 2 - ALTERNATIVAS DE PROJETO.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Cab	Cabina
CLP	Controlador Lógico Programável
Cont	Contrapeso
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Normalização no Mercosul
NP	Número de Penalização

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Desaceleração de frenagem (m/s^2)
A	Área (m^2)
A_{minimo}	Área de seção transversal mínima necessária (m^2)
$A_{utilizado}$	Área de seção transversal do perfil selecionado (m^2)
C_1	Coefficiente de aceleração (adimensional)
C_2	Coefficiente referente ao tipo de polia motriz (adimensional)
C_{max}	Conjugado máximo (N.m)
C_p	Conjugado de partida (N.m)
C_r	Conjugado da carga (N.m)
d	Diâmetro dos cabos de suspensão (mm)
D	Diâmetro primitivo da polia motriz (mm)
e	Excentricidade da força de frenagem em relação à linha da guia (mm)
e_n	Base dos logaritmos naturais (adimensional)
E	Módulo de elasticidade (Pa)
f	Coefficiente de atrito dos cabos contra as ranhuras da polia motriz (adimensional)
f_{max}	Deflexão máxima (mm)
F	Força (N)
F_b	Força de frenagem (N)
F_x	Força transversal na guia (N)
F_y	Força radial na guia (N)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
I	Momento de inércia (cm^4)
I_{minimo}	Momento de inércia mínimo necessário (cm^4)
$I_{utilizado}$	Momento de inércia do perfil selecionado (cm^4)
I_x	Momento de inércia no eixo x-x das guias (cm^4)
I_y	Momento de inércia no eixo y-y das guias (cm^4)
k_x	Raio de giração de flambagem no eixo x-x (mm)
k_y	Raio de giração de flambagem no eixo y-y (mm)
K	Massa total do carro (kg)
l	Comprimento (m)

M_x	Momento máximo de flexão no eixo x-x (N.m)
M_y	Momento máximo de flexão no eixo y-y (N.m)
n	Velocidade nominal do motor (rpm)
n_c	Número de cabos (cabos)
n_d	Coefficiente de segurança (adimensional)
n_s	Velocidade síncrona do motor (rpm)
p	Pressão específica (MPa)
$P_{contrapeso}$	Massa do contrapeso (kg)
P_{cr}	Força crítica de flambagem (N)
P_{maq}	Potência demandada da máquina elétrica (kW)
P_{mec}	Potência mecânica necessária para acionar a polia motriz (kW)
Q	Carga útil (kg)
r	Raio nominal da polia motriz (mm)
S_r	Índice de esbeltez da guia (mm ³)
S_{rD}	Índice de esbeltez crítico da guia (mm ³)
t	Somatório dos números de penalização (adimensional)
T	Força estática nos cabos do carro ao nível da polia motriz (N)
T_1	Maior das forças estáticas dos ramos da polia motriz (N)
T_2	Menor das forças estáticas dos ramos da polia motriz (N)
T_{caso1}	Força no ramo do carro da polia motriz no caso 1 (N)
T_{caso2}	Força no ramo do carro da polia motriz no caso 2 (N)
$T_{contrapeso}$	Força no ramo do contrapeso da polia motriz (N)
v	Velocidade nominal do carro (m/s)
Z_x	Momento de resistência à flexão no eixo x (mm ³)
Z_y	Momento de resistência à flexão no eixo y (mm ³)
α	Ângulo de abraçamento dos cabos na polia motriz (graus)
β	Ângulo da garganta dos cabos na polia motriz (graus)
γ	Ângulo da ranhura V da polia motriz (graus)
δ	Deslocamento (mm)
δ_{max}	Deslocamento máximo (mm)
$\delta_{resultante}$	Deflexão resultante nas guias (mm)
δ_x	Deflexão no plano x-x das guias (mm)
δ_y	Deflexão no plano y-y das guias (mm)

ϵ	Deformação (%)
η_{red}	Rendimento do redutor (adimensional)
μ	Coefficiente de atrito entre os cabos de aço e o ferro fundido das polias (adimensional)
σ	Tensão (MPa)
σ_{comb}	Tensão combinada de deformação e pressão (MPa)
σ_y	Tensão de escoamento (MPa)
τ_{mec}	Torque mecânico (N.m)
ω_{polia}	Velocidade angular nominal da polia motriz (rad/s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Apresentação	18
1.2	Justificativa	19
1.3	Objetivos	20
1.3.1	Objetivos Gerais	20
1.3.2	Objetivos Específicos	20
1.4	Organização do Texto	20
1.4.1	Embasamento Teórico	21
1.4.2	Metodologia de Projeto	21
1.4.3	Desenvolvimento do Projeto	21
1.4.4	Resultados	21
1.4.5	Considerações Finais	21
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	22
2.1	Elevadores e suas Tecnologias	22
2.1.1	Terminologia de Componentes para Elevadores	22
2.1.2	Tipos de Elevadores	23
2.1.3	Componentes de Elevadores Elétricos	26
2.1.4	Funcionamento	27
2.1.5	Elevador sem Casa de Máquinas	29
2.1.6	Tecnologias de Mercado para Elevadores Residenciais	31
2.2	Resistência dos Materiais	36
2.2.1	Deformação Elástica com Carregamento Axial	36
2.2.2	Deflexão de Vigas	36
2.3	Especificação de um Motor Elétrico	37
2.4	Normas Relevantes	39
2.4.1	ABNT NBR 12892:2009	39
2.4.2	ABNT NBR NM 207:1999	39
2.4.3	ABNT NBR 16042:2012	39
2.4.4	ABNT NBR 8800:2008	40
3	METODOLOGIA DO PROJETO	41
3.1	Definição do problema	41

3.1.1 Estabelecer Objetivos	41
3.1.2 Estabelecer Métricas para os Objetivos	42
3.1.3 Identificar Restrições	42
3.1.4 Revisão da declaração de problema do cliente.....	42
3.2 Projeto Conceitual.....	43
3.2.1 Estabelecer Funções	43
3.2.2 Estabelecer Requisitos	44
3.2.3 Estabelecer Meios para as Funções	45
3.2.4 Gerar Alternativas de Projeto.....	46
3.2.5 Refinar e Aplicar Métricas nas Alternativas de Projeto.....	47
3.3 Projeto Preliminar	48
3.3.1 Modelar e Analisar o Projeto Escolhido	49
3.3.2 Testar e Avaliar o Projeto Escolhido	49
3.4 Projeto Detalhado	49
3.4.1 Refinar e Otimizar o Projeto Escolhido	49
3.4.2 Designar e Corrigir os Detalhes do Projeto	49
3.5 Comunicação do Projeto.....	50
3.5.1 Documentar o Projeto Final	50
4 DESENVOLVIMENTO DE PROJETO	51
4.1 Cabina	51
4.2 Contrapeso	62
4.3 Cabos e Polias.....	65
4.4 Máquina de Tração	68
4.5 Guias para o Carro e para o Contrapeso	73
4.6 Caixa	79
4.7 Dispositivos de Segurança.....	84
4.7.1 Limitador de Velocidade	84
4.7.2 Freio de Segurança	85
5 RESULTADOS.....	86
5.1 Manutenção	86
5.2 Lista de Materiais.....	86
5.3 Avaliação da Viabilidade Econômica.....	87
5.3.1 Estimativa de Custo do Equipamento	87
5.3.2 Custo Médio de Utilização	88

5.4 Modelo Tridimensional Completo	89
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
APÊNDICE A	99

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo inicial tem-se a visão geral do trabalho e do conteúdo explorado. Primeiramente é feita uma apresentação geral do tema estudado, seu histórico, e conjuntura atual. A seguir tem-se uma breve justificativa da escolha do tema e o nicho em que se encontra este trabalho, depois são expostos os objetivos gerais e específicos almejados. Por fim, apresenta-se a maneira como foi estruturado o trabalho e a divisão dos capítulos.

1.1 Apresentação

A palavra elevador é oriunda das expressões em latim “*elevātor*” e “*ōris*” que significam o que eleva, ergue, levanta, do verbo *elevār*, elevar [1]. Por definição, elevador é o que eleva, máquina elevatória; ascensor [2]. Historiadores afirmam que os primeiros elevadores foram construídos no Egito cerca de 1500 a.C para utilizar água do rio Nilo no abastecimento das plantações. Acredita-se também que as grandes pirâmides do Egito tenham sido erguidas com a ajuda de guindastes primitivos baseados em cordas e apoios [3]. Em 236 aC, Arquimedes desenvolveu um guindaste operado por polias e cordas que eram enroladas num tambor através de um cabrestante e alavancas. A primeira menção do que podemos chamar de “elevador”, que se tem registro, data de 110 aC, quando o arquiteto e engenheiro romano Vitrúvio criou o primeiro guincho manual. Essas máquinas eram movidas pela força humana ou por tração animal. Mas foi só depois da Revolução Industrial, no século XIX, que a máquina a vapor possibilitou a construção de elevadores fixos para transportar materiais e, principalmente, pessoas. O primeiro sistema de segurança que impede a queda do elevador em caso de rompimento das cordas foi criado em 1852 pelo americano Elisha Grave Otis. Era baseado em trilhos serrilhados que prendiam a plataforma se ela perdesse sustentação [3].

Sabe-se que o crescimento e a verticalização dos grandes centros urbanos é diretamente relacionado ao desenvolvimento das tecnologias de elevação e transporte, pois viabilizou a construção e a valorização de edifícios mais altos. A maior parte da arquitetura dos séculos XX e XXI seria impossível sem o advento do elevador. Curiosamente, o desenvolvimento dos elevadores fez uma revolução no mercado imobiliário porque, a partir de sua larga utilização, houve uma inversão nos

valores dos imóveis. Antes, os apartamentos e escritórios que estivessem nos primeiros andares eram mais caros em virtude da menor dificuldade de acesso por meio das escadas. No entanto, atualmente os imóveis mais valorizados são de cobertura.

A instalação de elevadores em sobrados e residências é uma tendência dos dias atuais. Um elevador sempre será um diferencial em qualquer residência, seja na sua casa, ou em um investimento imobiliário. É um excelente investimento financeiro. A valorização do imóvel é muito maior do que o valor investido no elevador. Ademais, com o envelhecimento da população e a crescente inclusão social de pessoas com dificuldade de locomoção, aumenta-se a necessidade em oferecer autonomia e mobilidade, inclusive dentro de casa. Adquirir ou construir uma casa térrea, com acessibilidade, tornou-se uma tarefa cada vez mais difícil, devido ao alto custo dos terrenos nos grandes centros urbanos [4]. Além de todo conforto e comodidade proporcionados por um elevador, o equipamento também promove acessibilidade. O termo acessibilidade significa incluir a pessoa com deficiência na participação de atividades como o uso de produtos, serviços e informações. Atualmente, essa questão vem sendo marcada por grandes conquistas para a inclusão social [5]. Cientes disso, cresce a importância do aprimoramento dessas tecnologias para o uso residencial.

Neste trabalho, são lançadas as bases para a concepção e projeto estrutural e mecânico de elevador residencial para 3 pavimentos.

1.2 Justificativa

O presente trabalho se justifica porque o projeto de um elevador residencial torna-se muito importante quando observa-se que o equipamento é capaz de promover acessibilidade e melhorar a qualidade de vida de seus usuários. Ademais, é proporcionada a condição de aplicar os conceitos adquiridos durante o curso de engenharia mecânica, principalmente relativos a sistemas mecânicos, e ainda adquirir novos conhecimentos a respeito desse tipo de tecnologia. De fato, a concepção de um projeto agrega muita experiência ao estudante de engenharia, visto que para sua realização é necessário lançar mão de diversas técnicas de modelagem para a solução de problemas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

O objetivo desse trabalho é conceber e projetar estruturalmente e mecanicamente um elevador residencial para uma residência de 3 pavimentos. O equipamento deve ser capaz de transpor pessoas e cargas entre os andares da casa com segurança e praticidade.

Complementarmente, deve ser viável a um baixo custo de construção, instalação, operação e manutenção devido ao fato do projeto ser aplicado em uma residência. Devemos balancear durante o projeto a performance, custo, segurança e praticidade.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar estruturalmente a cabina e o contrapeso;
- Analisar a estrutura da caixa pelo método dos elementos finitos;
- Dimensionar conforme as normas os cabos de aço para tração e as polias;
- Especificar a máquina de tração e o redutor necessário;
- Especificar as guias para o carro e o contrapeso;
- Especificar equipamentos de segurança;
- Verificar a disponibilidade comercial dos elementos do projeto;
- Avaliar o custo do projeto;
- Modelar tridimensionalmente o equipamento montado.

1.4 Organização do Texto

O presente trabalho é dividido em sete capítulos. Iniciou-se com uma introdução, apresentando o tema e sua relevância, em seguida é feito o embasamento teórico, mais adiante descreve-se a metodologia adotada, prosseguindo tem-se o desenvolvimento do projeto, os resultados obtidos, as considerações finais e, por fim, as referências bibliográficas.

1.4.1 Embasamento Teórico

No capítulo 2 são apresentadas as bases teóricas sobre as quais foi executado esse trabalho. Têm-se a descrição dos componentes de um elevador e as adaptações disponíveis para seu uso residencial, a teoria de resistência dos materiais aplicada para o dimensionamento do equipamento, o princípio para a especificação de um motor elétrico e as principais informações contidas em norma para elevadores.

1.4.2 Metodologia de Projeto

Faz-se no capítulo o desenvolvimento da metodologia de projeto com base no modelo proposto pelo livro Introdução à Engenharia: Uma Abordagem Baseada em Projeto [6]. O livro agrega ao trabalho a metodologia de projeto. E os exemplos mencionados durante seu texto foram fundamentais para compreensão e aplicação dos conceitos apresentados. Têm-se os conceitos e definições fundamentais, as etapas do desenvolvimento do projeto e as especificações de cada etapa do projeto.

1.4.3 Desenvolvimento do Projeto

Tendo-se bem claras as etapas do projeto, no capítulo 4 apresentam-se os cálculos e métodos adotados para dimensionamento e especificação dos componentes. São detalhados os cálculos e simplificações utilizadas. Nesse capítulo tem-se ainda a apresentação do design dos componentes do projeto.

1.4.4 Resultados

São apresentados no capítulo 5 os resultados obtidos por meio dos processos mencionados no desenvolvimento. Avalia-se economicamente o projeto e monta-se o modelo tridimensional completo com os componentes dimensionados e selecionados.

1.4.5 Considerações Finais

São feitas as considerações finais a respeito dos resultados obtidos, a avaliação dos objetivos traçados e sugestões de trabalhos futuros relacionados ao tema abordado.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Elevadores e suas Tecnologias

2.1.1 Terminologia de Componentes para Elevadores

Para o melhor entendimento, é necessário que sejam definidos alguns termos usualmente empregados em instalação de elevadores. Definem-se da seguinte maneira as principais terminologias de componentes para elevadores:

- Ascensor ou elevador: aparelho estacionário provido de cabina que se move aproximadamente na vertical entre guias, servindo a níveis distintos e destinado ao transporte de pessoas e carga [7].
- Botão (chave) de emergência: dispositivo de acionamento manual destinado a paralisar o carro e mantê-lo parado [7].
- Cabina: parte do elevador que transporta passageiros e objetos [8].
- Caixa: espaço onde o carro e o contrapeso viajam. Este espaço é limitado pelo fundo do poço, pelas paredes e pelo teto [8].
- Carga nominal: Carga para a qual o equipamento foi construído [9].
- Casa de máquinas: recinto destinado à localização da máquina, painel de comando e outros dispositivos destinados ao funcionamento dos elevadores [7].
- Contrapeso: conjunto formado por armação, pesos e acessórios destinados à contrabalançar o peso do carro e parte da carga nominal [7].
- Freio de segurança: dispositivo de segurança fixado na armação do carro ou do contrapeso, destinado a para-los de maneira progressiva ou instantânea prendendo-os às guias quando acionado [7].
- Limitador de velocidade: Dispositivo que, quando o elevador atinge uma velocidade predeterminada, causa a parada do elevador e, se necessário, aciona o freio de segurança [9].
- Nivelamento: Operação que proporciona precisão de parada nos pavimentos [9].
- Máquina: conjunto destinado a movimentar o carro, constituído principalmente de motor, polia de tração (ou tambor) e freio [7].
- Percurso: distância percorrida pelo carro entre as paradas extremas [7].

- Poço: parte da caixa situada abaixo do nível de parada mais baixo servido pelo elevador [8].
- Velocidade nominal: velocidade do carro, em metros por segundo (m/s), para a qual o equipamento foi construído [8].

2.1.2 Tipos de Elevadores

Existem diversos tipos e modelos de elevadores disponíveis no mercado atualmente. No entanto os tipos mais utilizados em residência são os equipamentos hidráulicos e elétricos. Menos usuais, porém não desprezíveis, ainda existem os elevadores a vácuo.

Os elevadores a vácuo, conforme a Figura 1, tem seu princípio de funcionamento baseado na sucção de ar para causar uma diferença de pressão, fazendo o equipamento subir, remetendo-se ao princípio de funcionamento de uma seringa. Sua descida é controlada a partir do alívio na pressão do ar abaixo do carro. Porém, seu uso é limitado a pequenos tamanhos e baixas cargas. Somado a isso, ainda há o inconveniente de que o equipamento é ruidoso devido à atuação do compressor [10].

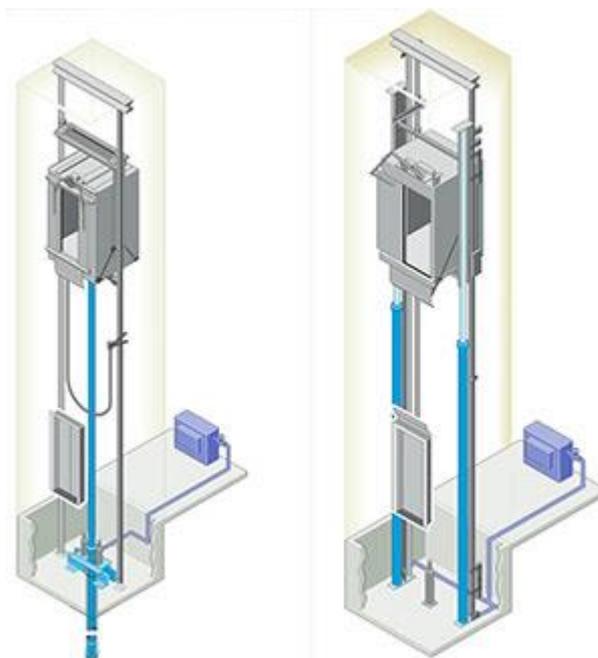
Figura 1 - Elevador a vácuo



Fonte: [11]

Os elevadores hidráulicos, mostrados na Figura 2, são movidos por um pistão hidráulico que normalmente se situa abaixo do equipamento. Anteriormente, maiores vantagens na aplicação desse tipo de acionamento em residências eram a eliminação da casa de máquinas no telhado da casa e a possibilidade de descida controlada do equipamento por gravidade em caso de falha na alimentação. Além disso, os elevadores hidráulicos proporcionavam um maior conforto aos passageiros durante a viagem. No entanto, algumas limitações importantes surgem a partir de sua aplicação. Equipamentos hidráulicos costumam ser mais lentos e menos energeticamente eficientes em relação aos elevadores elétricos. Outro problema é a utilização dos fluidos de trabalho, visto que existem prejuízos ambientais e sanitários resultantes de um possível vazamento de óleo e também o custo de manutenção é mais elevado [10].

Figura 2 - Elevadores hidráulicos



Fonte: [12]

Com o desenvolvimento e aprimoramento dos elevadores elétricos, superou-se o conforto aos passageiros durante a viagem. Novas tecnologias surgiram e permitiram a instalação de elevadores elétricos sem a necessidade da presença da casa de máquinas, vide Figura 3, permitindo a sua aplicação mesmo em locais com espaço limitado. Mais uma vantagem do equipamento elétrico é o menor ruído gerado por seu funcionamento porque os elevadores hidráulicos necessitam de uma moto-bomba. Aliado a um menor custo de manutenção, esse tipo de equipamento também é mais eficiente energeticamente, características que são altamente desejáveis em uma instalação residencial [10].

Figura 3 - Elevador elétrico sem casa de máquinas

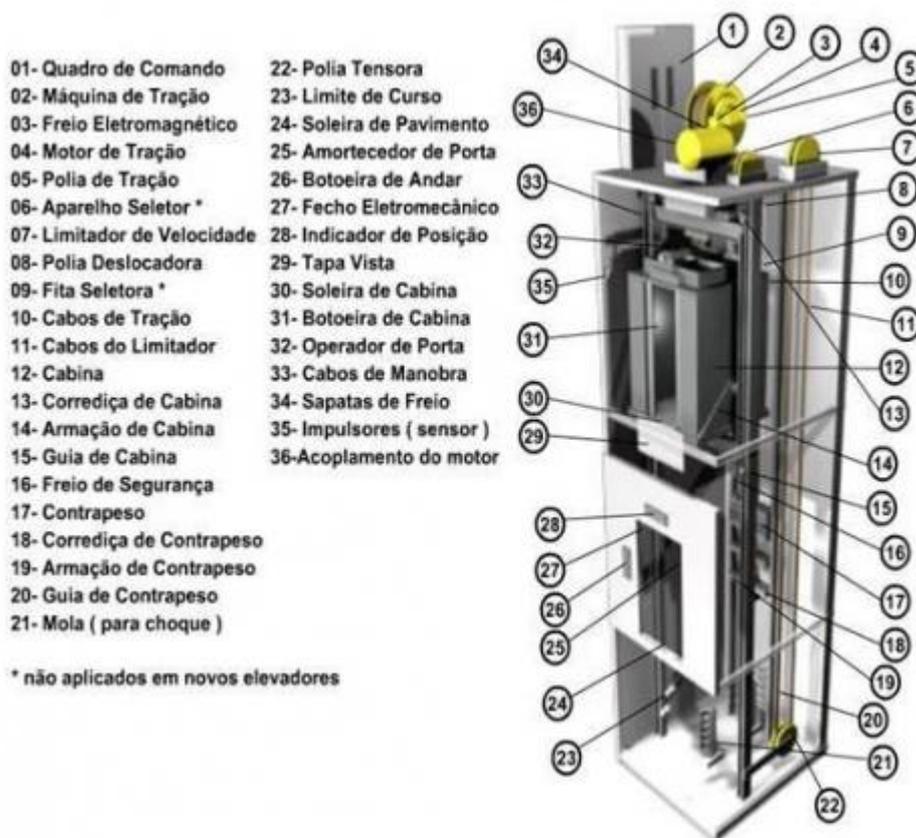


Fonte: [13]

2.1.3 Componentes de Elevadores Elétricos

Apesar de existirem alguns modelos de elevadores elétricos, há, no entanto, algumas convergências no que se refere aos seus componentes. Em geral, não há variações significativas nos principais componentes do equipamento. Apresenta-se a seguir, na Figura 4, um esquemático representando as partes e peças mais importantes de um elevador elétrico.

Figura 4 - Principais componentes de um elevador elétrico



Fonte: [14]

2.1.4 Funcionamento

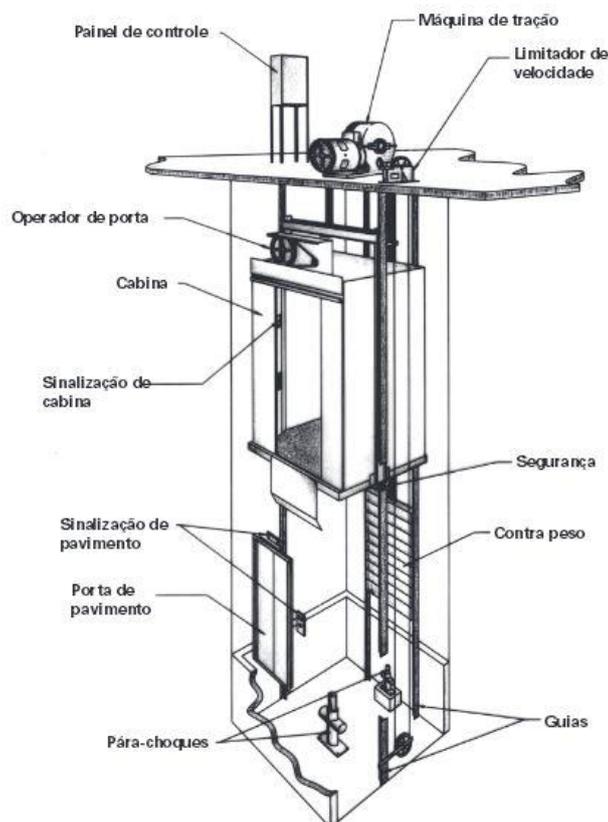
Em geral, como mostrado na Figura 5, monta-se a cabina sobre uma plataforma que por sua vez é sustentada por uma armação de aço. Ao conjunto formado por armação, cabina e plataforma denomina-se carro. O contrapeso é constituído por uma armação metálica formada por duas longarinas e dois cabeçotes, onde se fixam os pesos (intermediários), de tal forma que o conjunto tenha um peso total igual ao do carro acrescido de 40 a 50% da capacidade licenciada. As guias são trilhos de aço do tipo T sobre as quais deslizam o carro e o contrapeso por meio de corrediças. A fixação das guias é feita em suportes de aço chumbados em vigas, sejam de concreto ou de aço, na caixa.

O carro e o contrapeso são suspensos por cabos de aço ou novos elementos de tração que passam por polias, de tração e de desvio, instaladas na casa de máquinas ou na parte superior da caixa, conforme Figura 6. O movimento de subida

e descida do carro e do contrapeso é proporcionado pela máquina de tração, que imprime à polia a rotação necessária para garantir a velocidade especificada para o elevador. Para que haja o controle operacional do elevador, há a necessidade de controlar a corrente elétrica do motor, garantindo a aceleração e o retardamento do sistema. A parada é feita pela ação de um freio instalado na máquina. Além desse freio normal, é exigido por norma, por questões de segurança, que o elevador seja dotado de um freio de segurança para situações de emergência. O freio de segurança é um dispositivo fixado na armação do carro ou do contrapeso, destinado a pará-los, de maneira progressiva ou instantânea, prendendo-os às guias quando acionado pelo limitador de velocidade. Sua atuação é mecânica.

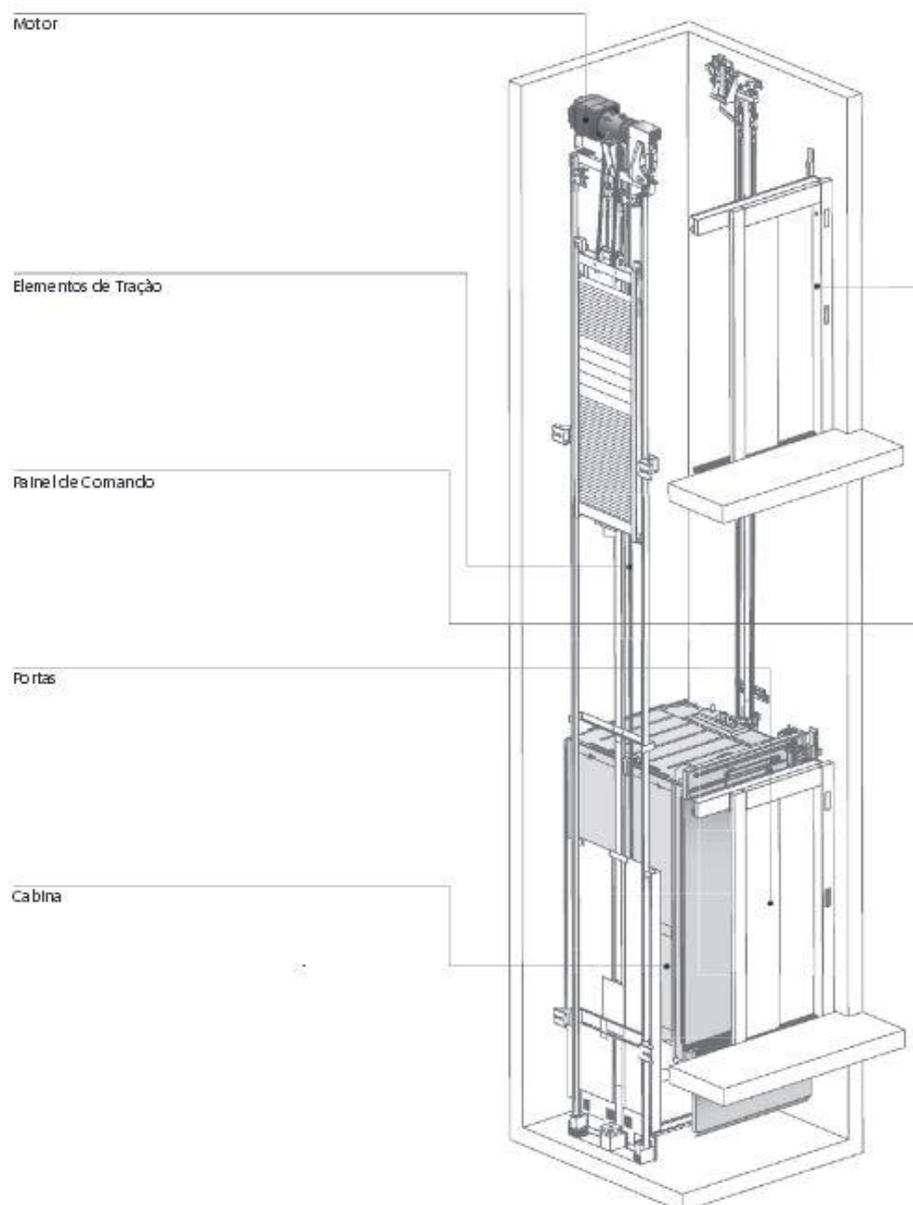
O limitador de velocidade, por sua vez, é um dispositivo montado no piso da Casa de Máquinas ou no interior da caixa, constituído basicamente de polia, cabo de aço e interruptor. Quando a velocidade do carro ultrapassa um limite preestabelecido, o limitador aciona mecanicamente o freio de segurança e desliga o motor do elevador [15].

Figura 5 - Esboço de um elevador elétrico com casa de máquinas



Fonte: [15]

Figura 6 - Esboço de um elevador sem casa de máquinas



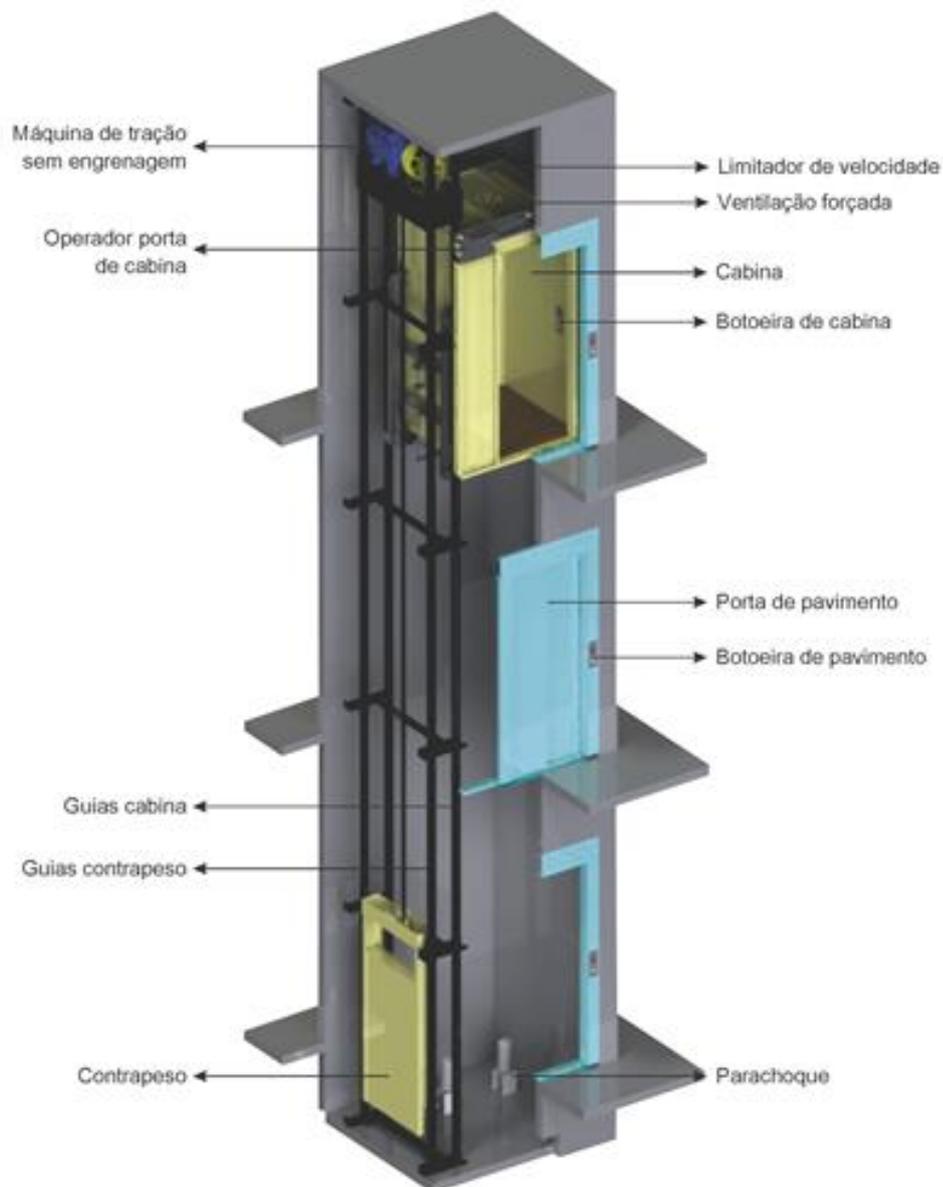
Fonte: [15]

2.1.5 Elevador sem Casa de Máquinas

Para que um elevador elétrico possa ser instalado sem a necessidade de casa de máquinas, algumas mudanças na configuração dos componentes são necessárias. Entretanto, a partir de pequenas mudanças na seleção dos componentes é possível provocar uma grande redução no espaço exigido para a instalação do equipamento, conforme mostrado na Figura 7. A máquina de tração e o limitador de velocidade se

encontram acima das guias do carro e do contrapeso. Além disso, é necessário obter alguma alternativa para a instalação do quadro de comando.

Figura 7 - Elevador elétrico sem casa de máquinas



Fonte: [16]

Para as instalações residenciais os equipamentos sem casa de máquinas são muito vantajosos em relação aos equipamentos convencionais, porém se limitam a equipamentos de médio e pequeno porte. As vantagens dos sistemas sem casa de máquina em relação aos sistemas convencionais são exemplificadas por [17]:

- Menor tempo de manutenção;
- Menor custo de manutenção;

- Menor custo com mão-de-obra durante a construção;
- Maior liberdade no projeto arquitetônico;
- O equipamento ocupa menos espaço, possibilitando maior área útil para o edifício;
- Menos peças móveis, a fim de obter maior durabilidade e confiabilidade;
- Baixa interferência no processo construtivo.

2.1.6 Tecnologias de Mercado para Elevadores Residenciais

Existem algumas empresas no mercado especializadas em projeto e instalação de elevadores residenciais. Os maiores fabricantes de elevadores no mundo também possuem linhas que atendem ao segmento residencial. Destacam-se dentre os fabricantes de elevadores residenciais a Thyssenkrupp Elevadores, com a linha residencial Levità, a Otis Elevadores, com o modelo Gen2, a Montele Elevadores e, por fim, a Liftech Tecnologia para Elevadores, com a linha DomusLift. Apresentam-se as peculiaridades dos diferentes modelos a seguir.

A seguir tem-se a Figura 8, mostrando o modelo Levità da Thyssenkrupp Elevadores instalado em uma residência. Suas especificações são descritas na Tabela 1.

Figura 8 -Elevador residencial Levità



Fonte: [18]

Tabela 1 – Especificações técnicas elevador residencial Levità

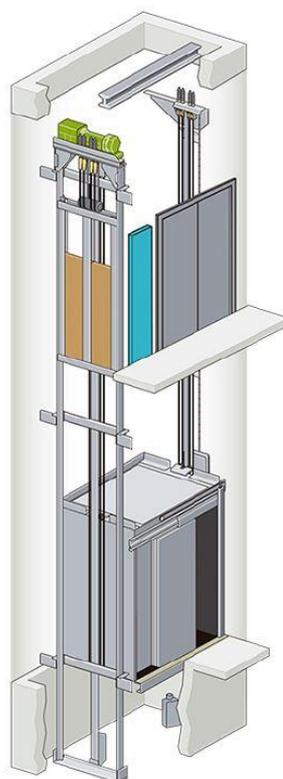
Características Técnicas	
Número de passageiros	3
Capacidade de carga [kg]	225
Máquina	Com sistema de engrenagem
Potência [kW]	2,2
Controle	Microprocessado com sistema de controle VVVF

Fonte: [18]

O Levità possui um sistema de no-break de emergência que permite que o passageiro complete a viagem mesmo que haja interrupção da fonte de alimentação. Além disso, visando a economia de energia, o equipamento também dispõe de um sistema de sleeping que desliga automaticamente as luzes da cabina após dez minutos de inatividade.

Outro modelo de destaque no cenário de elevadores residenciais é o Gen2 da Otis Elevadores, apresentado na Figura 9. Segue na Tabela 2 as suas especificações.

Figura 9 – Desenho esquemático do elevador residencial Gen2



Fonte: [17]

Tabela 2 - Especificações técnicas do elevador residencial Gen2

Características Técnicas	
Capacidade de carga [kg]	de 180 a 630
Número de passageiros	2 a 8
Velocidade [m/s]	1
Curso Máximo [m]	45
Máquina	Gearless com motor de indução permanente
Controlador	Sistema de controle modular

Fonte: [17]

Os maiores diferenciais do Gen2 são a utilização de cintas com alma de aço revestidas de poliuretano e a utilização de um sistema de recuperação de energia cinética. Isso pode ser vantajoso, visto que a utilização de cintas proporciona o uso de polias menores, possibilita configurações mais compacta e reduz o consumo de energia. Além disso, o sistema de recuperação de energia aumenta a eficiência do equipamento ao injetar de volta no sistema uma energia que seria desperdiçada. No entanto, a disponibilidade desse tipo de cintas no mercado é muito restrita e o custo do equipamento é maior.

A Montele Elevadores apresenta alguns modelos para percursos de até doze metros, evidencia-se dentre os modelos o EL H3. Figura 10. Segue mais adiante a Tabela 3 indicando suas especificações técnicas.

O EL H3 apresenta um baixo consumo de energia elétrica, o fabricante afirma que seu consumo é inferior ao consumo de um chuveiro elétrico. Ademais, o equipamento também possui um no-break para o caso de falha na alimentação e as portas automáticas são itens de série.

Figura 10 - Elevador residencial EL H3



Fonte: [19]

Tabela 3 - Especificações técnicas do elevador residencial EL H3

Características Técnicas	
Número de passageiros	3
Capacidade de carga [kg]	225
Velocidade [m/s]	0,35
Percurso [m]	12

Fonte: [19]

Finalmente, o elevador residencial desenvolvido pela Liftech, o Domuslift, é apresentado adiante na Figura 11. Também apresenta-se a Tabela 4 destacando as características técnicas do elevador residencial.

Figura 11 - Domuslift, o elevador residencial da Liftech



Fonte: [20]

Tabela 4 - Especificações técnicas do elevador residencial Domuslift

Características Técnicas	
Capacidade de carga [kg]	400
Número de passageiros	3 a 4
Velocidade [m/s]	0,15
Curso Máximo [m]	15
Máquina	Hidráulica de um ou dois pistões
Potência [kW]	2,2

Fonte: [20]

2.2 Resistência dos Materiais

2.2.1 Deformação Elástica com Carregamento Axial

É amplamente conhecida a relação entre carga axial e tensão, conforme indicada na Equação 2.1. Sabe-se que a razão entre força axial e área representa a tensão em um elemento tracionado. Também é sabida a relação entre tensão, módulo de elasticidade e deformação é expressa pela lei de Hooke, conforme a Equação 2.2.

$$\sigma = \frac{F(x)}{A(x)} \quad (2.1)$$

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.2)$$

Define-se a deformação segundo a Equação 2.3 abaixo:

$$\epsilon = \frac{d\delta}{dx} \quad (2.3)$$

Combinando as equações, tem-se a Equação 2.4 e

$$\frac{F(x)}{A(x)} = E \cdot \frac{d\delta}{dx} \quad (2.4)$$

$$\delta = \int_0^l \frac{F(x) \cdot dx}{A(x) \cdot E} \quad (2.5)$$

Desse modo, caso não haja variação na seção transversal, o material seja homogêneo e a carga seja uniforme ao longo do comprimento da barra, tem-se a Equação 2.6 [21].

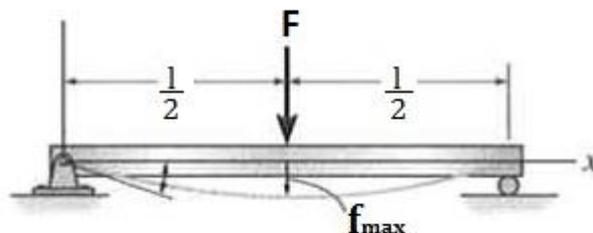
$$\delta = \frac{F \cdot l}{A \cdot E} \quad (2.6)$$

2.2.2 Deflexão de Vigas

Alguns métodos para cálculo de deflexão de vigas já são bastante difundidos na literatura. São eles: o método da integração direta, método dos momentos de áreas e o método da superposição de efeitos. Alguns casos clássicos já tem sua integração desenvolvida e, por conseguinte, uma equação que rege sua deflexão

máxima, conforme a Figura 12, cuja deflexão máxima é dada pela Equação 2.7 e conforme a Figura 13, cuja deflexão máxima é calculada pela Equação 2.8.

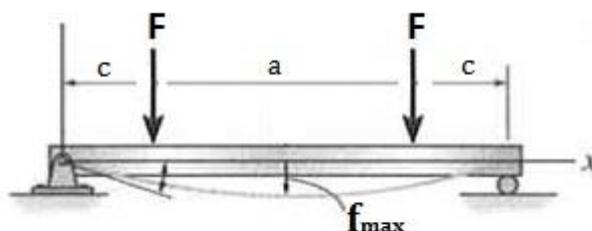
Figura 12 - Viga simplesmente apoiada com carga concentrada em seu centro



Fonte: Adaptado de [30]

$$f_{max} = \frac{Fl}{48EI} \quad (2.7)$$

Figura 13 - Viga simplesmente apoiada com cargas concentradas simétricas



Fonte: Adaptado de [30]

$$f_{max} = \frac{F \cdot l^3}{24 \cdot E \cdot I} \cdot (3a^2 + 8c^2 + 12ac) \quad (2.8)$$

2.3 Especificação de um Motor Elétrico

Na engenharia de aplicação de motores é comum e, em muitos casos práticos, comparar as exigências da carga com as características do motor. Existem muitas aplicações que podem ser corretamente acionadas por mais de um tipo de motor, e a seleção de um determinado tipo, nem sempre exclui o uso de outros tipos [22].

A seleção do tipo adequado de motor, com respeito ao conjugado, fator de potência, rendimento e elevação de temperatura, isolamento, tensão e grau de proteção mecânica, deve também levar em consideração:

- Custo inicial;
- Capacidade da rede;

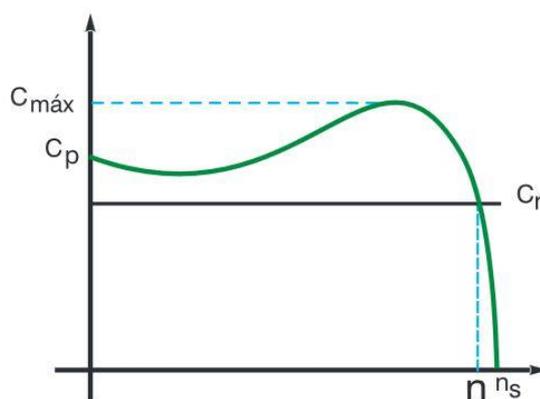
- Necessidade da correção do fator de potência;
- Conjugados requeridos;
- Efeito da inércia da carga;
- Necessidade ou não de regulação de velocidade;
- Exposição da máquina em ambientes úmidos, poluídos e/ou agressivos.

Na seleção correta dos motores, é importante considerar as características técnicas de aplicação e as características de carga, meio ambiente e alimentação no que se refere a aspectos mecânicos para calcular como o conjugado de partida, conjugado de aceleração e conjugado nominal [22].

O conjugado de partida é o torque necessário para produzir o movimento inicial. É fundamental que o conjugado do motor seja sempre superior ao conjugado da carga, para que seja possível partir de uma velocidade zero e atingir a velocidade nominal, assim, vencendo a inércia estática da máquina [22].

O conjugado de aceleração é o torque necessário para acelerar a carga à velocidade nominal. O conjugado do motor deve ser sempre maior que o conjugado de carga, em todos os pontos entre zero e a rotação nominal. No ponto de interseção das duas curvas, o conjugado de aceleração é nulo, ou seja, é atingido o ponto de equilíbrio a partir do qual a velocidade permanece constante. Este ponto de intersecção entre as duas curvas deve corresponder à velocidade nominal, conforme indicado na Figura 14. O conjugado médio de aceleração é a diferença entre o conjugado do motor e o conjugado resistente da carga [22].

Figura 14 - Seleção de motor considerando o conjugado resistente da carga



Fonte: [22]

Já o conjugado nominal é o torque necessário para mover a carga na condição de regime permanente e pode ser dividido em conjugado constante, conjugado variável ou potência constante [22].

2.4 Normas Relevantes

2.4.1 ABNT NBR 12892:2009

Intitulada “Elevadores unifamiliares ou de uso restrito à pessoa com mobilidade reduzida”, essa é a principal norma referente aos elevadores residenciais, por isso norteia boa parte do presente trabalho. A norma define os requisitos de segurança para construção e instalação de elevadores unifamiliares ou de uso restrito à pessoa com mobilidade reduzida. Contendo as recomendações necessárias para concepção da caixa, compartimento da máquina, portas, carro e contrapeso, suspensão, freio de segurança e limitador de velocidade, guias e atribuições necessárias das máquinas, a norma é bastante completa e muito esclarecedora para realização do projeto.

A norma é aplicada somente a instalações unifamiliares ou em edificações de uso geral para uso restrito à pessoa com mobilidade reduzida, considera-se o seu emprego um meio auxiliar de transporte e acessibilidade [23].

2.4.2 ABNT NBR NM 207:1999

Elevadores elétricos de passageiros – requisitos de segurança para construção e instalação. A norma define regras de segurança para construção e instalação relativas a elevadores elétricos de passageiros. Tem a finalidade de proteger os usuários, pessoal de manutenção e inspeção, pessoas que se encontram fora da caixa, casa de máquinas e casa de polias (caso existam) e, além disso, visa também proteger objetos na cabina, componentes da instalação do elevador e o edifício onde está instalado o elevador [9].

2.4.3 ABNT NBR 16042:2012

A ABNT NBR NM 207, ao definir requisitos para elevadores elétricos, estabelece a necessidade de uma casa de máquinas e casa de polias especiais para abrigo da maquinaria. A tecnologia moderna, porém, demonstra que a maquinaria, ou parte

dela, ou parte de seus componentes não necessitam estar dentro de uma casa de máquinas especial e podem ser colocadas na caixa ou fora dela. Para garantir a segurança da operação normal, manutenção e inspeção dos elevadores nesta nova condição, são necessárias disposições, que ainda não estão descritas na ABNT NBR NM 207. Por esta razão, a NBR 16042:2012 – Elevadores elétricos de passageiros – Requisitos de segurança para construção e instalação de elevadores sem casa de máquinas foi feita para atender a esta necessidade [8]. São estabelecidos alguns requisitos de boas práticas de construção, seja porque é peculiar à fabricação do elevador ou porque na utilização do elevador os requisitos podem ser mais exigentes do que em outros casos [8].

2.4.4 ABNT NBR 8800:2008

Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Esta norma, baseando-se no método dos estados-limites, estabelece 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 edificação nas quais os perfis de aço sejam laminados, soldados ou seção tubular (com ou sem costura) e as ligações sejam executadas com parafusos e soldas [24].

3 METODOLOGIA DO PROJETO

Para que haja organização e garantia de um projeto que realmente atenda aos anseios do cliente, é fundamental que seja aplicada uma boa metodologia de projeto.

Partindo da declaração do problema por parte do cliente, são necessários alguns passos importantes para que o projeto seja bem pensado e precisamente documentado.

3.1 Definição do problema

Inicialmente é preciso definir claramente o problema, visto que a declaração do cliente pode não expressar nitidamente o que precisa ser executado. A definição do problema, em geral, é feita na forma de uma pergunta.

Portanto, o cliente questiona: Qual é a solução de engenharia para locomoção segura entre os três pavimentos de sua residência alternativa à escada?

A resposta mais viável ao problema é um projeto de um elevador residencial unifamiliar seguro.

3.1.1 Estabelecer Objetivos

Tendo o problema claramente definido, é essencial estabelecer os objetivos que o projeto deve atender. Define-se objetivo como algo para o qual o esforço é dirigido; um propósito ou fim da ação. Em nosso contexto, objetivo está de acordo com sua utilização comum [6].

Tendo isso em vista, os objetivos desse projeto de elevador residencial se alinham aos objetivos previstos para um elevador residencial, conforme [23].

O objetivo do elevador residencial unifamiliar é atender a pessoas em edificações residenciais unifamiliares, melhorando o conforto na habitação e proporcionando uma previsão para uma eventual necessidade futura. Além disso, o elevador unifamiliar também possui função social ao prover acessibilidade a pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida, pessoas idosas, doentes ou com dificuldade de locomoção, permanente ou temporária, eliminando a limitação de acesso aos espaços físicos, e provendo integração com a comunidade.

3.1.2 Estabelecer Métricas para os Objetivos

Adiante, a fim de avaliar a qualidade do projeto, é preciso que se estabeleçam alguns parâmetros que meçam realmente o quão bem o projeto atende aos seus objetivos. Essa avaliação exige métricas. Para o presente projeto, foram definidas as seguintes métricas:

- Ocupar menor espaço horizontal e vertical
- Viabilizar a instalação em edificações existentes
- Reduzir o custo total envolvido na sua implantação e manutenção
- Exigir pouca potência instalada e ser energeticamente econômico
- Segurança (não deve apenas ser seguro, deve parecer seguro)
- Durabilidade (vida útil do equipamento)
- Praticidade e viabilidade (avaliar o benefício gerado pelo equipamento em função do ônus)
- Equipamento leve

3.1.3 Identificar Restrições

Além de definir como o projeto deve ser feito, também precisa-se especificar como o projeto não deve ser. Tem-se a definição de restrição como o estado de ser verificado, restrito ou forçado a evitar ou executar alguma ação. É interessante salientar que as restrições são extremamente importantes no projeto de engenharia, pois elas impõem limites absolutos que, se violados, significam que um projeto proposto é simplesmente inaceitável [6]. Para o presente projeto, adotam-se as restrições a seguir.

- Norma ABNT 12892:2009
- O espaço disponível para a caixa é um retângulo de 1,5m de largura por 1,2m de profundidade.
- O ruído emitido pelo equipamento em funcionamento deve ser aceitável, isto é, abaixo de 60 dB.

3.1.4 Revisão da declaração de problema do cliente

Para revisar a declaração de problemas do cliente, é necessário que os objetivos, restrições e métricas atendam às solicitações e à definição do problema fornecida

pelo cliente. Portanto, mediante ao que foi definido como objetivos, restrições e métricas, observa-se que a necessidade do cliente é satisfeita, isto é, revisando a declaração do problema do cliente, verifica-se que a solução é adequada ao problema ajustando-se aos objetivos, métricas e restrições.

3.2 Projeto Conceitual

3.2.1 Estabelecer Funções

Primeiramente, na idealização do projeto conceitual, são definidas as funções do equipamento. Função é a ação para a qual uma pessoa ou coisa é especialmente adequada ou usada, ou para a qual uma coisa existe; uma de grupo de ações relacionadas, colaborando para uma ação maior. São as ações que o equipamento ou sistema projetado deve executar, as coisas que o sistema ou equipamento é destinado a fazer. As funções de engenharia envolvem o fluxo ou a transformação de energia, materiais e informações.

A declaração de uma função normalmente consiste num verbo de ação e um objeto ou substantivo [6]. Logo, as funções do equipamento são dispostas a seguir.

- Transportar pessoas entre os pavimentos de uma residência;
- Transportar cargas entre os pavimentos de uma residência;
- Suportar seu próprio peso;
- Suportar a carga útil;
- Proteger o usuário do acesso às partes móveis do equipamento;
- Permitir o acesso seguro do usuário ao equipamento;
- Converter energia elétrica em energia mecânica para a movimentação do equipamento;
- Identificar o pavimento em que a cabina se encontra;
- Nivelar o piso da cabina com o pavimento no qual se encontra;
- Mover-se para o pavimento solicitado pelo usuário tanto externamente, nas portas de pavimento, quanto internamente, dentro do elevador;
- Travar em caso de emergência informada pelo usuário;
- Travar caso haja interrupção da alimentação elétrica ou falha mecânica;
- Reiniciar o funcionamento a partir de qualquer posição após o travamento apenas com o comando do usuário;

- Ventilar a cabina;
- Limitar excessos de velocidade;
- Manter o curso projetado do equipamento;
- Suportar os esforços gerados pela frenagem e movimentação excêntrica eventual do equipamento;
- Agregar valor estético à residência.

3.2.2 Estabelecer Requisitos

Após a definição das funções, tem-se o estabelecimento dos requisitos do projeto. Os requisitos de projeto são apresentados em três formas, que representam diferentes maneiras de formalizar o desempenho funcional e o comportamento de um projeto para análise e projeto de engenharia. Os requisitos prescritivos, que prescrevem um requisito na forma de ordem de grandeza para a função desejada, isto é, determinam valores a serem atendidos pelas funções. Já os requisitos procedurais, conforme apresentado pelo nome, indicam o procedimento que deve ser realizado para que seja possível a função desejada. E, finalmente, tem-se os requisitos de desempenho que estabelecem níveis de desempenho mínimos para as funções previstas pelo projeto.

Requisitos são os meios utilizados para atingir as funções desejadas, isto é, traduzir as funções para termos mensuráveis, para poder desenvolver e avaliar um projeto [6].

Tomando isso por base, temos os seguintes requisitos para o projeto:

- Transportar uma carga útil de até 225 kg;
- A cabina e o mecanismo de tração devem ser capazes de suportar a carga útil e o peso próprio do equipamento;
- O elevador deve possuir um poço para isolar o acesso do usuário às partes móveis;
- Permitir o acesso dos usuários e entrada de cargas por meio de portas em cada pavimento;
- Permitir o acesso dos usuários e entrada de cargas na cabina por meio de uma porta;
- Utilizar energia elétrica da rede como alimentação;

- O nivelamento deve estar dentro da tolerância de vinte milímetros;
- O equipamento deve ser provido de um controle de posição;
- Adicionar um botão de emergência interno e um externo (o botão deve ser feito de tal modo que não seja acionado acidentalmente ou indevidamente);
- Quando houver alguma falha elétrica ou mecânica, o equipamento deve interromper seu funcionamento e apenas reiniciar o sistema manualmente, após certificação do usuário da correção da falha;
- Permitir a troca de ar por meio de uma abertura no teto da cabina;
- Caso a velocidade exceda o limite de 15% da velocidade nominal, o equipamento deve frear automaticamente para retomar a velocidade aceitável.
- Instalar guias para a cabina e o contrapeso manterem-se alinhados;
- O design do equipamento deve ser aprovado pelo cliente.

3.2.3 Estabelecer Meios para as Funções

Listam-se aqui os diferentes meios de implementar cada função ou atributo identificado. Inicia-se por meio da construção de uma lista de funções que o projeto deve executar e dos atributos ou características que ele deve ter. A lista deve ter um tamanho razoável e gerenciável, com todas as funções e características em um mesmo nível de detalhe, a fim de garantir a uniformidade [6]. Por fim, são listados os meios para as funções.

Sendo assim, tem-se o Quadro 1, informando as funções e os possíveis meios para atingir cada função.

Quadro 1 - Meios para as funções

Função	Meio 1	Meio 2	Meio 3	Meio 4
Transporte vertical	Elevador Elétrico	Elevador Hidráulico	Elevador a Vácuo	
Área delimitada	Quadrado	Círculo	Retângulo	
Material da plataforma	Aço A-36	Alumínio	Aço inox	
Material da cabina	Aço inox	Aço A-36	Vidro	
Material da estrutura da caixa	Aço A-36	Alumínio	Aço inox	
Material da caixa	Aço inox	Aço A-36	Vidro	

Portas	Automáticas	Manuais		
Portas de pavimento	De correr	De abrir	Tipo bus	Pantográfica
Porta da cabina	De correr	De abrir	Tipo bus	Pantográfica
Conversão de energia	Motor elétrico	Motor hidráulico	Compressor de ar	
Meio de suspensão	Cabo de aço	Cinta de poliuretano	Pistão hidráulico	Diferencial de pressão
Redução de velocidade	Polia	Engrenagem	Redução com sem fim	
Identificar andar	Sensor a laser	Relé eletromecânico	Medição do comprimento do cabo	
Sistema de Controle	CLP	Sistema eletromecânico	Digital	Modular
Nivelamento	Inversor de frequência	Freio eletromagnético	Eletromecânico	
Emergência	Botão	Chave	Alavanca	
Guiar linearmente	Perfil U	Guias lineares	Perfil T	

Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.4 Gerar Alternativas de Projeto

Essa fase consiste em combinar os meios estabelecidos para implementar as funções, de tal maneira que seja possível a construção de um equipamento a partir das características selecionadas. Portanto, foram geradas quatro alternativas de projeto para seja escolhido qual deles é o projeto que deve prosseguir seu desenvolvimento para que sejam atingidos os objetivos traçados, conforme o Quadro 2 exibido adiante.

Quadro 2 - Alternativas de projeto

Função	Conceito 1	Conceito 2	Conceito 3	Conceito 4
Transporte vertical	Elevador Elétrico	Elevador Hidráulico	Elevador a Vácuo	Elevador Elétrico
Área delimitada	Retângulo	Quadrado	Círculo	Quadrado
Material da plataforma	Aço A-36	Alumínio	Aço inox	Aço inox

Material da cabina	Vidro	Aço A-36	Aço inox	Aço inox
Material da estrutura da caixa	Aço A-36	Alumínio	Aço inox	Aço inox
Material da caixa	Vidro	Aço A-36	Aço inox	Aço inox
Portas	Manuais	Manuais	Automáticas	Automáticas
Portas de pavimento	De abrir	Tipo bus	De correr	De correr
Porta da cabina	Tipo bus	Pantográfica	De correr	De correr
Conversão de energia	Motor elétrico	Motor hidráulico	Compressor de ar	Motor elétrico
Meio de suspensão	Cabo de aço	Pistão hidráulico	Diferencial de pressão	Cinta de poliuretano
Redução de velocidade	Redução com sem fim	-	-	Polia
Identificar andar	Relé eletromecânico	Relé eletromecânico	Medição do comprimento do cabo	Sensor a laser
Sistema de Controle	Eletrônico	Sistema eletromecânico	Digital	Digital
Nivelamento	Freio eletromagnético	Eletromecânico	Eletromecânico	Inversor de frequência
Emergência	Botão	Chave	Alavanca	Botão
Guiar linearmente	Perfil T	Guias lineares	Perfil T	Perfil U

Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.5 Refinar e Aplicar Métricas nas Alternativas de Projeto

Mediante às alternativas de projeto geradas, tem-se quatro projetos viáveis para escolher. Deve-se escolher apenas um deles para o desenvolvimento completo, uma vez que tempo, dinheiro e recursos pessoais são sempre limitados [6].

Várias estratégias para avaliação e seleção das alternativas de projeto podem ser utilizadas. Optou-se por avaliar as alternativas de projeto lançando mão de uma matriz de avaliação numérica, conforme a Tabela 5 - Matriz de avaliação numérica.

Tabela 5 - Matriz de avaliação numérica

Métricas	Conceito 1	Conceito 2	Conceito 3	Conceito 4
Menor espaço horizontal e vertical	80	60	75	90
Instalação em edificações existentes	70	65	60	75
Custo Total	90	70	75	80
Baixa potência instalada	85	50	80	95
Segurança	80	70	75	70
Durabilidade	85	75	70	90
Equipamento leve	75	65	80	70
Praticidade e viabilidade	90	70	60	50

Fonte: Produção do próprio autor.

Prosseguindo, somam-se as notas recebidas por cada conceito e considera-se que o conceito que atingiu o maior valor somado deve ser completamente desenvolvido. Logo, a Tabela 6 mostra que o conceito 1 obteve a maior soma dentre as alternativas de projeto e, portanto, será completamente desenvolvido nas próximas fases da metodologia.

Tabela 6 - Resultado da matriz de avaliação numérica

Métricas	Conceito 1	Conceito 2	Conceito 3	Conceito 4
Soma	655	525	575	620

Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 Projeto Preliminar

Concluído o projeto conceitual, agora faz-se necessário o desenvolvimento de um projeto preliminar que compreende as fases de modelagem e análise do projeto escolhido e, adiante, os testes e avaliação do projeto escolhido. Nessa seção, encontram-se as definições e conceitos importantes para a aplicação específica no

projeto. Nos próximos capítulos serão descritos os desdobramentos desses conceitos aplicados diretamente ao presente projeto.

3.3.1 Modelar e Analisar o Projeto Escolhido

Por definição, sabe-se que um modelo é uma representação em miniatura de algo, um padrão de algo a ser feito, um exemplo de imitação ou simulação e uma descrição ou analogia usada para visualizar algo [6].

Por conseguinte, nessa etapa do projeto são admitidas as simplificações e hipóteses para representação do modelo e para fins de simplificação e viabilidade de cálculo analítico. Também são realizados os cálculos de resistência e análise estrutural, restringindo-se pela deflexão máxima ou pelos critérios de falha.

3.3.2 Testar e Avaliar o Projeto Escolhido

Essa fase constitui-se de uma revisão dos resultados obtidos na etapa anterior. São feitos testes e avaliações do modelo proposto e do projeto de maneira geral. Isso é fundamental para que não haja falhas e erros de projeto, visto que são apurados os resultados e busca-se a correção das eventuais falhas encontradas.

3.4 Projeto Detalhado

3.4.1 Refinar e Otimizar o Projeto Escolhido

Em engenharia, buscam-se constantemente os resultados ótimos, as máximas eficiências e, fundamentalmente, os menores custos. Nesse projeto não é diferente. Nessa etapa do projeto detalhado, procura-se atingir o comportamento ótimo do equipamento, tendo sempre em vista as métricas estabelecidas, isto é, um elevador residencial ideal tem o custo, peso, espaço e potência em seus valores mínimos e os valores máximos para segurança, durabilidade, praticidade e viabilidade.

3.4.2 Designar e Corrigir os Detalhes do Projeto

Após a conclusão do refinamento e da otimização do projeto, é imprescindível que seja feita uma varredura geral nos detalhes do projeto a fim de identificar e corrigir as possíveis falhas encontradas.

3.5 Comunicação do Projeto

3.5.1 Documentar o Projeto Final

Após conclusão dessas fases teremos como saída a documentação final que poderá ser feita na forma de relatório, desenhos, especificações de fabricação, entre outras.

4 DESENVOLVIMENTO DE PROJETO

Nesse capítulo são apresentadas, conforme proposto pela metodologia de projeto adotada, as etapas compreendidas entre o projeto preliminar e a documentação do projeto, ou seja, serão desenvolvidos aqui o projeto preliminar e projeto detalhado. São avaliados: a cabina, o contrapeso, os cabos e polias, a máquina de tração, as guias para o carro e para o contrapeso, a caixa e os dispositivos de segurança.

Descreve-se os cálculos realizados, as simplificações admitidas nos modelos e as simulações efetuadas em software de engenharia com base no método dos elementos finitos. Têm-se ainda a seleção em catálogo de fabricantes de alguns componentes que devem ser especificados e adquiridos em fornecedor qualificado.

4.1 Cabina

Por definição normativa, sabe-se que a cabina é a parte do elevador que transporta passageiros e objetos. Por meio da mesma norma, define-se também que a área da cabina é limitada a um mínimo de 0,72 m² e máximo de 0,90 m². Além disso, é restrita a capacidade nominal máxima do equipamento, sendo esta de 3 pessoas ou 225 kg [23].

As únicas aberturas permitidas são as entradas para acesso normal dos passageiros e as aberturas para ventilação [23].

O conjunto formado pela armação, cursores, paredes, piso e teto da cabina deve ter resistência mecânica suficiente para suportar as forças aplicadas no funcionamento normal do elevador, na aplicação do freio de segurança ou no impacto do carro com o para-choque [23].

Portanto, nessa seção é realizada a análise da estrutura da cabina proposta, exibida na Figura 15.

Figura 15 – Estrutura da cabina



Fonte: Produção do próprio autor.

Para tal análise estrutural, será adotado o procedimento descrito a seguir.

Primeiramente, é fundamental que seja feita uma análise prévia do design proposto, isto é, a partir dessa análise inicial, notam-se quais serão os componentes mais solicitados para a determinação das dimensões iniciais dos perfis metálicos. Essa análise inicial também dá condições para seleção dos tipos de perfis metálicos que mais se adequem à solicitação de cada peça.

O dimensionamento dos perfis iniciais submetidos à flexão é feito a partir de uma premissa prevista em [24]. Tal norma propõe que os deslocamentos máximos para componentes estruturais submetidos a flexão tenham um valor máximo admissível em função do vão livre da viga. Mediante à norma, percebe-se que a deslocamento máximo admissível é dado pela Equação 4.1, na qual f_{max} é o deslocamento máximo admissível e l é o vão livre da peça.

$$f_{max} = \frac{l}{350} \quad (4.1)$$

Para as peças que estejam sob ação de tensões de tração, foi adotado um deslocamento máximo admissível de 1 mm.

Sabendo o deslocamento máximo admissível, utilizam-se as equações e os princípios da resistência dos materiais, denotadas em [25], para determinação da inércia ou a área necessária do perfil metálico.

Vale a pena salientar que, tendo em vista as incertezas e as imprecisões das informações de projeto, devemos adotar um coeficiente de segurança a fim de garantir a prevenção da falha. Segundo [26], para implementar a seleção de um fator de segurança de projeto, consideram-se, separadamente cada um dos oito fatores de penalização:

- A precisão com que podem ser determinadas as cargas, forças, deflexões ou outros agentes indutores de falha;
- A precisão com que as tensões ou outros fatores de severidade de carregamento podem ser determinados a partir das forças ou de outros fatores indutores de falha;
- A precisão com que as resistências à falha ou outras medidas de falha podem ser determinadas para o material selecionado segundo o modo de falha adequado;
- A necessidade de se restringir o material, peso, espaço ou custo;
- A gravidade das consequências da falha em termos de vidas humanas e/ou danos à propriedade;
- A qualidade da mão-de-obra na fabricação;
- As condições de operação;
- A qualidade da inspeção e da manutenção disponível ou possível durante a operação.

A determinação do coeficiente de segurança é feita por meio de números inteiros denominados números de penalização (NP). Avaliando-se os oito fatores de penalização, determina-se um número de penalização para cada um deles entre -4 e 4. Caso seja preciso elevar o fator de segurança, atribui-se um valor positivo ao número de penalização, caso contrário o NP assume um valor negativo. Portanto, temos a construção da Tabela 7, conforme apresentado a seguir.

Tabela 7 - Números de penalização selecionados

Fator de Penalização	Número de Penalização Selecionado (NP)
Conhecimento preciso do carregamento	2
Cálculo preciso das tensões	1
Conhecimento preciso da resistência	-2
Necessidade de conservação	-1
Gravidade das consequências de falha	4
Qualidade da fabricação	2
Condições de operação	1
Qualidade da inspeção/manutenção	3

Fonte: Produção do próprio autor.

A Equação 4.2 fornece o parâmetro t a partir da soma os termos. Logo, temos que:

$$t = \sum_{i=1}^8 (NP)_i \quad (4.2)$$

$$t = 10$$

O coeficiente de segurança (n_d), portanto, é dado pela seguinte Equação 4.3:

$$n_d = 1 + \frac{(10 + t)^2}{100} \quad (4.3)$$

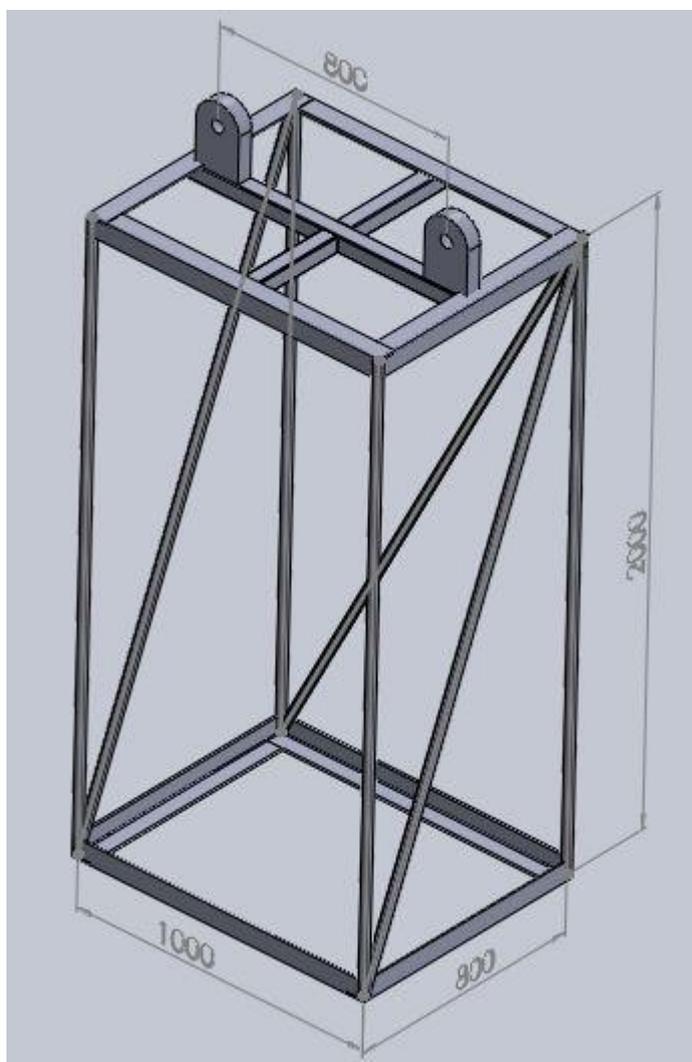
$$n_d = 5$$

Além disso, é necessário considerar os fatores econômicos e a disponibilidade comercial dos materiais selecionados.

Projetando a favor da segurança, adotou-se como premissa que os modelos matemáticos para dimensionamento de cada peça da estrutura da cabina devem ser realizados considerando o caso mais crítico, tanto em relação às cargas quanto em relação ao local de aplicação da carga. Essa hipótese é razoável não só em virtude de que são previstos os vários modos de aplicação de cargas na estrutura, mas

também é pressuposto que a estrutura não colapse mesmo que haja falha de algum componente.

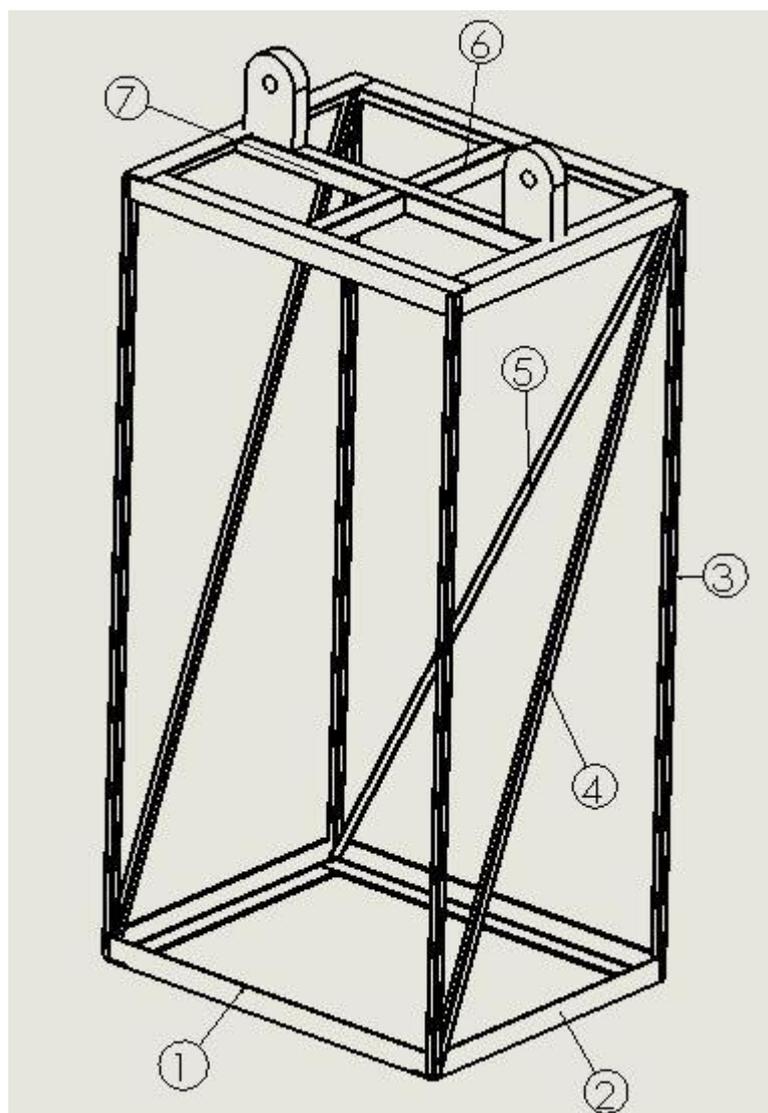
Tabela 8 - Dimensões principais da estrutura da cabina



Fonte: Produção do próprio autor.

Para facilitar a identificação de cada peça da estrutura da cabina no dimensionamento, foram numeradas as peças, conforme indicado na Figura 16. Algumas peças não se encontram numeradas devido ao fato de que seus modelos matemáticos são análogos a alguma peça já numerada.

Figura 16 - Numeração das peças da estrutura da cabina



Fonte: Produção do próprio autor.

Sendo assim, inicia-se a modelagem matemática de cada componente. Para as peças 1, 2, 6 e 7, admite-se que elas sejam idealizadas como vigas submetidas apenas à flexão. Já as peças 3, 4 e 5, são modeladas como barras submetidas somente a tensões de tração. É importante ressaltar que será somada à capacidade nominal máxima admitida um valor extra na carga aplicada nos modelos, pois supõe-se que pode haver um excesso de carga e, aliado a isso, são considerados os dispositivos contidos na cabina que agregam uma massa adicional.

As vigas 1, 2 e 6, foram idealizadas como vigas biapoiadas com uma carga pontual no seu centro com valor igual à carga total, isto é, carga útil mais carga extra.

Sabe-se que o deslocamento máximo ocorre também no centro da peça e é regido pela Equação 4.4, onde f_{max} é a flecha máxima, F é a força aplicada, l é o vão livre da viga, E é o módulo de elasticidade e I é o momento de inércia do perfil.

$$f_{max} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (4.4)$$

Tem-se adiante as tabelas com o memorial de cálculo de cada peça. Portanto, seguem abaixo a Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 9 - Viga 1 - Cantoneira de abas iguais

Variável	Valor	Unidade
F	2750	N
l	1	m
n_d	5	<i>adimensional</i>
f_{max}	2,86	mm
E	$2 \cdot 10^{11}$	$\frac{N}{m^2}$
$I_{mínimo}$	50,13	cm^4
<i>Perfil Utilizado</i>	3 x 3 x 1/4	<i>pol</i>
$I_{utilizado}$	50	cm^4
<i>Massa por metro</i>	7,29	$\frac{kg}{m}$
<i>Massa da peça</i>	7,29	kg

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 10 - Viga 2 - Cantoneira de abas iguais

Variável	Valor	Unidade
F	2750	N
l	0,8	m
n_d	5	<i>adimensional</i>
f_{max}	2,28	mm
E	$2 \cdot 10^{11}$	$\frac{N}{m^2}$
$I_{mínimo}$	32,08	cm^4
Perfil Utilizado	3 x 3 x 3/16	<i>pol</i>
$I_{utilizado}$	40	cm^4
Massa por metro	5,22	$\frac{kg}{m}$
Massa da peça	4,18	kg

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 11 - Viga 6 - Tubo quadrado

Variável	Valor	Unidade
F	2750	N
l	0,8	m
n_d	5	<i>adimensional</i>
f_{max}	2,28	mm
E	$2 \cdot 10^{11}$	$\frac{N}{m^2}$
$I_{mínimo}$	32,08	cm^4
Perfil Utilizado	65,3 x 65,3 x 3	mm
$I_{utilizado}$	44,4	cm^4
Massa por metro	5,7	$\frac{kg}{m}$
Massa da peça	4,56	kg

Fonte: Produção do próprio autor.

Tendo em vista que as peças 3, 4 e 5 são modeladas como barras submetidas apenas a tração, é sabido que sua deformação máxima é dada conforme a Equação 4.5, onde A é a área da seção transversal da peça:

$$\delta_{max} = \frac{F \cdot l}{E \cdot A} \quad (4.5)$$

Por conseguinte, tem-se o memorial de cálculo dessas peças apresentados em tabelas. Avante temos a Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14.

Tabela 12 - Peça 3 - Cantoneira de abas iguais

Variável	Valor	Unidade
F	2750	N
l	2	m
n_d	5	<i>adimensional</i>
δ_{max}	1	mm
E	$2 \cdot 10^{11}$	$\frac{N}{m^2}$
$A_{mínimo}$	1,38	cm^2
<i>Perfil Utilizado</i>	1 x 1 x 1/8	<i>pol</i>
$A_{utilizado}$	1,48	cm^2
<i>Massa por metro</i>	1,19	$\frac{kg}{m}$
<i>Massa da peça</i>	2,38	kg

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 13 - Peça 4 - Cantoneira de abas iguais

Variável	Valor	Unidade
F	2750	N
l	2,15	m
n_d	5	<i>adimensional</i>
δ_{max}	1	mm
E	$2 \cdot 10^{11}$	$\frac{N}{m^2}$
$A_{mínimo}$	1,48	cm^2
<i>Perfil Utilizado</i>	1 x 1 x 1/8	<i>pol</i>
$A_{utilizado}$	1,48	cm^2
<i>Massa por metro</i>	1,19	$\frac{kg}{m}$
<i>Massa da peça</i>	2,56	kg

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 14 - Peça 5 - Cantoneira de abas iguais

Variável	Valor	Unidade
F	2750	N
l	2,24	m
n_d	5	<i>adimensional</i>
δ_{max}	1	mm
E	$2 \cdot 10^{11}$	$\frac{N}{m^2}$
$A_{mínimo}$	1,54	cm^2
<i>Perfil Utilizado</i>	1 1/4 x 1 1/4 x 1/8	<i>pol</i>
$A_{utilizado}$	1,98	cm^2
<i>Massa por metro</i>	1,5	$\frac{kg}{m}$
<i>Massa da peça</i>	3,35	kg

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota-se que a viga 7 pode ser idealizada como uma viga biapoada com suas duas cargas simétricas em relação ao centro da peça. Cada polia impõe à viga uma carga igual à metade da carga total. Logo, a flecha máxima é dada pela Equação 4.6 [25], onde a é a distância entre as cargas e c é a distância entre as cargas e as extremidades da peça.

$$f_{max} = \frac{F \cdot l^3}{24 \cdot E \cdot I} \cdot (3a^2 + 8c^2 + 12ac) \quad (4.6)$$

Por fim, tem-se na Tabela 15 o memorial de cálculo para a viga 7.

Tabela 15 - Viga 7 - Tubo quadrado

Variável	Valor	Unidade
F	1375	N
l	1	m
n_d	5	<i>adimensional</i>
f_{max}	2,86	mm
a	0,8	m
c	0,1	m
E	$2 \cdot 10^{11}$	$\frac{N}{m^2}$
$I_{mínimo}$	14,84	cm^4
<i>Perfil Utilizado</i>	65,3 x 65,3 x 3	mm
$I_{utilizado}$	44,4	cm^4
<i>Massa por metro</i>	5,7	$\frac{kg}{m}$
<i>Massa da peça</i>	5,7	kg

Fonte: Produção do próprio autor.

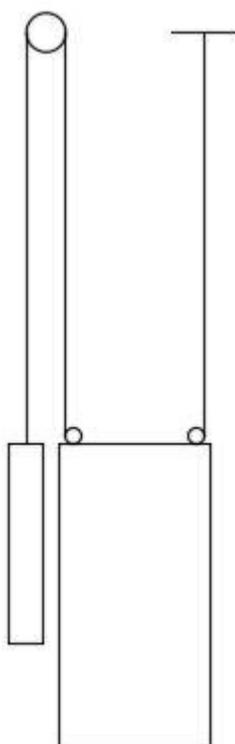
Percebe-se que o perfil selecionado para a peça 7 é superdimensionado. Isso ocorre devido ao fato da necessidade de redução de custo, pois é inviável a compra de uma peça de apenas 1 m de comprimento. Desta maneira, utilizou-se o mesmo perfil selecionado para a viga 6, a fim de minimizar o custo do equipamento.

As informações acerca dos perfis metálicos foram extraídas de tabelas de fabricantes. Para as cantoneiras de abas iguais baseou-se em [27] e para os tubos quadrados tomou-se por fundamento os dados apresentados por [28].

4.2 Contrapeso

Conforme convencionalizado, o contrapeso deve ser construído de tal modo que sua massa total seja igual à massa do carro mais 50% da carga útil. No entanto, conforme a Figura 17, o equipamento se comporta de maneira semelhante a uma polia móvel. Portanto, a massa necessária do contrapeso é igual à metade do valor convencionalizado, seguindo a Equação 4.7:

Figura 17 - Croqui da visão geral do elevador



Fonte: Produção do próprio autor.

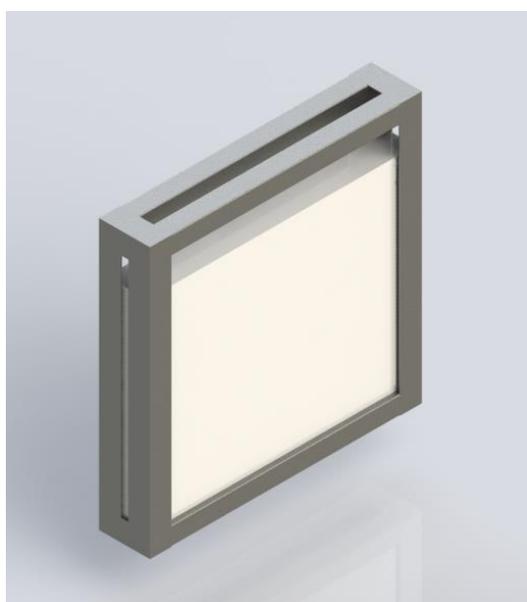
$$P_{\text{contrapeso}} = \frac{K + 0.5 Q}{2} \quad (4.7)$$

Calcula-se que a massa das paredes de vidro tem cerca de 140 kg [29]. Assim sendo, considerando-se a massa do carro igual à soma das massas das peças e das

paredes de vidro, observa-se, portanto, que a massa total do contrapeso deve ser de 160 kg.

As empresas fabricantes de perfis de aço fornecem o material em barras de 6 metros. Sabendo disso, nota-se que haverá excedente de material a partir da construção da estrutura da cabina. Logo, optou-se, visando o menor custo, por utilizar os perfis que não foram empregados na montagem da cabina e também adotou-se blocos de concreto inserção na montagem final. Por conseguinte, segue na Figura 18 o design proposto para o contrapeso.

Figura 18 - Contrapeso



Fonte: Produção do próprio autor.

Ainda é necessário que se faça a verificação estrutural do contrapeso. Nesse caso, a carga que deverá ser suportada será de 160kg e dividiu-se as peças estruturais em vigas da base e peças sob tração. Dessa maneira, tem-se a Tabela 16 e a Tabela 17 a seguir.

Tabela 16 - Vigas da base do contrapeso

Variável	Valor	Unidade
F	1587,44	N
l	0,8	m
n_d	5	<i>adimensional</i>
f_{max}	2,28	mm
E	$2 \cdot 10^{11}$	$\frac{N}{m^2}$
$I_{mínimo}$	18,52	cm^4
<i>Perfil Utilizado</i>	65,3 x 65,3 x 3	mm
$I_{utilizado}$	44,4	cm^4
<i>Massa por metro</i>	5,7	$\frac{kg}{m}$
<i>Massa da peça</i>	4,56	kg

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 17 - Peças sob tração do contrapeso

Variável	Valor	Unidade
F	1587,44	N
l	0,9	m
n_d	5	<i>adimensional</i>
δ_{max}	1	mm
E	$2 \cdot 10^{11}$	$\frac{N}{m^2}$
$A_{mínimo}$	0,36	cm^2
<i>Perfil Utilizado</i>	1 x 1 x 1/8	<i>pol</i>
$A_{utilizado}$	1,48	cm^2
<i>Massa por metro</i>	1,19	$\frac{kg}{m}$
<i>Massa da peça</i>	0,95	kg

Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 Cabos e Polias

É notável que os cabos de suspensão e as polias são componentes críticos e vitais na construção de um elevador. Pela norma [23], define-se que o diâmetro nominal mínimo do cabo deve ser de pelo menos 6 mm e que um elevador de tração deve ser suspenso por no mínimo 2 cabos. Impõe-se também que o coeficiente de segurança deve ser de no mínimo 7. É certo que a tensão máxima no cabo será causada quando a cabina estiver com sua plena carga. Portanto, a tensão máxima do cabo será dada, devido à configuração do elevador, pela metade da soma das massas total do carro e da carga útil da cabina multiplicada pela aceleração da gravidade. Devido ao fato de ser um dos componentes mais críticos do elevador, adotou-se o coeficiente de segurança 10. Assim, temos a Tabela 18 a seguir.

Tabela 18 - Dimensionamento dos cabos de aço

Variável	Valor	Unidade
<i>Massa suspensa</i>	218,07	<i>kg</i>
<i>n_d</i>	10	<i>adimensional</i>
<i>carga máxima do cabo</i>	2,18	<i>tf</i>
<i>diâmetro do cabo</i>	8	<i>mm</i>
<i>carga de ruptura por cabo mín.</i>	2,86	<i>tf</i>
<i>número de cabos</i>	2	<i>cabos</i>
<i>comprimento total de cabo</i>	40	<i>m</i>
<i>Massa total do cabo</i>	8,92	<i>kg</i>

Fonte: Produção do próprio autor.

A especificação técnica do cabo de aço é a seguinte: 2 cabos de aço 8 mm, 8x19 Seale, alma de fibra, torção regular, polido, pré-formado, lubrificação controlada, resistência dos arames especiais para o elevador, aplicação em elevador residencial e um comprimento total de 40 m de cabo [30].

Para as polias, a relação entre o diâmetro primitivo de polias e o diâmetro nominal de cabos de suspensão deve ser pelo menos 30, independentemente do número de pernas [23]. Logo, o diâmetro mínimo das polias deverá ser de pelo menos 240 mm.

Todavia, visando a garantia de atrito entre cabos e polias, restringe-se por [23] que seja satisfeita a equação 4.8 a seguir:

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right) \cdot C_1 \cdot C_2 \leq e_n^{f \cdot \alpha} \quad (4.8)$$

Onde: $\frac{T_1}{T_2}$ é a razão entre a maior e a menor das forças estáticas nos ramos do cabo situado dos lados da polia motriz nos seguintes casos:

- Cabina com carga equivalente a 125% da carga nominal estacionada no pavimento mais baixo;
- Cabina descarregada estacionada no nível do pavimento mais alto.

C_1 é um coeficiente que leva em conta a aceleração, retardamento e condições particulares de instalação cujo valor mínimo é 1,1 e C_2 é o coeficiente que leva em conta a variação do perfil da ranhura da polia motriz devido ao desgaste. e_n é a base dos logaritmos naturais, f é o coeficiente de atrito dos cabos contra as ranhuras da polia motriz, e α é o ângulo de abraçamento dos cabos na polia motriz. O coeficiente de atrito dos cabos contra as ranhuras é calculado conforme o tipo de ranhura da polia motriz. Para polias com ranhuras V, seu valor é dado pela Equação 4.9. Já para polias com ranhuras semicirculares ou recortadas, calcula-se segundo a Equação 4.10.

$$f = \frac{\mu}{\sin \frac{\gamma}{2}} \quad (4.9)$$

$$f = \frac{4\mu \left[1 - \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right]}{\pi - \beta - \sin \beta} \quad (4.10)$$

Onde: β é o ângulo da garganta dos cabos na polia motriz, γ é o ângulo das ranhuras V e μ é o coeficiente de atrito entre os cabos de aço e o ferro fundido das polias.

Ainda é necessário obedecer mais um requisito de atrito segundo a norma. A pressão específica deve ser calculada de acordo com a Equação 4.11, para ranhuras recortadas ou semicirculares, ou segundo a Equação 4.12, para ranhuras V.

$$p = \frac{T \left[8 \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]}{n_c \cdot d \cdot D \cdot (\pi - \beta - \sin \beta)} \quad (4.11)$$

$$p = \frac{4,5 \cdot T}{n_c \cdot d \cdot D \cdot \left(\sin \frac{\gamma}{2} \right)} \quad (4.12)$$

Em nenhuma hipótese a pressão específica pode descumprir a equação 4.13 abaixo.

$$p \leq \frac{12,5 + 4v}{1 + v} \quad (4.13)$$

Onde: d é o diâmetro dos cabos de suspensão, D é o diâmetro primitivo da polia motriz, n_c é o número de cabos, p é a pressão específica, T é a força estática nos cabos do carro ao nível da polia motriz, quando a cabina está parada no nível do pavimento mais baixo com sua carga nominal e, por fim, v é a velocidade nominal do carro. Portanto, construiu-se a Tabela 19 a seguir, compilando todos os cálculos feitos para a verificação do cumprimento das exigências da norma.

Tabela 19 - Verificação das exigências de atrito

Parâmetro	Ranhuradas V	Ranhuradas semicirculares
$T_{caso 1}$ [N]	2502,67	2502,67
$T_{caso 2}$ [N]	1035,63	1035,63
$T_{contrapeso}$ [N]	1587,45	1587,45
$C1$	1,1	1,1
$C2$	1,20	1
$\left(\frac{T_1}{T_2} \right) \cdot C_1 \cdot C_2$ <i>caso 1</i>	2,08	1,73
$\left(\frac{T_1}{T_2} \right) \cdot C_1 \cdot C_2$ <i>caso 2</i>	2,02	1,69
f	0,25	0,11
μ	0,09	0,09
γ [graus]	42	—

β [graus]	45	0
α [graus]	170	170
$e_n^{f.\alpha}$	2,11	1,41
n_c	2	2
d [mm]	8	8
D [mm]	250	250
p $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	7,86	1,59
v [m/s]	0,35	0,35
$\frac{12,5 + 4v}{1 + v} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	10,3	10,3

Fonte: Produção do próprio autor.

Observando a tabela acima, percebe-se que devemos adotar uma polia motriz de ranhuras V de 250 mm de diâmetro nominal [31], visto que polias motrizes semicirculares não atendem às condições de atrito impostas pela norma.

4.4 Máquina de Tração

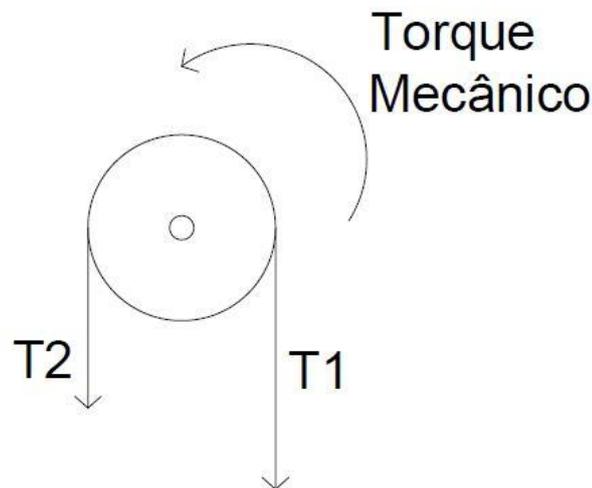
Para seleção da máquina de tração é preciso pensar não só no motor elétrico que irá ser empregado, mas também é imprescindível considerar o sistema de tração de maneira holística. Isto é, é necessário ter em vista a redução empregada para que se atinja a velocidade nominal especificada e o sistema de controle para reger as paradas e partidas do motor elétrico. É fato que motores elétricos têm sua rotação em função do número de polos e da frequência da rede elétrica. Logo, sabendo que as instalações elétricas residenciais brasileiras são de 60 Hz e os motores trifásicos mais usuais possuem quatro polos, a rotação síncrona de um motor desse tipo é de 1800 rpm. Sendo assim, para mantermos a velocidade do elevador dentro do limite estabelecido por norma, faz-se necessário pensar em alguma solução que combine eficiência e segurança.

Pode-se pensar em utilizar um robusto sistema de redução, todavia a redução deve ter a relação de transmissão de 1:60. Tal relação de transmissão remete à utilização de redutor de coroa e sem fim. Isso acarreta em perda significativa de eficiência, pois, nesse caso, o rendimento do redutor é da ordem de 50%.

Também deve ser considerada a utilização de um inversor de frequência, pois, assim, é possível obter melhor controle de velocidade e de torque no motor elétrico e melhor eficiência do sistema, o que é essencial para um projeto residencial.

Para determinar a potência da máquina de tração, é preciso considerar o torque mecânico máximo que a carga impõe por meio da diferença de tensão nos ramos da polia motriz conforme a Figura 19. Assim o torque mecânico τ_{mec} se dá pela Equação 4.14, onde r é o raio nominal da polia motriz e $T1$ e $T2$ são as forças nos cabos de suspensão no caso que proporciona o torque máximo.

Figura 19 - Diagrama de corpo livre da polia motriz



Fonte: Produção do próprio autor.

$$\tau_{mec} = (T1 - T2) \cdot r \quad (4.14)$$

Tendo em vista que a velocidade angular da polia motriz, w_{polia} , é função da velocidade nominal do carro, v , tem-se a Equação 4.15.

$$w_{polia} = \frac{v}{r} \quad (4.15)$$

Dessa maneira, a potência mecânica necessária para acionar a polia motriz P_{mec} é expressa pela Equação 4.16.

$$P_{mec} = \tau_{mec} \cdot w_{polia} \quad (4.16)$$

A potência da máquina de tração é dada a partir da divisão pelo rendimento do redutor utilizado conforme a Equação 4.17. Considerando um redutor de coroa e sem fim para fazer a redução, o rendimento adotado é de 0,5 [32].

$$P_{maq} = \frac{P_{mec}}{\eta_{red}} \quad (4.17)$$

Assim, temos o resultado na Tabela 20.

Tabela 20 - Potência da máquina de tração

Variável	Valor	Unidade
$T1$	2502,67	N
$T2$	1587,45	N
r	0,125	m
τ_{mec}	114,40	$N.m$
v	0,35	$\frac{m}{s}$
w_{polia}	2,8	$\frac{rad}{s}$
P_{mec}	0,32	kW
η_{red}	0,5	<i>adimensional</i>
P_{maq}	0,64	kW

Fonte: Produção do próprio autor.

Portanto, escolheu-se W22 Motofreio IR2 da WEG [32], Figura 20, cujas características se encontram registradas na Figura 21 - Dados elétricos do W22 Motofreio IR2 da WEG

Figura 20 - W22 Motofreio IR2 da WEG



Fonte: [32]

Figura 21 - Dados elétricos do W22 Motofreio IR2 da WEG

Características
• Carcaça: 80
• Potência: 1 HP
• Frequência: 60 Hz
• Polos: 4
• Rotação nominal: 1730
• Escorregamento: 3,89 %
• Tensão nominal: 220/380 V
• Corrente nominal: 3,02/1,75 A
• Corrente de partida: 19,9/11,5 A
• Ip / In: 6,6
• Corrente a vazio: 2,10/1,22 A
• Conjugado nominal: 4,14 Nm
• Conjugado de partida: 240 %
• Conjugado máximo: 280 %
• Categoria: ---
• Classe de isolamento: F
• Elevação de Temperatura: 80 K
• Tempo de Rotor Bloqueado: 8 s (quente)
• Fator de serviço: 1,15
• Regime de serviço: S1
• Temperatura Ambiente: -20°C – +40°C
• Altitude: 1000 m
• Proteção: IP55
• Massa aproximada: 14 kg
• Momento de inércia: 0,00323 kgm ²
• Nível de ruído: 48 dB(A)

Fonte: [32]

Optou-se por utilizar um motofreio para realizar a tração do elevador, pois o motor é mecanicamente freado através de uma mola de compressão, quando desligado e, quando o motor é ligado, a componente axial do campo eletromagnético empurra o disco de freio contra a pressão da mola, liberando-o e permitindo assim o funcionamento normal do motor. Isso é altamente desejável por questões de segurança do sistema de elevação [33]. Além disso, observa-se que o nível de ruído encontra-se em uma faixa aceitável.

Para seleção do redutor sem fim, avalia-se o tipo de equipamento acionado pelo redutor, tipo de motor que acionará o redutor, período de trabalho em horas por dia, potência necessária do redutor para acionamento do equipamento, rotação consequente de acordo com a redução e rotação imposta no eixo de entrada do redutor [34]. Portanto, selecionou-se um redutor modelo CR-50, conforme catálogo [34].

Em relação ao inversor de frequência em virtude da necessidade do tamanho compacto, alta performance e facilidade de uso, ideal para aplicações em pequenas máquinas, especifica-se o CFW100 - Mini Inversor de Frequência para ser utilizado no equipamento [35], mostrado na Figura 22.

Figura 22 - CFW100 - Mini Inversor de Frequência



Fonte: [35].

Finalmente, para conclusão do projeto do sistema de tração, é fundamental dimensionar a viga que suportará o motor elétrico, o redutor e, principalmente, apoiará todo o peso do carro e do contrapeso. Utilizando a mesma metodologia que foi empregada para dimensionamento da cabina, tem-se a Tabela 21. Para redução de custos, serão utilizados para suporte 3 vigas de perfil quadrado iguais às utilizadas na construção da cabina.

Tabela 21 - Dimensionamento das vigas de suporte do motor

Variável	Valor	Unidade
F	2056,69	N
l	1	m
n_d	5	<i>adimensional</i>
f_{max}	2,86	mm
E	$2 \cdot 10^{11}$	$\frac{N}{m^2}$
$I_{mínimo}$	39,49	cm^4
<i>Perfil Utilizado</i>	65 x 65 x 3	mm
$I_{utilizado}$	44,40	cm^4

Fonte: Produção do próprio autor.

4.5 Guias para o Carro e para o Contrapeso

Segundo a norma [23], a resistência das guias deve ser suficiente para suportar as forças atuantes na operação nominal, nas condições de acionamento do dispositivo de segurança e ensaios, para garantir a operação segura do elevador. Tanto o carro quanto o contrapeso devem ser guiados por pelo menos duas guias de aço rígidas. As deflexões das guias são limitadas a fim de evitar a colisão com partes móveis, garantir a efetividade dos dispositivos de segurança e para que não haja o destravamento accidental das portas.

Para equipamentos que contem com freio de segurança a deflexão máxima admissível é de 5 mm.

Em geral, utilizam-se guias para elevadores de perfil T em aço. Nesse trabalho, os dados técnicos dos perfis T padronizados foram extraídos do catálogo [36].

Segundo [37], recomenda-se o método de cálculo demonstrado a seguir para dimensionamento de guias para elevadores.

Primeiramente, checa-se a flambagem, isto é, determina-se o índice de esbeltez crítica S_{rD} , dada pela Equação 4.18, e compara-se com o índice de esbeltez da guia S_r , conforme Equação 4.19. Caso $S_{rD} < S_r$, então é utilizada a equação de Euler, Equação 4.20, para encontrar a força crítica P_{cr} na qual a estrutura irá falhar se exceder essa força.

$$S_{rD} = \frac{\pi\sqrt{2E}}{\sigma_y} \quad (4.18)$$

$$S_r = \frac{l}{k}, \quad k = \sqrt{\frac{I_{\text{minimo}}}{A}} \quad (4.19)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EA}{S_r^2} \quad (4.20)$$

Calcula-se a força de frenagem F_b em um sistema com dois trilhos guia conforme a Equação 4.21 a seguir, onde Q é a carga útil, K é a massa do carro, a é a desaceleração causada pela frenagem e g é a aceleração da gravidade. A desaceleração de frenagem foi determinada a partir da premissa de parar o elevador desde a velocidade nominal em meio segundo.

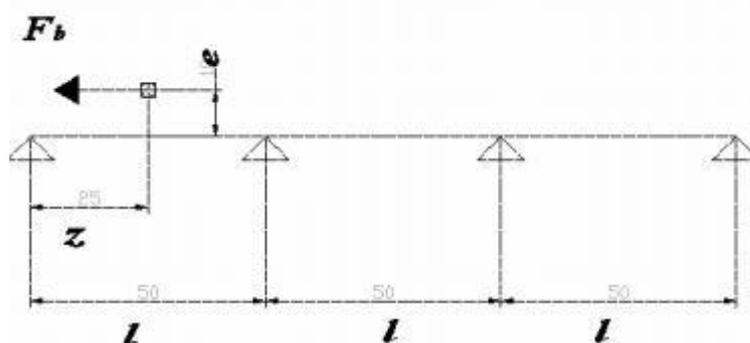
$$F_b = \frac{Q + K}{2} \cdot (a + g) \quad (4.21)$$

Deve ser respeitado o coeficiente de segurança, de tal modo que a força de frenagem deve ser n_d vezes menor que a força crítica de flambagem.

A tensão resultante σ_{comb} da combinação da deformação e da pressão, devido ao esforço axial, é dada pela Equação 4.22, onde F_b é a força de frenagem da sapata de freio do elevador, e é a excentricidade da força em relação à linha da guia, conforme Figura 23. A e Z_x são dados característicos de cada perfil. Além disso, sabe-se também que $C1$ é um coeficiente que depende do número de vãos da viga contínua. A tensão resultante deve ser menor que a tensão de escoamento do material utilizado.

$$\sigma_{comb} = F_b \left(\frac{1}{A} + C1 \frac{e}{Z_x} \right) \quad (4.22)$$

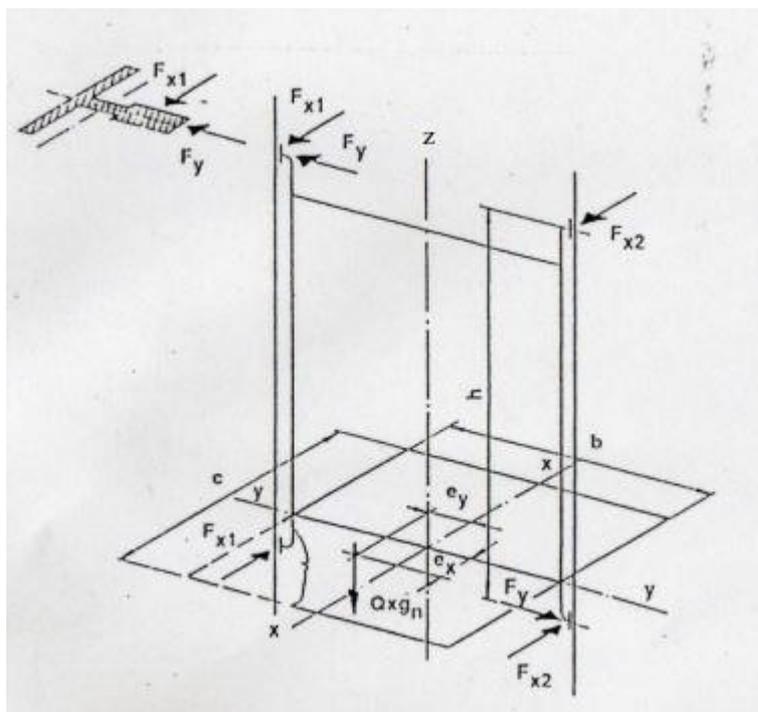
Figura 23 - Croqui de modelagem do guiamento do carro



Fonte: [37].

Em condições normais de operação, nas guias atuam as forças laterais, conforme mostrado na Figura 24. Tais forças são dadas pela Equação 4.23 e Equação 4.24.

Figura 24 - Forças nas guias laterais durante a operação normal



Fonte: [37].

$$F_x = \frac{5 \cdot Q \cdot g \cdot c}{128 \cdot h} \quad (4.23)$$

$$F_y = \frac{Q \cdot g \cdot b}{16 \cdot h} \quad (4.24)$$

Os momentos máximos de flexão são regidos pela Equação 4.25 e Equação 4.26, as tensões de flexão são dadas pela Equação 4.27 e Equação 4.28 e, por fim, a deflexão nos planos y-y e x-x é obtida pela Equação 4.29 e Equação 4.30, respectivamente.

$$M_y = 0,2 \cdot F_y \cdot l \quad (4.25)$$

$$M_x = 0,22 \cdot F_x \cdot l \quad (4.26)$$

$$\sigma_y = \frac{M_y}{Z_y} \quad (4.27)$$

$$\sigma_x = \frac{M_x}{Z_x} \quad (4.28)$$

$$\delta_y = \frac{0,01455 \cdot F_y \cdot l^3}{E \cdot I_x} \quad (4.29)$$

$$\delta_x = \frac{0,0193 \cdot F_x \cdot l^3}{E \cdot I_y} \quad (4.29)$$

Portanto, a deformação resultante é dada pela Equação 4.31. Sendo o resultado satisfatório quando a deformação resultante for menor que 5 mm, conforme determinado por norma.

$$\delta_{resultante} = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \quad (4.30)$$

Desse modo, agrupa-se os resultados dos cálculos obtidos a respeito da verificação de flambagem na Tabela 22 e os resultados do cálculo da força de frenagem encontram-se na Tabela 24. Os dados inerentes ao perfil selecionado são dispostos na Tabela 23.

Tabela 22 – Verificação de flambagem

Variável	Valor	Unidade
<i>Perfil selecionado</i>	<i>T 50/A</i>	<i>padrão ISO</i>
<i>l</i>	3	<i>m</i>
<i>S_r</i>	285,71	<i>adimensional</i>
<i>S_{rD}</i>	138,70	<i>adimensional</i>
<i>P_{cr}</i>	11,47	<i>KN</i>

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 23 - Propriedades do perfil T 50/A

Variável	Valor	Unidade
σ_y	205	MPa
E	$2 \cdot 10^5$	$\frac{N}{mm^2}$
I_x	$1,12 \cdot 10^5$	mm^4
I_y	$5,25 \cdot 10^4$	mm^4
Z_x	2530	mm^3
Z_y	2100	mm^3
k_x	15,4	mm
k_y	10,5	mm
A	475	mm^2

Fonte: Produção do próprio autor, a partir de [36].

Tabela 24 - Cálculo da força de frenagem

Variável	Valor	Unidade
F_b	2,29	KN
Q	225	kg
K	211,14	kg
a	0,7	$\frac{m}{s^2}$
g	9,81	$\frac{m}{s^2}$

Fonte: Produção do próprio autor.

Logo, verifica-se que é atendida a condição de segurança imposta, demonstrada pela Equação 4.31.

$$\frac{P_{cr}}{F_b} = 5,006 \geq n_d = 5 \quad (4.31)$$

Este foi o fator determinante para determinação do perfil T a ser utilizado, pois qualquer perfil abaixo não atende ao quesito de segurança imposto. Em seguida, reúnem-se os dados referentes à verificação da resistência por meio da comparação com a tensão de escoamento na Tabela 25.

Tabela 25 - Verificação da resistência sob tensão combinada

Variável	Valor	Unidade
σ_{comb}	21,57	MPa
C1	0,616	adimensional
σ_y	205	MPa

Fonte: Produção do próprio autor.

Assim, observa-se que a tensão de escoamento é bem maior que a tensão combinada calculada.

Por fim, apresentam-se, na Tabela 26, os resultados que comprovam que a deformação máxima na operação normal não supera o limite estabelecido por norma.

Tabela 26 - Cálculo das deformações

Variável	Valor	Unidade
F_y	68,98	N
F_x	34,49	N
M_y	41385,94	N.mm
M_x	22762,27	N.mm
σ_y	19,71	MPa
σ_x	9,00	MPa
δ_y	1,20	mm
δ_x	1,71	mm
$\delta_{resultante}$	2,09	mm
δ_{max}	5,00	mm

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir dos dados apresentados foi evidenciado que o perfil T 50/A atende a todas as exigências prescritas por norma. Portanto, sabendo que as guias são fabricadas em peças padrão de 5 m de comprimento, será necessário adquirir 8 peças para o guiamento do carro e do contrapeso.

4.6 Caixa

A caixa se destina a proteger o carro do elevador e todas as suas partes móveis, bem como servir de estrutura para fixação de componentes e partes do elevador, tais como guias, suportes, dispositivos de segurança, portas de pavimento e portas de emergência. A caixa deve ocupar pouco espaço e deve agregar valor estético ao imóvel que se destina [23]. Portanto, projetou-se o design da caixa conforme a Figura 25 a seguir utilizando perfis quadrados 65 x 65 x 3.

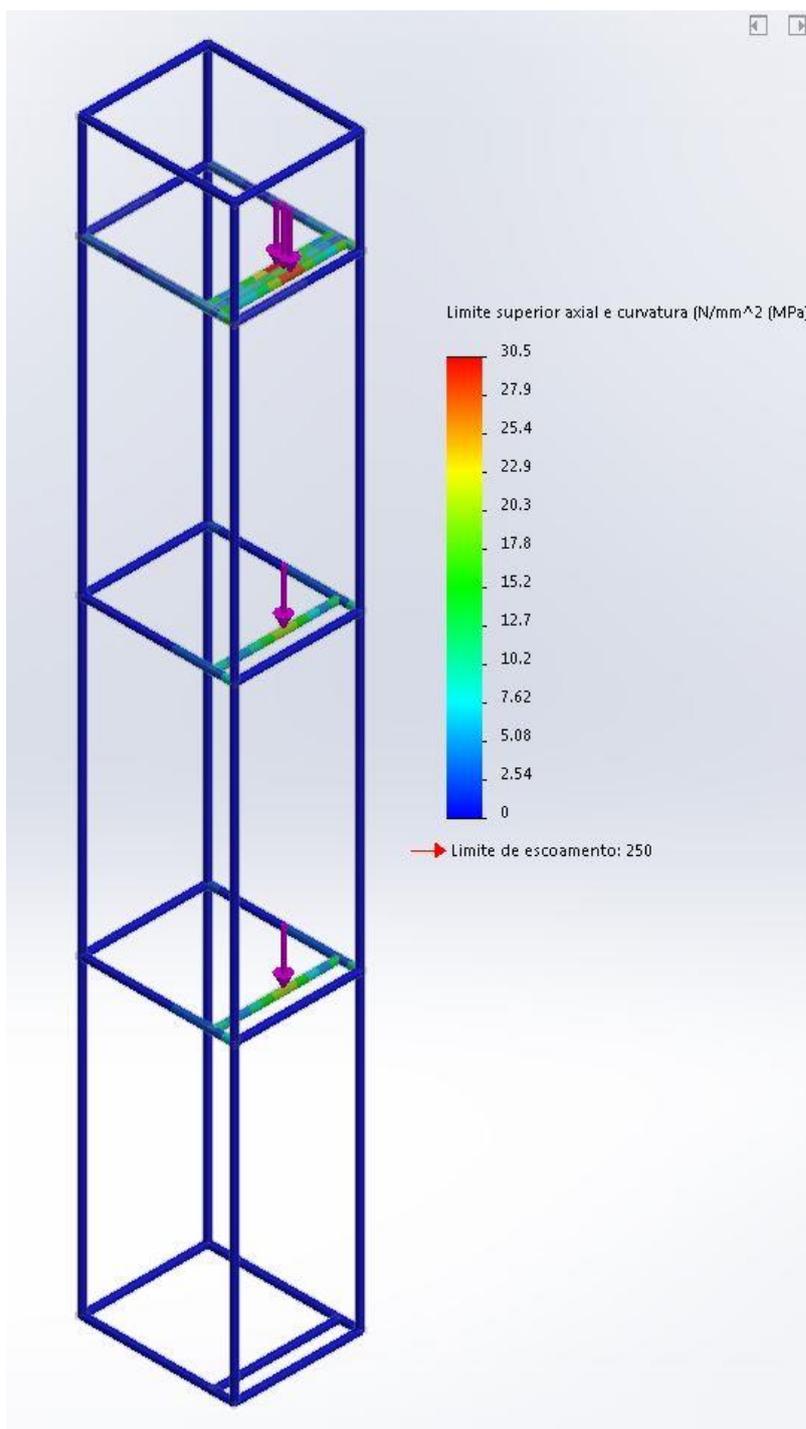
Figura 25 - Design da caixa do elevador



Fonte: Produção do próprio autor.

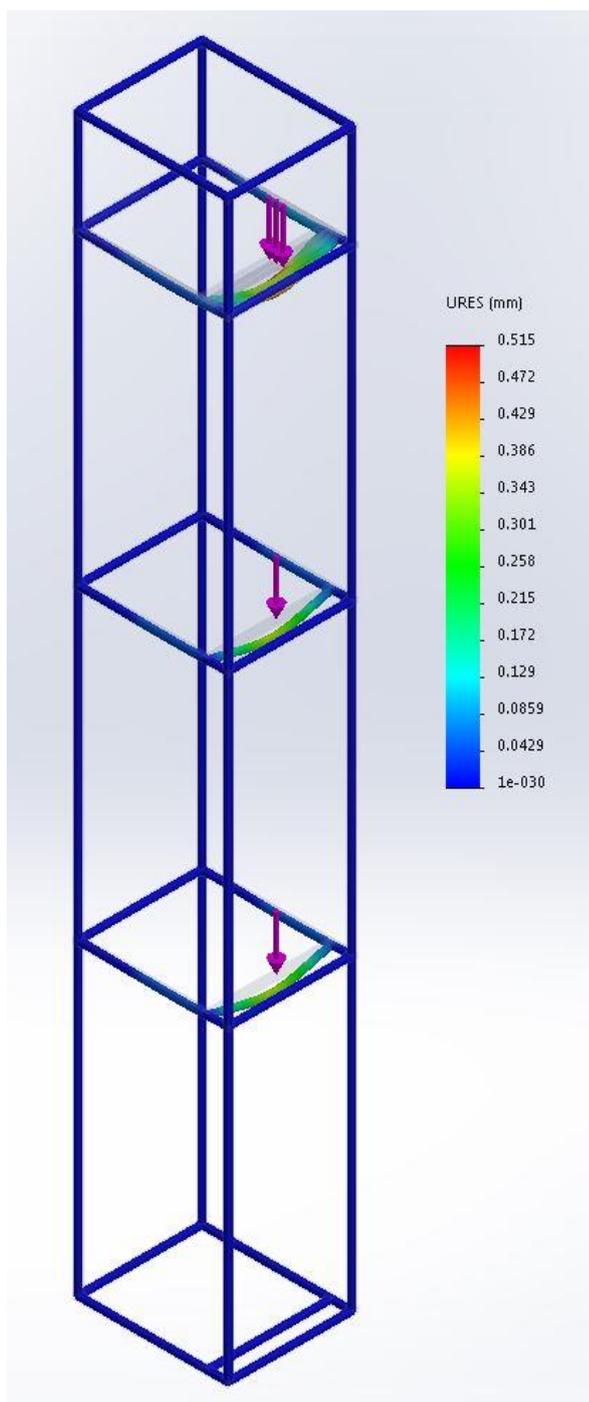
Para verificar a resistência estrutural da caixa, foi feita uma simulação pelo método dos elementos finitos na qual foram adotados elementos de viga para a análise. Para as fixações, admitiu-se que os nós dos vértices da caixa são engastados. Já na aplicação das cargas, optou-se por projetar a favor da segurança e considerar o pior caso de carregamento, isto é, quando o elevador está com sua carga máxima e é aplicado o freio de emergência. Portanto, foram geradas plotagens de tensão e deformação resultante conforme ilustrado na Figura 26 e Figura 27, respectivamente.

Figura 26 - Resultado de tensões na caixa em MPa



Fonte: Produção do próprio autor.

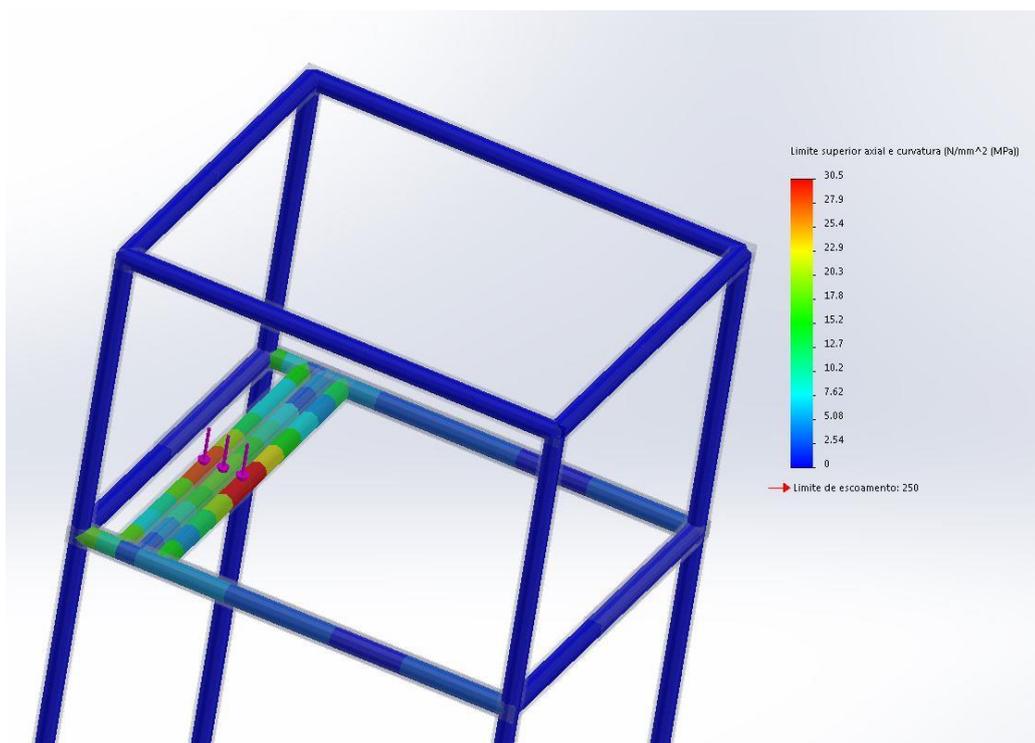
Figura 27 - Resultados de deformação na caixa em milímetros



Fonte: Produção do próprio autor.

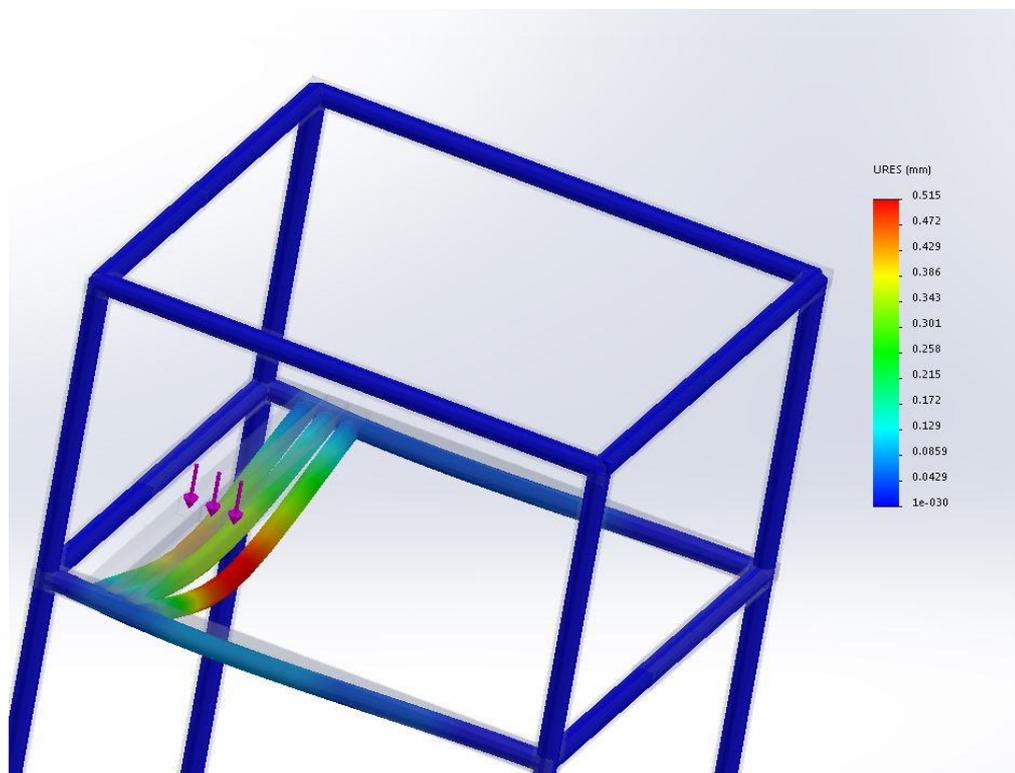
Na Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31, são mostrados em detalhe as tensões e deformações nas vigas mais solicitadas.

Figura 28 - Detalhe das tensões no suporte do motor elétrico



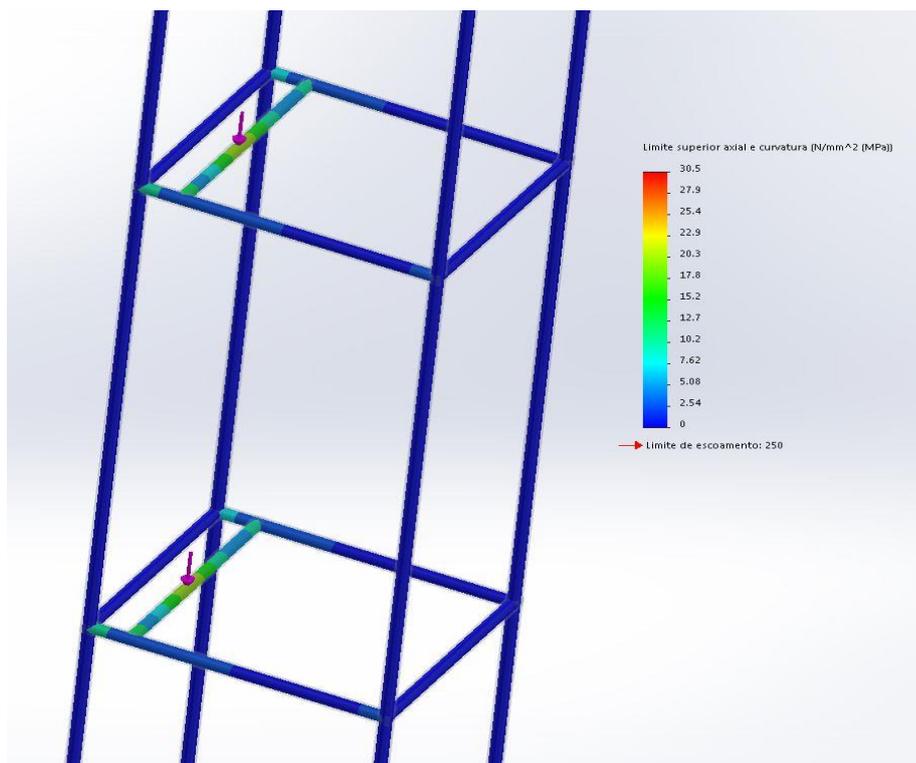
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 29 - Detalhe das deformações no suporte do motor elétrico



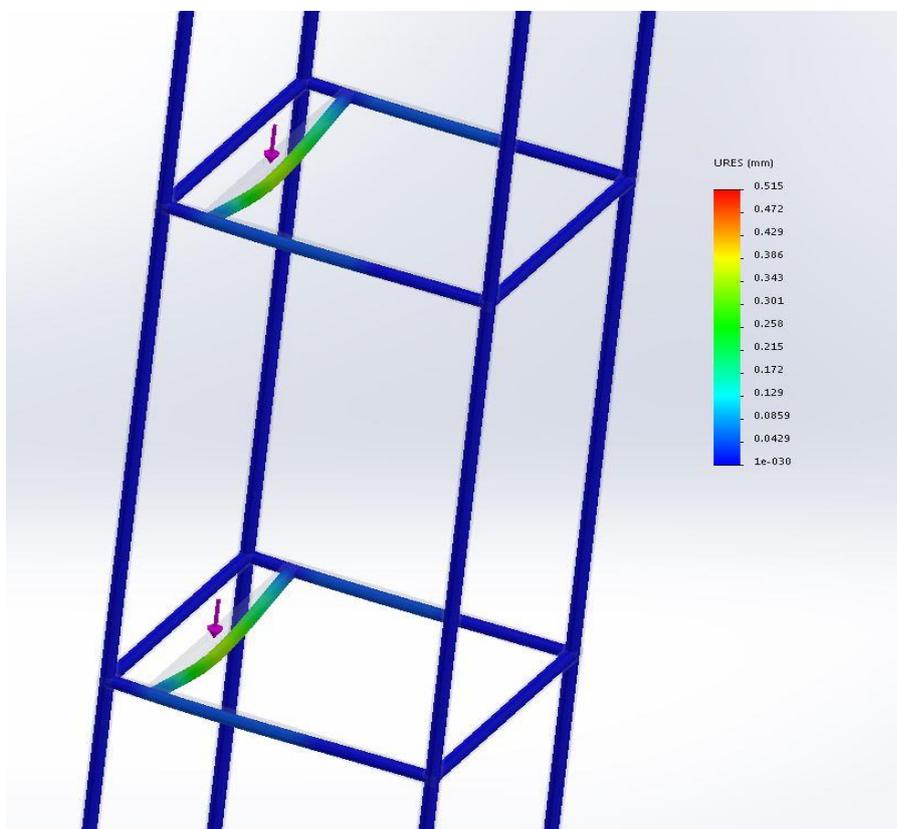
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 30 - Detalhe das tensões nas vigas de suporte das guias



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 31 - Detalhe das deformações nas vigas de suporte das guias



Fonte: Produção do próprio autor.

Percebe-se, dessa maneira, que os perfis utilizados para construção da caixa são capazes de resistir na mais crítica situação de sollicitação das peças, pois nota-se que as tensões não passam de 31 MPa, ou seja, bem abaixo da tensão de escoamento do aço A-36 que é de 250 MPa. Além disso, é visto que a máxima deformação pouco supera os 0,5 mm, um valor bem abaixo do limite de deflexão máxima restringido pela norma [24]. Assim, atesta-se que a estrutura é estável e rígida mesmo submetida às maiores cargas previstas para a operação segura do elevador.

4.7 Dispositivos de Segurança

Elevadores possuem dispositivos mecânicos de segurança que são acionados caso haja falha que ocasione o excesso de velocidade do carro. Estes dispositivos são o limitador de velocidade e o freio de segurança.

4.7.1 Limitador de Velocidade

O limitador de velocidade é um dispositivo que monitora constantemente a velocidade do elevador e basicamente é constituído de uma polia, sobre a qual corre um cabo de aço, conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Limitador de velocidade



Fonte: [38].

Caso o elevador ultrapasse o limite de velocidade permitido, é disparado pelo limitador o primeiro sistema de segurança elétrico, cortando a energia do elevador no quadro de comando. Ainda assim, caso o elevador não pare, é disparado um comando de segurança mecânico, acionando o dispositivo de desengate, localizado sobre a cabina, que por sua vez atua sobre o freio de segurança, parando definitivamente o elevador [39].

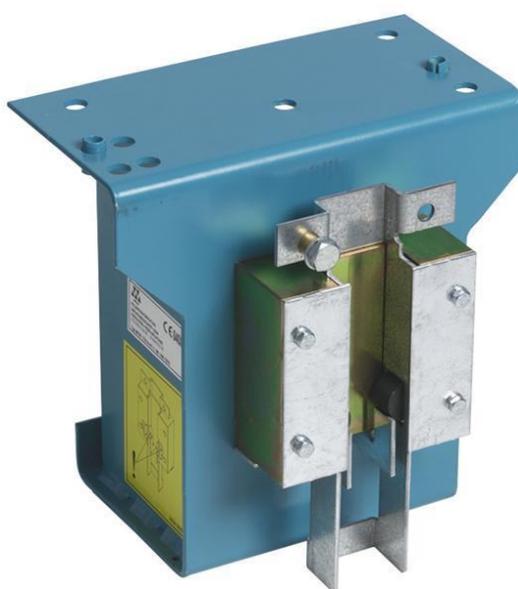
Por norma [23], recomenda-se que o desarme do limitador de velocidade para acionamento do freio de segurança do carro deve ocorrer a uma velocidade pelo menos igual a 115% da velocidade nominal e no máximo igual a 0,7 m/s.

Assim sendo, selecionou-se para o presente projeto um limitador de velocidade 0,50 m/s, polia 290 mm, cabo de 1/4 ou 3/8 da Schindler [40].

4.7.2 Freio de Segurança

Segundo a norma [23], o carro deve ser provido de um freio de segurança capaz de operar pelo menos no sentido de descida e capaz de parar o carro com a sua carga nominal, à velocidade de desarme do limitador de velocidade, mesmo se ocorrer ruptura dos elementos de suspensão, por meio de compressão nas guias, e de manter o carro preso nelas.

Figura 33 - Freio de segurança instantâneo



Fonte: [41].

5 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir do dimensionamento e especificação dos componentes do elevador residencial unifamiliar em questão.

5.1 Manutenção

O elevador e seus acessórios devem ser mantidos em bom estado de funcionamento. Para isso devem ser realizadas manutenções regulares no elevador [23]. A manutenção preventiva do elevador projetado deve ser realizada anualmente. O custo estimado da manutenção é de R\$ 480,00 [42].

5.2 Lista de Materiais

Nessa seção são listados todos os materiais especificados, as quantidades de cada peça e a referência do fornecedor ou fabricante especificado.

Tabela 27 - Lista de materiais especificados

Componente	Aplicação	Quantidade	Referência
<i>Cantoneira 3x3x1/4 (6m)</i>	<i>Cab/Cont</i>	1	<i>Met@lica [27]</i>
<i>Cantoneira 3x3x3/16 (6m)</i>	<i>Cab/Cont</i>	1	<i>Met@lica [27]</i>
<i>Cantoneira 1x1x1/8 (6m)</i>	<i>Cab/Cont</i>	3	<i>Met@lica [27]</i>
<i>Cantoneira $1\frac{1}{4} \times 1\frac{1}{4} \times 1/8$ (6m)</i>	<i>Cab/Cont</i>	1	<i>Met@lica [27]</i>
<i>Tubo Quadrado 63,5x63,5x3 (6m)</i>	<i>Cab/Cont/Caixa</i>	15	<i>Skylight [28]</i>
<i>Blocos de concreto</i>	<i>Cont</i>	8	<i>Fabricação própria</i>
<i>Vidro 10mm 0,8x2,0m</i>	<i>Cab</i>	2	<i>Glassmaxi [29]</i>
<i>Vidro 10mm 1,0x2,0m</i>	<i>Cab</i>	1	<i>Glassmaxi [29]</i>
<i>Vidro 10mm 1,2x3,0m</i>	<i>Caixa</i>	6	<i>Glassmaxi [29]</i>
<i>Vidro 10mm 1,5x3,0m</i>	<i>Caixa</i>	3	<i>Glassmaxi [29]</i>
<i>Lâmpadas 15W</i>	<i>Caixa</i>	10	<i>GE [43]</i>
<i>Porta tipo Bus 1,0x2,0m</i>	<i>Cab</i>	1	<i>Wittur [41]</i>
<i>Cabo de aço 1/4" 8x19 Seale</i>	<i>Sist. de tração</i>	40 m	<i>Cimaf [30]</i>

<i>Polias 3V 250mm</i>	<i>Sist. de tração</i>	3	<i>CPP Polias [31]</i>
<i>Motofreio 1HP</i>	<i>Sist. de tração</i>	1	<i>Weg [32]</i>
<i>Redutor sem fim</i>	<i>Sist. de tração</i>	1	<i>Rebralto [34]</i>
<i>Inversor de frequência</i>	<i>Sist. de tração</i>	1	<i>Weg [35]</i>
<i>Perfil T50/A</i>	<i>Guias</i>	8	<i>Monteferro [36]</i>
<i>Limitador de velocidade</i>	<i>Disp. de segurança</i>	1	<i>Alfa [40]</i>
<i>Freio de segurança</i>	<i>Disp. de segurança</i>	2	<i>Wittur [41]</i>

Fonte: Produção do próprio autor.

O projeto foi concentrado nos equipamentos estruturais e mecânicos essenciais para o funcionamento de elevador. Alguns itens de segurança como o cabo do limitador de velocidade, polia tensora do limitador de velocidade e acionador do freio de segurança, bem como o sistema de controle e equipamentos auxiliares como luz de emergência e intercomunicador não estão especificados aqui, porém seu custo é considerado no cálculo da estimativa do custo global do projeto.

5.3 Avaliação da Viabilidade Econômica

Quanto à avaliação financeira, o objetivo foi comparar a estimativa do custo do equipamento com o preço de equipamentos semelhantes disponíveis no mercado. Também buscou-se analisar os custos gerados a partir da utilização do elevador, considerando o consumo de energia elétrica e manutenção preventiva do equipamento.

5.3.1 Estimativa de Custo do Equipamento

Levando em conta todos os itens necessários para instalação do elevador residencial, calcula-se que o custo total do equipamento deve ser de aproximadamente R\$ 40.000,00.

Também foi parte desse trabalho fazer orçamentos de equipamentos semelhantes já disponíveis no mercado. Portanto segue na Tabela 28 - Cotações com fabricantes especializados a seguir o resultado das cotações de preço de elevadores sem casa de máquinas com alguns fabricantes.

Tabela 28 - Cotações com fabricantes especializados

Modelo / Empresa	Custo
<i>Alfa Elevadores</i>	R\$ 118.000,00
<i>Gen2 Otis Elevadores</i>	R\$90.000,00
<i>EL – H3 Montele Elevadores</i>	R\$ 76.769,00

Fonte: Produção do próprio autor.

O equipamento que mais se parece com o projeto desenvolvido é o EL-H3, divergindo apenas quanto às faces panorâmicas e o tamanho da cabina e da caixa. Já o modelo da Alfa Elevadores, conta com uma lateral panorâmica e portas automáticas em vidro. Por fim, o Gen2 é um equipamento para 6 passageiros, sendo o menor modelo disponível pelo fornecedor.

5.3.2 Custo Médio de Utilização

O consumo energético do elevador foi estimado por meio da estimativa do tempo de trabalho do motor e das lâmpadas que iluminam a cabina e a caixa. Baseando-se na potência de 1 HP do motor elétrico utilizado e prevendo a utilização de 10 lâmpadas de 15 W para iluminação, é possível calcular o custo da energia elétrica médio mensal se for determinado o tempo de utilização desses componentes. Adotou-se para o motor um regime de trabalho médio de 20 minutos por dia. Já para as lâmpadas, um tempo médio de 10 minutos por dia, pois considerou-se a instalação de dispositivos que permitam apenas o acionamento noturno e durante a utilização do equipamento, já que a caixa e a cabina do elevador são bastante translúcidas, permitindo a entrada de luz natural e, além disso, considerou-se também que o elevador trabalha metade do tempo de funcionamento em período noturno.

Assim, sabendo que o custo do KWh em vigor pela EDP Escelsa é de 0,46452 reais por quilowatt-hora [44], tem-se a Tabela 29 para o motor elétrico e a Tabela 30 para as lâmpadas.

Tabela 29 - Custo de utilização mensal do motor elétrico

Variável	Valor	Unidade
<i>Potência Elétrica</i>	0,785	<i>KW</i>
<i>Tempo/dia</i>	20	<i>min</i>
<i>Tempo/mês</i>	10	<i>horas</i>
<i>Custo KWh</i>	0,46452	$\frac{R\$}{KWh}$
<i>Custo mensal</i>	3,65	<i>R\$</i>

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 30 - Custo de utilização mensal das lâmpadas

Variável	Valor	Unidade
<i>Potência</i>	0,15	<i>KW</i>
<i>Tempo/dia</i>	10	<i>min</i>
<i>Tempo/mês</i>	5	<i>horas</i>
<i>Custo KWh</i>	0,46452	$\frac{R\$}{KWh}$
<i>Custo mensal</i>	0,35	<i>R\$</i>

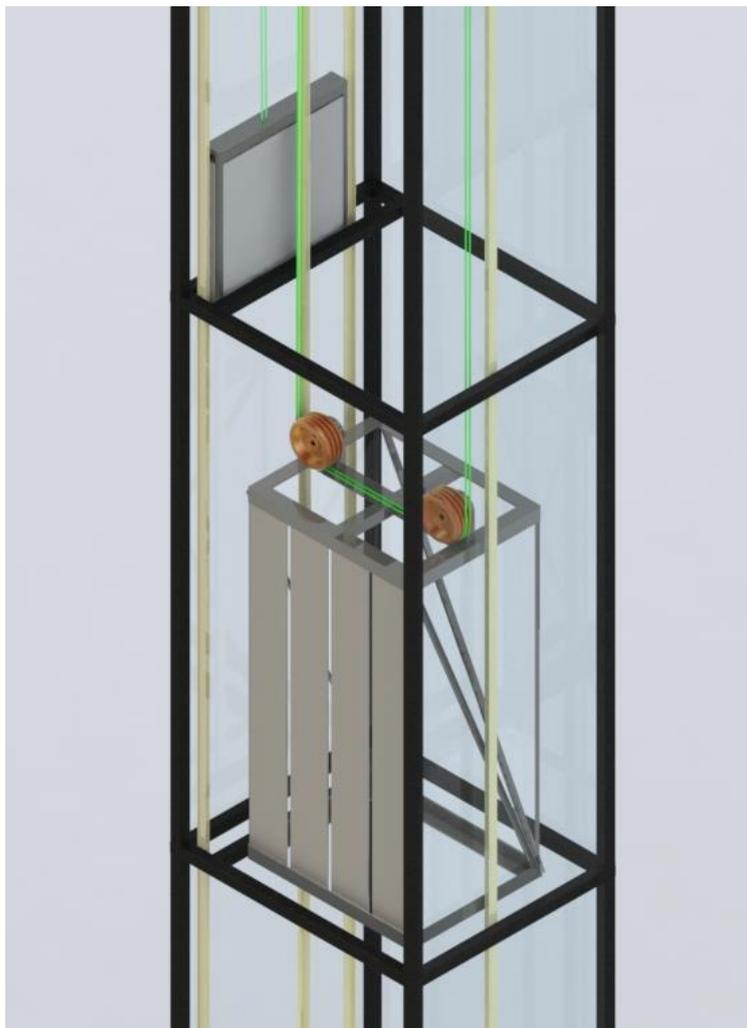
Fonte: Produção do próprio autor.

Assim, estima-se que o custo médio total agregado à conta de energia elétrica do usuário é de R\$ 4,00.

5.4 Modelo Tridimensional Completo

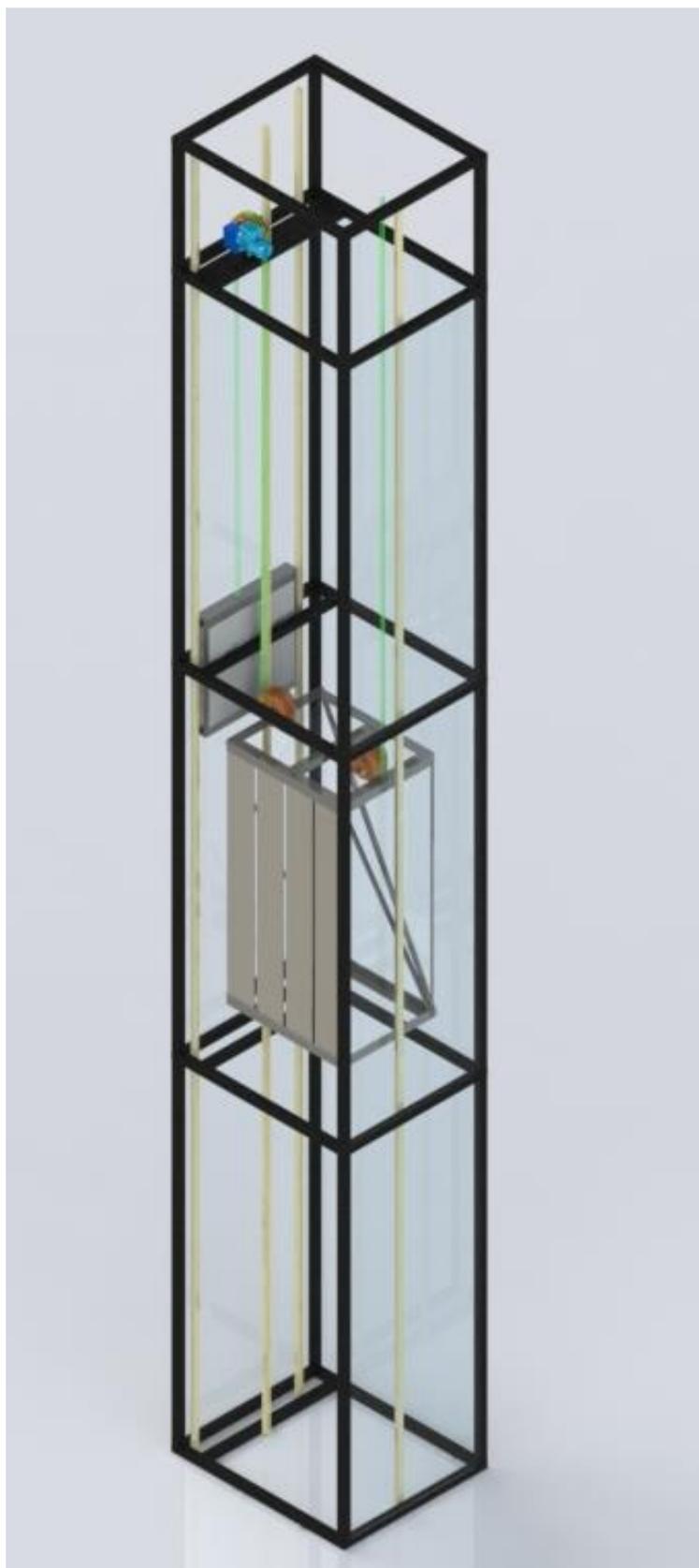
Foi gerado um modelo tridimensional completo a partir dos componentes selecionados no desenvolvimento do projeto. As imagens geradas são mostradas a seguir na Figura 34 e na Figura 35. Os desenhos de fabricação encontram-se no Apêndice A.

Figura 34 - Montagem da cabina e contrapeso na caixa



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 35 – Modelo tridimensional completo



Fonte: Produção do próprio autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema da solução de engenharia para locomoção segura entre os três pavimentos de uma residência se mostrou bastante abrangente no decorrer desse trabalho. Esse projeto envolve primeiramente o conhecimento de tecnologias de mercado na área de elevadores, do funcionamento do equipamento e das partes e termos usuais empregados nesse tipo de equipamento mecânico. Além disso, abrange a teoria de resistência dos materiais e as idealizações matemáticas para simplificação dessa problemática. Alcançou também o conhecimento sobre motores elétricos de corrente alternada, que envolve a teoria de máquinas e o procedimento de seleção de um motor para cada tipo de aplicação e solicitação. Por fim, esse tema envolve intrinsecamente as normas ABNT, que fundamentam a construção e instalação de elevadores para que sejam concebidos projetos seguros.

Diante de todo o campo que esse tema envolve, foram estudadas as teorias, as normas, a metodologia de projetos, foram também elaborados modelos, feitas simplificações e, por fim, chegou-se aos componentes que atendem às solicitações. Foram realizadas análises estruturais, dimensionamentos e seleções de partes e peças. O grande desafio de projetar um elevador residencial unifamiliar é prospectar, compreender e enquadrar todo o projeto nas condições das normas vigentes. Além disso, unificar a solução dos problemas e organizar a sequência de projeto das partes, pois os componentes do equipamento são interdependentes foi um desafio presente no decorrer do projeto.

Fazendo-se uma análise geral dos resultados, observa-se que é possível comprar os componentes dimensionados e especificados durante o projeto, montar e instalar o elevador proposto por este projeto. Isso ocorre em virtude da disponibilidade comercial dos elementos especificados e da garantia de espaço disponível para instalação. Observa-se também que o projeto desenvolvido é economicamente viável, visto que o custo é bastante inferior ao custo de um equipamento similar disponível no mercado. Além disso o custo de manutenção preventiva e o custo de operação do equipamento são baixos.

Quanto à comunicação do projeto, foram gerados modelos tridimensionais que auxiliam na visualização e na correção de eventuais equívocos presentes no projeto.

Gerou-se também desenhos de fabricação suficientes para montagem e instalação do equipamento.

Sugere-se para desenvolvimento em trabalhos futuros o projeto do sistema de controle, especificando os componentes conforme a disponibilidade e custo de mercado. Outra sugestão para desenvolvimento em trabalhos futuros é realizar o dimensionamento das juntas e soldas necessárias para instalação do equipamento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. OLIVEIRA, A. A. G. G. J. D. Os sufixos agentivos -nte e -(d/t/s)or no português: um estudo semântico diacrônico, São Paulo, 08 set. 2014.
2. FERREIRA, A. B. D. H. **Mini-Aurélio - O Minidicionário da Língua Portuguesa - Século XXI**. 4ª. ed. [S.l.]: Nova Fronteira, 2000.
3. CREA-MG. **Cartilha do Elevador**. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 32. 2013.
4. ALFABRA, E. Sobre a empresa: Elevadores Alfabra. **Site da Elevadores Alfabra**, 2016. ISSN Elevadores Alfabra. Disponível em: <<http://www.elevadoresalfabra.com.br/elevadores/elevadores-residenciais>>. Acesso em: 20/02/2016 Fevereiro 2016.
5. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. Acessibilidade. **Site do Ministério da Educação do Governo Federal**, 2013. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/?option=com_content&id=20000&Itemid=1276>. Acesso em: 07 Julho 2015.
6. DYM, C. et al. **Introdução à Engenharia - Uma abordagem baseada em projeto**. 3ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.
7. MONTE, P. J. D. **Elevadores e escadas rolantes**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2000.
8. ABNT. **NBR 16042:2012 - Elevadores elétricos de passageiros - Requisitos de segurança para construção e instalação de elevadores sem casa de máquinas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. 2012.
9. ABNT. **NBR NM 207:1999 - Elevadores Elétricos de Passageiros - Requisitos**

de Segurança para Construção e Instalação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. 1999.

- 10 UP CENTER ELEVADORES. Os diferentes tipos de elevadores residenciais. **Site da Up Center Elevadores**, 2013. Disponível em: <<http://www.upcenter.com.br/noticias/tipos-de-elevadores-residenciais/>>. Acesso em: 22 Fevereiro 2016.
- 11 SALVADOR NOTÍCIAS. **Site da Salvador Notícias**, 2013. Disponível em: <<http://www.salvadornoticias.com/2013/01/elevador-do-futuro-e-lancado-em-salvador.html>>. Acesso em: 01 Março 2016.
- 12 SIMI ELEVADORES. **Site da Simi Elevadores**. Disponível em: <<http://www.simielevadores.com.br/equipamentos/>>. Acesso em: 02 Março 2016.
- 13 ARCH DAILY. Elevadores: evolução e possibilidades de design. **Site da Arch Daily**, 2015. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/br/774522/elevadores-evolucao-e-possibilidades-de-design>>. Acesso em: 02 Março 2016.
- 14 CREL ELEVADORES. Funcionamentos do Elevador. **Site da Crel Elevadores**, 2015. Disponível em: <<http://www.crel.com.br/informativos/funcionamentos-do-elevador>>. Acesso em: 03 Março 2016.
- 15 SCHINDLER ELEVADORES. **Manual do Transporte Vertical em Edifícios - Elevadores de Passageiros, Escadas Rolantes, Obra Civil e Cálculo de Tráfego**. Schindler elevadores. São Paulo, p. 52.
- 16 7LIFT ELEVADORES. **Site da 7lift Elevadores**. Disponível em: <<http://www.7lift.com.br/>>. Acesso em: 10 Março 2016.
- 17 OTIS ELEVADORES. **Gen2 - O Elevador Sem Casa de Máquinas**. Otis Elevadores. São Bernardo do Campo. 2012.

- 18 THYSSENKRUPP ELEVADORES. **Levità - O Home Lift da ThyssenKrupp**
. **Elevadores**. ThyssenKrupp Elevadores. Guaíba. 2011.
- 19 MONTELE ELEVADORES. **Elevadores: Versatilidade, Tecnologia e Beleza**
. **para Percursos de até 12 Metros**. Montele Elevadores. [S.l.], p. 6.
- 20 LIFTECH TECNOLOGIA PARA ELEVADORES. **Domuslift: o seu elevador**
. **particular**. Liftech Tecnologia para Elevadores. Maia, p. 24.
- 21 HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5ª. ed. [S.l.]: Pearson Prentice
. Hall, 2008.
- 22 WEG. **Guia de Especificação de Motores Elétricos**. WEG Motores. Jaraguá do
. Sul. 2016.
- 23 ABNT. **NBR 12892:2009 - Elevadores Unifamiliares ou de Uso Restrito à**
. **Pessoa com Mobilidade Reduzida - Requisitos de Segurança para**
Construção e Instalação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].
2009.
- 24 ABNT. **NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de**
. **aço e concreto de edifícios**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].
2008.
- 25 PROVENZA, F. **Projetista de Máquinas**. 71ª. ed. São Paulo: Editora F.
. Provenza, 1996.
- 26 COLLINS, J. A. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas**. 1ª. ed. [S.l.]:
. LTC, 2006.
- 27 MET@LICA. **Portal Met@lica construção civil**. Disponível em:
. <<http://wwwo.metlica.com.br/tabelas/cantoneiras-de-abas-iguais>>. Acesso em:

22 Abril 2016.

28 SKYLIGHT ESTRUTURAS METÁLICAS. Tubos Quadrados. **Site da Skylight Estruturas Metálicas**, 2008. Disponível em: <http://www.skylightestruturas.com.br/tubos_quadrados2.asp>. Acesso em: 22 Abril 2016.

29 GLASSMAXI MÁXIMO EM VIDROS. **Site da Glassmaxi**. Disponível em: <http://www.glassmaxi.com.br/v03/espessura_do_vidro.php>. Acesso em: 27 Abril 2016.

30 CIMAFA. **Manual Técnico de Cabos**. CimaFA Cabos de responsabilidade. Osasco. 2009.

31 CPP POLIAS. **Polias de Ferro em V Perfil 3V**. CPP Polias. [S.l.]. 2014.

32 WEG MOTORES. Seleção de motores elétricos. **Site da Weg motores**, 2016. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp>. Acesso em: 12 Maio 2016.

33 FONTES, T. F. J. **REDIMENSIONAMENTO ELÉTRICO E MODERNIZAÇÃO DE MECANISMO DE IÇAMENTO DE PONTE ROLANTE**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2013.

34 REBRALTO REDUTORES E MOTOREDUTORES. **Redutores de coroa e rosca sem fim de simples e duplo estágio • Redutores helicoidais**. Rebralto Redutores e Motoredutores. Monte Alto. 2012.

35 WEG. **Automação Inversores de Frequência**. WEG. Jaraguá do Sul. 2014.

36 MONTEFERRO. **Product & Service**. Monteferro. Cotia. 2010.

37 NEAMAH, H. F.; ALI, W. H. Stress Analysis of Guide Rails of Elevators. **Al-Khwarizmi Engineering Journal**, Bagdá, v. V, n. 3, p. 1-13, Julho 2009.

38 ESPEL ELEVADORES. Sobre a empresa Espel Elevadores. **Site da Espel Elevadores**. Disponível em: <<http://www.espel.com.br/modernizacao-tecnica/>>. Acesso em: 21 Maio 2016.

39 ATLAS SCHINDLER. **Limitador de Velocidade - Tecnologia e segurança que acompanham sua viagem**. Atlas Schindler. São Paulo. 2012.

40 ALFA ELEVADORES. **Site da Alfa Elevadores**. Disponível em: <http://www.alfaelevadores.com.br/default.asp?actA=6&marca_ID=0&peca_VC=limitador&x=0&y=0>. Acesso em: 10 Maio 2016.

41 WITTUR. **Site da Wittur**. Disponível em: <<http://www.wittur.com/pt/default.aspx>>. Acesso em: 16 Maio 2016.

42 MM ELEVADORES. qual o preco minimo para se fazer uma boa manutencao no seu elevador. **Site da MM elevadores**. Disponível em: <<http://mmelevadores.com/news-mmelevadores/148-qual-o-preco-minimo-para-se-fazer-uma-boa-manutencao-no-seu-elevador.html>>. Acesso em: 15 Maio 2016.

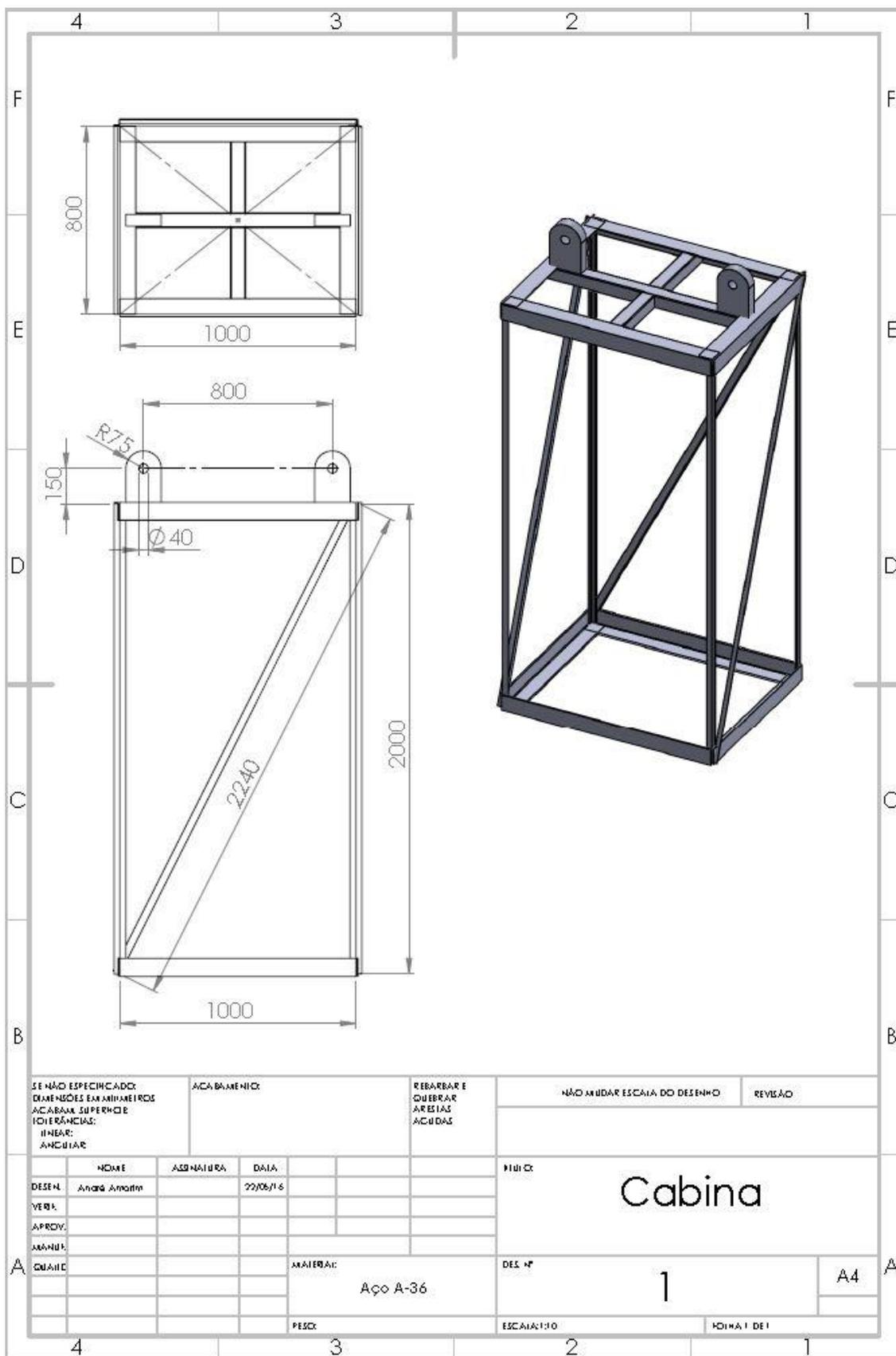
43 GE LIGHTING. **Catálogo de Produtos**. General Electric. [S.l.]. 2015.

44 ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Site de Aneel**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493>>. Acesso em: 19 Maio 2016.

APÊNDICE A

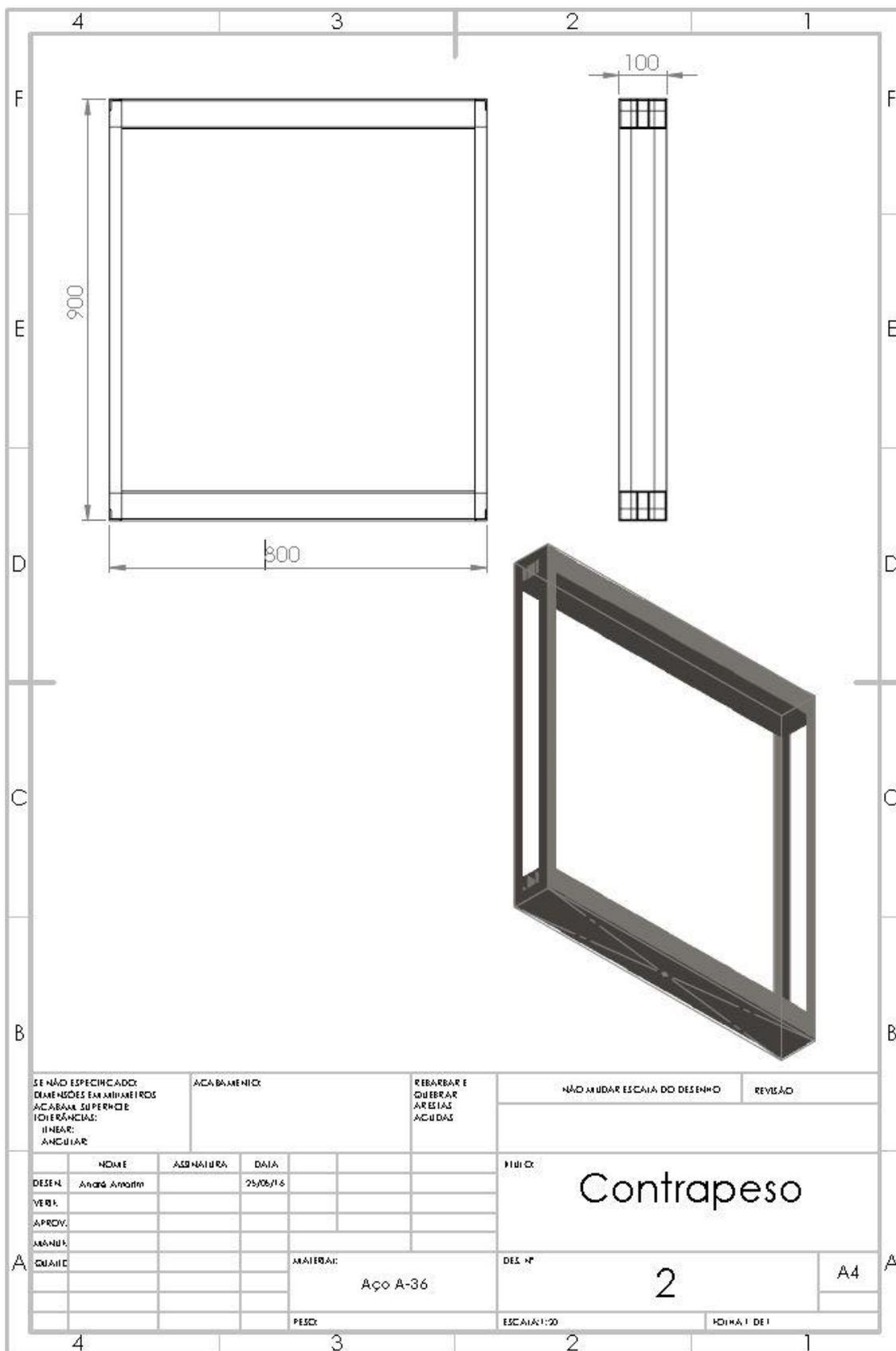
O apêndice A apresenta os desenhos produzidos para fabricação do equipamento. Segue na Figura 36 o desenho de fabricação da Cabina. Na Figura 37, encontra-se o desenho de fabricação da estrutura do contrapeso. Já a Figura 38, o desenho de fabricação da montagem da estrutura da caixa. E, por fim, na Figura 39, o desenho da montagem geral do equipamento.

Figura 36 - Desenho de fabricação da cabina



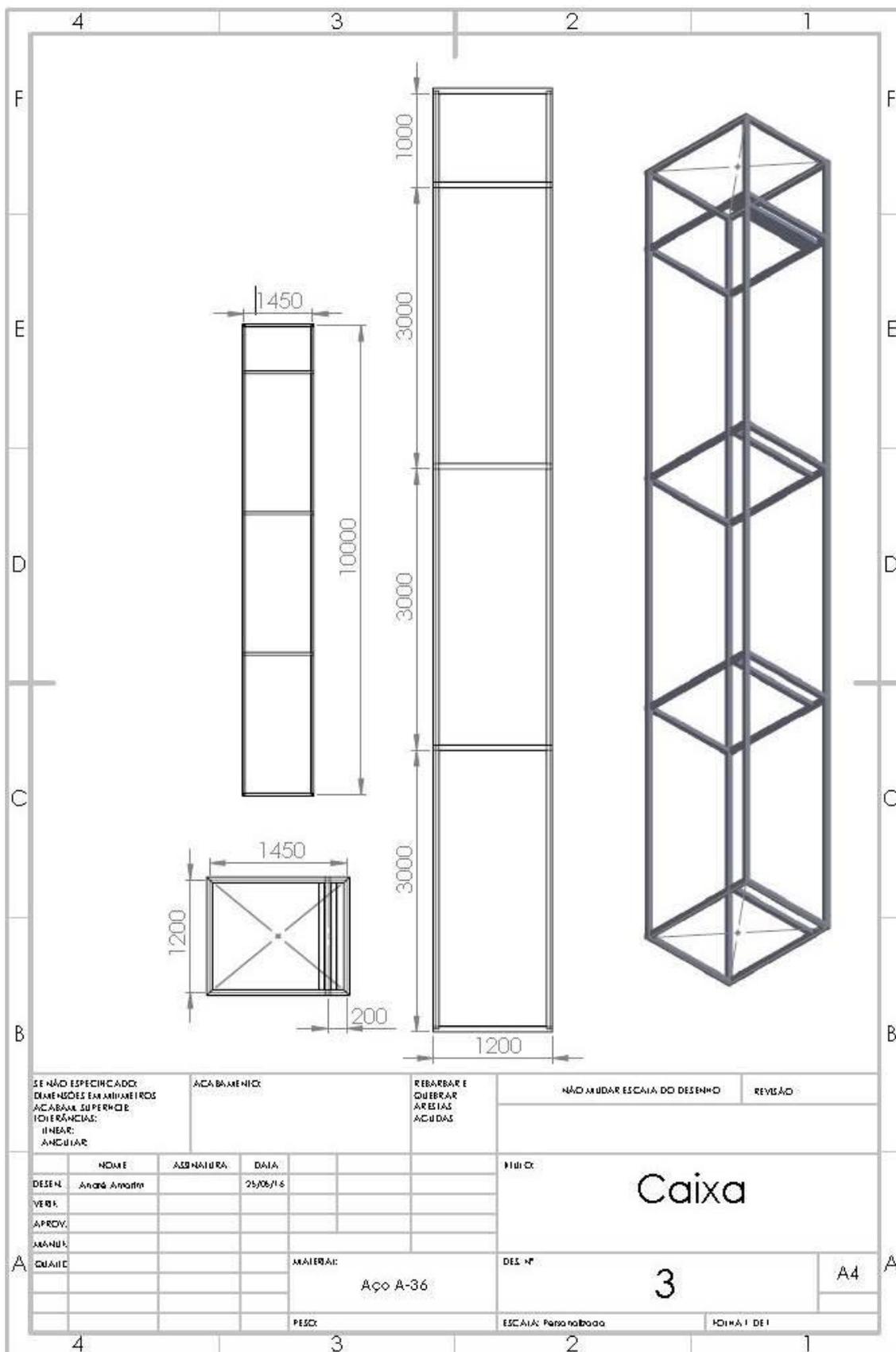
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 37 - Desenho de fabricação da estrutura do contrapeso



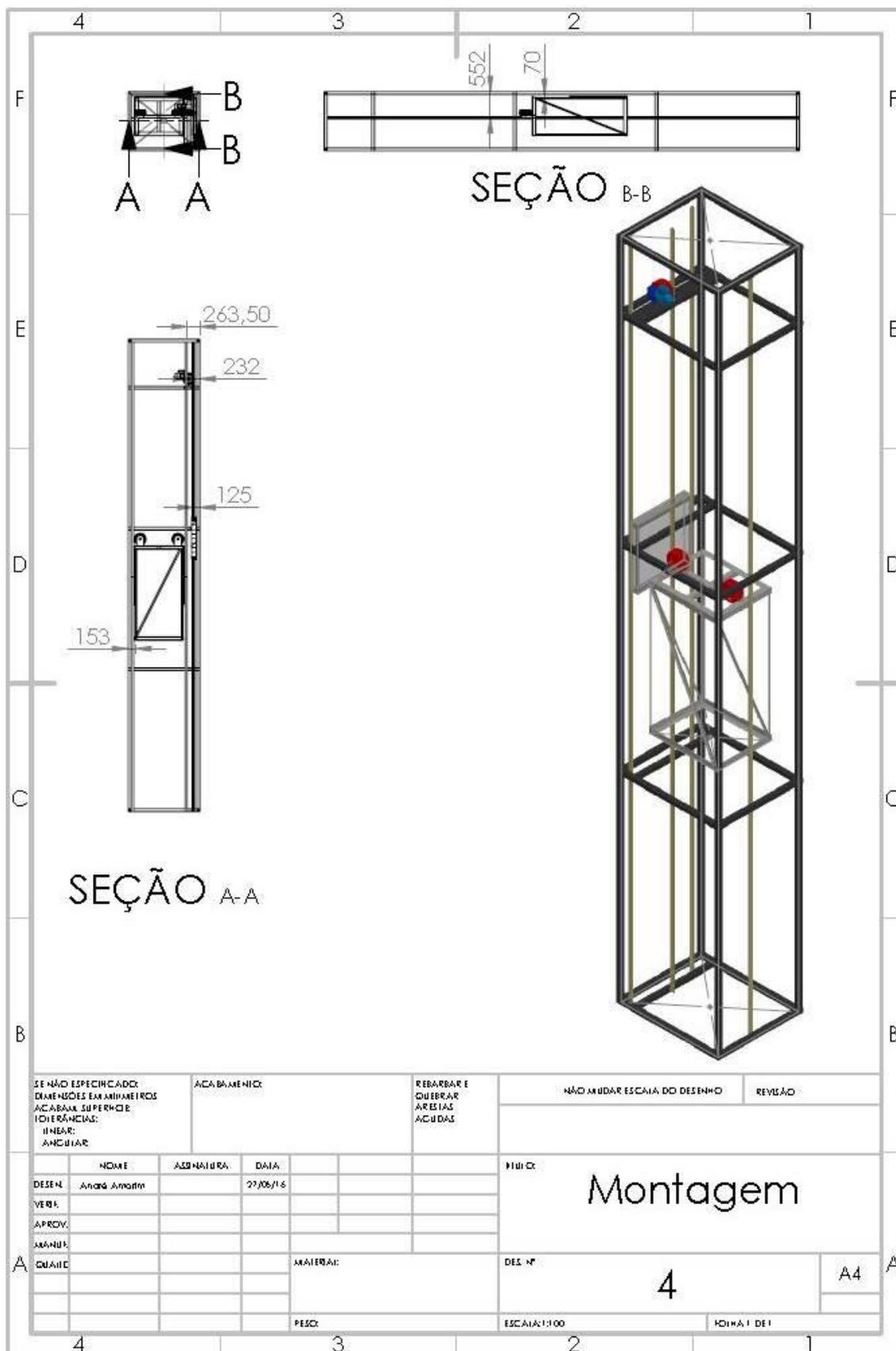
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 38 - Desenho de fabricação da estrutura da caixa



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 39 - Desenho da montagem geral do elevador



Fonte: Produção do próprio autor.