

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CLEITON SOARES CAMILO JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM
ELEVADOR DE TRANSFERÊNCIA PARA
PISCINAS

UBERLÂNDIA

2018

Cleiton Soares Camilo Júnior

**Desenvolvimento e avaliação de um elevador de
transferência para piscinas**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia
como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cleudmar Amaral de
Araújo

Uberlândia

2018

Cleiton Soares Camilo Júnior

**Desenvolvimento e avaliação de um elevador de
transferência para piscinas**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Uberlândia
como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 15 de fevereiro de 2019

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Cleudmar Amaral de Araújo
Orientador

Prof. Dr. Márcio Peres de Souza – UFU
Avaliador

Dra. Gabriela Lima Menegaz – UFU
Avaliador

Uberlândia
2018

*Este trabalho é dedicado às pessoas com mobilidade reduzida que,
por falta de recursos, não podem acessar piscinas.*

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Cleudmar pelo suporte e orientação durante o período desse trabalho.

Eu também gostaria de agradecer aos muitos que contribuíram com ideias e sugestões para o desenvolvimento desse projeto. Eu estou agradecido à empresa que fabricou o protótipo utilizado para *benchmarking*.

Por fim, eu gostaria de agradecer à Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica por garantir um ensino de qualidade durante o curso.

RESUMO

Uma das maiores preocupações em relação à segurança para pessoas com deficiência é a transferência de um lugar para outro, como de uma cadeira de rodas para uma piscina. As soluções mais recentes e inovadoras para esse problema são elevadores de piscina. Infelizmente, no Brasil, tecnologias assistivas de qualidade são importadas e, portanto, são caras, não sendo acessíveis à população de menor poder aquisitivo ou em clínicas de reabilitação localizadas em regiões pobres. Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo desenvolver um novo elevador de piscina que combina potência, baixo custo e resistência estrutural adequada, utilizando equipamentos fabricados e comercializados no mercado brasileiro. Como abordagem, foi realizado um processo de *benchmarking* no qual culminou na fabricação e estudo de um protótipo inspirado nas duas patentes mais recentes de elevadores de piscina do tipo em balanço não-giratório fixo. O resultado é um produto que atende às normas técnicas brasileiras e ao *ADA Standards*, utilizando um mecanismo de elevação operado por parafuso de potência. Assim, esse trabalho descreve o processo de desenvolvimento e validação desse produto.

Palavras-chaves: Elevador de transferência. Tecnologia assistiva. Acessibilidade em piscinas. Benchmarking.

ABSTRACT

One of the biggest concerns regarding safety for people with disabilities is transferring from one place to another, such as from a wheelchair to a swimming pool. The latest and most innovative solutions to this problem are swimming pool lifts. Unfortunately, in Brazil, quality assistive technologies are imported and, therefore, are unable to become popular. In this context, this work has developed a novel pool lift design that combines power, low cost, and robustness, that uses of equipment manufactured in the Brazilian market. As the approach, it was performed a benchmarking process culminating in the manufacture and study of a prototype inspired by the two most recent patents of pool lifts, fixed cantilevered non-rotating. The result is a product that meets the Brazilian technical standards and the ADA Standards, using a lifting mechanism operated by a leadscrew. Thus, this paper describes the development and validation process.

Key-words: Transfer lifts. Assistive technology. Accessibility in swimming pools. Benchmarking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elevador de piscina em balanço giratório.	24
Figura 2 – Elevador de piscina em balanço não-giratório.	24
Figura 3 – Elevador de piscina não em balanço.	25
Figura 4 – Patente para elevador de piscina movido por fonte hidráulica.	26
Figura 5 – Patente para elevador de piscina movido por um atuador linear.	26
Figura 6 – Patente para elevador de piscina em balanço não-giratório.	27
Figura 7 – Patente para elevador de piscina em balanço não-giratório.	27
Figura 8 – Desenho do aparelho proposto pela patente US 2014/0101839.	30
Figura 9 – Descrição sistemática do projeto do benchmark I, incluindo a visualização do protótipo fabricado.	31
Figura 10 – Modelo do projeto benchmark II.	32
Figura 11 – Áreas de aproximação e transferência conforme a ABNT NBR 9050.	35
Figura 12 – Volumes conforme a ABNT NBR 5410.	35
Figura 13 – Representação esquemática do Projeto 1.	37
Figura 14 – Moto-redutor utilizado como experimento para o projeto 1.	38
Figura 15 – Modelo do Projeto 2.	39
Figura 16 – Destaque para o sistema de transmissão de potência do modelo do Projeto 3.	39
Figura 17 – Posição inicial e final do modelo do Projeto 3.	40
Figura 18 – Modelo do Projeto 4.	41
Figura 19 – Traçado da síntese gráfica mostrando as três posições utilizadas para encontrar os pivôs fixos.	43
Figura 20 – Traçado dos elos que representam o braço de elevação (2), o braço compensador (4), e o elo de controle (3), nas três posições.	44
Figura 21 – Rascunho no SOLIDWORKS® utilizado para o dimensionamento do elevador de piscina.	45
Figura 22 – Rascunho no SOLIDWORKS® utilizado para o dimensionamento do elevador de piscina.	45
Figura 23 – Modelo matemático do elevador de piscina proposto.	47
Figura 24 – Diagrama esquemático sobreposto no modelo do Projeto 4.	47
Figura 25 – Geometria da rosca trapezoidal útil na procura de tensões de flexão e tensão transversa de cisalhamento na raiz da rosca, observando que a coordenada y aponta para dentro da página.	51
Figura 26 – Modelo no ANSYS® na posição inicial e a denominação de cada corpo.	53
Figura 27 – Condições de contorno da montagem do elevador de piscina.	54
Figura 28 – Malha final para a estrutura do elevador de piscina.	55

Figura 29 – Gráfico do histórico de convergência para a simulação da montagem do elevador de piscina.	56
Figura 30 – Malha final do conjunto fuso e porca.	57
Figura 31 – Seção de detalhe do ANSYS® Workbench, onde o usuário define as propriedades da rosca.	57
Figura 32 – Gráfico do histórico de convergência para a simulação do fuso e porca.	58
Figura 33 – Condições de contorno do parafuso de potência e a porca no ANSYS® Workbench.	59
Figura 34 – Dimensões principais finais do elevador de piscina.	60
Figura 35 – Confrontação dos resultados da simulação com o cálculos analíticos para força linear exercida pelo fuso durante o movimento de descida do Projeto 4.	66
Figura 36 – Torque exercido pelo parafuso durante o movimento de descida e subida da carga, em sequencia.	66
Figura 37 – Campo de deslocamento do modelo.	67
Figura 38 – Tensão equivalente von-Mises do modelo.	68
Figura 39 – Detalhe da região onde se encontra tensão máxima.	68
Figura 40 – Campo de deslocamento do modelo com o braço de elevação modificado.	69
Figura 41 – Tensão equivalente von-Mises do modelo com o braço de elevação modificado.	70
Figura 42 – Tensão equivalente de von Mises no fuso.	71
Figura 43 – Tensão de cisalhamento.	72
Figura 44 – Tensão máxima de cisalhamento.	72
Figura 45 – Modelo do elevador de piscina proposto em sua posição inicial.	73
Figura 46 – Modelo do elevador de piscina proposto em sua posição final.	74
Figura 47 – Da esquerda para direita: modelo do projeto proposto, benchmark II e benchmark I.	74
Figura 48 – Comparação entre as forças requeridas pelo atuador linear para carga de 1400 N.	75
Figura 49 – Condições de contorno da estrutura modificada do elevador de piscina na posição final.	93
Figura 50 – Malha final para a estrutura modificada do elevador de piscina.	93
Figura 51 – Gráfico do histórico de convergência para a simulação da estrutura modificada do elevador de piscina.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pesquisa da concorrência de elevadores de piscina.	29
Tabela 2 – Matriz de tomada de decisões.	42
Tabela 3 – Coeficientes de fricção f para pares enroscados.	49
Tabela 4 – Lista dos tipos tipos de juntas e corpos conectados.	52
Tabela 5 – Lista dos corpos do modelo e seu material.	53
Tabela 6 – Propriedades dos materiais utilizados no modelo ANSYS®.	54
Tabela 7 – Histórico de convergência para a simulação da estrutura do elevador de piscina.	56
Tabela 8 – Histórico de convergência para a simulação do fuso e porca.	58
Tabela 9 – Especificações do motor Bosch® DC 390.442.410.	63
Tabela 10 – Especificações do Arduino® Mega.	63
Tabela 11 – Especificações do controlador do motor.	64
Tabela 12 – Especificações do controlador do motor.	65
Tabela 13 – Resultados dos cálculos analíticos e da análise pelo MEF.	73
Tabela 14 – Levantamento do custo de importação do elevador de piscina ML300.	90
Tabela 15 – Estimativa do custo de fabricação do protótipo do modelo proposto.	90
Tabela 16 – Matriz de tomada de decisões.	91
Tabela 17 – Segurança - O mecanismo nunca deve tombar em qualquer posição e manter o paciente estável o tempo todo. O processo pelo qual o paciente é transferido para a água deve ser seguro e não deve expor o paciente a movimentos súbitos e bruscos.	91
Tabela 18 – Custo - O custo do mecanismo, incluindo custo de fabricação e preço do produto.	91
Tabela 19 – Confiabilidade - O mecanismo deve ser fácil de reparar e manter. Em relação a reparação e manutenção do mecanismo.	92
Tabela 20 – Complexidade - O mecanismo deve ser projetado para ser montado com o mínimo de peças e o mais simples possível.	92
Tabela 21 – Histórico de convergência para a simulação da estrutura modificada do elevador de piscina.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADA	Lei de proteção às pessoas portadoras de deficiência (do inglês: <i>Americans With Disabilities Act</i>)
CAD	Desenho assistido por computador (do inglês: <i>Computer Aided Design</i>)
CAE	Engenharia Assistida por Computador (do inglês: <i>Computer Aided Engineering</i>)
CIF	Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde
DR	Diferencial Residual
GDL	Graus de Liberdade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
ISO	Organização Internacional para Padronização (do inglês: <i>International Organization for Standardization</i>)
MEF	Método dos elementos finitos
OMS	Organização Mundial da Saúde
SELV	Sistema de Extra Baixa Tensão (do inglês: <i>Separated Extra Low Voltage</i>)
TA	Tecnologia Assistiva
USPTO	Escritório Americano de Marcas e Patentes (do inglês: <i>United States Patent and Trademark Office</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

C_n	Conjugado nominal
P_n	Potência nominal
n	Rotação do motor
DC	Corrente direta
O_2	Pivô fixo
N	Número de GDLs
B	Número de Total de Corpos
n_{j1}	Número de Juntas com 1 GDL
n_{j2}	Número de Juntas com 2 GDL
r	Comprimento entre a porca e o motor
p	Comprimento do braço de elevação que sustenta a força potente
L	Distância entre o motor e o pivô O_2
d	Comprimento do braço de elevação
F	Força potente exercida pelo motor
W	Força resistente exercida pelo peso do usuário
φ	Ângulo formado do eixo x até r
θ_2	Ângulo formado do eixo x até p
q	Vetor de posição
β	Ângulo formado do eixo x até W
γ	Ângulo entre p e d
\dot{q}	Vetor de velocidade
\dot{r}	Varição linear da posição de r
$\dot{\varphi}$	Varição da posição angular de ϕ
$\dot{\theta}_2$	Varição da posição angular de θ_2

\ddot{q}	Vetor aceleração
\ddot{r}	Variação da velocidade linear de \dot{r}
$\ddot{\varphi}$	Variação da velocidade angular $\dot{\phi}$
$\ddot{\theta}_2$	Variação da velocidade angular $\dot{\theta}_2$
A_x	Componente, em relação ao eixo x , da força de reação atuando no elo pivotado no ponto O_2
A_y	Componente, em relação ao eixo y , da força de reação atuando no elo pivotado no ponto O_2
F_x	Componente, em relação ao eixo x da força de reação entre o pistão e o elo
F_y	Componente, em relação ao eixo y da força de reação entre o pistão e o elo
m_b	Massa do elo
m_w	Massa do usuário
a_x	Componente, em relação ao eixo x , da aceleração do centro de gravidade do elo
a_y	Componente, em relação ao eixo y , da aceleração do centro de gravidade do elo
M_W	Momento devido à força W
M_F	Momento devido à força F
I	Momento de inércia do elo sobre o ponto O_2
l	Avanço da porca em relação ao fuso
N	Número de voltas que o motor executa
ΔS	Espaço linear a ser percorrido pela porca em relação ao fuso
p	Passo da rosca
N_c	Número de entradas do fuso
Δt	Intervalo de tempo de operação de descida ou subida do elevador de piscina

f_m	Frequência de rotação do motor
T_R	Torque aproximado para elevar a carga
T_L	Torque aproximado para baixar a carga
d_m	Diâmetro médio do fuso
f	Coefficiente de fricção para pares enroscados
2α	Ângulo de rosca
τ	Tensão de cisalhamento de corpo
d_r	Diâmetro menor do fuso
σ	Tensão axial no corpo do parafuso
A	Área transversal do fuso
n_t	Número de roscas engajadas
σ_b	Tensão de flexão de raiz de rosca
σ'	Tensão de von Mises
τ_{max}	Tensão máxima de cisalhamento
ΔPE_{elec}	Energia potencial de uma bateria
ΔV	Diferença de potencial
Q	Carga elétrica total da bateria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação e Objetivos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Pessoas Portadoras de Deficiência	18
2.1.1	Conceitos	18
2.1.2	Hidroterapia	18
2.1.3	Legislação de Acessibilidade	19
2.1.4	Realidade Brasileira e a Tecnologia Assistiva	20
2.2	Elevadores de piscina	21
2.2.1	Normas	21
2.2.2	Classificação	23
2.2.3	Estado da arte	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Identificação da Necessidade	28
3.2	Pesquisa Preliminar	28
3.2.1	Benchmark I	29
3.2.2	Benchmark II	32
3.3	Estabelecimento do Objetivo	32
3.4	Especificações de Projeto	33
3.5	Especificações de Desempenho	35
3.6	Idealização e Invenção	36
3.6.1	Projeto 1	36
3.6.2	Projeto 2	38
3.6.3	Projeto 3	39
3.6.4	Projeto 4	40
3.7	Seleção	41
3.8	Análise	42
3.8.1	Síntese Gráfica	42
3.8.2	Análise Cinemática	46
3.8.3	Análise Dinâmica	48
3.8.4	Parafuso de Potência	49
3.8.5	Método dos Elementos Finitos	51
3.8.5.1	<i>Análise Dinâmica do Corpo Rígido</i>	52
3.8.5.2	<i>Análise Estática</i>	54

3.8.5.3	<i>Parafuso de Potência</i>	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	Projeto Detalhado	60
4.1.1	Arquitetura do Projeto Mecânico	60
4.1.2	Funcionamento	61
4.1.3	Descrição dos Componentes	62
4.1.4	Manutenção e Limpeza	64
4.2	Resultado das Análises	65
4.2.1	Estrutura	66
4.2.2	Parafuso de Potência	70
4.3	Discussão	73
5	CONCLUSÃO	76
5.1	Trabalhos futuros	76
	 REFERÊNCIAS	 78
	 APÊNDICES	 81
	APÊNDICE A – CÓDIGOS MATLAB	82
	APÊNDICE B – RELATÓRIOS DE CUSTOS	90
	APÊNDICE C – MATRIZ DE TOMADA DE DECISÃO	91
	APÊNDICE D – ELEMENTOS FINITOS	93
D.1	Estrutura Modificada	93

1 INTRODUÇÃO

Uma das maiores dilemas enfrentados por pessoas com deficiência e/ou com mobilidade reduzida se dá em relação à segurança durante a transferência de um local para outro, como por exemplo, de uma cadeira de rodas para uma piscina. Pode haver dificuldade para a pessoa que se transfere, bem como para pessoa que ajuda na transferência. Existem diversas soluções para esse problema, como por exemplo, projetos arquitetônicos em piscinas e equipamentos de elevação e transferência que tornam o processo mais seguro e mais fácil.

Um mecanismo projetado para auxiliar a transferência de pessoas com mobilidade limitada ou deficiência física para uma piscina é comumente chamado de “elevador de piscina”. Este equipamento geralmente inclui um sistema de transmissão eletrônica, um movimento articulado, uma base de fixação anexa na borda da piscina e um assento para o usuário. Antes que os elevadores da piscina fossem inventados em 1980, o maior desafio nos centros de terapia aquática era simplesmente tirar as pessoas da água com segurança e facilidade. Elas eram transferidas de suas cadeiras de rodas por atendentes e carregadas na água e depois levadas para fora da água e de volta para suas cadeiras. O primeiro elevador de piscina comercialmente bem-sucedido mudou drasticamente esse trabalhoso procedimento, pois eliminou a dependência de tais atendentes, permitindo que mais pessoas com deficiência participassem da hidroterapia.

Esse tipo de dispositivo decorre de um projeto multidisciplinar de áreas da Engenharia em conjunto com a Fisioterapia para o desenvolvimento de Tecnologias Assistivas que auxiliem essas pessoas, melhorando sua qualidade de vida. Esta tarefa coloca muitos desafios para os pesquisadores à medida que investigam novos projetos eletromecânicos e estratégias de controle que possam funcionar em quaisquer projetos arquitetônicos de piscina e se adaptar às necessidades de mobilidade da pessoa com deficiência. Dentre os desafios enfrentados, comuns na área de engenharia de elevação, incluem: a fixação do elevador no chão, o transporte do elevador entre locais de armazenamento e uso, o fornecimento de um sistema de direção constante para operar o elevador, o provimento de estabilidade da cadeira do elevador para permanecer na posição vertical durante o movimento e a incorporação de sistemas de segurança.

1.1 Motivação e Objetivos

No Brasil, leis e normas anunciam a conquista dos direitos das pessoas com deficiência à igualdade, mas a distância entre esta conquista e a realidade ainda é grande. A realidade das pessoas com deficiência no Brasil é viver com inúmeras dificuldades

sociais, econômicas e de locomoção, todas associadas à mobilidade reduzida. O problema é ainda maior para essas pessoas pertencentes à classe econômica baixa, que são a maioria. Inúmeros estabelecimentos em regiões pobres do Brasil não têm condições financeiras de adquirir um elevador de piscina motorizado e robusto. Além disso, as opções de elevadores de piscina comercialmente disponíveis no mercado brasileiro são de pouca qualidade.

A justificativa para o desenvolvimento do produto fundamenta-se no resultado de pesquisa preliminar envolvendo centros especializados em serviços fisioterápicos e fabricantes de equipamentos médicos, que indica a carência na maioria das clínicas que dispõem de piscina para uso terapêutico de equipamento que auxilie na colocação e remoção do paciente da piscina. Além da escassez de equipamento, outros aspectos importantes caracterizam este processo de movimentação dos pacientes, como tempo de realização, risco envolvido e sobrecarga tanto física quanto psicológica dos fisioterapeutas. A baixa oferta deste tipo de produto no mercado nacional e o alto custo de importação têm levado as clínicas fisioterápicas a restringirem a oferta de serviços desta natureza, diminuindo as opções de tratamento de pacientes com estas necessidades.

Dentro desse contexto, a proposta deste trabalho é desenvolver um elevador de piscina de qualidade e econômico, utilizando equipamentos fabricados e comercializados no mercado brasileiro. Assim, pode-se oferecer um produto nacional e acessível à população com poucos recursos. Como abordagem para solução do problema apresentado, pesquisou-se inúmeras maneiras de transportar uma pessoa entre a piscina e o seu deck, no qual foram selecionados duas patentes, consideradas as mais adequadas, para se realizar um *benchmarking*. Seguindo a metodologia de projeto de engenharia, proposta por Robert L. Norton, esse trabalho apresenta um novo mecanismo, que até onde se saiba não há igual. Diversas análises foram conduzidas para garantir a segurança, potência e robustez do projeto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos com o objetivo de estabelecer as bases para posicionar os fundamentos cognitivos deste trabalho de pesquisa. O foco deste trabalho é centrado no desenvolvimento de um dispositivo para assistência na transferência de pessoas para piscinas, sendo que a maioria delas são pessoas portadores de deficiência. Portanto, durante o presente Capítulo são apresentados conceitos básicos relacionados à pessoas portadoras de deficiência e o estado da arte dos equipamentos de transferência para piscinas, assim como sua importância como ferramenta para auxiliar os processos de reabilitação.

2.1 Pessoas Portadoras de Deficiência

2.1.1 Conceitos

A incapacidade, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2012), é um termo genérico para deficiências, limitações de atividades e restrições de participação. Deficiências são problemas que afetam uma estrutura ou função do corpo; as limitações da atividade são dificuldades para executar ações ou tarefas e as restrições da participação são problemas para participar de situações vitais. Portanto, a incapacidade é um fenômeno complexo que reflete uma interação entre as características do organismo humano e as características da sociedade em que vive.

A Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde (CIF) (OMS, 2004), distingue entre funções do corpo, que são as funções fisiológicas dos sistemas orgânicos (incluindo as funções psicológicas), e estruturas do corpo, que são as partes anatômicas do corpo, tais como, órgãos, membros e seus componentes. As deficiências correspondem a um desvio ao que é geralmente aceito como estado biomédico normal (padrão) do corpo e das suas funções, que pode variar ao longo do tempo. Atividade é a execução de uma tarefa ou ação por um indivíduo e participação é o envolvimento numa situação da vida.

2.1.2 Hidroterapia

A piscina é um ambiente de suma importância para o tratamento de pessoas com deficiência. O exercício na água de uma piscina tem sido reconhecido como um tipo benéfico de fisioterapia para pessoas com incapacidades temporárias e permanentes. Um estudo feito por Barassi et al. (2017) tratou e avaliou 50 sujeitos que sofriam com deficiência neuro-motora usando técnicas de reabilitação aquática, o artigo chegou a conclusões positivas sobre sua eficácia. Segundo a pesquisa, as características físicas do

ambiente aquático podem ser exploradas pelo reabilitador para obter recuperação muscular, neurológica e sensorial específica com diferentes modalidades e tempos em comparação com as técnicas utilizadas em seco, estimulando a re aquisição de habilidades neuromotor-sensoriais prejudicadas ou mesmo perdidas. Além disso, conforme Porto, Simões e Moreira (2008), a reabilitação é uma atividade em que os resultados esperados para o paciente devem estar associados ao aumento da independência e autonomia social, possibilitando assim uma melhora significativa na qualidade de vida de todos os envolvidos no processo.

2.1.3 Legislação de Acessibilidade

No Brasil, a Constituição Federal garante a todo cidadão seus direitos sociais, entre eles o de ir e vir livremente, e garantias fundamentais para a pessoa humana, que incluem todos os indivíduos independentemente de suas condições físicas ou mentais. A principal lei brasileira que rege essa questão é a Lei de Acessibilidade – Decreto de Lei nº 5296, de 2 de Dezembro de 2004, que regulamenta a Lei nº 10.048/2000, que dá prioridade ao atendimento às pessoas com deficiência, e a Lei n. 10.098/2000, que estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas com deficiência ou com mobilidade reduzida. Por ser federal, ela vale em todos os estados do país, mas, estados e municípios ainda possuem legislações locais próprias que tratam da acessibilidade.

Tratando-se sobre a acessibilidade em piscinas, o artigo 18, parágrafo único, do Decreto Federal 5296, prevê:

Art. 18. A construção de edificações de uso privado multifamiliar e a construção, ampliação ou reforma de edificações de uso coletivo devem atender aos preceitos da acessibilidade na interligação de todas as partes de uso comum ou abertas ao público, conforme os padrões das normas técnicas de acessibilidade da ABNT.

§ 1º - Também estão sujeitos ao disposto no caput os acessos, piscinas, andares de recreação, salão de festas e reuniões, saunas e banheiros, quadras esportivas, portarias, estacionamentos e garagens, entre outras partes das áreas internas ou externas de uso comum das edificações de uso privado multifamiliar e das de uso coletivo.¹

Entre as regulamentações traçadas no Decreto supracitado, cabe mencionar as obrigações quanto às formalizações das edificações, tais como a emissão da carta “Habite-se” e a concessão de alvará de funcionamento, bem como suas renovações quando o documento foi expedido anteriormente ao Decreto 5296/2004 - para a obtenção de tais documentos, devem ser observadas e certificadas as regras de acessibilidade previstas neste Decreto e nas normas técnicas de acessibilidade da ABNT.

¹ BRASIL. Decreto nº 5.296, de 2 de dezembro de 2004. Regulamenta as Leis nos 10.048, de 8 de novembro de 2000, que dá prioridade de atendimento às pessoas que especifica, e 10.098, de 19 de dezembro de 2000, que estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 dez. 2004. Seção 1, p. 5.

2.1.4 Realidade Brasileira e a Tecnologia Assistiva

Mais de um bilhão de pessoas em todo o mundo convivem com alguma forma de deficiência. Nos próximos anos, a deficiência será uma preocupação ainda maior porque sua incidência tem aumentado. Isto se deve ao envelhecimento das populações e ao risco maior de deficiência na população de mais idade, bem como ao aumento global de doenças crônicas tais como diabetes, doenças cardiovasculares, câncer e distúrbios mentais (OMS, 2012). No Brasil, existem aproximadamente 45 milhões de pessoas vivendo com algum tipo de deficiência. Destas, cerca de 13 milhões apresenta deficiência motora (IBGE, 2010b).

De modo geral, essas pessoas enfrentam inúmeras dificuldades sociais, econômicas e de locomoção, todas associadas à mobilidade reduzida. Obstáculos relativos às instalações incluem áreas de estacionamento inacessíveis, acesso inadequado aos edifícios, sinalização deficiente, portas estreitas, degraus internos e instalações sanitárias inadequadas. Uma pesquisa realizada em 41 cidades brasileiras sobre as barreiras arquitetônicas nas unidades de assistência básica à saúde concluiu que cerca de 60% delas não permitem o acesso adequado de pessoas com dificuldades funcionais. Dentre essas inúmeras barreiras, as piscinas, em geral, são inacessíveis para grande parte dessas pessoas (SIQUEIRA et al., 2009).

A eliminação de barreiras de acesso nas ruas, edificações e transportes mereceu a atenção daqueles que pensaram e elaboraram a carta constitucional e a igualdade das pessoas portadoras de deficiência, pelo menos perante a lei, ficava garantida como possibilidade de integração destas pessoas na cidade permitindo sua circulação e o atendimento de suas necessidades espaciais. Leis e normas anunciam a conquista dos direitos das pessoas com deficiência à igualdade, mas a distância entre esta conquista e a realidade ainda é grande. A realidade das pessoas com deficiência no Brasil e no mundo revela poucas oportunidades para engajamento em atividades esportivas, seja com objetivo de recuperação, lazer ou competição. Ainda existem inúmeras barreiras físicas, como calçadas estreitas, com pavimento deteriorado e com obstáculos difíceis de serem detectados por pessoas portadoras de deficiência visual; portas demasiado estreitas para que se passe uma cadeira de rodas; escadas inacessíveis em edifícios; elevadores pequenos e sem sinalização em braille; ônibus, trens e aviões inacessíveis; telefones e interruptores de luz colocados fora da área de alcance ou inexistência de banheiros adaptados. Estas barreiras são o resultado da despreocupação e do despreparo dos técnicos das diversas áreas (COHEN, 1998).

Diante desse quadro de incapacidade funcional, um mecanismo necessário é a utilização da Tecnologia Assistiva (TA). Esta é uma área do conhecimento que engloba equipamentos e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação de pessoas com deficiência, incapacidade ou mobilidade reduzida, visando autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social. No caso da acessibilidade

em piscinas, as tecnologias assistivas mais recentes se dão no desenvolvimento de elevadores para transferência.

No Brasil, muitos recursos desenvolvidos nas universidades não são incorporados ao mercado, sendo que a variedade de produtos fabricados no país é pequena e grande parte dos aparelhos importados não dispõe de isenção tributária, elevando significativamente o custo da TA disponível para venda. Portanto, é de suma importância para o Brasil o incentivo do desenvolvimento de produtos e serviços de TA de baixo custo para atender as classes sociais menos favorecidas e assim, aplicar o conceito de sustentabilidade social, elevando a qualidade de vida de toda a população. Para que isso ocorra, de acordo com Negri (2018), existem muitos gargalos que vão desde a formação de cientistas e pesquisadores até o fortalecimento da infraestrutura necessária para o pleno desenvolvimento de suas atividades, passando por um ambiente econômico mais propício à inovação. Todos, ou grande parte desses aspectos, podem ser influenciados ou aprimorados a partir da implementação de políticas públicas adequadas e inteligentes.

2.2 Elevadores de piscina

Existem vários modos de transferir uma pessoa para fora e dentro de uma piscina. Ao longo do tempo esses métodos foram ficando mais fáceis e seguros. Nessa seção, é apresentada a fundamentação teórica sobre os elevadores de piscina, tecnicamente chamados de Equipamentos de transferência, que são dispositivos de elevação assistiva projetados para transferir um indivíduo para dentro e fora de uma piscina. Categoricamente, elevadores de piscina são um tipo de elevadores de pacientes.

2.2.1 Normas

No Brasil, a ABNT NBR 9050 (ABNT, 2015) é a norma que estabelece critérios e parâmetros técnicos a serem observados quanto ao projeto, construção, instalação e adaptação do meio urbano e rural, e de edificações às condições de acessibilidade. Os padrões dessa norma exigem que as novas piscinas construídas ou alteradas tenham meios de acessibilidade, que também incluem requisitos específicos para elevadores de piscina: localização, tamanho do assento, capacidade de elevação e espaço no chão. Essa norma também classifica e normaliza os métodos de acesso as piscinas, sendo esses: bancos de transferências, degraus submersos, rampas submersas e equipamentos de transferência.

Banco de transferência. São paredes construídas na borda da piscina, na altura do assento da cadeira de rodas. Elas têm uma ou duas hastes que permitem ao indivíduo deixar sua cadeira e ir para a piscina. Geralmente são usadas em conjunto com um outro dispositivo de acesso, tal como uma rampa. Não envolve mecanismos mecânicos, e não gera manutenção. É uma opção interessante para usuários que desejam praticidade e agilidade

para acessar a piscina. Entretanto, o banco de transferência não atende as pessoas que têm dificuldade de movimentar-se, permanente ou temporariamente, ou com redução efetiva de sua mobilidade, flexibilidade, coordenação motora. Além disso, uma obra arquitetônica para adaptar uma piscina, demandaria quebra de piso, nivelamento, e outras atividades, demandando tempo e custo inicial alto.

Degraus ou rampas submersas. São uma opção para pessoas que conseguem andar. Estas rampas são feitas nos mesmos padrões que as rampas terrestres de acessibilidade para deficientes. Os corrimãos são necessários em ambos os lados da rampa. Cadeiras de rodas convencionais não são recomendadas para uso submerso. Entretanto, esse tipo de projeto é limitado pelo tamanho do local, pela verba disponível e pelo tipo de atividade a ser realizada nela. Mesmo que adaptações arquitetônicas nas piscinas ofereçam certas vantagens, ainda são limitadas, de modo que pessoas com dificuldade de locomoção não são capazes de se locomoverem de forma independente.

Equipamentos de transferência. O produto desenvolvido por este trabalho pertence à esta classificação. São mecanismos projetados para auxiliar a transferência de pessoas para piscinas. Esses equipamentos geralmente são sistemas de elevação eletromecânicos ou hidráulicos, possuindo um movimento articulado, uma base de fixação anexa na borda da piscina, e um assento para o usuário.

Em nível internacional, o único padrão existente para elevadores de pacientes é a ISO 10535:2006. Este padrão não só fornece critérios de projeto e fabricação, mas também define as várias categorias para elevadores de pacientes. Divide em duas categorias: guindaste estacionário e guindaste móvel. Um guindaste estacionário é um equipamento com o qual uma pessoa é levantada, transferida ou movida dentro de uma área predefinida. Os guindastes estacionários podem ser fixados, por exemplo, em uma parede, teto ou piso, montados em uma âncora de plataforma ou podem estar livres no chão. Um guindaste móvel é um equipamento provido com um ou mais dispositivos (por exemplo, rodas) que é livremente móvel sobre o chão e com o qual uma pessoa é levantada, transferida ou movida independentemente de uma instalação fixa ou uma âncora de plataforma. A diferença básica entre um guindaste móvel e um guindaste estacionário é que os guindastes móveis são usados para transportar o usuário de um lugar para outro, como de uma cama para uma banheira ou banheiro. Já os guindastes estacionários exigem que o usuário seja realmente transferido para o dispositivo para, então, ser transferido para o destino pretendido, que é adjacente ao guindaste estacionário. (S.R. SMITH, 2012)

Os critérios de *design* e os protocolos de teste apropriados para todos os tipos de elevadores de pacientes estão contidos na ISO10535: 2006. A adesão a este padrão garantirá um produto seguro em relação à integridade estrutural, estabilidade, segurança elétrica ou eletrônica e operação. Quaisquer produtos vendidos internacionalmente, especialmente na Comunidade Europeia, geralmente devem provar o cumprimento de um padrão prevalecente.

Se uma empresa é certificada ISO9001, eles podem auto certificar seus produtos, pois todos os seus processos são auditados anualmente. Outras empresas podem empregar agências de certificação independentes para documentar sua conformidade com uma norma. (S.R. SMITH, 2012)

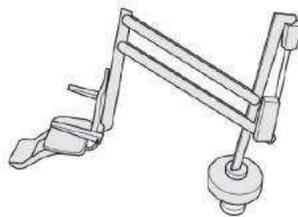
Nos Estados Unidos, país onde estão registrado a maioria das patentes publicadas e relacionadas à elevadores de piscina, existe a Lei dos Americanos Portadores de Deficiências, do inglês *Americans With Disabilities Act*, ou “ADA” (DOJ, 2010), que determina, por lei federal, que todos os estabelecimentos públicos devem eliminar as barreiras de uso de tais instalações para aqueles com deficiências. O ADA define meios para eliminar as barreiras de uso de piscinas públicas e spas como provimento de elevadores de piscina, entrada inclinada para piscinas, ou ambos. Os elevadores de piscina devem ser instalados e estar prontos para uso em todos os momentos em que a piscina estiver aberta. A ADA estabelece ainda definições de “piscinas públicas” que abrangem amplamente as piscinas que não são limitados a proprietários privados. Essa norma tem renome internacional, e é bastante referenciada em trabalhos científicos. Acredita-se que tal reconhecimento se deu pelo fato dos Estados Unidos ter sido um dos primeiros países a tomar ações efetivas para a promoção da acessibilidade.

2.2.2 Classificação

Uma ampla gama de dispositivos de transferência de pessoas foi desenvolvida variando de sistemas simples de manivela e roldanas à elevadores instalados no teto parecidos como uma ponte rolante. Para fins práticos, neste trabalho, não são revisados todos os tipos existentes, mas apenas os modelos de dispositivos de interesse para essa pesquisa, e que são amplamente usados e comercializados. Desse modo, para facilitar o entendimento, foram divididos em três principais grupos: em balanço giratório, em balanço não-giratório e não em balanço. Tal divisão foi proposta pela empresa S.R. SMITH (2012).

Elevadores em Balanço Giratório. Esse tipo de elevador de piscina tem a capacidade de elevar e girar a posição do assento sobre o deck e estender o assento para fora do ponto de ancoragem e sobre qualquer obstáculo no caminho para a água. Esse recurso permite transferências seguras, sejam estas independentes ou assistidas. Os elevadores em balanço giratório podem funcionar de forma eficaz em praticamente qualquer tipo de design de piscina. Eles podem ser fixos, ancorados ou autoportante. A Figura 1 ilustra um exemplo dessa classificação de elevador de piscina.

Figura 1 – Elevador de piscina em balanço giratório.



Fonte: (S.R. SMITH, 2018)

Elevadores em Balanço Não-Giratório. Os elevadores de piscina desse tipo estendem o assento diretamente do ponto de carregamento. Assim como elevadores não em balanço, eles têm restrições de amplitude de movimento. De forma geral, são mais eficazes com o design de borda da piscina simples sem calha. A Figura 2 ilustra um exemplo dessa classificação de elevador de piscina.

Figura 2 – Elevador de piscina em balanço não-giratório.



Fonte: (S.R. SMITH, 2018)

Elevadores Não em Balanço. São elevadores em que o assento está preso e gira em torno do ponto de ancoragem. O uso de elevadores não em balanço é limitado a projetos de piscina simples que apresentam nenhuma calha ou calhas embutidas. Os elevadores movidos a água são bons exemplos de elevadores não em balanço. Esses tipos de elevadores são geralmente fixados na beira da piscina, mas podem, em alguns casos, ser colocados em uma âncora de deck. A limitação é que esses tipos de elevadores sempre precisam ser conectados a um abastecimento de água. Além disso, elevadores hidráulicos operados podem ser lentos para baixar ou suspender, o que pode ocasionar em alguma dificuldade em momentos de emergência. A Figura 3 ilustra um exemplo dessa classificação de elevador de piscina.

Figura 3 – Elevador de piscina não em balanço.



Fonte: (S.R. SMITH, 2018)

2.2.3 Estado da arte

Esta subseção oferece uma visão geral sobre pesquisas relevantes sobre o projeto, atuadores e controle de elevadores de piscina com foco em patentes recentes e resultados de pesquisas que têm impacto sobre esta abordagem.

Antes que os elevadores de piscina fossem inventados em 1980, o maior desafio nos centros de terapia aquática era simplesmente tirar as pessoas da água com segurança e facilidade. Elas eram levadas para fora de suas cadeiras de rodas por atendentes e carregadas por esses atendentes na água e depois levadas para fora da água e de volta para suas cadeiras. O primeiro elevador de piscina comercialmente bem-sucedido mudou drasticamente esse trabalhoso procedimento, pois eliminou a dependência de tais atendentes, permitindo que mais pessoas com deficiência participassem da hidroterapia. (SMITH, 2017)

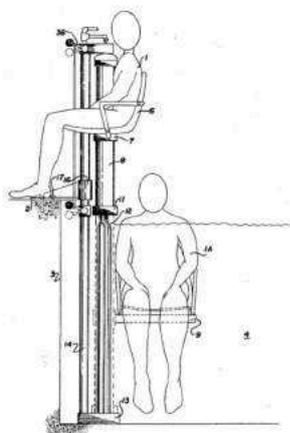
A evolução histórica do desenvolvimento de elevadores de piscina pode ser traçada desde a invenção patenteada por Nolan (1980) e mostrada na Fig. (4). Esse dispositivo transporta verticalmente pessoas em uma trajetória helicoidal dentro e fora da piscina. Seu mecanismo consiste em um cilindro hidráulico adaptado em um guia para seguir um came helicoidal alongado à medida que o cilindro se estende verticalmente. Assim como diversas outras patentes desta época é alimentado por uma bomba hidráulica.

Em 1998, a próxima geração de elevadores de piscinas foi inventada e ajudou a superar muitas das limitações do primeiro projeto. Este novo elevador de piscina era autoportante e alimentado por bateria, projetado para trabalhar com projetos de piscina mais contemporâneos. O dispositivo patenteado por Caden, Resch e Sander (1998), Fig. (5), ilustra esses avanços. Nele pode-se notar que o mecanismo de barras é movimentado

por um atuador linear elétrico, que é silencioso, não tóxicos e eficientes energeticamente.

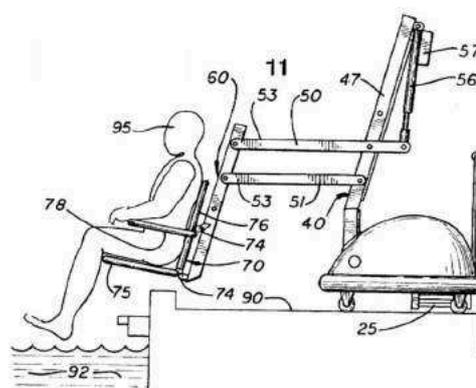
Em comparação com os sistemas hidráulico e pneumático, a solução desse atuador linear é muito mais fácil de instalar. Ele ocupa menos espaço, uma vez que não há mangueiras e bombas que exijam manutenção rotineira para evitar riscos à segurança e vazamentos de óleo. Além disso, tem tempo de vida longo, com pouca ou nenhuma manutenção. Isso garante custo total de operação muito baixo em comparação com os outros sistemas.

Figura 4 – Patente para elevador de piscina movido por fonte hidráulica.



Fonte: (NOLAN, 1980)

Figura 5 – Patente para elevador de piscina movido por um atuador linear.

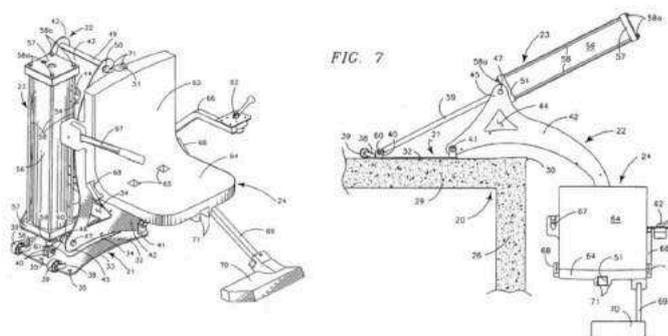


Fonte: (CADEN; RESCH; SANDER, 1998)

Diversas patentes foram registradas para novos projetos de dispositivos de transferência do tipo em balanço não-giratório. Sendo que a patente mais antiga foi registrada por Terzo (2005), mostrada na Fig. (6). Este é um dispositivo em que o movimento particular e a forma arqueada do quadro de elevação deste elevador de piscina permitem que ele seja de natureza menor, mais simples e mais compacta do que os anteriores elevadores de piscina.

No entanto, esses elevadores de piscina têm sido tipicamente adequados para uso em áreas de ambiente controlado, como piscinas de clubes, instalações de terapia e de cuidados a idosos que podem ser internos e têm pessoal disponível para realizar facilmente manutenção, configuração e supervisão de uso. Se usado ao ar livre, os elevadores de piscina citados anteriormente podem exigir a remoção e colocação em armazenamento para proteção contra condições climáticas adversas ou ambientes; ou proteção temporária adicional especial. Além disso, estes elevadores de piscina existentes contêm movimentos mecânicos perigosos desprotegidos que podem esmagar, apertar ou ferir um usuário ou alguém próximo. Levando em conta isso, Sheridan (2014) propôs o dispositivo mostrado na Fig. (7), que é eletricamente abastecido e apresenta um sistema motor aprimorado

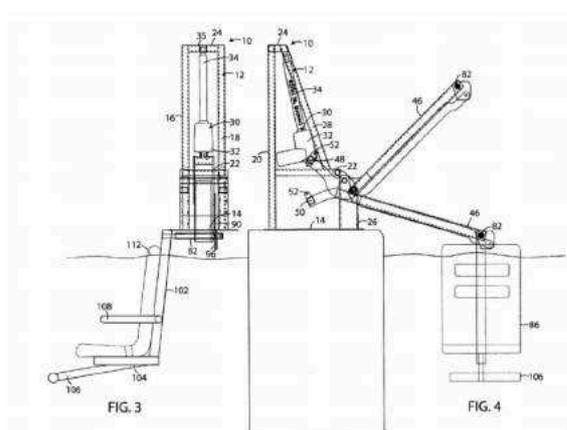
Figura 6 – Patente para elevador de piscina em balanço não-giratório.



Fonte: (TERZO, 2005)

que limita o movimento mecânico de eletrônicos, atuadores e articulação mecânica. O problema do movimento mecânico de elevação anterior é resolvido, proporcionando o uso de uma cobertura física protetora fixa para os eletrônicos e o sistema de acionamento do movimento. O dispositivo atende à necessidade dos novos requisitos do ADA por ser adequado para condições ambientais adversas; bem como fornece melhorias de segurança necessárias para uso público geral em tais ambientes.

Figura 7 – Patente para elevador de piscina em balanço não-giratório.



Fonte: (SHERIDAN, 2014)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia seguida por este trabalho foi proposta por Norton (2010) e engloba dez etapas, a saber: identificação da necessidade, pesquisa preliminar, estabelecimento do objetivo, especificações de desempenho, idealização e invenção, seleção, análise, projeto detalhado, prototipagem e teste, e produção. Esse não é um processo necessariamente linear. O autor esclarece que, por sua natureza, esse é iterativo. De fato, ao longo do desenvolvimento deste produto foi necessário retornar diversas vezes a fases anteriores do processo por razões que serão discutidas, mas que, ao final, foram de grande valia à aprendizagem do problema e sua melhor solução. Sendo assim, são apresentados nas próximas Seções, as fases do ciclo de desenvolvimento do produto e as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento deste projeto.

3.1 Identificação da Necessidade

Este é o primeiro passo da metodologia, onde declara-se a necessidade primordial que dá início ao processo, de forma breve e sem muitos detalhes. Esse trabalho busca atender a necessidade de pessoas com deficiência em acessar piscinas de maneira autônoma e a um custo baixo. A pesquisa realizada por Cerqueira et al. (2010) indica a carência na maioria das clínicas de reabilitação, que dispõem de piscina para uso terapêutico, de equipamento que auxilie na colocação e remoção do paciente da piscina, o que têm as levado elas a restringirem a oferta de serviços desta natureza.

3.2 Pesquisa Preliminar

A segunda fase da metodologia de projeto, considerada por Norton (2010) como a mais importante do processo, é a pesquisa preliminar. Aqui deseja-se aprender a respeito do problema estudando produtos já existentes. Para tanto, foi feita uma busca de patentes junto ao Escritório Americano de Marcas e Patentes (USPTO, na sigla em inglês) e o Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), apresentada no Capítulo anterior.

A Tabela 1 apresenta a pesquisa da concorrência, isto é, uma busca dos preços praticados no mercado brasileiro e estrangeiro. Esta pesquisa mostrou que nem todos os produtos comercializados possuíam uma patente e muitos desses eram similares a patentes de outros concorrentes.

Tabela 1 – Pesquisa da concorrência de elevadores de piscina.

Produto	País	Tipo	Preço
ELIT 150	Brasil	BG	R\$ 11.500,00
Freedom Pool Lift	Brasil	BG	R\$ 29.000,00
Elevador hidráulico Fluidra	Brasil	NB	R\$ 42.300,00
Cajumoro Guarujá	Brasil	BG	R\$ 19.800,00
Cajumoro Ipanema	Brasil	BNG	R\$ 22.500,00
S.R. Smith ML 300	Estados Unidos	BNG	U\$ 3.171,10
Pool Lift Patriot Portable AT1	Estados Unidos	BNG	U\$ 3.800,00
Harmar P350	Estados Unidos	BNG	U\$ 3.475,00
Global R-450R Rotational	Estados Unidos	BG	U\$ 5.099,00

Fonte – Produzido pelo autor.

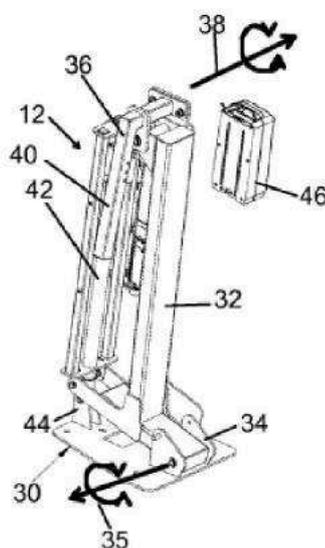
Nota – Abreviações: BG = Balanço Giratório, BNG = Balanço Não-Giratório, e NB = Não em Balanço.

A pesquisa da concorrência mostrou que os elevadores de piscina do tipo em balanço não giratório fixo são os mais baratos. Isto se deve a sua menor complexidade, e conseqüente menor quantidade de partes móveis. Dentre todos os projetos de elevadores de piscina pesquisados, escolheu-se dois exemplares para se realizar uma análise detalhada de cada componente do mesmo, este é um processo usualmente chamado de *benchmarking*. Sendo assim, são apresentado abaixo os detalhes de cada um.

3.2.1 Benchmark I

O elevador de piscina ML 300 comercializado pela empresa S.R. Smith® tem sua patente registrada no USPTO com número US 2014/0101839. A fim de aprender a respeito do funcionamento desse tipo de elevador de piscina, fabricou-se um protótipo baseado nesse produto. Esse elevador é referido nesse trabalho como protótipo de benchmark I. A Figura 8 mostra o desenho do aparelho disponível na publicação da patente.

Figura 8 – Desenho do aparelho proposto pela patente US 2014/0101839.



Fonte: (SMITH, 2014)

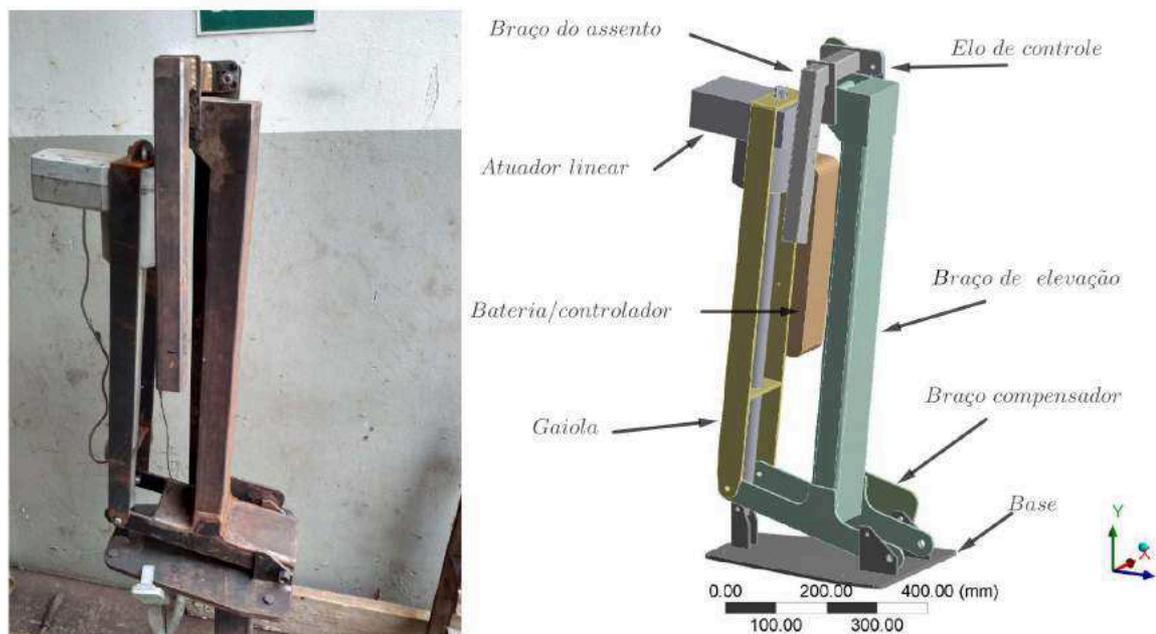
Esse elevador de piscina tem a base posicionada adjacente à borda da piscina. A base articula rotativamente uma estrutura de elevação arqueada alongada em torno de um eixo paralelo à borda da piscina. Um atuador linear eletromecânico estende-se na interligação articulada entre a base e a porção medial da estrutura de elevação arqueada para movimentar articuladamente um suporte da cadeira, transportado pela estrutura de elevação e orientado numa direção paralela à borda da piscina adjacente, a partir de uma primeira posição vertical acima do deck da piscina para uma segunda posição do lado de baixo do deck na cavidade da piscina. Um braço de orientação mantém o suporte do usuário da cadeira na orientação horizontal do assento durante o curso de seu movimento.

Esse elevador de piscina não é fabricado no Brasil, portanto foi orçado com a empresa Fluidra®, representante da marca no Brasil, um valor de aproximadamente R\$ 50.000,00 para a importação desse produto, incluindo os impostos e frete. A Tabela 14, no Apêndice B, detalha o levantamento feito. Uma vez que esse preço é impraticável para esta pesquisa, a outra única opção para realizar o *benchmarking* foi fabricar um protótipo baseado nesse produto.

Para a fabricação do protótipo benchmark I, primeiramente foi utilizado o modelo 3D, do Revit®, e outros desenhos técnicos disponibilizados no website da empresa para criação de um modelo 3D no software SOLIDWORKS®. Os equipamentos elétricos e o atuador linear, com 10.000 N de força linear, foram importados da empresa HIWIN®. A fabricação da estrutura metálica e montagem final foi feita na empresa Torneadora e Fresadora Martins Camilo Ltda. A Figura 9 mostra o modelo 3D do projeto benchmark I

e protótipo fabricado.

Figura 9 – Descrição sistemática do projeto do benchmark I, incluindo a visualização do protótipo fabricado.



Fonte: Produção do próprio autor.

Um evidente problema neste elevador é a sua preservação. Para zelar de sua integridade, deve-se seguir um laborioso programa de manutenção. Isto inclui, manter todos os componentes eletrônicos limpos e secos, manter a tampa do console/bateria instalada durante todo o período para evitar o acúmulo de umidade na caixa de controle e na bateria uma vez que a coleta excessiva de umidade pode afetar o desempenho da bateria e do içamento e pode levar à falha da bateria e/ou a falha na operação do elevador. Por fim, como o elevador foi montado ao ar livre, teve-se que utilizar uma cobertura externa.

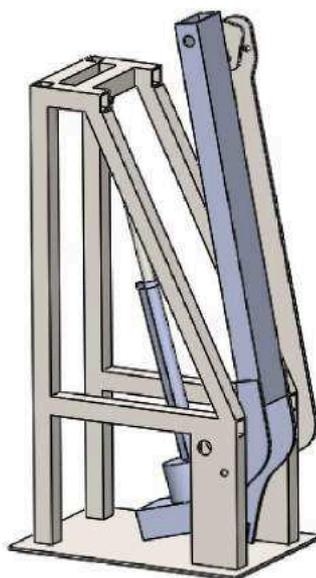
Após a construção deste protótipo, concluiu-se que o preço final, apesar de competitivo no mercado nacional, não é suficientemente acessível à população de baixa renda. Acredita-se que o fator que mais influencia o preço final do elevador são os equipamentos eletrônicos, já que são importados. Este *insight* fez com que se opta-se por projetar o elevador de piscina utilizando equipamentos encontrados no mercado brasileiro. Isso é uma vantagem pois além de, teoricamente, serem mais baratos, tais equipamentos são prontamente intercambiáveis em caso de falha, dispensando importações internacionais e não dependendo de flutuações de câmbio.

3.2.2 Benchmark II

Outro modelo que se revelou interessante para o estudo é o proposto por Sheridan (2014), patente registrada no USPTO com número US 8,646,119, mostrado na Fig. (7). Esse elevador é referido nesse trabalho como protótipo de benchmark II. Na pesquisa de mercado realizada, não foi encontrado um produto comercialmente disponível que fosse baseado nessa patente. A fim de aprender a respeito do funcionamento desse tipo de elevador de piscina, criou-se um modelo 3D baseado nas patentes disponíveis e o resultado é mostrado na Fig. (10).

Este elevador de piscina foi escolhido, pois ele resolve o problema do protótipo benchmark I em relação a manutenção do elevador, uma vez que possui uma cobertura permanente dos componentes eletrônicos, o que minimiza a manutenção preditiva se o elevador for usado ao ar livre. O princípio de funcionamento é parecido com o do benchmark I, isto é, realiza o mesmo movimento angular impulsionado por um atuador linear eletromecânico preso à estrutura metálica.

Figura 10 – Modelo do projeto benchmark II.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 Estabelecimento do Objetivo

Uma vez que a teoria envolvida no problema, na seção de pesquisa preliminar, foi completamente entendida, pode-se redefinir o problema em um objetivo mais claro. De acordo com Norton (2010), esse objetivo deve possuir três características: ser conciso, abrangente e não possuir elementos que preveem a solução.

A necessidade original era *projetar um melhor elevador de piscina*. Segundo Cohen (1998), a maioria das pessoas com deficiência física pertencem às classes econômicas baixas. Inúmeros estabelecimentos em regiões pobres do Brasil não têm condições financeiras de adquirir um elevador de piscina motorizado, robusto e barato. As opções de elevadores de piscina comercialmente disponíveis no mercado brasileiro não atendem as normas ADA, ou seja, são de pouca qualidade. Visto isso, restabeleceu-se um outro objetivo, *projetar um modo de transferir pessoas para piscinas de forma barata e motorizada*.

Após pesquisar inúmeras maneiras de transportar uma pessoa entre a piscina e o seu deck, chegou-se à conclusão que os elevadores de transferência para piscinas do tipo em balanço não-giratório fixo são, em geral, mais baratos. A pesquisa preliminar também mostrou que para esse tipo de mecanismo, os equipamentos utilizados eram fabricados somente no exterior e sua importação é cara. Logo, uma consequência direta de projetar de forma barata é projetar utilizando equipamentos nacionais.

3.4 Especificações de Projeto

Especificações de projeto dizem como isso deve ser feito. De forma geral, devem atender as normas que enquadram em seu funcionamento. Abaixo são listadas e detalhadas as partes de interesse das normas a serem seguidas.

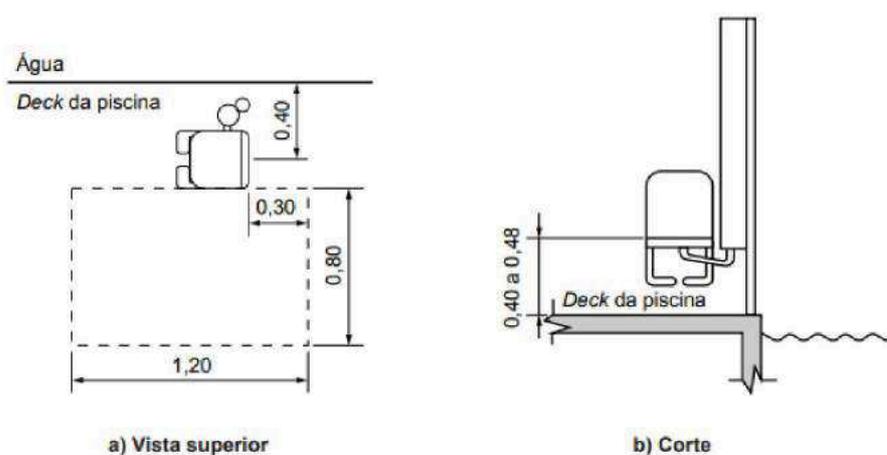
1. Deve atender à Norma ABNT NBR 9050.
 - Quando for instalado equipamento de transferência, devem ser garantidas as áreas de aproximação e transferência, conforme a Fig. (11).
2. Deve atender à Norma ABNT NBR 5410.
 - Para caracterizar a instalação, a norma considera a existência de 3 volumes, conforme a Fig. (12), denominando-os de volume 0,1 e 2. O volume 0 corresponde ao interior do reservatório (piscina ou lava-pés) e os volumes 1 e 2 estão em suas adjacências de acordo com as distâncias horizontais e verticais especificadas. Para os volumes 0 e 1, é admitida apenas a instalação em extra-baixa tensão, com separação elétrica, em tensão não superior a 12 V, em corrente alternada, e 30 V, em corrente contínua. A norma utiliza a denominação SELV, do inglês *separated extra low voltage*. Para o volume 2, caso não seja aplicado o mesmo tipo de instalação em extra-baixa tensão, admite-se a instalação em baixa tensão, desde que os circuitos contenham ligações equipotenciais e estejam protegidos por dispositivos DR (corrente diferencial residual não superior a 30 mA).

- Os componentes da instalação elétrica devem possuir pelo menos os seguintes graus de proteção no volume 1: IPX5 (IPX4 para pequenas piscinas cobertas que não sejam normalmente submetidas a lavagens com jatos d'água sob pressão).

3. Deve atender à Norma ADA.

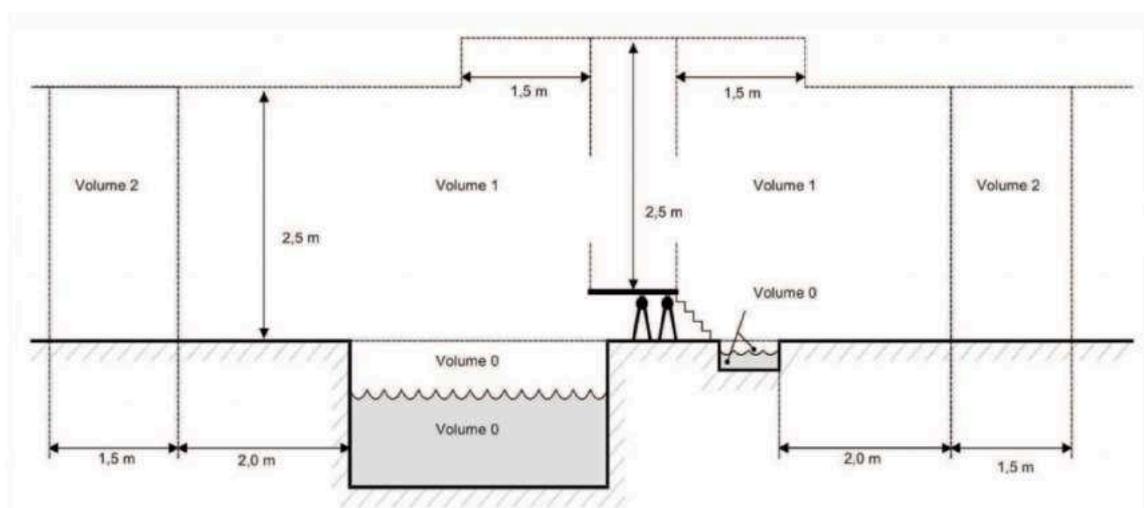
- Capacidade mínima de elevação de 300 libras (136 Kg).
- O elevador deve ter um apoio para os pés.
- O elevador montado deve ser instalado onde a profundidade da piscina não exceda 48 polegadas (1219 mm). A menos que toda a profundidade da piscina seja maior que 48 polegadas (1219 mm).
- A linha central do assento não deve ser menor do que 16 polegadas (406 mm) da beira da piscina.
- O mecanismo deve ser operado no espaço livre do deck e deve ter uma inclinação não superior a 1:48.
- A borda esquerda do assento deve ter um espaço livre de 36 polegadas (914 mm) à sua esquerda e 36 polegadas (914 mm) do encosto para a frente da cadeira e 12 polegadas (305 mm) do encosto do banco para trás.
- A base do assento deve ser ter altura mínima de 16 polegadas (406 mm).
- O topo do assento deve garantir uma extensão de 16-19 polegadas (406-483 mm).
- O topo do banco deve ser submerso pelo menos 18 polegadas (457 mm) abaixo do nível de água ao baixar o passageiro.
- O usuário deve ser capaz operar, sem assistência, a partir do convés e dentro da água.

Figura 11 – Áreas de aproximação e transferência conforme a ABNT NBR 9050.



Fonte: (ABNT, 2015)

Figura 12 – Volumes conforme a ABNT NBR 5410.



Fonte: (ABNT, 2004)

3.5 Especificações de Desempenho

Especificações de desempenho definem o que o sistema deve fazer. Essas especificações limitam o projeto sem restringir a liberdade do projetista, em outras palavras, as especificações de desempenho servem para definir o problema da maneira mais completa e geral possível e também para especificar definições contratuais do que deve ser alcançado. A lista abaixo mostra as especificações de desempenho.

1. Os componentes do elevador devem ser resistentes à corrosão.
2. O elevador deve mover os passageiros do chão para a piscina de forma segura e suave. A cadeira não deve cair ou inclinar-se e a operação deve permanecer estável e não deve expor o usuário a acelerações inseguras.
3. O custo do produto não deve exceder R\$ 9.000,00.
4. O elevador deve resistir às intemperes do ambiente.
5. O elevador deve ser de fácil utilização.
6. O elevador não pode danificar qualquer telha da piscina ou área da piscina durante a operação ou instalação.
7. O elevador deve mover um usuário por vez.
8. Deve sustentar longos períodos de uso (vida da bateria capaz de prover um mínimo de 30 ciclos de operação).
9. O elevador deve ter sua manutenção idealmente fácil.
10. É desejado possuir um sistema articulado.
11. O elevador deve ser capaz de se adaptar a várias configurações de piscina.

3.6 Idealização e Invenção

A parte de idealização, segundo Norton (2010), associa diversão e frustração. De fato, diversas iterações foram feitas à medida que erros iam sendo encontrados, porém de grande importância, pois permitiam elaborar novos projetos criativos.

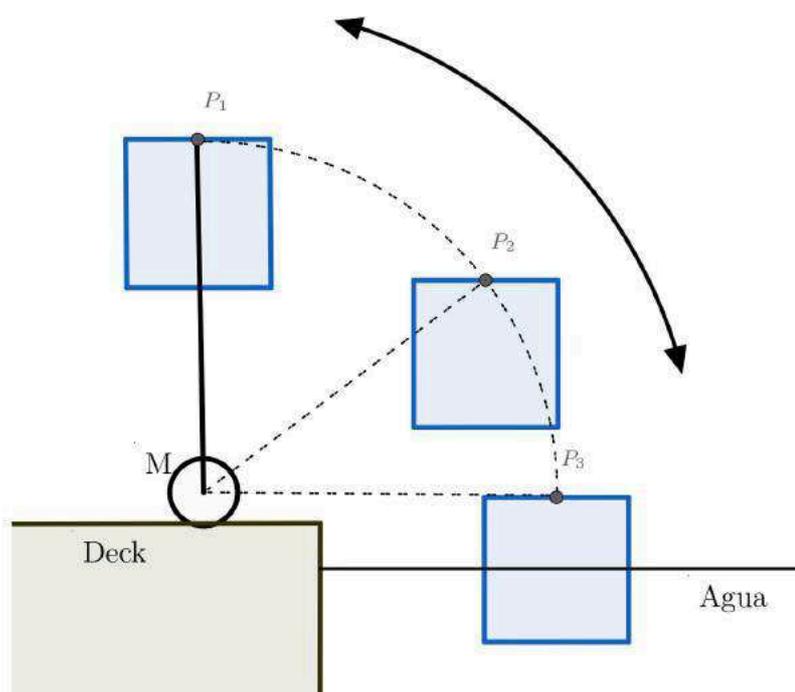
Esta Seção apresenta a descrição de todos os projetos idealizados. É importante ressaltar que essa etapa não foi uma sequência única, mas sim um processo iterativo, ou seja, além de realizar-se o modelo 3D, foram feitas análises posteriores para cada um desses projetos e quando identificadas falhas, uma nova solução foi idealizada.

3.6.1 Projeto 1

Uma das características mais desejadas para esse projeto é que o dispositivo tenha o mecanismo o mais simples possível, ou seja, que sua cinemática tenha o menor número de graus de liberdade e conseqüentemente as etapas de transferência para o mecanismo sejam as menores possíveis. Levando isso em consideração, o mecanismo mais simples e trivial seria um movimento circular de um braço fixo adjacente a piscina, onde a primeira posição angular fosse com o braço em direção ao deck e o usuário sentasse na cadeira, e a segunda posição angular seria com o braço submerso na água. Um motor elétrico é montado na base

do braço por uma junta de revolução, sendo assim, a rotação do eixo do motor realiza o movimento angular do braço. A Figura 13 mostra o princípio de funcionamento idealizado.

Figura 13 – Representação esquemática do Projeto 1.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Considerando os requisitos de desempenho, o braço deve ter no mínimo um metro e deve ser capaz de sustentar uma carga de 1.400 N, o que gera um momento de torção fornecido na extremidade do braço, isto é, seu conjugado nominal C_n , é de aproximadamente 1.400 N-m. Outros requisitos são de que o motor opere em até 24 V, para corrente contínua, e que o tempo de operação seja de no máximo 60 segundos para a descida ou subida, isto é, percorrer uma amplitude de $\approx 120^\circ$, em outras palavras, $\approx 0,33$ RPM. Sendo assim, a Potência nominal máxima requerida P_n , calculada por $P_n = 2\pi n C_n / 60$, é de ≈ 49 W, desconsiderando atrito e outras perdas. O motor DC Bosch® F 006 B10 273, opera em 24 V, e fornece 550 W de potência, 3300 RPM e 10 N-m de torque (nominal). Acoplado com uma redução de 1:2.000, o mecanismo fornece um torque no eixo do braço de 20.000 N-m, suficiente para realizar a tarefa. A Figura 14 mostra sua montagem experimental, em que mediu-se valores de corrente na faixa de 35 A. Para abastecer 30 ciclos de operação, ou seja, 1 hora de uso, a bateria deve ter uma capacidade de pelo menos 35 Ah.

Concluindo, os aparatos requeridos para sustentar tamanha demanda por energia são robustos e caros. Para resolver esse problema, idealizou-se um mecanismo para aumentar a vantagem mecânica, e, assim, reduzir a demanda por energia.

Figura 14 – Moto-reductor utilizado como experimento para o projeto 1.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.6.2 Projeto 2

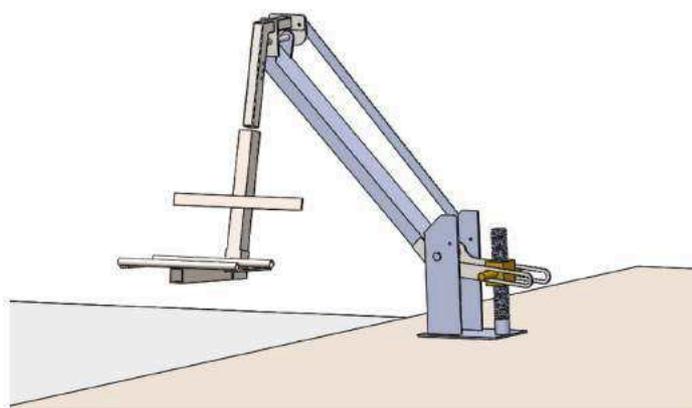
Tendo-se como base que os elevadores de transferência para piscinas do tipo em balanço não-giratório fixo são, em geral, mais baratos, idealizou-se um novo mecanismo de elevação inspirado nos protótipos de benchmark I e II, os quais pertencem a essa classificação. Um braço de elevação, ligado na base, faz um movimento angular para locomover o assento do deck para dentro da piscina, e um outro braço, ligado ao assento e à base, forma um mecanismo de quatro barras que mantém o assento na horizontal durante a locomoção.

Nos protótipos de benchmark I e II, o sistema de transmissão de potência se dá por atuador linear. Essa escolha faz muito sentido já que os atuadores lineares elétricos representam a solução perfeita quando se precisa de movimentos lineares, seguros e com controle de movimento suave e preciso. Atualmente, esses equipamentos têm empuxo de até 15.000 N e podem ser integrados em sistemas de controle sofisticados, usando comunicação de dados tipo barramento. Obtendo-se assim feedback preciso da posição e controle sobre a aceleração e a velocidade. Porém, por diversos motivos já discutidos, essa solução é cara, especialmente no Brasil.

A alternativa mais óbvia é substituí-lo por um parafuso de potência, que tem o princípio de funcionamento de um atuador linear, é mais barato e ocupa um menor espaço. Portanto, nesse novo projeto idealizou-se um mecanismo que fizesse uso de um fuso. Assim sendo, esse projeto se inspirou em atuadores Scotch Yoke. Esse tipo de mecanismo, também conhecido como jugo escocês, é um caso particular do mecanismo biela-manivela e transforma um movimento linear, no caso do fuso, em movimento rotativo, no caso para o braço de elevação. Sua principal vantagem é economia de espaço. Contudo, o fato de a potência ser transmitida por escorregamento limita a capacidade de carga. Além disso,

para um fuso estacionário, essa aplicação se limita para mecanismos rotativos com $\frac{1}{4}$ de volta. Ou seja, o movimento angular do braço de elevação não pode ultrapassar 90° , limitando o deslocamento do assento. A Figura 15 mostra o modelo idealizado.

Figura 15 – Modelo do Projeto 2.

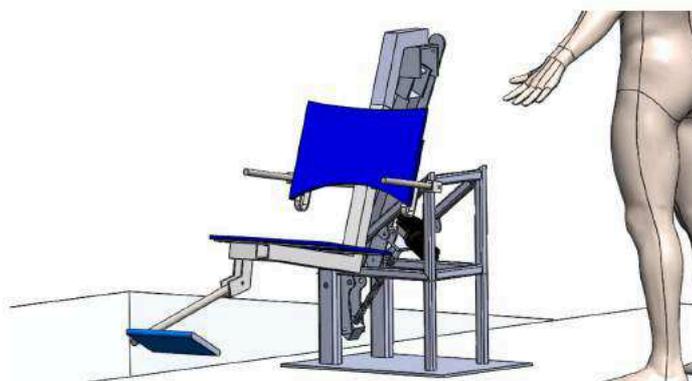


Fonte: Produção do próprio autor.

3.6.3 Projeto 3

Este projeto foi inspirado na patente US 8,646,119 de Sheridan (2014). É possível notar alguma semelhança estética entre esse projeto, mostrado na Figura 16, e o modelo da patente, mostrado na Figura 10. Ambos possuem uma cobertura permanente dos componentes eletrônicos, o que minimiza a manutenção preditiva no caso de o elevador ser usado ao ar livre.

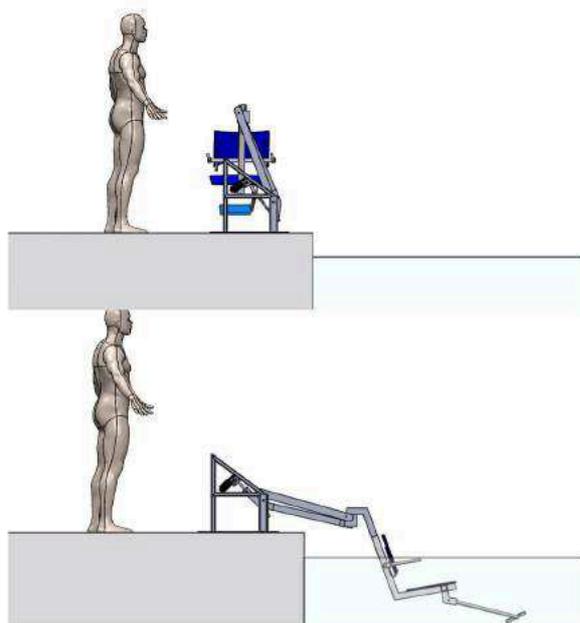
Figura 16 – Destaque para o sistema de transmissão de potência do modelo do Projeto 3.



Fonte: Produção do próprio autor.

Um dos problemas da patente é a falta de mobilidade do cadeirante ao entrar no assento. Para resolver tal problema, idealizou-se um mecanismo giratório na parte superior do braço de elevação. Um pino montado no elo que liga o assento e o braço de elevação gira 120° entre as posições de entrada do usuário, no deck, e saída, dentro da piscina. A Figura 17 ilustra o funcionamento.

Figura 17 – Posição inicial e final do modelo do Projeto 3.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para o sistema de transmissão de potência, optou-se por substituir o atuador linear por um sistema de fuso e motor, pois são equipamentos baratos no mercado brasileiro. A diferença desse projeto para com o Projeto 2 é que o fuso está conectado à base por uma junta rotacional. Isso possibilita o braço de elevação realizar um movimento angular maior que 90° .

3.6.4 Projeto 4

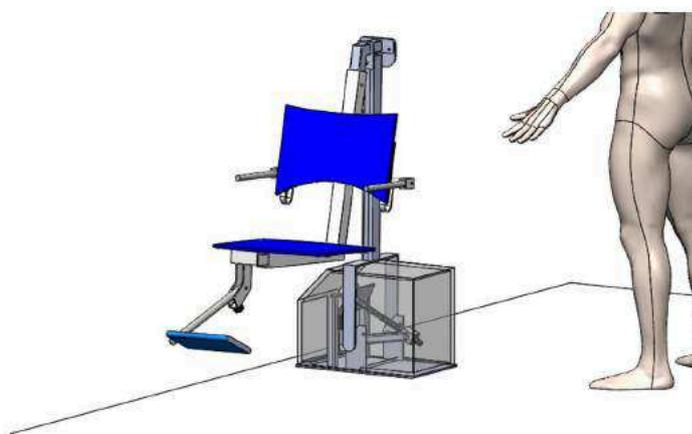
A análise dinâmica do Projeto 3 mostrou um problema no sistema de transmissão de potência quando a porca atingia o final do curso do parafuso de potência; havia um crescimento repentino da força de elevação. Isso se deve ao braço de alavanca estar muito curto nessa posição. Para resolver esse problema, fez-se uma iteração na posição de fixação das extremidades do fuso, alterando o comportamento da força, até encontrar uma progressão suave ao longo do deslocamento.

Esse projeto herdou a proteção do projeto anterior, além do movimento angular do

braço de elevação. Entretanto, o mecanismo de giro na parte superior do braço de elevação foi abandonado para reduzir o número de partes móveis. O assento foi aperfeiçoado para atender à norma ADA, incluindo o apoio de pé, sinto e apoio de braço.

A maior inovação desse projeto foi o desenho do braço de elevação que agora tem o formato de um garfo, envolvendo a proteção exterior. Esse *design* reduziu ainda mais o tamanho do elevador de piscina em relação aos outros projetos. A Figura 18 mostra o modelo do Projeto 4.

Figura 18 – Modelo do Projeto 4.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.7 Seleção

Nessa etapa da metodologia do projeto mecânico, realiza-se a seleção do melhor projeto idealizado para projeto detalhado. Norton (2010) sugere a criação de uma matriz de decisão, pois ajuda a identificar a melhor solução, já que força o projetista a considerar vários fatores de forma sistemática. A Tabela 2 mostra a matriz de decisões, embasada na tabela proposta pelo mesmo autor. Cada projeto ocupa uma linha na matriz, que é julgado, individualmente, de acordo com as seguintes características: Custo, Segurança, Desempenho e Tamanho. A escolha dessas categorias foi guiada pela matriz de decisões apresentada por Bu e Graham (2013). A cada categoria, é relacionado um fator de ponderação, que mede a importância relativa do quesito. As tabelas apresentadas no Apêndice C detalham cada uma dessas características e seus respectivos fatores de ponderação.

O Projeto melhor avaliado é o quarto, que também foi o último a ser idealizado. Por razões de espaço, praticidade e tempo, esse trabalho detalha as análises realizadas somente nesse projeto, que se encontram na próxima Seção.

Tabela 2 – Matriz de tomada de decisões.

Fator de ponderação	Custo 0,30	Segurança 0,35	Desempenho 0,15	Complexidade 0,20	Total
Projeto 1	3	2	3	4	2,85
Projeto 2	4	3	4	3	3,45
Projeto 3	4	3	4	1	3,05
Projeto 4	4	4	4	2	3,60

Fonte – Produzido pelo autor.

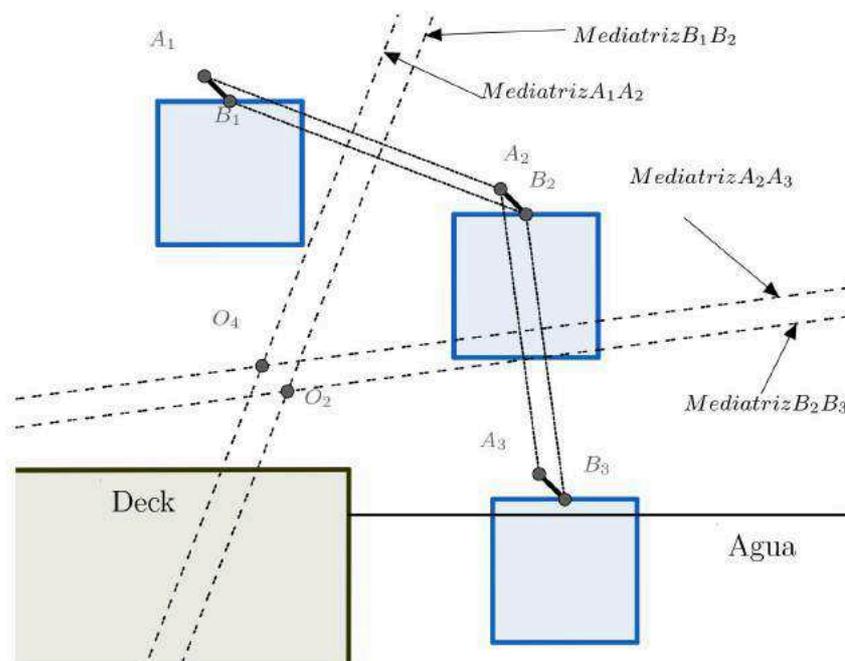
3.8 Análise

Nesta seção está descrito de forma detalhada o processo de elaboração das análises para o Projeto 4. Foram feitas abordagens analítica e numérica. Não serão mostrados os detalhes das análises feitas para os projetos antecedentes, para não delongar e desfocar este trabalho.

3.8.1 Síntese Gráfica

A Figura 19 mostra as três posições (1, 2 e 3) usadas para criar o *design*. Os blocos 1, 2 e 3 são representados pelos números em negrito e mostram a cadeira que leva o usuário em três posições críticas. A posição 1 é a posição onde o usuário entra na cadeira. Na posição 2 a cadeira está sobre a água na eminência de ser submersa. A posição final 3 indica a cadeira submersa na água. Um movimento circular é capaz de satisfazer tais condições de posições. Além disso, é preciso que a cadeira se mantenha na posição vertical durante o movimento, portanto além de um braço principal de elevação, necessitasse de um mecanismo auxiliar de controle de movimento. Utilizando o método de síntese de três posições com pivôs especificados, demonstrado por Norton (2010), é possível criar a configuração de um mecanismo de quatro barras para gerar o movimento desejado. Fazendo isso, encontram-se os pivôs fixos O_2 e O_4 .

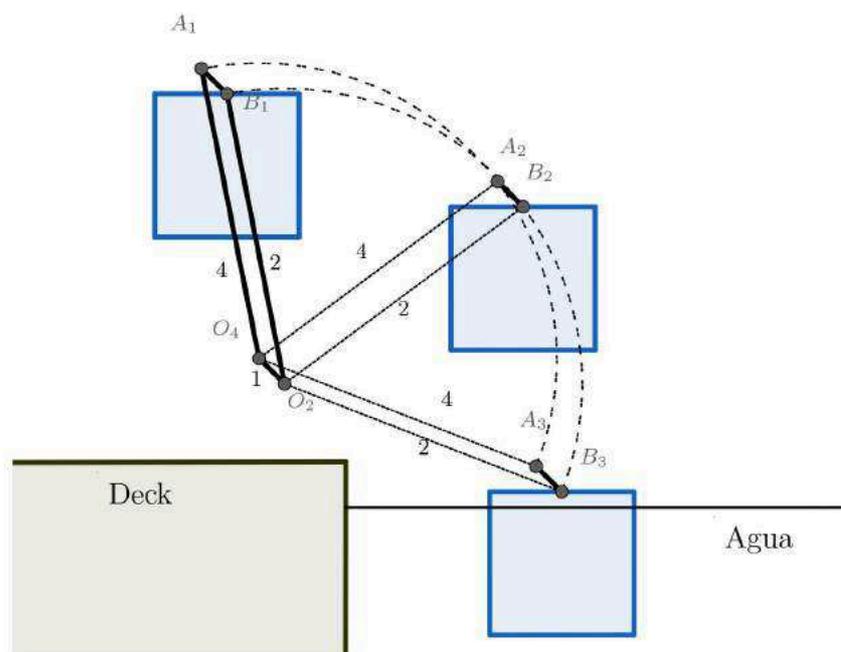
Figura 19 – Traçado da síntese gráfica mostrando as três posições utilizadas para encontrar os pivôs fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A Figura 20 mostra os elos 1, 2, 3 e 4 criados. O elo 1 é a base e não muda de posição enquanto a cadeira estiver em movimento. O elo 2 conecta a cadeira na base, e será chamado de braço de elevação. O elo 3 mantém sua posição angular em relação a horizontal durante o movimento da cadeira, assim, se considera de forma simplificada que esse elo é a cadeira. O elo 4 é o braço que faz o controle do movimento, chamado de braço compensador. Todas as juntas (A, B, O_2 e O_4) são rotacionais.

Figura 20 – Traçado dos elos que representam o braço de elevação (2), o braço compensador (4), e o elo de controle (3), nas três posições.



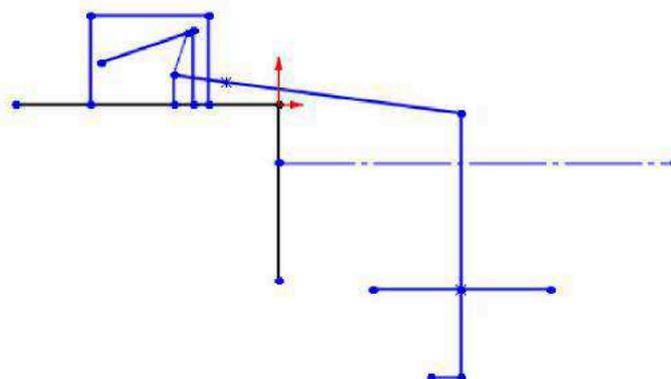
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A escolha das dimensões do elevador de piscina foi impulsionada por diferentes elementos. Um requisito importante é que a armação ocupe o menor espaço possível no local da piscina. Ao mesmo tempo, a máquina deve ter a resistência necessária o suficiente para transportar com segurança uma pessoa adulta. Esses objetivos contraditórios em combinação com os componentes motores e eletrônicos disponíveis impõem restrições estreitas de tamanho e peso.

Uma vez selecionado o tipo de movimento do braço de elevação e considerando as especificações de desempenho, pode-se realizar um estudo de posição para determinar as dimensões da estrutura. Essas dimensões são importantes para se calcular a faixa de movimentação angular que o braço de elevação faz para ser capaz de submergir o usuário dentro da piscina por completo e colocá-lo ao nível do chão a uma altura confortável para que o mesmo possa se transferir para, no caso, uma cadeira de rodas.

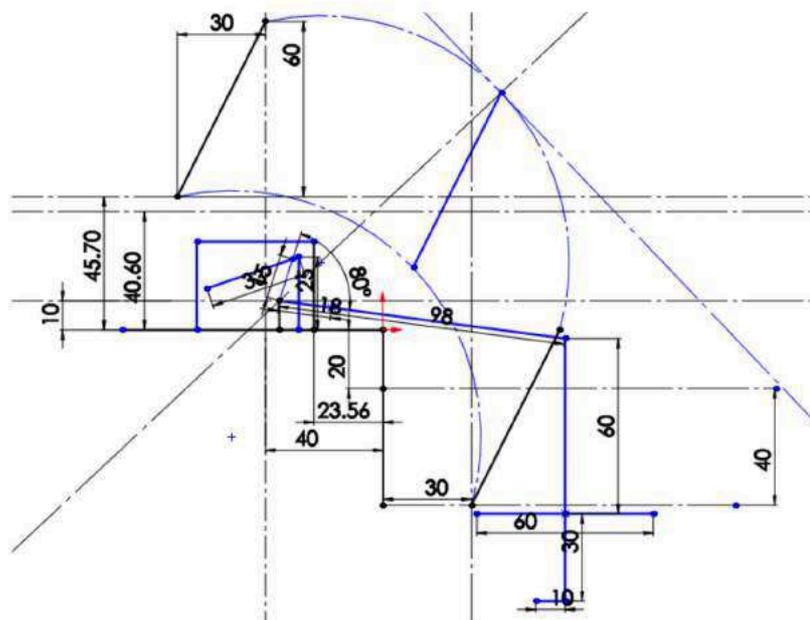
Para tanto, foi feito um desenho inicial no software de CAD SOLIDWORKS® da geometria do elevador de piscina. Introduziu-se as especificações de desempenho no qual, após algumas iterações, chegou-se a um dimensionamento que satisfaz os requisitos. A Figura 22 mostra o Estudo de posição para o projeto.

Figura 21 – Rascunho no SOLIDWORKS® utilizado para o dimensionamento do elevador de piscina.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 22 – Rascunho no SOLIDWORKS® utilizado para o dimensionamento do elevador de piscina.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Como se trata de um mecanismo plano, pode-se utilizar o critério de Kutzbach para calcular a quantidade de Graus de Liberdade GDL desse dispositivo, conforme a Eq.

(1).

$$N = 3(B - 1) - 2n_{j1} - 2n_{j2} \quad (1)$$

Onde:

- N: Número de GDLs;
- B: Número Total de Corpos (incluindo o solo);
- n_{j1} Número de Juntas com 1 GDL;
- n_{j2} Número de Juntas com 2 GDLs.

Temos 7 corpos, incluindo o solo e contando como 2 o parafuso de potência. Temos oito juntas com 1 GDL, logo, substituindo esses valores na Eq. (1), temos que o número de GDLs do mecanismo é 2, que está relacionado a rotação em torno de dois eixos perpendiculares ao plano em que está contido o esquema do mecanismo, um na base e o outro, no sentido oposto, no topo.

3.8.2 Análise Cinemática

A Figura 23 mostra a configuração esquemática do mecanismo, onde r é o comprimento do fuso até a porca, representada por D . Esse conjunto é controlado por um motor acoplado no ponto O . L representa a distância entre O e O_2 . O braço de elevação é dado pelo elo ternário representado pelo triângulo DBO_2 , em que O_2 é o centro de apoio (fulcro). p é o comprimento do braço que sustenta a força potente F e d é o comprimento do braço de alavanca da força resistente W . O sistema de coordenada é posicionado com a origem coincidente no ponto O e com eixo x paralelo a L . O ângulo φ representa o ângulo formado de L até r . O ângulo θ_2 é o ângulo formado de x até p . Pode-se descrever esse mecanismo completamente por meio do vetor de posição $q \equiv (r, \varphi, \theta_2)$. A variável independente é r , assim restam os ângulos φ e θ_2 para serem encontrados.

Portanto, a equação vetorial em malha fechada é:

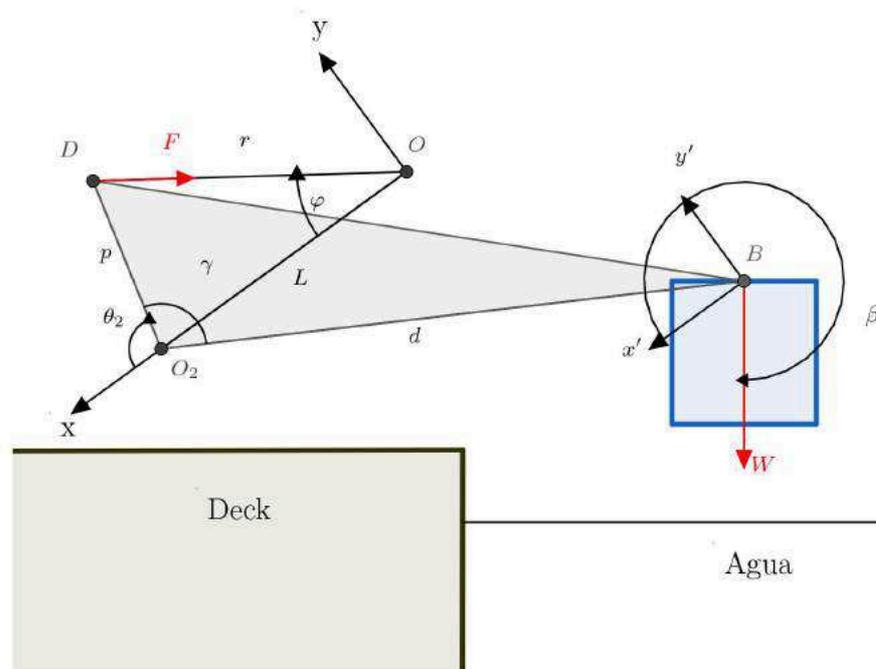
$$\mathbf{r} - \mathbf{p} - \mathbf{L} = 0 \quad (2)$$

Pode-se representar esses vetores em coordenadas polares e cartesianas, respectivamente:

$$re^{i\varphi} - pe^{i\theta_2} - Le^{i0} = 0 \quad (3)$$

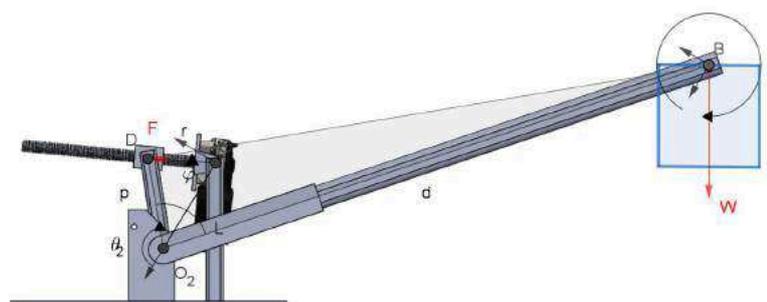
$$r(\cos\varphi + i\sin\varphi) - p(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2) - L(\cos 0 + i\sin 0) = 0 \quad (4)$$

Figura 23 – Modelo matemático do elevador de piscina proposto.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 24 – Diagrama esquemático sobreposto no modelo do Projeto 4.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A Equação 4 pode ser separada em partes real e imaginária e cada uma igualada a zero, resultando no seguinte sistema:

$$\begin{cases} \text{real} : r \cos \varphi - p \cos \theta_2 - L = 0 \\ \text{imaginário} : r \sin \varphi - p \sin \theta_2 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Pode-se resolver o sistema de Eqs. (5) para φ e θ_2 .

Da mesma forma, o vetor de velocidade $\dot{q} \equiv (\dot{r}, \dot{\varphi}, \dot{\theta}_2)$ e o vetor aceleração $\ddot{q} \equiv (\ddot{r}, \ddot{\varphi}, \ddot{\theta}_2)$ são definidos como função das derivadas temporais do vetor posição, e, portanto, sendo representado na forma polar como:

$$(\dot{r} + ir\dot{\varphi})e^{i\varphi} - (\dot{p} + ip\dot{\theta}_2)e^{i\theta_2} - (\dot{L} + iL\dot{O})e^{i0} = 0 \quad (6)$$

$$(\ddot{r} + i2\dot{r}\dot{\varphi} + ir\ddot{\varphi} - r\dot{\varphi}^2)e^{i\varphi} - (\ddot{p} + i2\dot{p}\dot{\theta}_2 + ip\ddot{\theta}_2 - p\dot{\theta}_2^2)e^{i\theta_2} - (\ddot{L} + i2\dot{L}\dot{O} + iL\ddot{O} - L\dot{O}^2)e^{i0} = 0 \quad (7)$$

Realizando o mesmo procedimento utilizado para encontrar φ e θ_2 a partir do vetor posição, pode-se encontrar $\dot{\varphi}$, $\dot{\theta}_2$, $\ddot{\varphi}$ e $\ddot{\theta}_2$. A aceleração angular no ponto O_2 será utilizada na análise dinâmica e sua expressão é calculada como:

$$\ddot{\theta}_2 = -\frac{r\ddot{\varphi}^2 - 2\ddot{r} - 2p\dot{\theta}_2^2 \cos(\varphi - \theta_2) + r\dot{\varphi}^2 \cos(2\varphi) + r\dot{\varphi}^2 \sen(2\varphi)}{2psen(\varphi - \theta_2)} \quad (8)$$

3.8.3 Análise Dinâmica

A Figura 23 exhibe as forças que atuam no mecanismo. Assume-se que o peso e o momento de inércia correspondentes aos elos são pequenos, causando forças normais insignificantes, se comparado com o módulo da força peso do usuário e da força motora do atuador. As equações de equilíbrio de força são

$$A_x + F_x = m_b a_x \quad (9)$$

$$A_y + F_y - W = m_b a_y \quad (10)$$

$$M_F + M_W = I\ddot{\theta}_2 \quad (11)$$

onde A_x, A_y são os componentes da força de reação atuando no elo pivotado no ponto O_2 , F_x, F_y são os componentes da força de reação entre o pistão e o elo, m_b é a massa do elo, a_x e a_y são os componentes da aceleração do centro de gravidade do elo, M_F e M_W são os momentos devidos à força útil, F , e peso do usuário, W , sobre O_2 respectivamente, e são dados por $M_F = F \cos(\varphi + \pi) p \sen(\theta_2) + F \sen(\varphi + \pi) p \cos(\theta_2)$, $M_W = W \sen(\beta) d \cos(\theta_2 + \gamma) + W \cos(\beta) d \sen(\theta_2 + \gamma)$, e I é o momento de inércia do elo sobre o ponto O_2 que é definido como $I = m_w d^2$ para uma ponto de massa na extremidade do elo, com um comprimento d . Substituindo isso e a Eq. (8) na Eq. (11) e simplificando, obtemos a força F atuando no fuso.

3.8.4 Parafuso de Potência

Uma vez decidido que a atuação do mecanismo se dará por um parafuso de potência, é necessário estimar a potência P , o torque T_R e a rotação de funcionamento n que capacita o motor para realizar determinado trabalho. O primeiro passo é determinar o tipo de rosca adequado para a aplicação no projeto. Como deseja-se uma transmissão suave e uniforme seleciona-se a rosca trapezoidal. Depois estipula-se a quantidade de entradas e o passo adequados para a transmissão em função do avanço l desejado. Escolheu-se uma entrada, pois é mais facilmente encontrado no mercado apesar da eficiência ser menor. O número de voltas que o motor deve executar para percorrer esse espaço desejado é $N = \frac{\Delta S}{l}$, mas sendo o avanço l definido como o produto do passo p pelo número de entradas N_e tem-se $N = \frac{\Delta S}{pN_e}$. O intervalo de tempo de operação de subida ou descida, Δt , é estipulado na seção dos requisitos de desempenho, então, pode-se calcular a frequência de rotação do motor por $f_m = \frac{N}{\Delta t}$ e, logo, a rotação do motor por $n = 60f_m$.

Shigley, Mischke e Budynas (2005) demonstram as equações para os cálculos do torque aproximado necessário T_R , para elevar, e T_L , para baixar a carga W , por um parafuso de potência dadas por

$$T_R = \frac{Wd_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m \sec \alpha}{\pi d_m - fl \sec \alpha} \right) \quad (12)$$

$$T_L = \frac{Wd_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m - l}{\pi d_m + fl} \right) \quad (13)$$

em que o ângulo de rosca 2α é de 30° , d_m é o diâmetro médio, f é o coeficiente de atrito, l é o avanço, que, no caso, é o valor do passo, pois tem-se apenas um filete. A Tabela 3 exibe coeficientes de fricção de começo de e de operação funcionamento para pares de materiais comuns.

Tabela 3 – Coeficientes de fricção f para pares enroscados.

Material do parafuso	Material da porca			
	Aço	Bronze	Latão	Ferro Fundido
Aço seco	0,15-0,25	0,15 – 0,23	0,15 – 0,19	0,15 – 0,25
Aço lubrificado	0,11 – 0,17	0,10 – 0,16	0,10 – 0,15	0,11 – 0,17
Bronze	0,08 – 0,12	0,04 – 0,06	-	0,06 – 0,09

Fonte – (ROTHBART, 1985)

Os mesmos autores ainda demonstram as equações para análise estrutural do parafuso de potência. A tensão de cisalhamento de corpo τ decorrente do momento de

torção T_R no exterior do corpo do parafuso é

$$\tau = \frac{16T_R}{\pi d_r^3} \quad (14)$$

A tensão axial σ no corpo do parafuso devido à carga W é

$$\sigma = \frac{W}{A} = \frac{4W}{\pi d_r^2} \quad (15)$$

A tensão de flexão de raiz de rosca σ_b é encontrada a partir de

$$\sigma_b = \frac{6W}{\pi d_r n_t p} \quad (16)$$

em que n_t , é o número de roscas engajadas. Porém, devido à deformação elástica sofrida, as roscas engajadas não podem compartilhar a carga igualmente. Alguns experimentos mostram que a primeira rosca engajada carrega 0,38 da carga; a segunda, 0,25; a terceira, 0,18; e a sétima está livre de carga. Sendo assim, com uma rosca carregando 0,38W, a Eq. (16) é dada por

$$\sigma_b = \frac{6(0,38W)}{\pi d_r n_t p} \quad (17)$$

O cisalhamento transversal no extremo da secção transversal de raiz decorrente da flexão é zero. Contudo, existe uma tensão circunferente de cisalhamento τ no extremo da secção transversal da raiz da rosca, como mostrado pela Eq. (14). A partir do sistema de coordenadas da Fig. (25), observa-se que as tensões tridimensionais são

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{6(0,38W)}{\pi d_r n_t p} & \tau_{xy} &= 0 \\ \sigma_y &= 0 & \tau_{yz} &= \frac{16T_R}{\pi d_r^3} \\ \sigma_z &= \frac{4W}{\pi d_r^2} & \tau_{zx} &= 0 \end{aligned}$$

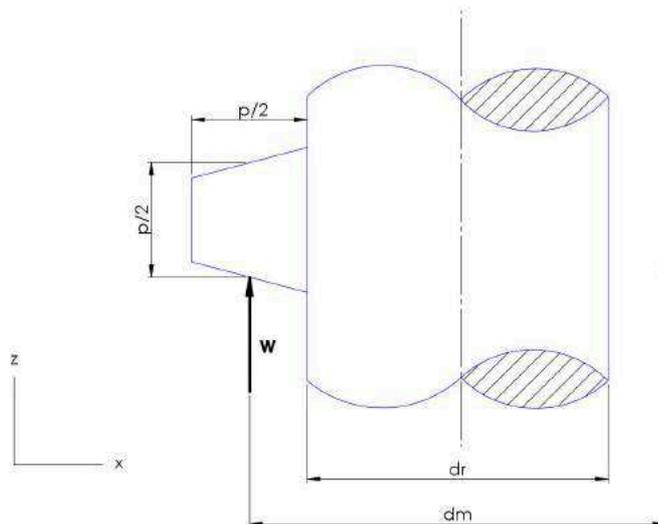
A equação da tensão plana é dada por

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{yz}} \quad (18)$$

A equação de tensão de von Mises é dada por

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (19)$$

Figura 25 – Geometria da rosca trapezoidal útil na procura de tensões de flexão e tensão transversa de cisalhamento na raiz da rosca, observando que a coordenada y aponta para dentro da página.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A tensão máxima de cisalhamento é fornecida pela seguinte equação

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (20)$$

3.8.5 Método dos Elementos Finitos

Os cálculos preliminares analíticos para a verificação de tensão mostram que o dispositivo deve ser capaz de suportar a carga, mas efeitos complexos, como a concentração de tensão nos cantos, exigem uma análise mais detalhada. Para isso, é necessário utilizar a análise de elementos finitos com auxílio de uma ferramenta de Engenharia Assistida por Computador (ou *Computer Aided Engineering – CAE*, em inglês). Esse método possibilita identificar os prováveis pontos de ruptura e modificar o modelo, possibilitando uma iteração rápida no desenvolvimento do projeto.

Para tanto foi utilizado o pacote computacional ANSYS® Workbench para a simulação e análise estrutural em elementos finitos do modelo. Em primeiro lugar, uma análise dinâmica do corpo rígido é implementada para julgar as conexões entre as articulações e obter as forças articulares máximas para encontrar posições potencialmente perigosas do movimento. Em seguida, uma análise estática é realizada para verificar a deformação e a tensão do mecanismo nessa posição.

A simulação foi feita, basicamente, em cinco etapas fundamentais que serão detalhadas na sequência dessa seção.

- i. Importou-se geometria para o ANSYS®;
- ii. Definiu-se as propriedades dos materiais;
- iii. Definiu-se as condições de contorno dentro do software;
- iv. Gerou-se a malha;
- v. Obteve-se os valores de deformação e tensão na estrutura.

3.8.5.1 Análise Dinâmica do Corpo Rígido

Primeiramente, foi importado um arquivo parasolid do modelo CAD simplificado feito no SOLIDWORKS®. Dentre as simplificações está a união do fuso com a placa que suporta o motor e a retirada do motor, a retirada da rosca do fuso. A posição inicial é quando o assento está na posição de carregamento do usuário, sobre o deck à 48 cm da superfície do chão e a posição final é quando o assento está na posição de descarregamento do usuário, submerso a uma profundidade de 40 cm. As condições de contato fixo foram excluídas e foram criadas condições de junta. A Tabela 4 lista o tipo de junta para os elementos. A Figura 26 mostra a localização das juntas no modelo ANSYS®.

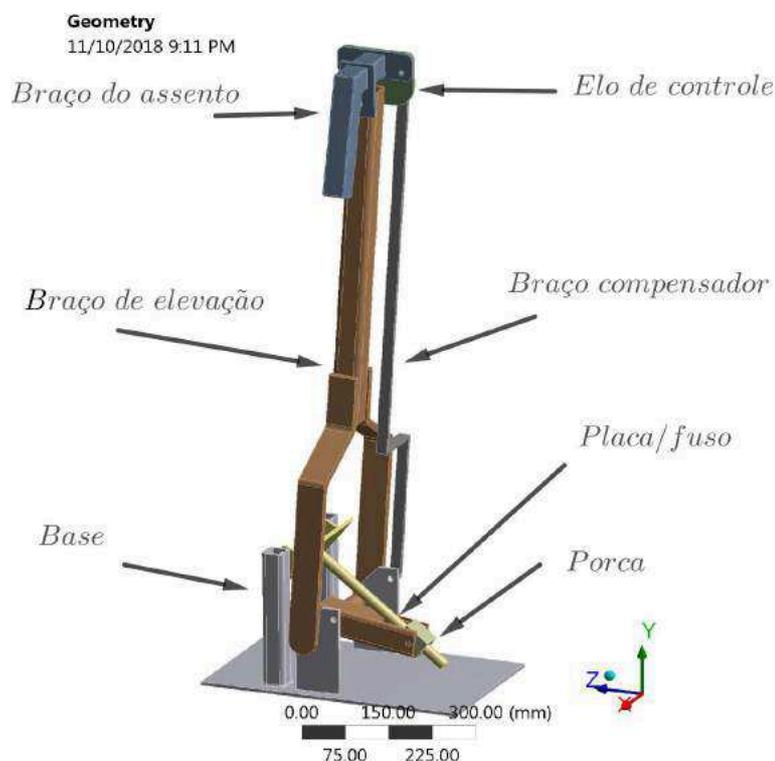
Tabela 4 – Lista dos tipos tipos de juntas e corpos conectados.

Junta	Corpo 1	Corpo 2	Tipo
1	Terra	Base	Fixo
2	Base	Placa/fuso	Revolução
3	Placa/fuso	Porca	Translação
4	Porca	Braço	Revolução
5	Base	Braço de elevação	Revolução
6	Base	Braço compensador	Revolução
7	Elo de controle	Braço compensador	Revolução
8	Elo de controle	Braço do assento	Revolução
9	Elo de controle	Braço do assento	Revolução
10	Elo de controle	Braço do assento	Revolução
11	Elo de controle	Braço de elevação	Revolução

Fonte – Produzido pelo autor.

A maioria dos elevadores de piscina disponíveis são confeccionados em aço carbono e/ou aço inox (inoxidável). A alta resistência à oxidação atmosférica pelo aço inox justifica seu amplo uso para essa aplicação. Já para se utilizar o aço carbono necessita-se de uma pintura de proteção anticorrosiva. Por essas razões e por ser mais barato, neste trabalho foi escolhido a utilização do aço carbono em toda estrutura, o polipropileno foi utilizado no assento, encosto da cadeira e no suporte para os pés, e o bronze foi utilizado para a porca. A Tabela 5 detalha a escolha dos materiais para cada elemento. A Tabela 6 mostra as propriedades mecânicas do material escolhido.

Figura 26 – Modelo no ANSYS® na posição inicial e a denominação de cada corpo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Tabela 5 – Lista dos corpos do modelo e seu material.

Numeração	Nome do Corpo	Material	Massa (kg)
1	Base	Aço SAE 1045	10,85
2	Placa/fuso	Aço SAE 1045	1,70
3	Porca	Bronze	0,51
4	Braço de elevação	Aço SAE 1045	11,67
5	Braço compensador	Aço SAE 1045	1,10
6	Elo de controle	Aço SAE 1045	0,83
7	Braço do assento	Aço SAE 1045	1,42

Fonte – Produzido pelo autor.

Para simular o peso do usuário, aplicou-se uma massa pontual, ao longo da trajetória, de 140 kg na superfície do braço do assento, na direção da gravidade. A gravidade foi incluída para levar em conta o peso e a inércia do mecanismo, no modelo é a direção -Y. O ANSYS® Workbench não suporta uma conexão de rosca parafuso, logo, para simular o movimento do fuso de rosca, foi calculado a velocidade linear do avanço da porca por $v = \frac{pm}{60}$. Esta simulação foi baseada em suposições cinemáticas, para um modelo mais realista uma combinação de velocidade de torque teria que ser introduzida ao invés de um

Tabela 6 – Propriedades dos materiais utilizados no modelo ANSYS®.

Propriedade	Aço SAE 1045	Bronze
Módulo de Elasticidade [GPa]	200	103
Coefficiente de Poisson	0,27	0,34
Densidade [kg/m ³]	7.850	8.950
Limite de escoamento [MPa]	310 - 485	124 - 310
Resistência Mecânica [MPa]	585 - 690	338 - 469

Fonte – (ASM INTERNATIONAL, 1990)

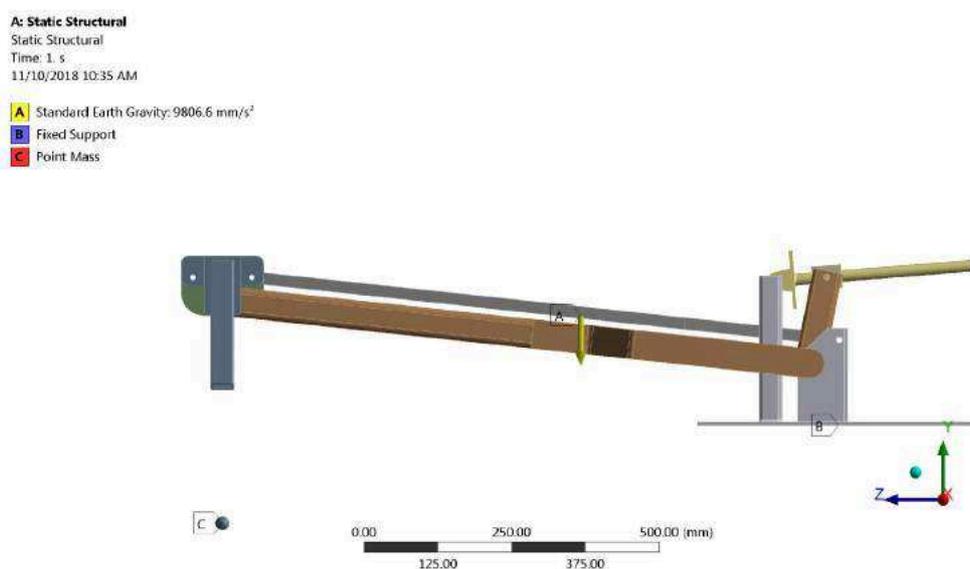
movimento.

3.8.5.2 Análise Estática

Baseado nos resultados obtidos pela análise dinâmica de corpo rígido, realizou-se uma análise estática do elevador de piscina em sua posição mais crítica, isto é, a posição angular quando obtemos o pico do torque. Esta posição é onde o braço de alavanca é maior, isto é, quando o peso do usuário está mais distante da base de fixação no deck.

O modelo na posição mais crítica durante a análise dinâmica de corpo rígido foi importado para o ANSYS® Workbench para se realizar uma análise estática. Preservou-se as mesmas designações de materiais e conexões. A Figura 27 mostra o modelo a ser estudado e suas condições de contorno.

Figura 27 – Condições de contorno da montagem do elevador de piscina.

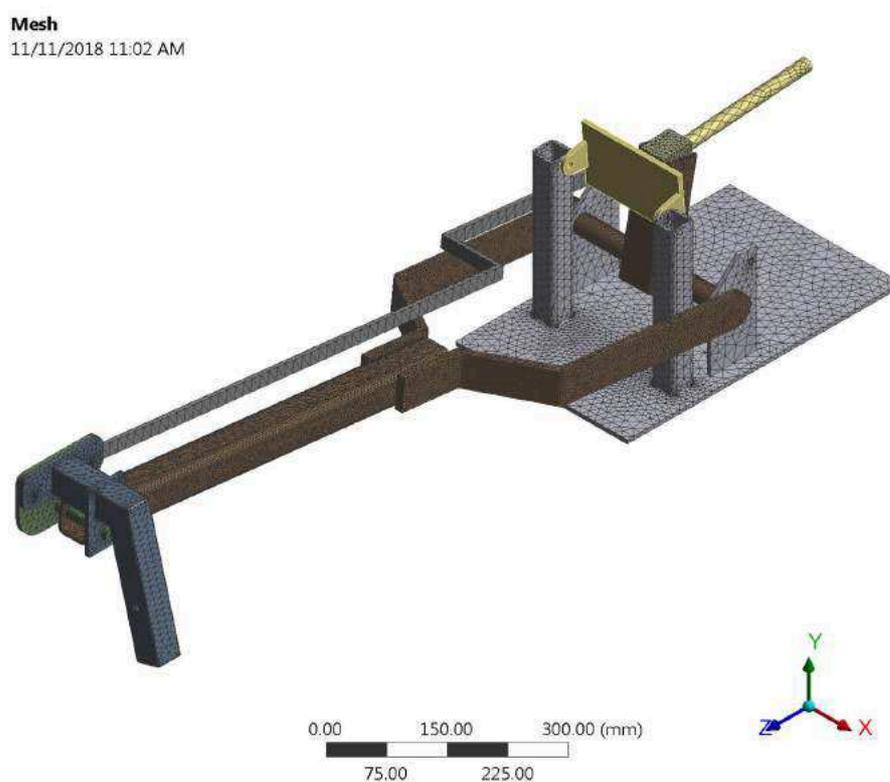


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Realizou-se um estudo do grau de refinamento com o intuito de analisar a sensibili-

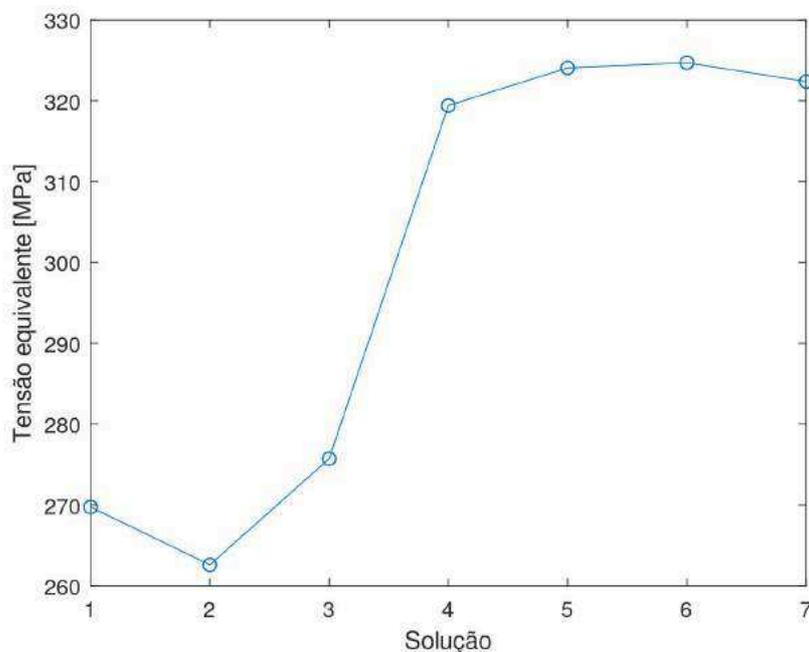
dade da malha, tendo em vista a opção otimizada entre o custo computacional e a precisão dos resultados. Foi realizado uma simulação inicial com a malha gerada automaticamente pelo software. Após isso, a malha foi recriada com uma distribuição de elementos mais densa no elemento estrutural onde foi localizado a maior tensão equivalente de von-mises. Isso foi feito, alterando-se o tamanho do elemento finito, manualmente, de forma progressiva. Repetiu-se o processo até que os resultados convergissem de forma satisfatória, isto é, uma variação menor do que 1% em relação ao resultado anterior. Todos os resultados de simulação mostrados adiante se referem às malhas mais refinadas. A Figura 28 e a 29 mostram a malha final e seu histórico de convergência, respectivamente. A Tabela 7 detalha o histórico de convergência.

Figura 28 – Malha final para a estrutura do elevador de piscina.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 29 – Gráfico do histórico de convergência para a simulação da montagem do elevador de piscina.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Tabela 7 – Histórico de convergência para a simulação da estrutura do elevador de piscina.

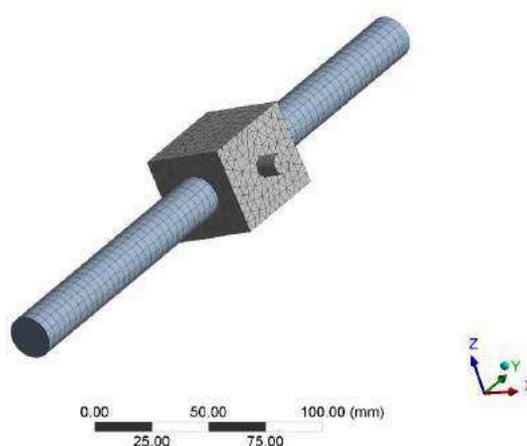
	Tensão Equivalente [MPa]	Variação [%]	Nós
1	269,75		14491
2	262,60	-2,6506	22905
3	275,72	4,9962	34254
4	319,41	15,8458	48783
5	324,07	1,4589	58909
6	324,71	3,8507	142982
7	322,38	-0,71756	155578

Fonte – Produzido pelo autor.

3.8.5.3 Parafuso de Potência

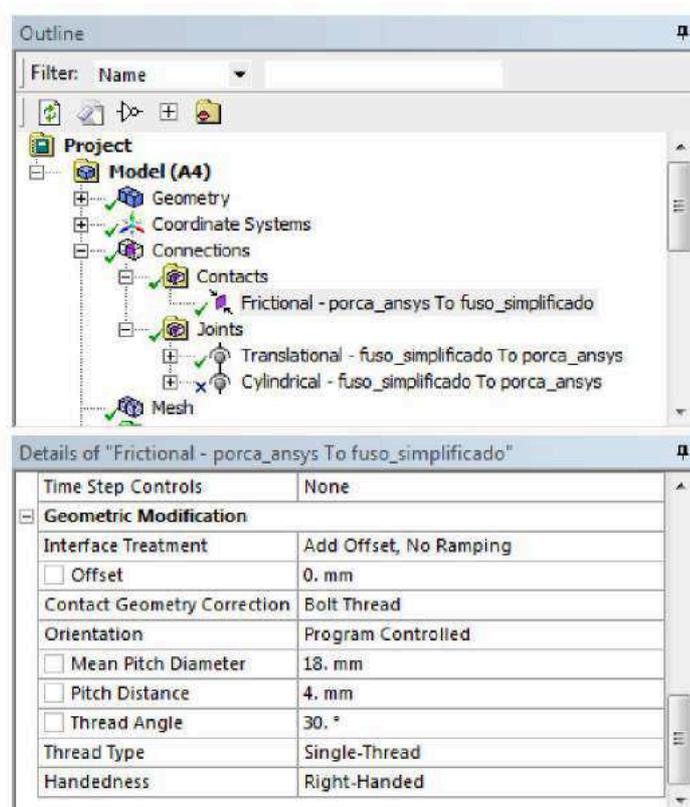
Além disso, uma modelagem do parafuso de potência e porca, de forma simplificada, foi feita no SOLIDWORKS®. Depois disso, ele foi importado no ANSYS® Workbench. Uma análise estrutural estática foi feita com este modelo. O estudo da malha se deu da mesma forma feita na análise estática anterior. A Figura 30 e a 32 mostram a malha final e seu histórico de convergência, respectivamente. A Tabela 8 detalha o histórico de convergência.

Figura 30 – Malha final do conjunto fuso e porca.



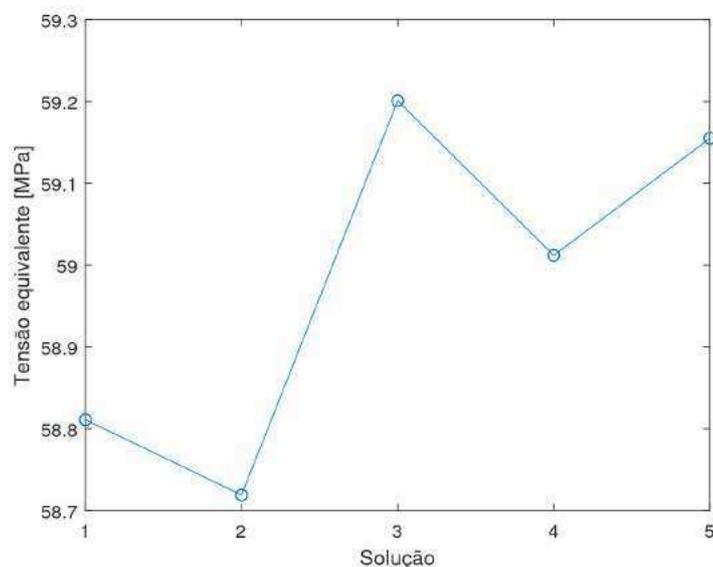
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 31 – Seção de detalhe do ANSYS® Workbench, onde o usuário define as propriedades da rosca.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 32 – Gráfico do histórico de convergência para a simulação do fuso e porca.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Tabela 8 – Histórico de convergência para a simulação do fuso e porca.

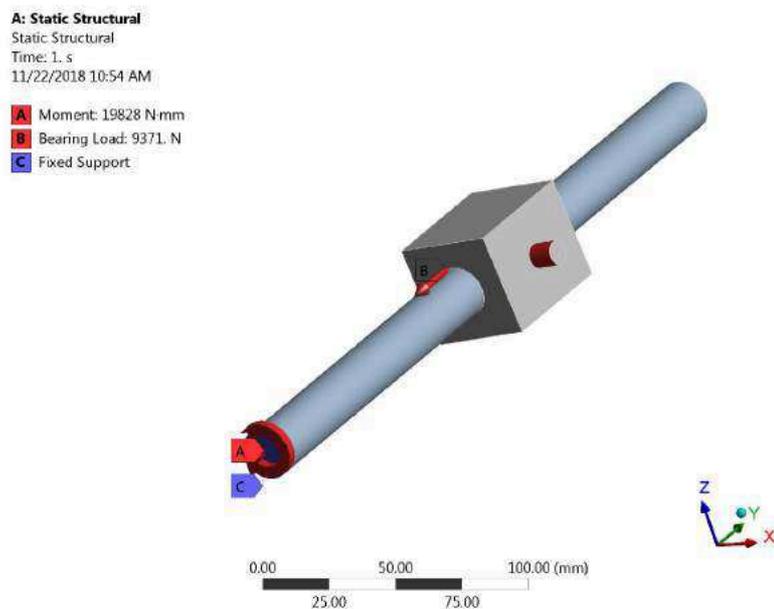
	Tensão Equivalente [MPa]	Variação [%]	Nós	Elementos
1	58,811		15257	5693
2	58,719	-0,1567	16261	8583
3	59,201	0,8142	17013	7985
4	59,012	-0,3203	17836	9076
5	59,155	0,2417	21961	12626

Fonte – Produzido pelo autor.

Para configurar as condições de contorno do parafuso de potência foi utilizado o resultado de força exercido na junta que conecta o braço de elevação e a porca obtidos na análise estática anterior, esse valor é uma força concêntrica ao fuso aplicada no suporte da porca. Além disso, foi utilizado o resultado de torque máximo obtido no código desenvolvido, esse valor é um momento aplicado à base onde se conecta o fuso ao motor. A Figura (33) mostra a configuração das condições de contorno do fuso no software. Um recurso útil introduzido no ANSYS® 15.0 é a capacidade de modelar segmentos de parafuso usando contatos em vez de modelar a geometria do perfil real da rosca no Workbench, o que economiza tempo significativo. Da mesma forma, não se necessita de criar uma malha altamente refinada e os tempos de resolução são muito mais rápidos usando esse recurso. Um estudo realizado por (SIMUTECH GROUP, 2018), mostra que os resultados estão

próximos da precisão de um verdadeiro modelo de parafuso com rosca. A Figura 31 mostra as configurações utilizadas nesse trabalho para a simulação.

Figura 33 – Condições de contorno do parafuso de potência e a porca no ANSYS® Workbench.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

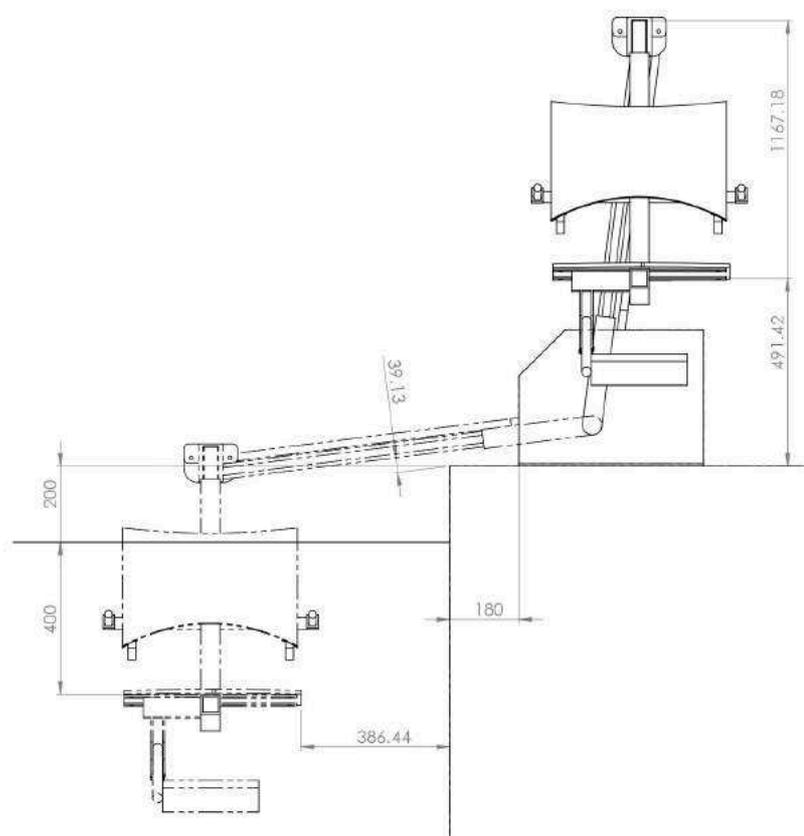
Neste capítulo são apresentados o resultado do projeto, análise e simulações, conforme mostrado no Capítulo 3.

4.1 Projeto Detalhado

4.1.1 Arquitetura do Projeto Mecânico

A Figura 34 mostra a vista lateral do elevador de piscina proposto por esse trabalho numa posição retraída e estendida. O dispositivo atinge a cinemática desejada e as posições para a cadeira, conforme estabelecido pela ADA. O *design* foi criado usando sínteses de 3 posições proposta por Norton (2010), onde criou-se uma ligação de quatro barras. Após inúmeras iterações do projeto, chegou-se a um dimensionamento da estrutura.

Figura 34 – Dimensões principais finais do elevador de piscina.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Este elevador de piscina é sustentado por uma base adjacente a borda da piscina

que, por sua vez, está superior ao nível da água. Uma estrutura metálica é fixada sobre esta base. Um elo terciário, aqui denominado braço de elevação, está rotacionalmente conectado, em sua porção central, em um ponto de apoio localizado na estrutura metálica, trabalhando como uma alavanca. Um assento é suportado na extremidade do braço de elevação que está em direção à piscina para realizar um movimento giratório em torno de um eixo do assento, orientado paralelamente ao eixo do ponto de apoio. A extremidade oposta do braço de elevação está conectada a uma porca por uma junta rotacional. A porca está conectada a um fuso de rosca por uma junta helicoidal. Um motor elétrico é rotacionalmente conectado à estrutura metálica e é mecanicamente conectado para rotacionar o fuso de rosca e deslocar linearmente a porca, girando o braço de elevação. Através de um controlador eletrônico o usuário controla o acionamento do motor elétrico, movimentando o elevador de piscina. Um braço compensador mantém a cadeira na posição vertical durante o movimento giratório do braço de elevação.

Uma cobertura protetora cobre a estrutura metálica, o motor, bateria, controlador e assim por diante e é espacialmente estacionária. O revestimento protetor fornece proteção como uma barreira de segurança contra a interação humana inadvertida ou o emaranhamento não intencional do usuário ou espectador durante o movimento mecânico. Esta cobertura protetora protege também substancialmente as ações eletrônicas e mecânicas do clima e danos ambientais durante o seu uso ou não, suportando climas e ambientes adversos sem necessidade de manutenção ou configuração adicionais. Além disso, essa configuração representa uma redução no movimento do sistema de acionamento se comparado ao elevador de piscina anterior, o que permite que os controles eletrônicos e o sistema de acionamento estejam contidos dentro da cobertura física de proteção permanente e fixa.

4.1.2 Funcionamento

Para garantir o bom funcionamento do elevador de piscina e também para prolongar a sua vida útil, é essencial que se obedeça a todas as instruções do fabricante sempre que se usar o elevador.

É da responsabilidade do proprietário do elevador garantir que os procedimentos de segurança corretos sejam implementados e uma avaliação de risco seja realizada. Se um usuário for mentalmente debilitado ou tiver deficiências físicas, essas questões devem ser levadas em consideração para determinar o número de pessoas necessárias para completar a transferência para o assento e o número de pessoas necessárias para estar na água, prontas para receber o usuário. Somente pessoas saudáveis o suficiente para atividades aquáticas devem usar o elevador de piscina. Os usuários devem consultar seu médico para determinar se as atividades de água são apropriadas. Deve se manter os dedos e as mãos afastados dos braços de elevação durante o uso.

Quando a unidade estiver posicionada para uso, o procedimento para transferir o

usuário do assento para a água é o seguinte:

- i. Verificar o nível da bateria para garantir que a carga é adequada para a operação (pelo menos 50% de carga recomendada).
- ii. Usar os botões do controle para elevar o assento até a posição de carga/descarga no deck.
- iii. Transferir o usuário para o assento, garantindo que o peso do usuário esteja centrado no assento. Os apoios de braços podem ser girados, se necessário.
- iv. Colocar o cinto de segurança.
- v. Usar os botões do controle para abaixar o assento na água. O controle manual à prova d'água pode permanecer conectado ao assento se o usuário estiver operando o elevador.
- vi. Soltar o cinto de segurança.
- vii. Quando terminar, voltar para o assento, garantindo que o peso do usuário esteja centrado no assento.
- viii. Colocar o cinto de segurança.
- ix. Usar os botões do controle para retornar à posição de carga/descarga no deck.
- x. Soltar o cinto de segurança.
- xi. Transferência do assento.

4.1.3 Descrição dos Componentes

Motor

De acordo com as análises realizadas no capítulo anterior, o torque mínimo requerido é de 20 N-m. É possível acoplar motores de para-brisa com um redutor de 1:2 para atingir esse torque. Esse tipo de motor é comercialmente encontrado no Brasil em tensões de 12/24 V. É preferível optar por motores 24 V, pois esse será alimentado por baterias, e, para mesma potência, consomem a metade de corrente do que os de 12 V. Vários motores atendem a essas especificações, o motor escolhido, mas não-limitante, é o Bosch® DC Linha EPF, modelo 390.442.410. A Tabela 9 lista seus parâmetros.

Tabela 9 – Especificações do motor Bosch® DC 390.442.410.

Parâmetro	Valor
Tensão	24 V
Potência	67 W
Rotação	75 RPM
Corrente (nominal)	10 A
Corrente (máxima)	42 A
Torque (nominal)	10 N-m
Torque (máximo)	70 N-m
Sentido de giro	CW/CCW
Grau de proteção	IP 34
Peso	2,9 Kg
Modelo	0 390 442 410

Fonte – Produzido pelo autor.

Microcontrolador

Um microcontrolador é selecionado para servir como uma plataforma de prototipagem fácil. Um exemplo ilustrativo, mas não-limitante, é o Arduino® Mega. A maneira ideal como os componentes se conectam ao Arduino® pode ser através de uma placa de montagem.

Esta placa conterá as conexões necessárias codificadas por cores de conexão rápida para os vários dispositivos e incluirá: um conversor DC-DC de comutação (diminui de 24 V a 9 V), conexão a uma bateria de back-up de célula primária de 9 V, e, potencialmente, um módulo Bluetooth.

Uma célula primária de 9 V é escolhida como uma bateria de reserva para o sistema de controle para garantir que o Arduino® continue a rodar, permitindo uma troca de bateria quente.

Tabela 10 – Especificações do Arduino® Mega.

Parâmetro	Valor
Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de Operação	5 V
Tensão de entrada (recomendado)	7-12 V
Tensão de entrada (limite)	6-20 V
Pinos digitais de E/S	54
Pinos de Entrada Analógica	16
Corrente DC por pino de E/S	20 A

Fonte – Produzido pelo autor.

Controlador do motor

Um controlador de motor de prateleira é selecionado para controlar o motor CC. Um exemplo ilustrativo, mas não-limitante, é o controlador de motor Sabretooth® dual 25 A. Este controlador é ideal, pois incorporou segurança (proteção térmica e de sobrecorrente) e pode detectar tensões baixas da bateria para evitar danos às células devido à descarga excessiva das baterias de lítio se uma bateria personalizada for usada.

Tabela 11 – Especificações do controlador do motor.

Parâmetro	Valor
Tensão (Nominal)	6-30 V
Corrente	25 A
Corrente de pico por canal	50 A
Métodos de entrada	Analógico, R / C, serial

Fonte – Produzido pelo autor.

Bateria

O motor CC selecionado foi classificado para operar a 24 V, o que define o requisito de tensão da bateria. O motor consome corrente nominal de 10 A. A potência usada por esse motor na corrente e tensão nominal é de 67 W durante o processo de elevação e abaixamento. Para um tempo de elevação de 60 s, a energia total necessária é de 4,0 kJ por ciclo de elevação.

A energia potencial de uma bateria ΔPE_{elec} é dada pela multiplicação da diferença de potencial ΔV por sua carga total Q . Então, uma bateria com uma capacidade de 10 Ah tem $q = 10[Ah] = 10[C/s].3600[s] = 36[kC]$. Logo, sua energia total é de $\Delta PE_{elec} = 36[kC].24[V] = 864[kJ]$. Portanto, esta bateria é suficiente para $864/4 \approx 216$ ciclos de elevação, no entanto, isso pressupõe uma descarga completa que reduz a vida útil da bateria.

Diversas baterias com estas especificações são comercialmente encontradas. Um exemplo ilustrativo, mas não-limitante, é a bateria para bicicletas elétricas SENSE®, distribuída no Brasil. Essa bateria é fabricada com células de íon de lítio, e fornece 24 V e uma capacidade de 10 Ah. Possui vida útil em média de 2 anos e meio (aproximadamente 600 ciclos de recarga) e vem com um carregador bivolt (110 V/220 V).

4.1.4 Manutenção e Limpeza

A fim de prolongar a sua vida útil do elevador de piscina é necessário realizar uma manutenção preditiva do equipamento. Uma cobertura protetora cobre a estrutura metálica, o motor, bateria e controlador. Uma abertura vedada permite o manuseio desses equipamentos elétricos, como por exemplo, a retirada da bateria para carregamento. Para garantir que todos os equipamentos elétricos fiquem seguros, deve-se manter essa

janela fechada, sempre que não estiver usando. A Tabela 12 apresenta o cronograma de manutenção que deve ser executado para garantir a operação adequada com os itens diários realizados antes de cada uso:

Tabela 12 – Especificações do controlador do motor.

Mamutenção Realizada	Diário	Semanal	Mensal
Verificar o nível da bateria antes de cada utilização	✓		
Limpar a conexão da bateria com um pano limpo e seco	✓		
Examinar o elevador por qualquer dano ou falta de hardware	✓		
Testar para operação normal	✓		
Certificar-se de que a cobertura está fechada	✓		
Inspecionar a estrutura do elevador quanto à ferrugem			✓
Limpar todas as conexões da bateria com uma esponja de nylon		✓	
Limpar todas as superfícies metálicas com uma cera limpadora			✓

Fonte – Produzido pelo autor.

4.2 Resultado das Análises

Aqui são apresentados os resultados das análises feitas na Seção 3.8.

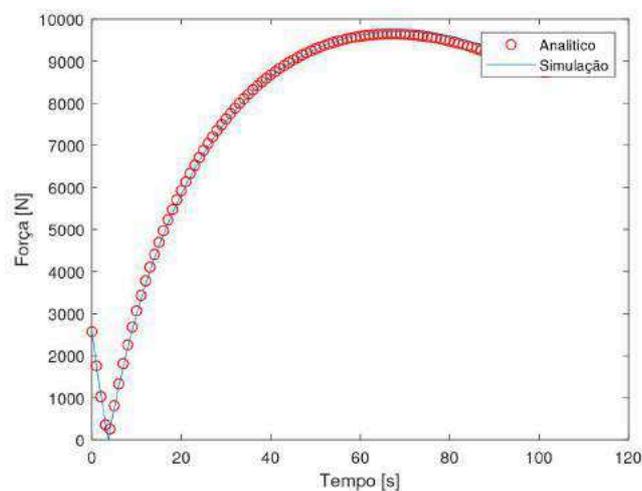
No Apêndice A encontra-se o código em MATLAB® desenvolvido para resolver simbolicamente os sistemas de equações da análise cinemática e dinâmica do elevador de piscina. Nesse mesmo código também se encontram os cálculos para análise de tensão do parafuso de potência.

As simulações numéricas foram realizadas no pacote computacional ANSYS® Workbench, onde foram realizadas uma análise dinâmica do corpo rígido para encontrar posições potencialmente perigosas do movimento e, em seguida, uma análise estática na posição de maior risco, onde a estrutura sofre maior esforço, para verificar a deformação e as tensões do mecanismo. Observando que as condições de contorno e refinamento de malha foram discutidas no Capítulo anterior e seus resultados estão disponíveis no Apêndice D.

A simulação numérica foi validada confrontando o resultado da força linear entre o fuso e a porca do modelo, no ANSYS® Workbench, com as equações analíticas obtidas pela análise dinâmica. A Figura 35 mostra os dois resultados confrontados.

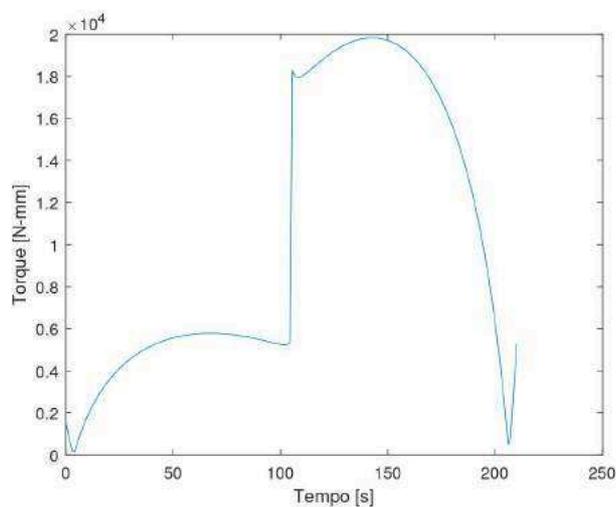
Com o resultado da força linear é possível obter o torque requerido pelo motor, através da solução numérica da Eq. (12). A Figura 36 mostra os resultados para o torque requerido pelo parafuso de potência ao longo do movimento de descida do usuário, de 0 a aproximadamente 105 s, e de subida do mesmo, aproximadamente de 105 até os 210 s. Observa-se que o torque para levantar a carga é cerca de 4 vezes maior do que o torque para abaixar a mesma carga.

Figura 35 – Confrontação dos resultados da simulação com o cálculos analíticos para força linear exercida pelo fuso durante o movimento de descida do Projeto 4.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 36 – Torque exercido pelo parafuso durante o movimento de descida e subida da carga, em sequencia.



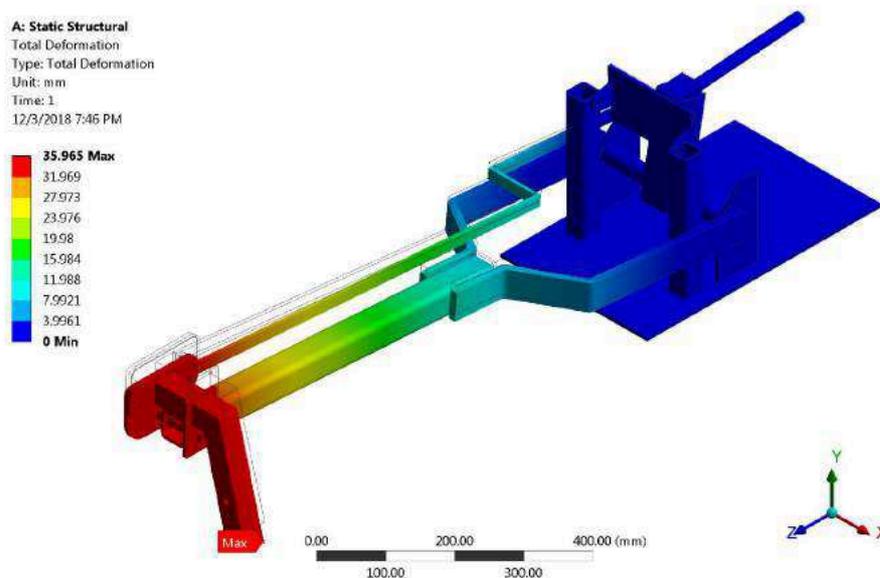
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

4.2.1 Estrutura

A Figura 37 mostra a representação gráfica do campo de deslocamento sofrido pela estrutura na posição crítica. Observa-se que a maior deflexão, como já esperado, se localiza na extremidade do braço, em balanço, e é aproximadamente 3,6 cm. Porém, isso não constitui um problema, pois a estrutura como um todo mantém seu formato inicial e não corre risco de se colidir com outro corpo externo. Além disso, esse deslocamento é imperceptível para o usuário, pois quando o elevador de piscina está na posição inicial,

a deflexão é aproximadamente nula, já que a dimensão do braço de alavanca é muito pequena, e o seu incremento é gradual e lento conforme o movimento de descida até a posição final.

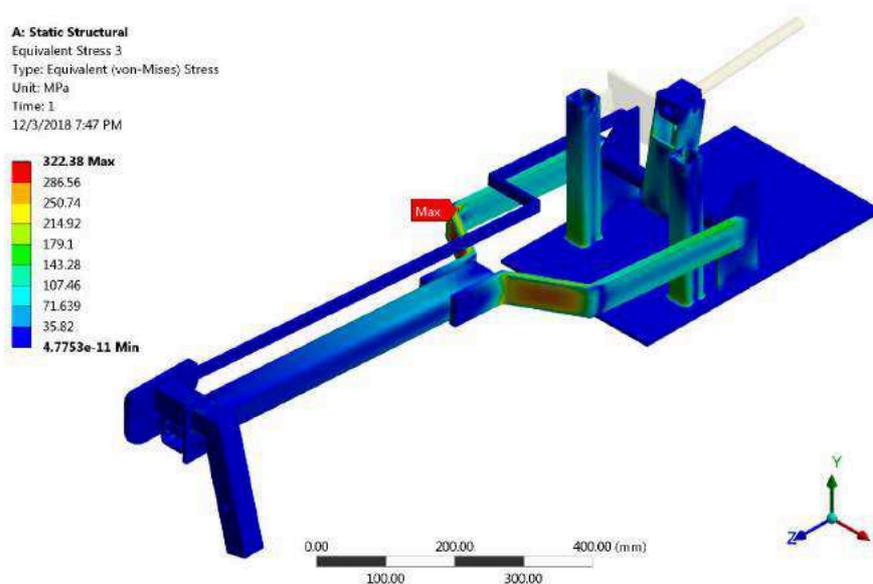
Figura 37 – Campo de deslocamento do modelo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A Figura 38 mostra o gráfico de tensão de von Mises sofrido pela estrutura nas condições impostas. A tensão máxima ocorre onde já era esperado, ou seja, no canto vivo reentrante. Cantos vivos reentrantes devem ser evitados, pois são pontos de concentração de energia de deformação, a qual alimenta mecanismos de propagação de trincas ou de flambagem localizada.

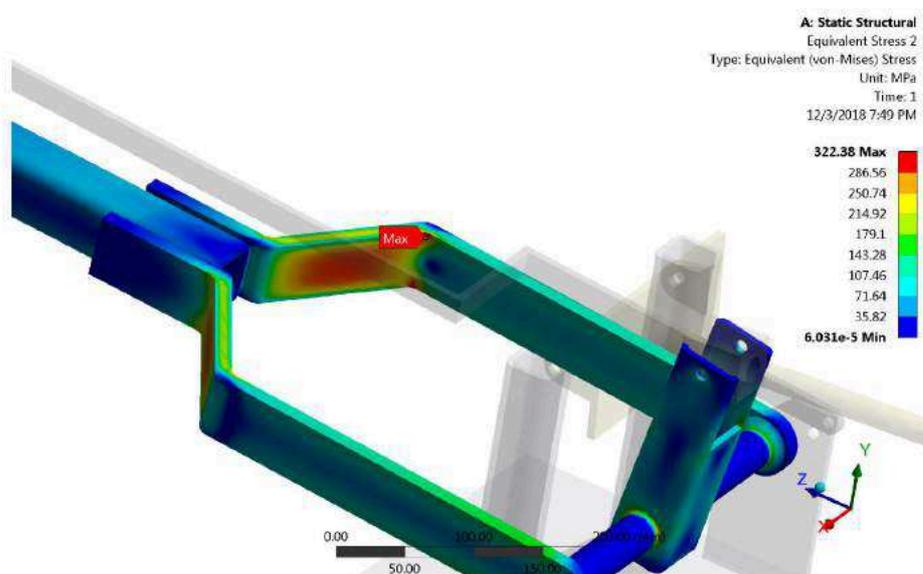
Figura 38 – Tensão equivalente von-Mises do modelo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A Figura 39 exibe mais nitidamente a localização desse pico de esforço - a dobra da chapa que dá o formato de garfo para o braço de elevação. O ângulo desta dobra foi iterado de 90° a 150° , juntamente com a espessura da chapa, de modo que essa região sofresse o menor esforço possível, possibilitado uma distribuição mais uniforme das linhas de força que passam por essa aresta.

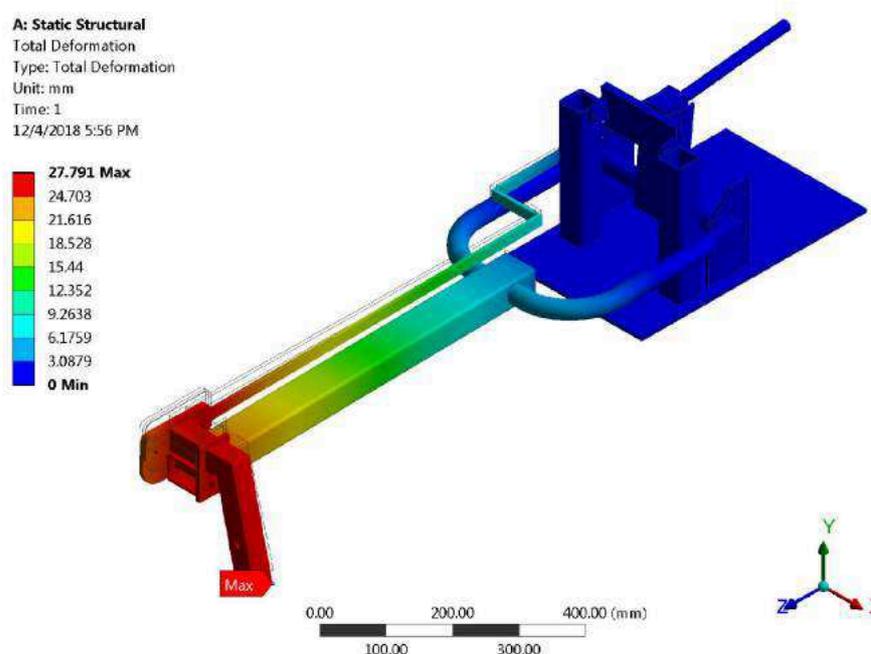
Figura 39 – Detalhe da região onde se encontra tensão máxima.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

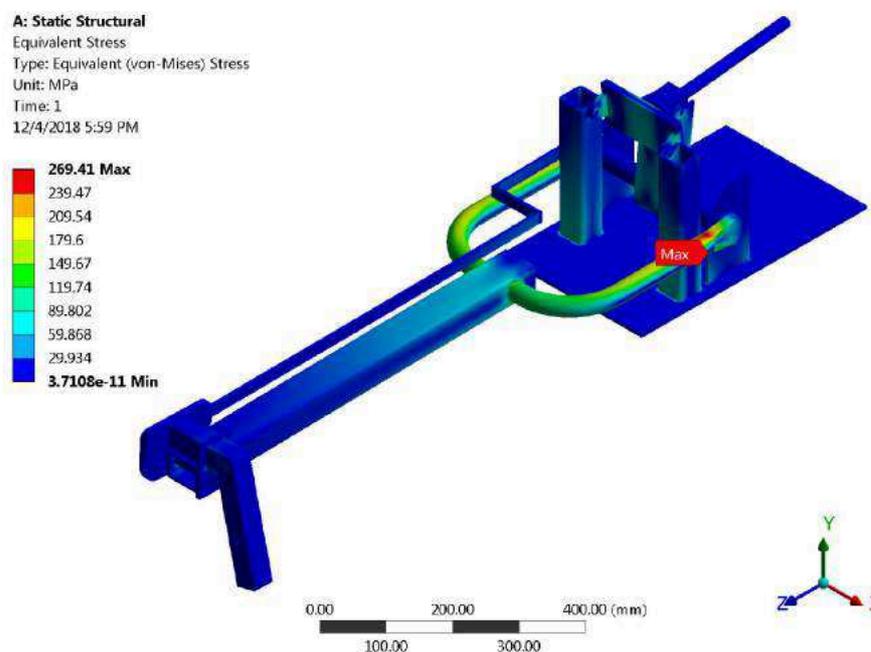
O valor da tensão máxima, 322,38 MPa, está acima do limite de escoamento do aço SAE 1045 (310 - 485 MPa). Dessa forma, foi feita uma mudança na geometria desse elemento estrutural, de forma a evitar o ângulo agudo do canto reentrante. Para isso, mudou-se a geometria do garfo para uma forma curva, redistribuindo a energia de modo que não fique concentrada. O perfil foi alterado de uma seção retangular para um tubo circular. Também reduziu-se ao máximo o comprimento do garfo, para reduzir o esforço de flexão aplicado sobre ele. A Figura 40 mostra a representação gráfica do campo de deslocamento sofrido pela nova estrutura nas mesmas condições impostas anteriormente. A Figura 41 mostra o gráfico de tensão de von Mises sofrido pela nova estrutura nas mesmas condições impostas anteriormente.

Figura 40 – Campo de deslocamento do modelo com o braço de elevação modificado.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 41 – Tensão equivalente von-Mises do modelo com o braço de elevação modificado.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Analisando os resultados dos processamentos do modelo novo, constata-se que o valor máximo para deslocamento total convergiu para 2,7 cm, o que representa um melhoramento na rigidez da estrutura. A tensão máxima atingida é de 269,41 MPa, que está abaixo do limite de escoamento do aço SAE 1045. Portanto, para o caso de carga considerado, espera-se que a estrutura metálica retenha sua integridade estrutural.

4.2.2 Parafuso de Potência

O torque máximo requerido é de 19.828 N-mm e se dá na elevação da carga quando o braço de alavanca é maior durante o movimento circular do braço de elevação. Através do gráfico da Fig. (35) pode-se extrair o valor da força linear máxima exercida no fuso, que é de 9.371 N. O módulo de elasticidade do material do fuso é 310 MPa, considerando um fator de segurança 2 e fator de serviço de 1,6, tem-se uma tensão admissível de 96,88 MPa. Substituindo esses valores na Eq. (15), encontra-se o valor mínimo para o diâmetro menor d_r , do fuso, 11,10 mm. Para esse projeto, selecionou-se o diâmetro médio d_m do fuso de 20 mm.

As tensões sofridas pelo parafuso de potência foram calculadas analiticamente. A tensão de cisalhamento de corpo τ decorrente do momento de torção T_R no exterior do corpo do parafuso, calculada pela Eq. (14), é de 24,65 MPa. A tensão axial σ no corpo do parafuso devido à carga W , calculada pela Eq. (15), é de 46,61 MPa. A tensão de flexão

de raiz de rosca σ_b , calculada pela Eq. (17), é de 17,30 MPa. As tensões tridimensionais, conforme a Figura 25, observando que a coordenada y aponta para dentro da página, são

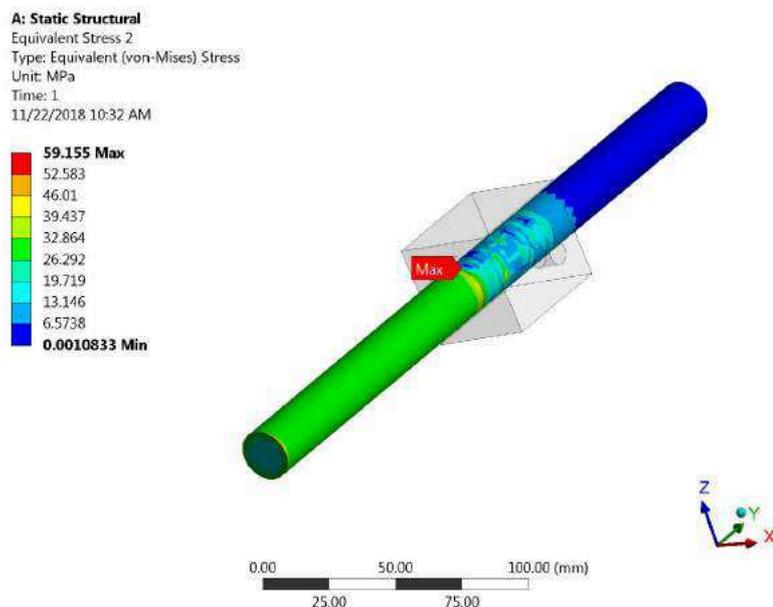
$$\begin{aligned}\sigma_x &= 17,29 \text{ MPa} & \tau_{xy} &= 0 \\ \sigma_y &= 0 \text{ MPa} & \tau_{yz} &= 24,65 \text{ MPa} \\ \sigma_z &= 46,61 \text{ MPa} & \tau_{zx} &= 0\end{aligned}$$

Observa-se que não existem tensões de cisalhamento na face x . Isso significa que σ_x é uma tensão principal. As tensões restantes podem ser transformadas utilizando-se a Eq. (18), da tensão plana, obtendo-se σ_1, σ_3 de 57,23 e -10,62 MPa.

Ordenando as tensões principais, produz-se $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = 57, 23, 17, 29, -10, 62$ MPa. Substituindo estas na Eq. (19), tem-se uma tensão de von Mises σ' de 59,07 MPa. A tensão máxima de cisalhamento τ_{max} é calculada pela Eq. (20), e seu resultado é de 33,93 MPa.

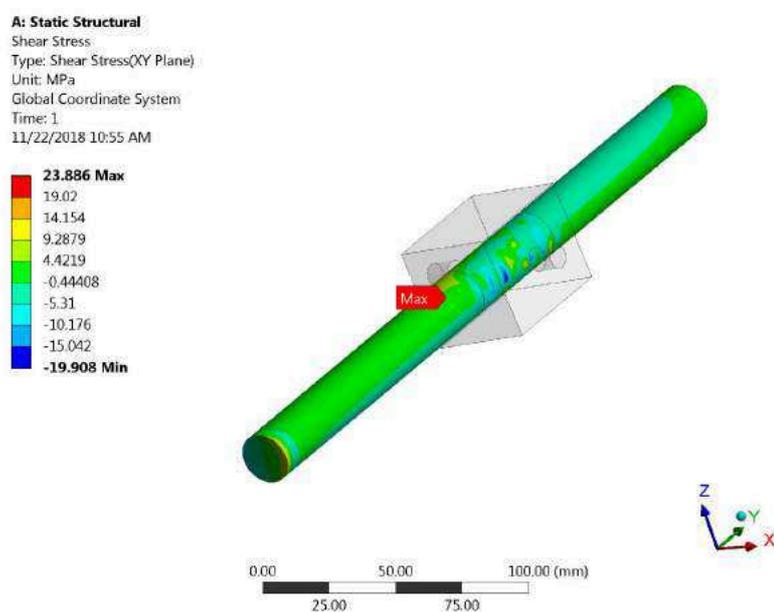
A Figura 42 mostra o resultado para a máxima tensão equivalente de von Mises. A Tabela 13 mostra a comparação dos resultados dos cálculos analíticos com a simulação no ANSYS®. Os resultados da análise pelo MEF das tensão de cisalhamento e tensão máxima de cisalhamento são mostrados nas Figs 43 e 44, no Apêndice D.

Figura 42 – Tensão equivalente de von Mises no fusão.



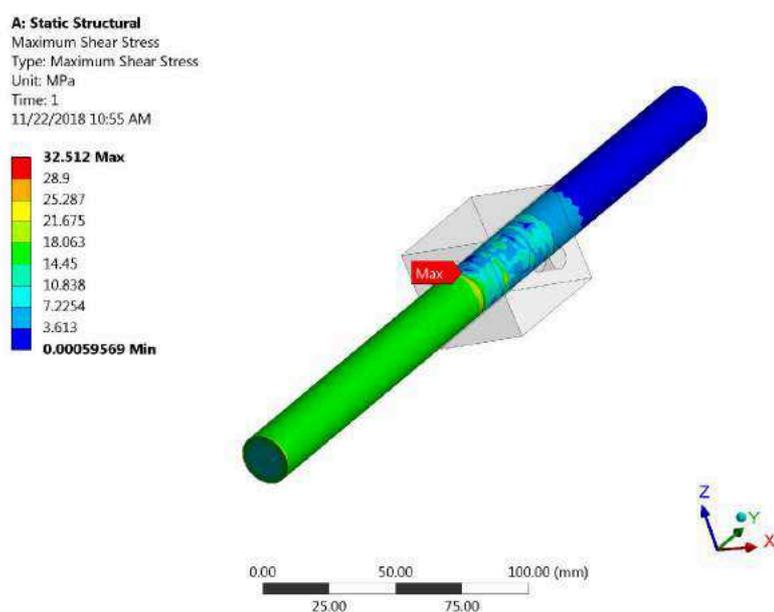
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 43 – Tensão de cisalhamento.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 44 – Tensão máxima de cisalhamento.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Observa-se que os valores obtidos de cálculos analíticos e MEF estão dentro dos limites aceitáveis, portanto, o parafuso de potência e a porca selecionados para essa aplicação são seguros.

Tabela 13 – Resultados dos cálculos analíticos e da análise pelo MEF.

Resultados	Analítico	Simulação MEF
Tensão de von Mises [MPa]	59,07	59,16
Tensão de cisalhamento [MPa]	24,65	23,89
Tensão máxima de cisalhamento [MPa]	33,93	32,51

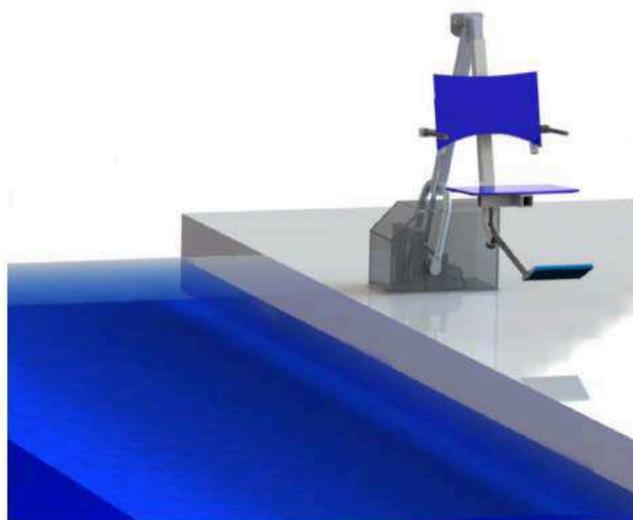
Fonte – Produzido pelo autor.

Com a finalização da análise em elementos finitos foi possível concluir que o projeto do elevador de piscina está dimensionado para o uso.

4.3 Discussão

As Figuras 45 e 46 mostram o modelo do elevador de piscina proposto em sua posição inicial e final, respectivamente.

Figura 45 – Modelo do elevador de piscina proposto em sua posição inicial.

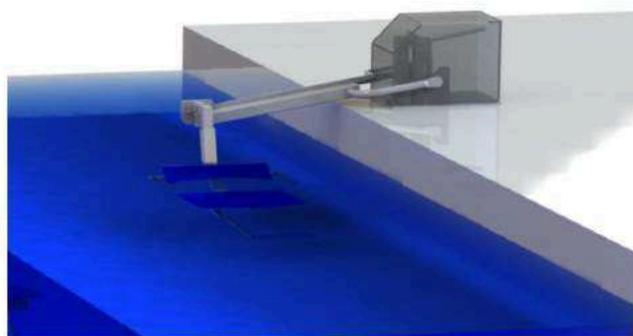


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O projeto do elevador de piscina atende a maior parte da população, em termos de peso, uma vez que considera os valores para percentis selecionados das medidas de peso para um sujeito brasileiro adulto do sexo masculino de acordo com os dados amostrais e estimativas populacionais das medianas de altura e peso da população (IBGE, 2010a). Para este sujeito médio, o peso corresponde a uma média de 72,7 kg, mas como medida de segurança todos os cálculos foram feitos para um peso de 140 kg.

O problema do movimento mecânico de elevação do projeto de benchmark I é resolvido, proporcionando o uso de uma cobertura física protetora fixa para os eletrônicos

Figura 46 – Modelo do elevador de piscina proposto em sua posição final.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

e o sistema de acionamento do movimento, assim como o projeto de benchmark II. Porém, a cobertura física do benchmark II é grande, pois tem que acomodar um atuador linear e isso é um revés de acordo com a pesquisa de necessidade. Para superar esse problema, o projeto proposto por esse trabalho utiliza um parafuso de potência como forma de acionar o mecanismo, reduzindo significativamente o volume ocupado. A Figura 47 mostra os modelos lado a lado, onde pode ser feita comparação visual entre eles.

Figura 47 – Da esquerda para direita: modelo do projeto proposto, benchmark II e benchmark I.

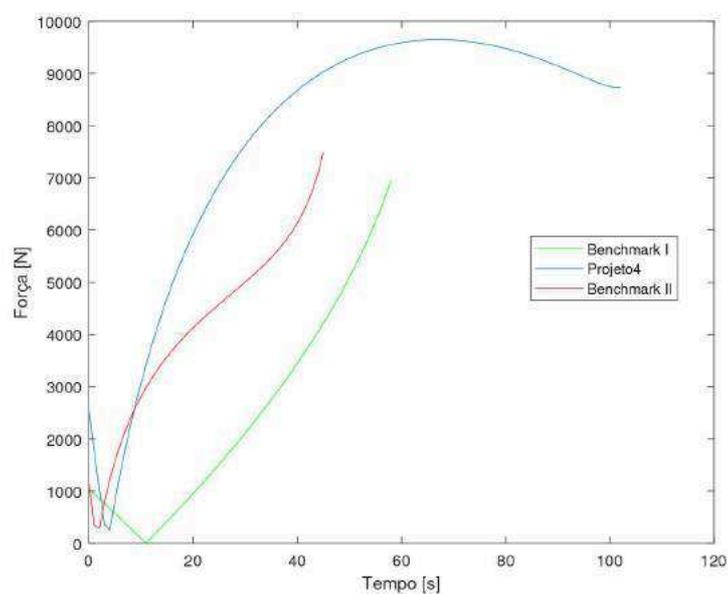


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A Figura 48 mostra o gráfico da força linear requerida em função do tempo de operação, no caso descida, para cada um. É possível observar que o tempo de operação do

projeto proposto é maior que os dos benchmark I e II. Além disso, a força requerida pelo parafuso de potência é cerca de 35% maior do que a dos benchmark I e II. Essas limitações se devem ao baixo aproveitamento da vantagem mecânica oferecida pela configuração do mecanismo proposto. Isso impôs o uso de uma redução relativamente elevada, diminuindo a velocidade de rotação do fuso e conseqüentemente aumentando o tempo de deslocamento do usuário. Esses pontos deverão ser revistos em trabalhos futuros.

Figura 48 – Comparação entre as forças requeridas pelo atuador linear para carga de 1400 N.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

O custo de produção é menor do que o do benchmark I e II, em virtude do custo dos equipamentos eletrônico como o controlador, bateria, controle remoto e a substituição do atuador linear por um conjunto de parafuso de potência. E todos os equipamentos são encontrados comercialmente no Brasil, sem a necessidade de importação.

5 CONCLUSÃO

Para o desenvolvimento do dispositivo, utilizou-se de ferramentas de metodologia de projeto proposta por Norton (2010), as quais foram fundamentais para guiar esse trabalho, através de um conjunto de técnicas e processos empregados, em especial, para projetos de engenharia. Isso possibilitou a estruturação do problema, elaboração dos conceitos, entendimento das necessidades dos usuários, organização de uma pesquisa, proposta de soluções, análises, seleção e, por fim, levou a uma solução viável.

O estudo de *benchmarking* de duas patentes culminou com a fabricação de um protótipo. Isso possibilitou a descoberta de vários *insights*, que foram essenciais para a geração de ideias para serem aplicadas na idealização e projeto do novo elevador de piscina proposto.

As ferramentas computacionais de CAD e CAE foram fundamentais no processo de desenho e análise estrutural dos modelos e, também, na fabricação dos componentes e montagem do protótipo de benchmark. As análises em elementos finitos, mostraram alguns pontos concentradores de tensão em um elemento estrutural do elevador de piscina proposto, o qual foi alterado a geometria, resultando em uma estrutura mais resistente, de forma que o elevador de piscina projetado se mostra apto para trabalhar de forma segura para as condições consideradas.

Foi realizada uma abordagem por métodos analíticos que validou os resultados das simulações numéricas, através de estudos cinemático, dinâmico e estrutural. Ainda assim, é necessário realizar testes experimentais em um protótipo, o que não foi possível neste trabalho, devido à falta de recursos.

O modelo atende às especificações de desempenho e de projeto, incluindo as normas técnicas brasileiras vigentes e o *ADA Standards*. Além disso, caso comercializado, é um produto fácil de fabricar e utiliza componentes facilmente encontrados no mercado brasileiro a custo baixo.

5.1 Trabalhos futuros

Como são raras as pesquisas realizadas em elevadores de transferência para piscinas, muito ainda se deve avançar. A medida em que novas tecnologias forem surgindo, é interessante serem aplicadas a esses equipamentos. De modo geral, como continuidade desse trabalho, sugere-se para atividades futuras:

- i. Fabricação do protótipo, que não foi possível devido à falta de recursos financeiros.

- ii. Realização de testes experimentais para confrontar com os resultados obtidos pelo método analítico e numérico.
- iii. Realização de um estudo clínico junto à pessoas portadores de deficiência para avaliar a aceitação do produto.
- iv. Existem componentes que devem ser cuidadosamente projetados para este elevador de piscina, mas que estavam fora do escopo deste projeto. Como por exemplo, o desenvolvimento de um kit de bateria e um controlador padronizado.

Finalizando, com o trabalho apresentado, o autor procurou contribuir para a popularização da tecnologia assistiva à população de baixa renda. Consequentemente, ajudando a diminuir a lacuna causada pela desigualdade de oportunidades existentes na sociedade brasileira. Por outro lado, este trabalho procurou avançar no campo da engenharia de elevação, ajudando a levar a uma melhor compreensão dos mecanismos, através da aplicação dos conhecimentos de cinemática e dinâmica para o caso de elevadores de piscina e sua validação por métodos numéricos.

REFERÊNCIAS

ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. [S.l.]: ASM Handbook Committee, 1990. Citado na página 54.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão*. Rio de Janeiro, 2004. 217 p. Citado na página 35.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos*. Rio de Janeiro, 2015. 148 p. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 35.

Barassi et al. The role of water environment rehabilitation in patients with neurological and cognitive disabilities. *Biophilia*, v. 2017, n. 1, p. 28–34, 2017. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/ibra/2017/1/2017_28/_pdf>. Citado na página 18.

BU, L.; GRAHAM, P. *Design of a Pool Access Device*. Worcester Polytechnic Institute, 2013. 107 p. Disponível em: <<http://digitalcommons.wpi.edu/atrc-projects/18/>>. Citado na página 41.

CADEN, J.; RESCH, B.; SANDER, W. *Aquatic lifting device*. U.S.: Pat. 5.790.995, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

CERQUEIRA, C. G. et al. O desenvolvimento do produto sob a ótica ergonômica: uma contribuição à responsabilidade social da instituição e à formação interdisciplinar do discente. *Congresso nacional de excelência em gestão*, Niterói, n. ISSN 1984-9354, 2010. Citado na página 28.

COHEN, R. *Pessoas Portadoras de Deficiência Física - O Direito à Locomoção: Declaração*. 107 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 33.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Antropometria e estado nutricional de crianças, adolescentes e adultos no Brasil*. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45419.pdf>>. Citado na página 73.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Demográfico. Características gerais da população, religião e pessoas com deficiência*. Rio de Janeiro, 2010. 1–239 p. Disponível em: <ftp://ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Caracteristicas_Gerais_Religiao_Deficiencia/caracteristicas_religiao_deficiencia.%0Apdf>. Citado na página 20.

NEGRI, F. Novos caminhos para a inovação no Brasil. *Interfarma*, 2018. Disponível em: <<https://www.interfarma.org.br/public/files/biblioteca/novos-caminhos-para-a-inovacao-no-brasil-interfarma.pdf>>. Citado na página 21.

NOLAN, J. E. *Swimming pool chair lift*. U.S.: Pat. 4.221.008, 1980. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

NORTON, R. L. *Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos*. Porto Alegre: AMGH, 2010. Citado 7 vezes nas páginas 28, 32, 36, 41, 42, 60 e 76.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. *Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde*. Lisboa, 2004. Citado na página 18.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. The World Report on Disability. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities*, tradução Lexicus Serviços Linguísticos - São Paulo : SEDPcD, São Paulo, v. 25, n. 6, p. 495–496, 11 2012. ISSN 13602322. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1468-3148.2012.00693.x>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

PORTO, E.; SIMÕES, R.; MOREIRA, W. Corporeidade E Ação Profissional Na Reabilitação : (Des) Encontros. *Revista Brasileira de Ciências do Esporte*, v. 25, n. ISSN 2179-3255, p. 101–116, 2008. Disponível em: <<http://www.revista.cbce.org.br/index.php/RBCE/article/view/242/243>>. Citado na página 19.

ROTHBART, H. A. *Mechanical Design and Systems Handbook*. 2 ed. ed. New York: McGraw-Hill, 1985. Citado na página 49.

SHERIDAN, S. W. *Pool chair lift and Associated method of use*. U.S.: Pat. 8.646.119, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 32 e 39.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. *Projeto de Engenharia Mecânica*. 7 ed. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. Citado na página 49.

SIMUTECH GROUP. *ANSYS 15.0: Bolt Threads*. 2018. Disponível em: <<https://www.simutechgroup.com/tips-and-tricks/fea-articles/205-ansys-15-bolt-thread>>. Citado na página 58.

SIQUEIRA, F. C. V. et al. Barreiras arquitetônicas a idosos e portadores de deficiência física: um estudo epidemiológico da estrutura física das unidades básicas de saúde em sete estados do Brasil. *Ciência e Saúde Coletiva*, ABRASCO - Associação Brasileira de Saúde Coletiva, v. 14, n. 1, p. 39–44, 2 2009. ISSN 1413-8123. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232009000100009&lng=pt&tlng=pt>. Citado na página 20.

SMITH, H. *The 5 Best Pool Lifts*. 2017. Disponível em: <<https://www.rehabmart.com/post/top-5-pool-lifts-review>>. Citado na página 25.

SMITH, S. *Lift seat*. U.S.: Pat. 2014/0101839, 2014. Citado na página 30.

S.R. SMITH. *History and Evolution of Swimming Pool Lifts From Patient Lifts to Pool Lifts*. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

S.R. SMITH. *Pool Access*. 2018. Disponível em: <<https://srsmith.com/en-us/products/pool-access/>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

TERZO, M. B. *Portable pool lift for disabled persons*. U.S.: Pat. 2005/0086730, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

UNITED STATES DEPARTMENT OF JUSTICE. *2010 ADA Standards for Accessible Design*. Estados Unidos, 2010. Citado na página 23.

Apêndices

APÊNDICE A – CÓDIGOS MATLAB

Código A.1 – Geracao simbolica das equacoes

```

1 clear all;
2 clc;
3 close all;
4
5 %% Posicao angular
6
7 syms r L p theta2 phi beta
8
9 eqn1 = r*cos(phi) - p*cos(theta2) - L == 0;
10 eqn2 = r*sin(phi) - p*sin(theta2) == 0;
11
12 sol = solve([eqn1, eqn2], [phi, theta2]);
13 phiSol = sol.phi;
14 theta2Sol = sol.theta2;
15
16 phiSol %%Posicao angular em 0 (angulo phi)
17
18 theta2Sol %%Posicao angular em 0_2 (angulo teta2)
19
20 %% Equacoes da Velocidade
21
22 syms rp theta2p phip
23
24 eqn3 = rp*cos(phi) - r*phip*sin(phi) + p*theta2p*sin(theta2) == 0;
25 eqn4 = rp*sin(phi) + r*phip*cos(phi) - p*theta2p*cos(theta2) == 0;
26
27 sol = solve([eqn3, eqn4], [phip, theta2p]);
28 phipSol = sol.phip;
29 theta2pSol = sol.theta2p;
30
31 phipSol %%Velocidade angular em 0
32
33 theta2pSol %%Velocidade angular em 0_2
34

```

```

35 %% Equacoes da Aceleracao
36
37 syms rpp theta2pp phipp
38
39 eqn5 = rpp*cos(phi) - 2*rp*phip*sin(phi) - r*phipp*sin(phi) -
      r*phip^2*cos(phi) - r*phip^2*sin(phi) + p*theta2pp*sin(theta2) +
      p*theta2p^2*cos(theta2) == 0;
40 eqn6 = rpp*sin(phi) + 2*rp*phip*cos(phi) + r*phipp*cos(phi) -
      p*theta2pp*cos(theta2) + p*theta2p^2*sin(theta2) == 0;
41
42 sol = solve([eqn5, eqn6], [phipp, theta2pp]);
43 phippSol = sol.phipp;
44 theta2ppSol = sol.theta2pp;
45
46 phippSol % Aceleracao angular em 0
47
48 theta2ppSol % Aceleracao angular em 0_2

```

Código A.2 – Equacao da forza

```

1 clear all
2 clc
3 close all
4
5 %% Equacoes de equilibrio
6
7 syms Mf F p phi theta2
8 Mf = F*cos(phi+pi)*p*sin(theta2) + F*sin(phi+pi)*p*cos(theta2);
9
10 syms Mw W gamma d beta
11 Mw = W*cos(beta)*d*sin(theta2+gamma) + W*sin(beta)*d*cos(theta2+gamma);
12
13 syms I m
14 I = m*d^2;
15
16 syms theta2pp theta2p r rp rpp phip phipp
17 theta2pp = -(rpp*cos(phi)^2 + rpp*sin(phi)^2 - phip^2*r*cos(phi)^2 +
      p*theta2p^2*cos(phi)*cos(theta2) - phip^2*r*cos(phi)*sin(phi) +
      p*theta2p^2*sin(phi)*sin(theta2))/(p*(cos(phi)*sin(theta2) -
      cos(theta2)*sin(phi)));

```

```

18
19 %% Isolando a Forca
20
21 %Mf - Mw = I*theta2pp
22 sol = solve( -(F*cos(phi+pi)*p*sin(theta2) -
    F*sin(phi+pi)*p*cos(theta2)) + (-W*cos(beta)*d*sin(theta2+gamma) +
    W*sin(beta)*d*cos(theta2+gamma)) == m*d^2*(-(rpp*cos(phi)^2 +
    rpp*sin(phi)^2 - phip^2*r*cos(phi)^2 +
    p*theta2p^2*cos(phi)*cos(theta2) - phip^2*r*cos(phi)*sin(phi) +
    p*theta2p^2*sin(phi)*sin(theta2))/(p*(cos(phi)*sin(theta2) -
    cos(theta2)*sin(phi)))) ,F);

```

Código A.3 – Main

```

1 clear all
2 clc
3 close all
4
5 format short g
6
7 %% Dados da esquema matematico
8
9 p = 0.150;
10 L = 0.15465;
11 r = 0.27298;
12
13 rpp = 0; %aceleracao nula
14
15 d = 1;
16 gamma = 95*pi/180;
17 beta = 334.86*pi/180;
18 W = 1400; %1000 N
19 m = 140; %100 kg
20 P = 200; % 200 N ou 20 kg aprox peso da estrutura metalica
21
22 %% Rosca de fuso trapezoidal
23
24 passo = 4;
25 l = 1*passo;
26 dmax = 20;

```

```

27 dm = dmax - paso/2; %diametro medio do fuso
28 dr = dmax - paso; %diametro interno fuso
29
30 f = 0.14; %porca de bronze e rosca de aco lubrificado
31 alfa = 30*pi/180; %angulo da rosca trapezoidal eh 30 ACME eh 29
32
33 S = floor(r*1000)-15; %espaco linear a ser percorrido menos 1,5cm;
34 N = S/l; %quantidade de voltas (N) que o motor devera executar para
    percorrer esse espaco desejado
35 %tempo = 40; %tempo que se deseja percorrer esse espaco
36 %freq = N/tempo; %frequencia de rotacao do motor
37 %n = 60*freq; %rotacao em RPM
38
39 n = 75/2; %rotacao do fuso
40 freq = n/60; %frequencia de rotacao do motor
41 tempo = N/freq; %tempo para percorrer esse espaco
42 rp = (n*l/60)/1000; %velocidade linear da porca em metros
43
44 %% Iteracao e graficos
45 for t = 0:1:tempo
46
47     %Angulo
48     phi = 2*atan(((p*(L + p + r)^2*(((L + p - r)*(p - L + r))/((L + p +
        r)^3*(L - p + r)))^(1/2))/(p - L + r) - (L*(L + p + r)^2*(((L + p
        - r)*(p - L + r))/((L + p + r)^3*(L - p + r)))^(1/2))/(p - L + r)
        + (r*(L + p + r)^2*(((L + p - r)*(p - L + r))/((L + p + r)^3*(L -
        p + r)))^(1/2))/(p - L + r))/(L + p + r));
49     theta2 = 2*atan(((L + p + r)^2*(((L + p - r)*(p - L + r))/((L + p +
        r)^3*(L - p + r)))^(1/2))/(p - L + r));
50
51     %Velocidade angular
52     phip = (-(rp*(cos(phi)*cos(theta2) +
        sin(phi)*sin(theta2)))/(r*(cos(phi)*sin(theta2) -
        cos(theta2)*sin(phi))));
53     theta2p = (-(rp*(cos(phi)^2 + sin(phi)^2))/(p*(cos(phi)*sin(theta2) -
        cos(theta2)*sin(phi))));
54
55     %Aceleracao angular
56     phipp = (-(rpp*cos(phi)*cos(theta2) + rpp*sin(phi)*sin(theta2) +

```

```

p*theta2p^2*cos(theta2)^2 + p*theta2p^2*sin(theta2)^2 -
  phip^2*r*cos(phi)*cos(theta2) - phip^2*r*cos(theta2)*sin(phi) +
  2*phip*rp*cos(phi)*sin(theta2) -
  2*phip*rp*cos(theta2)*sin(phi))/(r*(cos(phi)*sin(theta2) -
  cos(theta2)*sin(phi)));
57 theta2pp = (-(rpp*cos(phi)^2 + rpp*sin(phi)^2 - phip^2*r*cos(phi)^2 +
  p*theta2p^2*cos(phi)*cos(theta2) - phip^2*r*cos(phi)*sin(phi) +
  p*theta2p^2*sin(phi)*sin(theta2))/(p*(cos(phi)*sin(theta2) -
  cos(theta2)*sin(phi))));
58
59 % Forca
60 F = -(W*d*cos(gamma + theta2)*sin(beta) - W*d*sin(gamma +
  theta2)*cos(beta) + (d^2*m*(rpp*cos(phi)^2 + rpp*sin(phi)^2 -
  phip^2*r*cos(phi)^2 + p*theta2p^2*cos(phi)*cos(theta2) -
  phip^2*r*cos(phi)*sin(phi) +
  p*theta2p^2*sin(phi)*sin(theta2)))/(p*(cos(phi)*sin(theta2) -
  cos(theta2)*sin(phi)))/(p*cos(phi)*sin(theta2) -
  p*cos(theta2)*sin(phi)));
61 F1(t+1)= abs(-(W*d*cos(gamma + theta2)*sin(beta) - W*d*sin(gamma +
  theta2)*cos(beta) + (d^2*m*(rpp*cos(phi)^2 + rpp*sin(phi)^2 -
  phip^2*r*cos(phi)^2 + p*theta2p^2*cos(phi)*cos(theta2) -
  phip^2*r*cos(phi)*sin(phi) +
  p*theta2p^2*sin(phi)*sin(theta2)))/(p*(cos(phi)*sin(theta2) -
  cos(theta2)*sin(phi)))/(p*cos(phi)*sin(theta2) -
  p*cos(theta2)*sin(phi)));
62
63
64 %Torque da rosca trapezoidal
65 TR(t+1) = abs((F*dm/2)*((1+pi*f*dm*sec(alfa))/(pi*dm-f*1*sec(alfa))));
66 TL(t+1) = abs((F*dm/2)*((pi*f*dm-1)/(pi*dm+f*1)));
67
68
69
70 %figure(1)
71 %hold on;
72 %plot(t, phi*180/pi, '-o');
73
74 %figure(2)
75 %hold on;

```

```
76 %plot(t, phip*180/pi,'-o');
77
78 %figure(3)
79 %hold on;
80 %plot(t, phipp*180/pi,'-o');
81
82 %figure(4)
83 %hold on;
84 %plot(t, theta2*180/pi,'-o');
85
86 %figure(5)
87 %hold on;
88 %plot(t, theta2p*180/pi,'-o');
89
90 %figure(6)
91 %hold on;
92 %plot(t, theta2pp*180/pi,'-o');
93
94
95 %figure(7)
96 %hold on;
97 %plot(t, abs(T),'-o');
98
99
100 r = r - rp;
101 end
102
103
104 %% Plot do Torque
105
106 T = [TL,flip(TR)];
107
108 %figure
109 %tempo2 = linspace(0,length(T),length(T));
110 %plot(tempo2,T)
111 %xlabel('Tempo [s]')
112 %ylabel('Torque [N-mm]')
113
114 %% Calulos Analiticos
```

```
115
116 nt = 13; %roscas engajadas
117
118 tau = 16*max(T)/(pi*dr^3);
119 sigma = 4*max(F1)/(pi*dr^2);
120 sigmab = 6*0.38*max(T)/(pi*dr*1*nt);
121 von = (1/sqrt(2))*sqrt((sigmab)^2+(-sigma)^2+(sigma-sigmab)^2+6*tau^2);
122
123 sigma1 = sigma/2 + sqrt((sigma/2)^2+tau^2);
124 sigma2 =sigma/2 - sqrt((sigma/2)^2+tau^2);
125 sigmalinha =
    sqrt(((sigmab-sigma1)^2+(sigma1-sigma2)^2+(sigma2-sigmab)^2)/2);
126
127
128 taumax = 0.5*sqrt(sigma^2+4*tau^2);
129 taumax2 = 0.5*(sigma1-sigma2);
130
131
132 %% [SIMULACAO ANSYS vs analitico] Plot da forca do atuador linear
133
134 load LinearMotor1.csv
135 tempo4 = linspace(0,tempo,length(LinearMotor1(:,1)));
136 data = LinearMotor1(:,2);
137
138 tempo5 = linspace(0,t,length(F1));
139
140 figure
141 plot(tempo5,abs(F1),'ro')
142 hold on
143 plot(tempo4,data)
144 legend({'Analitico', 'Simulacao'})
145 xlabel('Tempo [s]')
146 ylabel('Forca [N]')
147
148 %% [SIMULACAO ANSYS] Plot Forcas de reacao na juntas
149
150 load prob1.txt
151 load prob2.txt
152 load prob3.txt
```

```
153 load prob4.txt
154 load prob5.txt
155 load prob6.txt
156 load prob7.txt
157 load prob8.txt
158 load prob9.txt
159 load prob10.txt
160
161 tempo3 = linspace(0,tempo,length(prob2(:,1)));
162
163 figure
164 plot(tempo3,prob2(:,2),'DisplayName','Junta 3')
165 hold on
166 plot(tempo3,prob3(:,2),'DisplayName','Junta 4')
167 plot(tempo3,prob4(:,2),'DisplayName','Junta 5')
168 plot(tempo3,prob5(:,2),'DisplayName','Junta 6')
169 plot(tempo3,prob6(:,2),'DisplayName','Junta 7')
170 plot(tempo3,prob7(:,2),'DisplayName','Junta 8')
171 plot(tempo3,prob8(:,2),'DisplayName','Junta 9')
172 plot(tempo3,prob9(:,2),'DisplayName','Junta 10')
173 plot(tempo3,prob10(:,2),'DisplayName','Junta 11')
174
175 hold off
176
177 legend('Junta 3','Junta 4','Junta 5','Junta 6','Junta 7','Junta
      8','Junta 9','Junta 10','Junta 11')
178 xlabel('Tempo [s]')
179 ylabel('Forca [N]')
```

APÊNDICE B – RELATÓRIOS DE CUSTOS

Tabela 14 – Levantamento do custo de importação do elevador de piscina ML300.

Descrição do custo	Valor(R\$)
Valor do produto	14.113,35
Frete internacional	13.398,40
Imposto de importação	8.468,01
ICMS	5.645,34
Taxas administrativas	7.859,00
Total	49.484,10

Fonte – Produzido pelo autor.

Nota – Valor do dólar no dia da pesquisa R\$ 3,95.

Tabela 15 – Estimativa do custo de fabricação do protótipo do modelo proposto.

Descrição do custo	Valor(R\$)
Parafuso de potência	500,00
Estrutura Metálica	1.000,00
Assento	100,00
Motor	500,00
Microcontrolador	300,00
Controlador do motor	300,00
Bateria	1.000,00
Fixadores	50,00
Mão-de-obra	2.000,00
Total	5.750,00

Fonte – Produzido pelo autor.

APÊNDICE C – MATRIZ DE TOMADA DE DECISÃO

Tabela 16 – Matriz de tomada de decisões.

Fator de ponderação	Custo 0,35	Segurança 0,30	Desempenho 0,15	Complexidade 0,20	Total
Projeto 1	3	2	3	4	2,9
Projeto 2	4	3	4	3	3,5
Projeto 3	4	3	4	1	3,1
Projeto 4	4	4	4	2	3,6

Fonte – Produzido pelo autor.

Tabela 17 – Segurança - O mecanismo nunca deve tombar em qualquer posição e manter o paciente estável o tempo todo. O processo pelo qual o paciente é transferido para a água deve ser seguro e não deve expor o paciente a movimentos súbitos e bruscos.

Peso	Descrição
5	Transferência e movimentos muito seguros, e nenhuma inclinação
4	Transferência segura e movimentos pouco desejáveis e inclinação
3	Transferência menos segura e movimentos ainda pouco desejáveis e inclinação
2	Nível aceitável de segurança e movimentos e inclinação
1	Nível inaceitável de segurança, movimentos e inclinação

Fonte – Produzido pelo autor.

Tabela 18 – Custo - O custo do mecanismo, incluindo custo de fabricação e preço do produto.

Peso	Descrição
5	O custo do mecanismo está abaixo de R\$ 5.000,00
4	O custo do mecanismo está abaixo de R\$ 10.000,00
3	O custo do mecanismo está abaixo de R\$ 15.000,00
2	O custo do mecanismo está abaixo de R\$ 20.000,00
1	O custo do mecanismo é superior a R\$ 20.000,00

Fonte – Produzido pelo autor.

Tabela 19 – Confiabilidade - O mecanismo deve ser fácil de reparar e manter. Em relação a reparação e manutenção do mecanismo.

Peso	Descrição
5	É simples, o que pode ser feito pelo cliente com manual
4	Levará algum tempo pelo cliente com manual ou simples se chamar especialista
3	Não é complexa, mas deve ser feita por especialista
2	É complexa e deve ser feita por especialista
1	É muito complexa e deve ser feita por especialista

Fonte – Produzido pelo autor.

Tabela 20 – Complexidade - O mecanismo deve ser projetado para ser montado com o mínimo de peças e o mais simples possível.

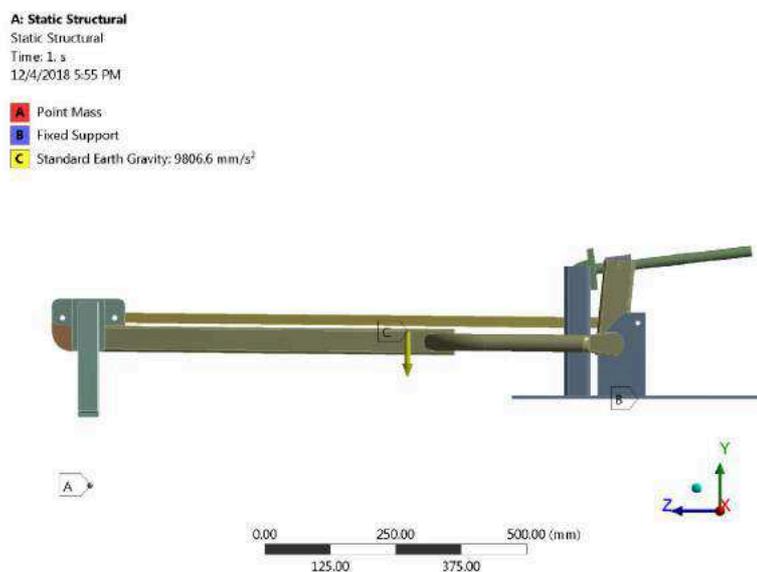
Peso	Descrição
5	O mecanismo possui menos de 2 partes móveis
4	O mecanismo possui 3 partes móveis
3	O mecanismo possui 4 partes móveis
2	O mecanismo possui 5 partes móveis
1	O mecanismo possui 6 partes móveis

Fonte – Produzido pelo autor.

APÊNDICE D – ELEMENTOS FINITOS

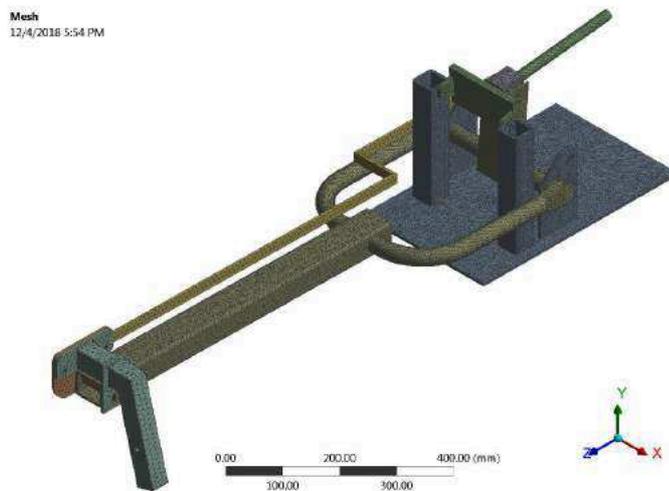
D.1 Estrutura Modificada

Figura 49 – Condições de contorno da estrutura modificada do elevador de piscina na posição final.



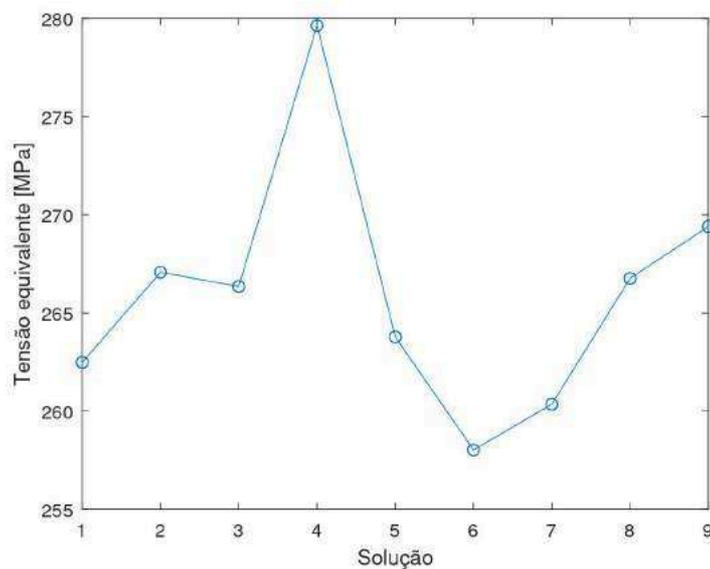
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 50 – Malha final para a estrutura modificada do elevador de piscina.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 51 – Gráfico do histórico de convergência para a simulação da estrutura modificada do elevador de piscina.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Tabela 21 – Histórico de convergência para a simulação da estrutura modificada do elevador de piscina.

	Tensão Equivalente [MPa]	Variação [%]	Nós	Elementos
1	262,48		83254	46993
2	267,07	1,7187	92998	52414
3	266,35	-0,2703	101640	58155
4	279,63	4,7491	113586	68592
5	263,78	-6,0088	120036	68592
6	258,02	-2,2324	141120	81148
7	260,35	0,8949	186269	107489
8	266,76	2,4029	212592	118743
9	269,45	0,9983	358292	206182

Fonte – Produzido pelo autor.