UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – SEM

ISMAEL MOTTA BARBOSA

**Equipamentos de autoajuda: projeto e validação de um protótipo
funcional para sustentação e movimentação de membros
superiores**

São Carlos

2016

ISMAEL MOTTA BARBOSA

**Equipamentos de autoajuda: projeto e validação de um protótipo
funcional para sustentação e movimentação de membros
superiores**

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Projeto mecânico.

Orientadora: Prof^a. Dra. Zilda De Castro Silveira.

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-
SE DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA EESC-USP.

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Barbosa, Ismael Motta
B238e Equipamentos de autoajuda: projeto e validação de um protótipo funcional, para sustentação e movimentação de membros superiores / Ismael Motta Barbosa; orientador Zilda de Castro Silveira . São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto Mecânico -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Sistemas mecânicos. 2. Metodologia de projeto. 3. Projeto preliminar. 4. Tecnologia assistiva. 5. Equipamento de auto ajuda. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ISMAEL MOTTA BARBOSA.**

Título da dissertação: "Equipamentos de autoajuda: projeto e validação de um protótipo funcional, para sustentação e movimentação de membros superiores".

Data da defesa: 04/02/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dra. **Zilda de Castro Silveira (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Gregory Bregion Daniel**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof. Dr. **Cleudmar Amaral de Araújo**
(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pelo amor e apoio incondicionais, além de fornecer todos os alicerces necessários para a minha caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, que me proporcionou a base do meu aprendizado além de ser uma fonte de inspiração em relação ao caráter e a ética.

A querida orientadora Prof^a. Dra. Zilda de Castro Silveira, pela oportunidade, pela paciência, pelos aprendizados e pela amizade construída ao longo deste trabalho.

A querida Alessandra Cavalcanti que confiou em mim para a realização deste trabalho do cunho interdisciplinar e social.

Ao Pedro e Flávio, técnicos da Oficina do Departamento de Engenharia Mecânica, que proporcionaram com rapidez e qualidade os itens necessários para a fabricação deste projeto.

Barbosa, I. M. **Equipamentos de autoajuda: projeto e validação de um protótipo funcional para sustentação e movimentação de membros superiores**. 191 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um equipamento destinado a proporcionar a realização de exercícios terapêuticos, baseado numa abordagem sistemática de desenvolvimento de projeto orientado pelo usuário e obter um protótipo funcional. Por meio das técnicas de metodologia de projeto e dos fundamentos gerais de elementos de máquinas desenvolveram-se a fase do projeto conceitual, com interface ao projeto informacional de Souza (2016), e do projeto preliminar direcionado ao desenvolvimento de um protótipo funcional destinado à sustentação e movimentação dos membros superiores de indivíduos com disfunções motoras nos membros superiores. Devido a um conjunto de fatores provenientes dos mais diversos segmentos da sociedade, há uma demanda crescente com relação à atuação das diversas áreas da engenharia, que possam fornecer soluções tecnicamente viáveis e ainda, com um grau de personalização em massa destinadas às aplicações na área da saúde. A área de conhecimento denominada "Tecnologia Assistiva" (TA) inserida na área da saúde, atua principalmente no desenvolvimento de órteses, próteses e auxílio à mobilidade, desenhando fronteiras com questões de acessibilidade, com uso e adequação de produtos, bem como na atuação de áreas de habilitação e reabilitação promovendo qualidade de vida e inclusão social de indivíduos com algum tipo de deficiência ou mobilidade reduzida. Nesse trabalho, o uso de ferramentas de metodologia de projeto durante as discussões sobre o projeto informacional e a implementação do projeto conceitual, ambos de caráter interdisciplinar, permitiu estabelecer a interface entre decisões técnicas de engenharia e os requisitos do usuário. O usuário intermediário, responsável pela prescrição e avaliação do protótipo foi representado por uma amostra de terapeutas ocupacionais, que acompanharam o processo de desenvolvimento do projeto até a validação do protótipo funcional. Os resultados obtidos nesse trabalho foram: obtenção de uma lista de requisitos do usuário, que convertida em um conjunto de características técnicas permitiu o desenvolvimento do projeto orientado pelo usuário (Terapeutas Ocupacionais) e construção de um protótipo funcional. O equipamento de apoio aos exercícios terapêuticos proposto apresenta graus de inovação, quando comparado à equipamentos comerciais e patentes, principalmente: adequação à diferentes mobiliários em ambiente hospitalar e doméstico (camas, cadeiras, mesas); melhor processo de compactação do equipamento para armazenagem e transporte, feito por uma única pessoa; exercícios com os membros superiores: uni e bilateral e abertura completa dos membros superior no plano coronal por meio de guias lineares.

Palavras-chave: *Projeto conceitual; projeto de sistemas mecânicos; auxílio a mobilidade; tecnologia assistiva; sling.*

Barbosa, I. M. **Sling: design and functional prototype development applied to the apparatus for supporting and movement of the upper limbs**. 191 p. Dissertation (Master's Degree) - São Carlos Engineering School, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

ABSTRACT

This work presented the development of an apparatus whose objective is allow the therapeutic exercises, based on a systematic approach user-oriented design development, and fabricate a functional prototype. Based on design methodology and machine elements theory it was developed the conceptual and the preliminary design phase, based on the informational design phase of Souza (2016), to develop a functional prototype aimed to provide support and movement of the upper limbs of people with motor dysfunction in these members. Due to a range of factors from the various segments of society, there is increasing demand related to the performance of various areas of engineering, that can provide technically feasible solutions and with a degree of mass customization intended for applications in the health area. The knowledge area of "Assistive Technology" (AT) is inserted in the health area and acts mainly in the development of prostheses, orthoses and aid mobility, by drawing borders with accessibility issues, using and adjusting products, in addition to acting in habilitation and rehabilitation areas, which promote quality of life and social inclusion of individuals with a disability or reduced mobility. In this work, the use of design methodology tools during the discussion on the informational design and implementation of conceptual design, both interdisciplinary, revealed the interface between technical engineering decisions and user requirements. The intermediate user, responsible for evaluating the prototype was represented by sample occupational therapists, which prescribes and follows up the use of the mechanisms and/or equipment to end users. The main result of this work was a better definition of the user requirements that allowed obtaining design parameters' focusing on occupational therapists as well as the development of a functional prototype. The main technical characteristics obtained through of the interactive and iterative processes along the informational, conceptual and preliminary design phases both prototype validation were: compaction of the device (related to storage and use for one or both arms of the user). Besides, the equipment allows possibility of adaptation to different furniture and environments: hospital, clinics, small treatment rooms, domestic bed, and chairs and use; rehabilitation exercises with positions of the upper limbs: uni- and bilateral and total movement of the upper limbs on coronal plane based on linear guides.

Keywords: *Conceptual design, design of mechanical systems, mobility assistance, assistive technology, sling.*

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	7
AGRADECIMENTOS	9
RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
SUMÁRIO.....	15
LISTA DE FIGURAS	19
LISTA DE TABELAS	27
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	29
LISTA DE SÍMBOLOS.....	31
1. INTRODUÇÃO	35
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	35
1.2. OBJETIVO	37
1.3. MOTIVAÇÃO	37
1.4. INFRAESTRUTURA LABORATORIAL.....	38
2. APRESENTAÇÃO DO APARELHO <i>SLING</i>	40
2.1. CLASSIFICAÇÃO DE DEFICIÊNCIA.....	40
2.2. TECNOLOGIA ASSISTIVA.....	41
2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DE TA	44
2.3. APARELHOS DE SUSPENSÃO DOS MEMBROS SUPERIORES E O PRODUTO <i>SLING</i>	48
2.3.1. ORIGEM, CLASSIFICAÇÃO E FUNCIONALIDADE DOS APARELHOS DE SUSPENSÃO DOS MEMBROS SUPERIORES	49
2.4. MOTIVAÇÃO: APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	56
3. REVISÃO do ESTADO DA TÉCNICA E DA ARTE	59

3.1. REVISÃO DO ESTADO DA TÉCNICA.....	59
3.2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	63
3.3. DISCUSSÃO SOBRE OS PROJETOS DE <i>SLINGS</i> DISPONÍVEIS	70
4. MATERIAIS E MÉTODOS	73
4.1. VISÃO DA METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO, DENTRO DO CICLO DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	73
4.2. METODOLOGIA DE PROJETO.....	76
4.2.1. PROJETO INFORMACIONAL	77
4.2.2. PROJETO CONCEITUAL.....	79
4.2.3. PROJETO PRELIMINAR OU ANTEPROJETO	82
4.2.4. PROJETO DETALHADO	84
4.2.5. PREPARAÇÃO DA PRODUÇÃO	85
4.3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO NÃO CONVENCIONAL	85
4.3.1. TECNOLOGIA FDM (<i>FUSED DEPOSITION MODELLING</i>).....	85
4.4. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	87
5. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DO CONCEITUAL	88
5.1. ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO <i>SLING</i>	88
5.2. RESULTADOS DO PROJETO INFORMACIONAL	90
5.3. PROJETO CONCEITUAL	92
5.3.1. ANÁLISE FUNCIONAL.....	92
5.3.2. ANÁLISE MORFOLÓGICA.....	93
5.3.3. RESULTADO DA AVALIAÇÃO DO <i>SLING</i> PELO GRUPO DE TERAPEUTAS OCUPACIONAIS	100
5.3.4. MELHORIA NO PROTÓTIPO <i>SLING</i>	102
6. PROJETO PRELIMINAR	106
6.1. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO <i>SLING</i>	106

6.2. DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS	110
6.3. VERIFICAÇÃO ESTATICA PELA ANÁLISE DOS ELEMENTOS FINITOS ..	114
6.3.1. ANÁLISE DA PARTE SUPERIOR DO <i>SLING</i> EM CONFIGURAÇÃO ABERTA.....	115
6.3.2. ANÁLISE DA PARTE INFERIOR DO <i>SLING</i> EM CONFIGURAÇÃO ABERTA.....	119
6.3.3. ANÁLISE DO <i>SLING</i> NA CONFIGURAÇÃO FECHADA.....	124
6.4. SISTEMA DE SUSTENTAÇÃO DOS MEMBROS SUPERIORES: PROJETO DE MOLAS	129
6.4.1. CÁLCULO DA MOLA 1	130
6.4.2. CÁLCULO DA MOLA 2	138
6.5. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE SUSTENTAÇÃO DOS MEMBROS SUPERIORES	138
6.5.1. VERIFICAÇÃO DA TENSÃO DE FLEXÃO ATUANTE.....	140
6.5.2. VERIFICAÇÃO DA TENSÃO DE CISLHAMENTO ATUANTE	141
7. FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO	143
7.1. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	143
7.2. MONTAGEM E AVALIAÇÃO DO <i>SLING</i>	148
8. CONCLUSÃO.....	151
REFERÊNCIAS.....	154
APÊNDICE I.....	161
APÊNDICE II.....	173
ANEXO I.....	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplos de aparelhos de suspensão dos membros superiores; (a) Standard Mobile Arm Support (JAECO Orthopedic); (b) TOP/HELP (Focal Meditech); (c) Armon Ayura (Microgravity Products) (Fonte: Van Der Heide <i>et al.</i> , 2013).....	53
Figura 2.2: Portable Spring Balancer (PSB) (Fonte: adaptado de Asai e Kuroiwa, 1999)	55
Figura 2.3: “Arm Balancer” (a) acoplado em uma cadeira de rodas e (b) e (c) na atividade de alimentação do usuário. (Fonte: Thorpe, 1986)	56
Figura 2.4: Equipamento para sustentação e movimentação do membro superior disponíveis no LAPITEC da FMRP-USP, em (a) modelo A, (b) modelo B e (c) modelo C (Fonte: Souza, 2016).	58
Figura 3.1: Patentes (a) do registro US 3.077.613 (Fonte: adaptado de Mayer, 1959, p.3) e (b) do registro US 3.373.993 (Fonte: adaptado de Oja e Schueuerman, 1968).	59
Figura 3.2: Patentes (a) do registro US 3.683.898 (Fonte: adaptado de Underwood, 1970, p.1) e (b) do registro US 5.048.825 (Fonte: adaptado de Kelly, 1990, p.1). ...	60
Figura 3.3: Patentes (a) do registro US 5.466.204 (Fonte: adaptado de Nearing, 1994) e (b) do registro US 5.501.656 (Fonte: adaptado de Homma e Arai, 1994, p.1).	61
Figura 3.4: Patentes (a) do registro US 7.364.555 B1 (Fonte: adaptado de Davidson, 2005, p.1) e (b) do registro PI 8902279 A (Fonte: adaptado de Kanawati e Philot, 1990, p.11).	62
Figura 3.5: Patente de registro PI 8902279 A do aparelho “Levitar” (a) mostrando sua configuração e (b) como é utilizado nos usuários. (Fonte: adaptado de Kanawati e Philot, 1990)	63
Figura 3.6: “Deltoid-Aid Brand Arm Conterbalance” (a) em atividade de vida diária, atividade de lazer e treino vocacional; (b) foto do aparelho (Fonte: AJOT, 1969).....	64
Figura 3.7: “Deltoid-Aid Sling” adaptado (a) suspensão dos braços adaptado; (b) utilização do aparelho de suspensão pelo usuário (Fonte: Worley <i>et al.</i> , 1991)	65

Figura 3.8: (a) “ <i>Swedish Arm Sling Suspension</i> ”, 1969, (J.A. Preston Corporation®) (Fonte: AJOT, 1969) e (b) “ <i>Forearm Suspension</i> ” (Fonte: James e Orr,1984).	66
Figura 3.9: “ <i>Folding Arm Suspension Frame</i> ” (a) exemplo da utilização do aparelho; (b) sistema de suspensão do braço. (Fonte: FOLDING ARM SUSPENSION FRAME, 2015).....	67
Figura 3.10: “ <i>Swedish HelpArm</i> ” (a) exemplo da utilização do aparelho; (b)foto do aparelho (Fonte: SWEDISH HELPARM, 2015)	68
Figura 3.11: “ <i>NITZBON Helparm</i> ” (Nitzbon©) em diversas posições de uso (Fonte: EURO SLING, 2015).....	68
Figura 3.12: (a) “ <i>Mobility Arm Sling</i> ” para (b) utilização livre de mobiliário ou (C) junto a cadeira de rodas (Fonte: MOBILITY ARM SLING, 2015)	69
Figura 3.13: Levitar de Braços (a) Articulado e (b) Biarticulado. (Fonte: LEVITAR, 2015).....	69
Figura 4.1: Modelo de desenvolvimento de produtos industriais. (Fonte: Rodrigues <i>et al.</i> , 2015).....	75
Figura 4.2: Desdobramentos de matrizes no QFD. (Fonte: Rodrigues <i>et al.</i> , 2015). 78	
Figura 4.3: Árvore funcional de um descascador de batatas (Fonte: Baxter, 2000) . 81	
Figura 4.4: Etapas do projeto (Fonte: Baxter, 2000)	84
Figura 4.5: Esquema simplificado do processo FDM. (Fonte: Cimenject, 2015)	86
Figura 4.6: Impressora 3D Stratasys™ Dimension 1200es®. (Fonte: STRATASYS, 2015).....	86
Figura 5.1: Fluxograma das etapas de desenvolvimento do projeto <i>Sling</i>	89
Figura 5.2: Parte da Matriz QFD do <i>sling</i> , denominada Casa da Qualidade que relaciona os requisitos do usuário com os requisitos técnicos em quatro graus distintos: relação forte (dois círculos ou peso 9), média (um círculo ou peso 3), fraca (triângulo ou peso 1) ou nula. (Fonte: Souza, 2016).....	91
Figura 5.3: Estrutura funcional para o sistema <i>sling</i>	93
Figura 5.4: Desenhos tridimensionais gerado no SolidWorks® 2013 sobre o projeto <i>sling</i> resultante da análise morfológica (a) primeira opção e (b) segunda opção.	95

Figura 5.5: Layout do projeto <i>sling</i> mostrando a modularidade do protótipo, com ajustes na altura, na base e com uma dobra central que possibilita a atuação em um ou nos dois membros.	96
Figura 5.6: <i>Sling</i> como uma estrutura intercambiável, tanto na possibilidade de uso do aparelho no chão com o usuário de pé ou sentado, quanto o uso do aparelho junto a uma mesa.....	96
Figura 5.7: Croqui da terceira opção do projeto <i>sling</i> resultante da reunião interdisciplinar.	97
Figura 5.8: Configuração do <i>sling</i> avaliado pelo grupo de terapeutas ocupacionais, com a inclusão das barras de fixação entre bases. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.	98
Figura 5.9: Esboço final do conceito da alça de sustentação do braço (a) modelo em “8” e (b) modelo em “V” invertido. (Fonte: Souza, 2016)	99
Figura 5.10: <i>Mock-up</i> da configuração elegida para dar continuidade ao projeto do <i>sling</i> , com os nomes de suas estruturas.	99
Figura 5.11: Protótipo funcional do <i>sling</i> , sendo [a], [b], [c] e [d] itens sugeridos para passar por alterações sugeridos na avaliação dos terapeutas; [e] e [f] itens acrescentados pelo Autor e Souza (Fonte: Souza, 2016)	101
Figura 5.12: Nova opção para o acoplamento do sistema de movimentação e sustentação do membro superior do <i>sling</i> . Desenho gerado no SolidWorks® 2013.	102
Figura 5.13: Nova configuração da haste vertical superior do <i>sling</i> . Desenho gerado no SolidWorks® 2013.	103
Figura 5.14: Detalhe na nova configuração do sistema de regulação de altura. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.....	104
Figura 5.15: Vista explodida da parte inferior do conjunto <i>sling</i> . Desenho gerado no SolidWorks® 2013.	104
Figura 5.16: <i>Sling</i> final na (a) configuração aberta e (b) configuração fechada. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.....	105

Figura 6.1: Principais dimensões do <i>sling</i> aberto (a) vista frontal e (b) vista lateral.	106
Figura 6.2: Estimativa do comprimento de partes do corpo sentado, em função da estatura H. (Iida, 2005)	107
Figura 6.3: Alcance manual frontal de uma pessoa em pé, medida em metros. (Fonte ABNT NBR 9050, 2004, p.9).....	108
Figura 6.4: Alcance manual frontal de uma pessoa sentada em uma cadeira de rodas, medida em metros (Fonte ABNT NBR 9050, 2004, p.10).....	108
Figura 6.5: Dimensões em metros do modulo de referência da área ocupada por uma pessoa utilizando uma cadeira de rodas. (Fonte ABNT NBR 9050, 2004, p.6)	108
Figura 6.6: Dimensões em metros de portas com revestimento e puxador horizontal. (Fonte ABNT NBR 9050, 2004, p.52)	109
Figura 6.7: Perfis estruturais de alumínio (a) exemplo de montagem e (b) configuração com largura de 45 mm e ranhura de 10 mm. (Fonte: BOSCH, 2015).....	112
Figura 6.8: Componentes que podem ser acoplados ao perfil estrutural de alumínio (a) rodízio e (b) articulação. (Fonte: BOSCH, 2015)	112
Figura 6.9: Vista frontal do croqui do <i>sling</i> . Desenho gerado no SolidWorks® 2013.	113
Figura 6.10: Detalhe no ajuste de altura do <i>sling</i> presente na Figura 6.9, com destaque para as dimensões dos tubos. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.....	113
Figura 6.11: Configuração do <i>sling</i> para a análise de deformações e falhas em elementos finitos. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.....	114
Figura 6.12: Condições de contorno e restrições aplicadas a parte superior do <i>sling</i> na configuração aberta.	115
Figura 6.13: Malha de elementos finitos dos principais elementos da parte superior do <i>sling</i> gerada no ANSYS®.	116
Figura 6.14: Gráfico da qualidade dos elementos da malha da parte superior do <i>sling</i>	117

Figura 6.15: Gráfico da relação de aspecto dos elementos da malha na parte superior do <i>sling</i> .	117
Figura 6.16: Resultado gerado na simulação computacional para o deslocamento total da parte superior do <i>sling</i> na configuração aberta.	118
Figura 6.17: Resultado gerado na simulação computacional para tensão equivalente de von-Mises da parte superior do <i>sling</i> na configuração aberta.	118
Figura 6.18: Posição das condições de contorno e das restrições na parte inferior do <i>sling</i> da configuração aberta.	120
Figura 6.19: Posição das condições de contorno nos pinos responsáveis pela regulagem de altura do <i>sling</i> .	120
Figura 6.20: Refinamento da malha em algumas regiões da parte inferior do <i>sling</i> (a) o ajuste de altura e (b) o assentamento do rolamento com a base inferior.	121
Figura 6.21: Gráfico da qualidade dos elementos da malha da parte inferior do <i>sling</i> .	121
Figura 6.22: Gráfico da relação de aspecto dos elementos da malha da parte inferior do <i>sling</i> .	122
Figura 6.23: Resultado gerado na simulação computacional para o deslocamento total da parte inferior do <i>sling</i> na configuração aberta.	122
Figura 6.24: Resultado gerado na simulação computacional para tensão equivalente de von-Mises da parte inferior do <i>sling</i> na configuração aberta.	123
Figura 6.25: Resultado gerado na simulação computacional para tensão equivalente de von-Mises nos pinos responsáveis pela regulagem de altura do sistema.	123
Figura 6.26: Condições de contorno e restrições aplicadas a parte superior do <i>sling</i> na configuração fechada.	124
Figura 6.27: Resultado gerado na simulação computacional para tensão equivalente de von-Mises da parte superior do <i>sling</i> na configuração fechada.	125
Figura 6.28: Tensão equivalente de von-Mises da Figura 6.27 com ênfase na articulação.	126

Figura 6.29: Resultado gerado na simulação computacional para o deslocamento total da parte superior do <i>sling</i> na configuração fechada.	126
Figura 6.30: Resultado gerado na simulação computacional para o deslocamento total da parte inferior do <i>sling</i> na configuração fechada.	127
Figura 6.31: Resultado gerado na simulação computacional para tensão equivalente de von-Mises da parte inferior do <i>sling</i> na configuração fechada.	128
Figura 6.32: Tensão equivalente de von-Mises da Figura 6.31 com no parafuso que liga a base ao rodízio.	128
Figura 6.33: Sistema de sustentação dos membros superiores do <i>sling</i> , com destaque para as molas de extensão. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.	130
Figura 6.34: Parte do conjunto de sustentação dos membros superiores (a) vista isométrica e (b) desenho técnico da vista lateral com cotas das posições relativas das molas e do diâmetro do cilindro que conecta as peças. Medida em milímetros. Desenhos gerados no SolidWorks® 2013.	139
Figura 6.35: Gráfico dos esforços solicitantes no sistema de sustentação dos membros superiores da Figura 6.34 sendo (a) a força cortante e (b) o momento fletor.	140
Figura 7.1: Desenhos técnicos da haste vertical superior com destaque (a) no seu dimensionamento e curvatura, e (b) na posição para realizar a furação e soldagem.	144
Figura 7.2: Desenho técnico da haste vertical inferior.	145
Figura 7.3: Desenho técnico do ajuste entre tubos.	145
Figura 7.4: Peça de ligação entre a base e a estrutura principal do <i>sling</i>	146
Figura 7.5: Assentamento dos rolamentos axiais.	146
Figura 7.6: Desenho técnico de uma das metades da articulação compatível com o perfil alumínio.	147
Figura 7.7: <i>Sling</i> montado para passar pela segunda avaliação do grupo de terapeutas ocupacionais.	148

Figura 7.8: <i>Sling</i> sendo utilizado por um paciente tetraplégico. Estudo foi aprovado pelo Comissão Nacional de Ética em Pesquisa (Número do Parecer: 689.103, Data da Relatoria: 25/06/2014).....	149
Figura A.1: Combinações de molas helicoidais de extensão (a) em série e (b) em paralelo. (Fonte: Norton, 2004, p.695)	162
Figura A.2: Resistências mínimas sob tração de fios de molas, identificados pelo número ASTM. (Fonte: Norton, 2004, p.699)	163
Figura A.3: Dimensões de uma mola de extensão. (Fonte: Norton, 2004, p.722)...	165
Figura A.4: Intervalo preferido de tensão inicial em molas de extensão como uma função do índice de mola. (Fonte: Norton, 2004, p.724)	166
Figura A.5: Pontos de máxima tensão no gancho ou laço de uma mola de extensão. (Fonte: Norton, 2004, p.724)	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Público Alvo para Sistema de classificação de TA. (Fonte: CGEE, 2014)	44
Tabela 2.2: Diretrizes para sistemas de classificação de TA. (Fonte: CGEE, 2012).	45
Tabela 2.3: Classes da norma ISO 9999:2011 – Classificação e Terminologia de Produtos Assistivos para Pessoas com Deficiência. (Fonte: CGEE, 2012)	46
Tabela 2.4: Definição de Mobilidade, Orientabilidade e Usabilidade. (Fonte: CGEE, 2012)	47
Tabela 5.1: Descrição das necessidades do usuário identificadas para o projeto do <i>sling</i> (Fonte: Souza, 2016)	90
Tabela 5.2: Análise morfológica do <i>sling</i> .	94
Tabela 5.3: Relação dos aspectos positivos e negativos elencados pelos terapeutas (Fonte: Souza, 2016)	100
Tabela 6.1: Principais dimensões do <i>sling</i>	110
Tabela 6.2: Especificações do projeto da Mola 1	137
Tabela 6.3: Especificações do projeto da Mola 2	138
Tabela 6.4: Valores dos esforços solicitantes da Figura 6.35.	140
Tabela A.1: Coeficientes e expoentes para a Equação 6.10 (Fonte: Norton, 2004, p.699)	163
Tabela A.2: Resistências máximas de escoamento de torção S_{ys} e flexão S_y para molas helicoidais de extensão em aplicações estáticas. (Fonte: Norton, 2004, p.725)	169
Tabela A.1: Projeto de uma mola helicoidal de extensão – MOLA 1	173
Tabela A.2: Projeto de uma mola helicoidal de extensão – MOLA 2	175

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SIGLAS	NOMENCLATURA
PcD	Pessoa com Deficiência
TA	Tecnologia Assistiva
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
USP	Universidade de São Paulo
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
NUMA	Núcleo de Manufatura Avançada
CER	Centro de Reabilitação
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
CIF	Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde
OMS	Organização Mundial de Saúde
CAT	Comitê de Ajudas Técnicas
DU	Design Universal
SUS	Sistema Único de Saúde
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MAS	<i>Mobile Arm Support</i>
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	NOMENCLATURA
H_{max}	Altura máxima do <i>sling</i>
H_{es}	Altura da parte inferior da articulação que se encontra entre as estruturas superiores do <i>sling</i>
H_r	Altura do ajustador da altura do <i>sling</i>
a	Distância entre os braços de uma pessoa
l	Largura entre as bases do <i>sling</i>
b	Distância entre a parte frontal da base e a haste vertical do <i>sling</i>
c	Largura da base do <i>sling</i>
H	Estatuta média de uma pessoa
H_b	Altura dos braços de uma pessoa
F	Força
m	Massa
g	Aceleração da gravidade
$P_{braço}$	Peso do braço de uma pessoa em Newtons
M_z	Momento em relação ao eixo z
F_x	Componente da força no eixo x
F_y	Componente da força no eixo x
N_y	Força Normal no eixo y
V_y	Força cortante no eixo y
δ	Deslocamento ou deformação longitudinal da peça
L	Comprimento da peça
A	Área da seção transversal
E	Módulo de elasticidade do material
P	Força axial interna da seção

σ_{te}	Resistência admissível ao escoamento na tração
σ_{tr}	Limite de resistência à tração
ε	Alongamento percentual
d_o	Diâmetro externo
d_i	Diâmetro interno
A_{hvs}	Área da haste vertical superior
A_{hvi}	Área da haste vertical inferior
σ_{max}	Tensão normal máxima no elemento
M	Momento interno
c'	Distância perpendicular do eixo neutro ao ponto mais afastado do elemento estudado
r_o	Raio externo
r_i	Raio interno
τ	Tensão de cisalhamento
y'	Distância da linha neutra até o ponto de cisalhamento estudado
V	Força cortante
I	Momento de inércia
t	Largura da área da seção transversal medida na altura “ y' ”
Q	Momento de primeira ordem
A'	Área em torno do eixo neutro
τ_{cr}	Limite de resistência ao cisalhamento
τ_{ce}	Resistência admissível ao escoamento no cisalhamento
τ_{max}	Tensão máxima de cisalhamento
P_{cr}	Carga crítica ou carga axial máxima na coluna imediatamente antes de começar a flambagem
$F_{m\acute{a}x}$	Força máxima
$F_{m\acute{i}n}$	Força mínima
C	Coeficiente de mola

D	Diâmetro de espira da mola
d	Diâmetro de fio da mola
τ_i	Tensão inicial da espira
F_i	Força de pré-carga na mola
K_s	Fator de cisalhamento direto
F_m	Força média
F_a	Força alternada
τ_m	Tensão média
τ_{min}	Tensão mínima
K_w	Fator de Wahl
S_{ut}	Limite de resistência à tração
S_{us}	Limite de resistência ao cisalhamento
S_{ys}	Resistência ao escoamento sob tração para o corpo da espira
S_{ew}	Limite de resistência relativo às tensões alternadas
S_{es}	Limite de resistência à fadiga sob carregamento alternado
N_{fs}	Coeficiente de segurança para uma carga dinâmica nas espiras
K_b	Fator de concentração de tensão
σ_a	Tensão de flexão no gancho alternada
σ_m	Tensão de flexão no gancho média
σ_{min}	Tensão de flexão no gancho mínima
S_e	Resistência de endurance por tração
N_{fA}	Coeficiente de segurança à fadiga no gancho em flexão
R_2	Raio do fio da mola
C_2	Razão do raio da espira com o raio do fio da mola
τ_{Ba}	Tensão de torção no gancho alternada
τ_{Bm}	Tensão de torção no gancho média

τ_{Bmin}	Tensão de torção no gancho mínima
N_{fB}	Coeficiente de segurança à fadiga do gancho em torção
k	Constante da mola
N_a	Número de espiras ativas da mola
N_t	Número total de espiras no corpo da mola
L_b	Comprimento no corpo da mola
L_f	Comprimento livre da mola
OD	Diâmetro externo de espira
F_a	Carga axial total aplicada sobre o rolamento axial
C_0	Capacidade de carga estática
s_0	Fator de segurança estática
P_0	Carga axial estática
σ	Tensão equivalente de von-Mises

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a contextualização do trabalho, definindo termos relacionados com a Tecnologia Assistiva, bem como seu objetivo e sua motivação.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Dados de diversas fontes da literatura técnica indicam que os constantes avanços médicos-tecnológicos, influenciam no aumento da expectativa de vida da população mundial. Por outro lado, essa longevidade reflete também em algum prejuízo próprio do envelhecimento natural, causando algum tipo de limitação física e psicológica. Segundo Kalache *et al.* (1987): “Envelhecer mantendo todas as funções não significa problema quer para o indivíduo ou para comunidade, quando as funções começam deteriorar é que os problemas começam a surgir”.

Além do envelhecimento populacional observado na maioria dos países, e principalmente no Brasil, há outras condições que limitam a qualidade de vida e a inclusão social de indivíduos, em diferentes faixas etárias. Acidentes diversos, doenças neurológicas adquiridas durante a gestação ou em outras etapas da vida são exemplos de condições que também limitam a execução de tarefas cotidianas envolvendo alimentação, vestuário e higiene. Portanto, limitam também sua autonomia em ambiente social.

Nestes casos, a execução de atividades rotineiras se torna prejudicada ou de extrema dificuldade devido ao enfrentamento de diversas restrições de toda ordem. Dentre essas dificuldades, o problema se agrava para os indivíduos de baixa renda, pois possuem pouco ou nenhum acesso aos equipamentos e produtos que auxiliam na execução das suas funções. De acordo com o Relatório Final do Mapeamento de Competências em Tecnologia Assistiva realizado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) em 2012, a população brasileira que requer, em distintos graus, o suporte de recursos tecnológicos de auxílio à deficiência é estimada em 45 milhões

de pessoas. Sendo que a maior parte desse contingente carece das condições econômicas para adquirir, no mercado, os bens necessários à melhoria de sua qualidade de vida e de trabalho.

Neste cenário, surge a Tecnologia Assistiva (TA), termo utilizado para referenciar produtos, recursos, práticas e serviços, estratégias e metodologias que objetiva fomentar e restaurar a funcionalidade de pessoas com deficiência, incapacidade ou mobilidade reduzida (CGEE, 2012).

Sendo assim, os produtos e aparelhos de TA são de grande importância, pois tem como objetivo prover autonomia, independência, inclusão social e qualidade de vida de pessoas com deficiência. Entre estes produtos são encontrados uma vasta gama de sistemas mecânicos e mecatrônicos que auxiliam pacientes com problemas neurodegenerativos, acidentados, idosos, entre outros casos, a realizarem ações básicas como a autoalimentação, autohigienização, movimentação de membros ou locomoção da própria pessoa, como exemplos.

Porém, no Brasil, muitos destes produtos de TA são importados e chegam ao mercado brasileiro com um alto custo. Devido a esta situação, os terapeutas ocupacionais em muitas clínicas de reabilitações públicas confeccionam aparelhos ou adaptam equipamentos sem o auxílio da engenharia, podendo acarretar no mau funcionamento do produto e, no pior dos casos, lesionar ou agravar a situação do paciente.

Por isso, para desenvolver produtos ou aparelhos de TA, se faz necessário um contato interdisciplinar entre a área da engenharia com a área da saúde, como gerontologia e terapia ocupacional. Esta relação é fundamental, pois os profissionais da área da saúde possuem o conhecimento das limitações e dificuldades das pessoas com deficiência em relação às atividades ou funções a serem exercidas. O engenheiro de projeto por sua vez, precisa tomar um conjunto de decisões técnicas ao longo das diferentes fases do projeto, que muitas vezes dependem da orientação do usuário (terapeutas ocupacionais e pacientes), de forma a atribuir na solução construtiva final algum grau de personalização, que atenda aos requisitos dos usuários.

Dentro deste contexto, este trabalho propõe a utilização da metodologia de desenvolvimento do projeto para a construção do protótipo de um aparelho de autoajuda, denominado *Sling*, com função reabilitar indivíduos que devido a

disfunções neuromusculares ou musculoesqueléticas possuem dificuldades para movimentar os membros superiores. Com parceria de Souza (2016) que realizou a fase do projeto informacional, coletando as informações sobre o projeto com um grupo de terapeutas ocupacionais e aplicando um estudo utilizando a matriz da Casa da Qualidade – QFD. Com este estudo foi possível obter uma lista de requisitos do usuário, que desdobrada gerou a lista de características técnicas que norteou a fase do projeto conceitual. Uma vez obtidas soluções conceituais com algum grau de inovação seguiu-se a fase do projeto preliminar, na qual foram realizados os pré-dimensionamentos de componentes críticos e análise estrutural do aparelho. Para a construção do protótipo físico foi necessário gerar a documentação técnica do projeto incluindo os desenhos técnicos de detalhe. O protótipo foi implementado no trabalho de Souza (2016) para ser analisado junto à mesma equipe de terapeutas ocupacionais para validar as soluções propostas.

1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento do protótipo funcional de um equipamento de autoajuda destinado à sustentação e movimentação dos membros superiores. Como objetivos secundários pode-se destacar:

- Revisão do estado da técnica;
- Desenvolvimento de soluções conceituais;
- Análise funcional e especificação dos subsistemas do conceito selecionado.

1.3. MOTIVAÇÃO

A motivação para esta pesquisa nasceu com base no trabalho de Souza (2016), na área de terapia ocupacional, possibilitando a realização deste trabalho em conjunto com a Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto/SP. As terapeutas ocupacionais desta faculdade atendem pacientes que possuem disfunções neuromusculares ou musculoesqueléticas dos membros superiores fazendo necessário o uso de um

aparelho para sustentação e movimentação destes membros como recurso de atendimento.

Este aparelho auxilia o paciente não somente nas realizações de atividades sobre uma mesa, como a redação, digitação e auto alimentação, mas também fornece a possibilidade da ação terapêutica no que diz respeito ao fortalecimento dos músculos da pessoa com deficiência, podendo gerar mais autonomia e bem-estar ao usuário final (ou pessoas com deficiência).

Porém, devido a relatos constantes sobre a dificuldade de montagem do equipamento existente na clínica de reabilitação de Ribeirão Preto/SP e sua utilização junto aos pacientes, o qual não permite grande mobilidade na movimentação dos braços e, em alguns casos, não suportou o peso dos seus seguimentos, ou seja, não cumprindo sua função, concluiu-se que deveria ser realizado um estudo de engenharia acerca do tema.

A relevância desta pesquisa, em particular, está no desenvolvimento sistemático do projeto de equipamentos de autoajuda, com o objetivo de promover de fato, um estudo multidisciplinar incluindo as fases do projeto informacional e conceitual. Em se tratando de um projeto de engenharia, no qual se buscou algum grau de inovação, a construção do protótipo funcional possibilitou sua avaliação operacional junto aos grupos de pesquisa da área de saúde.

1.4. INFRAESTRUTURA LABORATORIAL

Esse trabalho foi desenvolvido com o apoio das seguintes instituições: Universidade de São Paulo (USP), com os *campi* da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) e a Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, e a Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) em Uberaba/MG.

O protótipo funcional foi fabricado com o apoio da Oficina Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP e sua montagem foi feita também junto ao Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA), da EESC-USP.

A avaliação operacional do protótipo foi realizada no Laboratório de Pesquisa e Inovação em Tecnologia Assistiva (Departamento de Terapia Ocupacional), em Ribeirão Preto/SP, junto ao Centro de Reabilitação (CER) do Hospital das Clínicas em Uberaba/MG.

Para a fabricação do protótipo visual e de algumas peças do protótipo funcional, optou-se por questões relacionadas à facilidade de acesso, ao uso da manufatura aditiva, especificamente por meio da tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*). Para essas atividades, houve o apoio da Divisão de Tecnologias Tridimensionais, do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, localizado em Campinas-SP e também do Laboratório de Tribologia e Compósitos, do Departamento de Engenharia Mecânica, da EESC-USP.

CAPÍTULO 2

2. APRESENTAÇÃO DO APARELHO SLING

Este capítulo aborda os principais conceitos da área de conhecimento da tecnologia assistiva, nos contextos nacional e internacional, bem como descreve a classe e os tipos de equipamentos de autoajuda relacionados aos sistemas de sustentação e movimentação de membros superiores.

2.1. CLASSIFICAÇÃO DE DEFICIÊNCIA

Visando o melhor entendimento do assunto, é necessário definir três termos importantes: funções do corpo, estruturas do corpo e deficiência. A Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde (CIF; 2004) define que “as funções do corpo são as funções fisiológicas dos sistemas orgânicos (incluindo as funções psicológicas); as estruturas do corpo são partes anatômicas do corpo, tais como órgãos, membros e seus componentes; e deficiência são problemas nas funções ou na estrutura do corpo, tais como, um desvio importante ou uma perda”.

Dentro desta classificação, a CIF entende deficiência através do prisma da funcionalidade, a qual é definida pela relação dinâmica entre alterações de estruturas e funções corporais, limitações para realização individual de atividades e restrições à participação em atividades, sobretudo envolvendo o coletivo (CGEE Relatório Estudo de Tecnologia Assistiva, 2012). Ou seja, entende-se que as deficiências podem ser parte ou uma expressão de uma condição de saúde, mas não indicam, necessariamente, a presença de uma doença ou que o indivíduo deva ser considerado doente. Já o termo deficiência de estrutura pode consistir numa anormalidade, defeito, perda ou outro desvio importante a um padrão das estruturas do corpo. Estas deficiências podem ser temporárias ou permanentes; progressivas, regressivas ou estáveis; intermitentes ou contínuas. Além disso, as deficiências podem originar outras deficiências, como exemplo, a diminuição da força muscular pode prejudicar as funções do movimento.

2.2. TECNOLOGIA ASSISTIVA

Os dados do Censo Demográfico Brasileiro realizado em 2010 indicam que 23,9% da população brasileira têm algum tipo de deficiência (física, auditiva, visual, intelectual ou múltipla). Essas pessoas comumente apresentam dificuldades para a realização de atividades funcionais no seu dia a dia ou precisam de auxílio de outras pessoas para conseguir realiza-las adequadamente (Françani, *et al.*, 2009).

A este dado acrescenta-se que a prevalência das incapacidades e deficiências é maior nas regiões mais pobres e, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), entre as crianças e adolescentes estas taxas alcançam valores 10 vezes maiores que os países desenvolvidos. Diante dos quadros de incapacidade funcional, as sociedades se organizam de forma a superarem essas dificuldades promovendo a inclusão social dessas pessoas. Um dos mecanismos necessários é a utilização de Tecnologia Assistiva por essa parcela da população em qualquer faixa etária, e em qualquer situação do cotidiano (CAT, 2009).

O termo *Assistive Technology* (AT), traduzido no Brasil como Tecnologia Assistiva (TA), foi introduzido na legislação norte-americana em 1998 através da *Public Law 105-394* e que teve sua definição atualizada em 2004, mencionada a seguir:

“Qualquer item, parte do equipamento ou produto adquirido comercialmente ou fora de prateleira, modificado ou customizado, que é utilizado para aumentar, manter ou melhorar a capacidade funcional do indivíduo com deficiência” (*Public Law 108-264*, 2004).

No Brasil, essa terminologia teve sua definição promovida pelo Comitê de Ajudas Técnicas (CAT), mencionada a seguir:

“Tecnologia Assistiva é uma área do conhecimento, de característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas 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” (CAT, 2009).

Portanto, TA diz respeito à pesquisa, fabricação, uso de equipamentos, recursos ou estratégias utilizadas para potencializar as habilidades funcionais das pessoas com deficiência. A aplicação de TA abrange todas as ordens do desempenho humano, desde as tarefas básicas de autocuidado até o desempenho de atividades profissionais (CAT, 2009).

Devido a sua ampla definição, os produtos de TA não são necessariamente tecnologias mais avançadas. Oh e Unnikrishnan (2012) comentam que um aparelho simples usado nas atividades da vida diária de pessoas com deficiências pode ajudá-las na prevenção de machucados e promover uma vida mais saudável. Os mesmos autores também exemplificam que um simples abridor de garrafas feito de borracha pode prevenir machucados nas mãos, assim como um tapete que previne quedas, que são considerados aparelhos de TA e podem auxiliar na qualidade de vida de idoso e pessoas com deficiência, além de contribuir na diminuição dos gastos com hospitalizações.

Outro importante conceito dentro da TA é o Design Universal (DU). Cavalcanti e Galvão (2007) definem o termo como uma abordagem filosófica que faz parte do processo de desenvolvimento do produto e ambientes como um todo, visando atender às necessidades da maioria dos usuários, sem adaptações necessárias. As mesmas autoras complementam que o DU respeita a diversidade entre os indivíduos e tem como objetivo garantir a autonomia e a independência funcional do indivíduo diante da realização de uma atividade e, portanto, sua inclusão social.

Plos *et al.* (2012) comentam que Design Universal ou “design para todos” visa conciliar duas abordagens que parecem conflitantes: concepção de produtos para o mercado de massa, que se destina a população média, ou seja, usuários comuns; e projetar produtos especializados ou dedicados, como o caso da TA, destinados a pessoas com deficiência. Ou seja, o DU visa projetar produtos ou ambientes que atendam tanto a parcela da população com deficiência, mas que também sejam atraentes para todo o resto da população, levando em conta importantes características como o design modular, aceitabilidade funcional, acessibilidade da população e integração social.

Portanto, papel do DU é de grande importância, principalmente no que diz respeito à inclusão social. As Tecnologias Assistivas são desejadas pelo fato de auxiliarem pessoas com deficiência a viverem suas vidas, restaurando suas funções, além de restaurar sua relação com o meio ambiente, participação social e também sendo responsável pelo aumento da autoestima. No entanto, os produtos de TA são rejeitados por alguns usuários, pois salientam a sua deficiência, que está associada à dependência, degradando assim a imagem do próprio utilizador. Plos *et al.* (2012) comentam cerca de 1/3 das TA são abandonadas, entre três meses a cinco anos de uso, mostrando que sua aceitação deve ser questionada. Os mesmos autores advertem que há casos de pessoas que preferem ficar isoladas em casa em vez de sair com um aparelho que denuncia sua deficiência.

Kadir e Jamaludin (2013) também relacionam o DU com outro importante conceito, a Sustentabilidade Social. Para os autores, uma evolução do critério de sustentabilidade social é o acesso a facilidades e amenidades vitais para pessoas executarem diferentes tipos de atividades essenciais para a vida, que devem ser sustentadas ao longo da vida, mesmo quando estas pessoas se tornarem deficientes ou idosas.

A partir dessa preocupação, surge a necessidade de oferecer produtos que resultem em ações seguras, eficientes para a satisfação do usuário/cliente, prevalecendo à garantia dos direitos quanto à usabilidade e acessibilidade (Cavalcanti e Galvão, 2007).

Varela e Oliver (2013) chamam a atenção que uma das questões a ser discutida neste processo refere-se à possibilidade do acesso da parcela da população que possui algum tipo de deficiência aos recursos produzidos pela comunidade científica e que são ofertados no mercado. 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. As mesmas autoras concluem que diante deste cenário, é importante considerar que, para muitas famílias, o acesso a TA restringisse aos recursos disponíveis no Sistema Único de Saúde (SUS), que constam da lista de concessão de

órtese e prótese, com somente alguns modelos básico de equipamentos para locomoção e de aparelhos para deficiência visual e aditiva.

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.

2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DE TA

Historicamente, diferentes iniciativas foram estabelecidas para classificar a TA. Cada uma dessas propostas baseou-se em distintas formas de organização dos recursos de TA, bem como em perspectivas diferentes de aplicação de tais tentativas de classificação (CGEE, 2012). De uma maneira geral, pode-se dizer que as classificações estão relacionadas a públicos distintos, conforme listado na Tabela 2.1, os quais estão interessados em diferentes informações relacionadas ao recurso de TA, bem como em relação aos níveis de detalhamento exigidos na descrição.

Tabela 2.1: Público Alvo para Sistema de classificação de TA. (Fonte: CGEE, 2014)

Nr	Público alvo
1	Usuário de recursos de TA e público em geral
2	Profissionais de prestação de serviços em TA
3	Representantes de fornecedores de TA
4	Representantes industriais
5	Formuladores de políticas em TA

Estas distintas necessidades de classificação são originadas pela maneira com a qual são confrontados com a temática em suas atividades cotidianas. Considerando

este cenário, a Tabela 2.2 lista as principais diretrizes para a formulação de um sistema de classificação de TA.

Visando cada público-alvo e as diretrizes listadas, os sistemas de classificações de TA são uma referência para diferentes funções, como por exemplo, facilitar a busca por novos recursos de TA que atendam às necessidades da PcD, facilitar o estabelecimento de normalização técnica que garanta qualidade do produto e segurança do usuário, facilitar a realização de compras governamentais e o estabelecimento de marcos regulatórios, entre outros.

Tabela 2.2: Diretrizes para sistemas de classificação de TA. (Fonte: CGEE, 2012)

Nr	Diretrizes
I	Classificar os recursos de TA por categorias de funcionalidade ou por tipos de deficiência
II	Classificar os recursos de TA com base nas áreas de conhecimento envolvidas para o seu desenvolvimento e prestação de serviços
III	Sistematizar a organização dos processos produtivos e econômicos relacionados a TA

Dentre as diretrizes citadas na Tabela 2.2, em geral se prioriza a categorização conforme a linha I, onde os sistemas são baseados em critérios de funcionalidade. Isto ocorre porque a informação perante a funcionalidade é fundamental para facilitar a disponibilização dos recursos existentes ao usuário final e aos profissionais em contato direto com os PcD (CGEE, 2012).

Os principais sistemas de classificação de recursos de TA por critério de funcionalidade são baseados na *International Organization for Standardization* (ISO) 9999:2011, a qual é a norma internacional referente ao tema de maior importância. Nesta norma são utilizados três níveis decrescentes de classificação: classe, subclasse e detalhamento. As classes que compõem o mecanismo de classificação estão listadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Classes da norma ISO 9999:2011 – Classificação e Terminologia de Produtos Assistivos para Pessoas com Deficiência. (Fonte: CGEE, 2012)

Código	Classe	Descrição
04	Tratamento médico pessoal	Inclui produtos utilizados para melhorar, monitorar ou manter a condição médica do indivíduo. Exclui produtos usados exclusivamente por profissionais de serviços de saúde.
05	Treinamento de habilidades	Incluir recursos utilizados para melhorar a habilidade física, mental ou social do indivíduo.
06	Órteses e próteses ¹	Inclui dispositivos órteses e próteses de membro inferior e superior com ou sem fonte adicional de energia, bem como órteses cosméticas e demais produtos ortopédicos.
09	Proteção e cuidados pessoais	Inclui recursos de apoio para vestir e despir, higiene pessoal, ostomia, tratamento de incontinência, entre outros.
12	Mobilidade pessoal	Inclui recursos de auxílio à locomoção, como cadeiras de rodas e andadores.
15	Cuidado com o lar	Inclui recursos de apoio para comer e beber, cozinhar, bem como para realização de outras tarefas no ambiente doméstico.
18	Mobiliário e adaptações para residências e outras edificações	Inclui mobiliário e demais adaptações a ambientes físicos que reduzam barreiras de mobilidade à PcD.
22	Comunicação e informação	Trata de dispositivos e práticas que auxiliem as PcD a receber, enviar, produzir e processar informação em diferentes formatos. Inclui recursos para ver, ouvir, ler, escrever, telefonar, sinalizar, avisar.

¹ Órteses são dispositivos aplicados externamente para alterar as características estruturais e/ou funcionais de sistemas neuromusculares e/ou esqueléticos. Próteses são aplicadas também externamente, mas são utilizadas para substituir partes do corpo ausentes ou deficientes. (CGEE, 2014)

24	Manuseio de objetos e equipamentos	Inclui recursos que auxiliem a manipulação de objetos e dispositivos diversos para a realização de múltiplas atividades.
27	Melhorias ambientais, ferramentas e máquinas	Trata de dispositivos e equipamentos para contribuir com a melhoria do ambiente pessoal na vida diária. Inclui ferramentas manuais e diferentes dispositivos com fonte adicional de energia.
30	Lazer	Inclui recursos destinados a jogos, esportes e outras atividades de lazer.

Vale ressaltar também que os produtos de TA devem atender aos critérios de mobilidade, orientabilidade e usabilidade, como segue na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Definição de Mobilidade, Orientabilidade e Usabilidade. (Fonte: CGEE, 2012)

Critério	Definição
Mobilidade	Refere-se ao desempenho do indivíduo no contexto físico; ou seja, se o espaço permite a sua circulação, e se apresenta as dimensões apropriadas para a realização da tarefa.
Orientabilidade	Relacionamento do indivíduo com a arquitetura construída, e se o indivíduo consegue obter do meio as informações necessárias para uso e acesso.
Usabilidade	Ocorre na relação da interface usuário versus produto, no caso indivíduo e equipamentos do local.

Ainda de acordo com o Relatório do Estudo de Tecnologia Assistiva (CGEE, 2012), a mobilidade ainda pode ser dividida em duas subdivisões: mobilidade funcional e mobilidade na comunidade. Segundo o mesmo relatório, mobilidade funcional está atribuída à capacidade de o indivíduo mover-se ou mudar-se de uma posição para a outra, quando no desempenho de uma atividade do cotidiano, como exemplo, a transferência da cadeira de rodas para a cama, ou na utilização de um

banheiro. Nesta definição são incluídas a deambulação funcional e o transporte de objetos. Já a mobilidade na comunidade, por sua vez, abrange desde a utilização dos meios de transporte público e privado até o ato de dirigir um carro.

2.3. APARELHOS DE SUSPENSÃO DOS MEMBROS SUPERIORES E O PRODUTO *SLING*

O sistema nervoso central é responsável em manter as partes do corpo em equilíbrio dinâmico e estático contra a força gravitacional. Entretanto, nos indivíduos com lesões neurológicas, ortopédicas, distróficas, degenerativas, de caráter temporário, permanente ou progressivo, dadas as sequelas transitórias ou definitivas, apresentam dificuldades na sustentação contra a força da gravidade de determinadas partes do corpo ou na movimentação de seus membros. Essas situações que dificultam a sustentação de partes do corpo ou segmentos dos membros afetam também a amplitude de certas articulações, impossibilitando a realização de movimentos básicos (Philot e Kanawatl, 1990).

Neste contexto, para determinado grupo de indivíduos com disfunção neuromuscular ou musculoesquelética que conduz a incapacidade funcional para a realização de movimentos do membro superior, existe a indicação de um aparelho de tecnologia de reabilitação para auxiliar o terapeuta ocupacional na sustentação do(s) segmento(s) da pessoa com deficiência contra a gravidade, permitindo a manutenção de movimento para o envolvimento em atividades que demandam função manual (Souza, 2016).

Em particular, este trabalho é voltado para o desenvolvimento do aparelho convencionalmente chamado de “*sling*” que tem sua aplicação voltada para a sustentação dos segmentos braço, antebraço e mão contra a força da gravidade, permitindo movimentação passiva do membro superior no plano sagital e ativa no plano horizontal. Este aparelho é destinado principalmente às pessoas com perda de movimentação no ombro, cotovelo, antebraço, punho e mão, como nos casos de lesão medular, acidente vascular encefálico, esclerose lateral amiotrófica, distrofia muscular, dentre outros.

2.3.1. ORIGEM, CLASSIFICAÇÃO E FUNCIONALIDADE DOS APARELHOS DE SUSPENSÃO DOS MEMBROS SUPERIORES

Aparelhos assistivos que auxiliam a funcionalidade dos membros superiores foram introduzidos nos Estados Unidos da América após a 1ª Guerra Mundial e valorizados no final do século XIX e início do XX como alternativa para as pessoas com sequelas das doenças que foram epidemias daquela época, como a poliomielite. Segundo Van Der Heide *et al.* (2013), a evolução do tratamento desta doença resultou em um grande número de sobreviventes com braços muito fracos para trazerem suas mãos para a boca e se alimentarem. Sendo assim, diferentes aparelhos foram criados para que estas pessoas pudessem sustentar e/ou movimentar os membros superiores contra a ação da gravidade, mesmo sem força muscular suficiente, utilizando um suporte de compensação ou adaptações terapêuticas. Estes aparelhos aprimoravam a capacidade da pessoa para realizar atividades desejadas ou necessárias em seu dia a dia, como por exemplo segurar um talher (garfo, faca ou colher) e fazer uso deste durante a alimentação. Como resultado, a literatura descreve estes aparelhos como: apoio para braços, órtese de braço, estabilizador de braço, órteses e dispositivos ortopédicos.

Os termos descritos acima são classificados na *International Organization for Standardization* (ISO 9999, 2011) como “Produtos assistivos para pessoas com deficiência” na categoria “produtos de apoio para assistir e/ou substituir à função do braço e/ou mão e/ou dedos”, como produtos de “Apoios de antebraço para atividades manuais”. Nesta categoria, pode-se encontrar tanto aparelhos que assistem o movimento do usuário nos planos contra a força da gravidade auxiliando-o na manutenção e ganho de amplitude de movimento do membro superior, quanto aparelhos que possibilitam a movimentação do braço no plano horizontal favorecendo a função manual para atividades de alimentação, higiene bucal, escrita e comunicação, por exemplo.

Ainda com base na classificação da ISO 9999 (2011), o termo “órtese” é definido como um aparelho aplicado externamente ao corpo humano para modificar as características funcionais e/ou estruturais do sistema neuromuscular e/ou musculoesquelético. As autoras Cavalcanti e Galvão (2007) explicam que o termo órtese (*orthosis*) é derivado do grego “ortho”, que significa corrigir ou alinhar. As

autoras ainda comentam que esses aparelhos têm como objetivo principal possibilitar função por meio (1) da aplicação ou diminuição de forças sobre o corpo, de maneira controlada, para proteger a cicatrização de estruturas; (2) da manutenção ou aumento da amplitude de movimento das articulações para prevenir ou corrigir deformidades; (3) substituição ou aumento de uma função e (4) da sua utilização como base para acessório de autoajuda.

Utilizando os termos citados anteriormente, é possível encontrar na literatura alguns estudos que relatam os tipos de aparelhos de tecnologia assistiva que auxiliam nas execuções das funções do braço, ressaltando qual a classe de pacientes recomendada para o uso de tais equipamentos e quais são as suas ações terapêuticas. Rahman *et al.* (2001), por exemplo, realizaram um estudo sobre o controle de uma órtese motorizada para os braços. Os autores comentam que a população clínica para este projeto de órtese consiste de indivíduos que têm anormalidades neuromusculares que os deixam com fraqueza muscular, mas sem envolvimento do trato espinal sensorial ou cortical. “Pessoas com essas condições perdem a capacidade de movimentar o braço de maneira desejada, devido ao enfraquecimento dos músculos proximais, mas a função muscular distal é menos afetada e a sensação permanece intacta” (Rahman *et al.*, 2001).

Os mesmos autores ainda dividem esta população clínica em duas categorias: aqueles com doença nas células do corno anterior ou aqueles com transtornos musculares, podendo ainda serem classificadas como permanente e progressiva. Os indivíduos considerados com perda permanente das células do corno normalmente sofreram paralisia viral, como a poliomielite, ou sofreram de morte celular do corno anterior intra-uterina, que é muitas vezes visto em pessoas com artrogripose múltipla congênita. Os indivíduos com perda progressiva das células do corno anterior incluem aqueles com atrofia muscular espinal (SMA) dos três tipos: tipo I (de Werdnig-Hoffman), tipo II (intermediário) e do tipo III (doença de Kugelberg-Welander). Já os indivíduos com desordens musculares podem ter sofrido com distúrbios tais como: Duchenne e Distrofia Muscular de Beker; miopatias congênitas, como nemaline e miotubular; e algumas das distrofias mitocondriais raras onde ocorrem anomalias da fibra muscular.

Abbruzzese *et al.* (2011) incluem na classe de pessoas que necessitam de reabilitação dos membros superiores os indivíduos que já enfrentaram um AVC. Segundo os mesmos, cerca de 80% dos sobreviventes de AVC agudo podem perder os movimentos dos braços e as habilidades das mãos. Segundo Coscia *et al.* (2014) o controle do membro superior nesses pacientes é frequentemente afetado por um acoplamento anormal nos abdutores do ombro e nos flexores do cotovelo.

Abbruzzese *et al.* (2011) complementam que estes pacientes podem recuperar o uso significativo de seu braço através da realização de exercícios repetitivos de motricidade: “pacientes com distrófia muscular devem utilizar a terapia física para evitar o atrofiamento e manter a função muscular”. Para estes autores, o aspecto mais importante da reabilitação são os treinos repetitivos. Por sua vez, essas tarefas são realizadas com o auxílio de uma órtese do membro superior, as quais servem para orientar e auxiliar no movimento das articulações. Coscia *et al.* (2014) também ressaltam a importância do uso deste tipo de aparelho, pois têm um impacto benéfico sobre o desempenho no alcance dos movimentos dos braços, além de ajudar significativamente a suavizar os movimentos dos mesmos, possivelmente pela melhoria da coordenação dos músculos do ombro-cotovelo.

Em uma revisão realizada por Van Der Heide *et al.* (2013), tendo como foco “apoios de braços dinâmicos”, foram analisados um total de 104 aparelhos. Em seu método de análise, os autores classificaram os aparelhos em três grupos principais: (1) aparelho não-acionados, os quais não necessitam de uma fonte de energia externa para funcionar e não possuem capacidade de armazenar energia mecânica proveniente do movimento do braço para facilitar sua movimentação no plano sagital, limitando-se ao movimento do mesmo apenas no plano horizontal; (2) aparelhos passivamente atuados, os quais também não necessitam de uma fonte de energia externa, mas já possuem a habilidade de armazenar energia potencial, auxiliando o usuário em alguns movimentos nos planos sagital e horizontal; e (3) aparelhos ativamente atuados, os quais requerem entrada de energia externa e, normalmente, possuem uma vasta possibilidade de movimentos.

Para ilustrar a classificação dada por Van Der Heide *et al.* (2013), a Figura 2.1 exemplifica os tipos de aparelhos para suspensão dos membros superiores

definidos anteriormente. O aparelho denominado mostrado na Figura 2.1(a) é o exemplo de um aparelho não acionado. Este suporte para os braços foi projetado para ser acoplado junto a cadeiras ou cadeiras de rodas. Como se pode notar, este aparelho serve de apoio ao antebraço do usuário e em seu centro existe uma junta articulada que permite a movimentação rotacional do braço apenas no plano horizontal. A Figura 2.1(b) mostra um exemplo de aparelho passivamente atuado. Este aparelho, que pode ser acoplado em mesas, cadeiras e cadeiras de rodas, além de auxiliar no movimento rotacional do antebraço, ele também permite movimentação vertical do membro superior devido a um sistema de molas, contrapesos ou faixas elásticas que agem para compensar o impacto da ação da gravidade no braço, resultando em uma movimentação mais precisa do membro superior. Por último, a Figura 2.1(c) mostra um aparelho ativamente atuado, que é alimentado por energia externa e com o auxílio de um controle pode posicionar o braço do usuário na posição desejada pelo mesmo.

O estudo realizado por Asai e Kuroiwa (1999) teve o intuito de identificar o tipo mais efetivo de órtese do membro superior para o auxílio da auto-alimentação em pacientes com alto grau de lesões cervicais. Dois aparelhos foram utilizados para a realização desta avaliação, o “*Mobile Arm Support*” (MAS), mostrado na Figura 2.1(a), e o “*Portable Spring Balancer*” (PSB), ilustrado na Figura 2.2.

Os, MAS são aparelhos mecânicos, preferencialmente projetados em forma de exoesqueletos que agem de forma passiva, que suportam o peso do braço e assim, prestam assistência aos movimentos do ombro e do cotovelo através uma junta rotacional de baixa fricção. De acordo com Lin *et al.* (2013), estes aparelhos foram originalmente projetados para aumentar a independência para a função de alimentação, mas posteriormente foram adaptados para permitir que o usuário realizasse outras atividades tais como limpeza, higiene, escrita, tarefas domésticas, além da maneabilidade de objetos sobre uma mesa, o que auxiliou em atividades recreativas e de formação profissional.

Figura 2.1: Exemplos de aparelhos de suspensão dos membros superiores; (a) Standard Mobile Arm Support (JAECO Orthopedic); (b) TOP/HELP (Focal Meditech); (c) Armon Ayura (Microgravity Products) (Fonte: Van Der Heide *et al.*, 2013)

Segundo Asai e Kuroiwa (1999), o MAS fornece (a) suporte para a sustentação do ombro em flexão e abdução em com uma ação anti-gravitacional; (b) assistência para rotação e abdução interna; e (c) assistência para rotação interna e externa do ombro. Estes ainda complementam que o, MAS é um excelente equipamento, mas possui a desvantagem de ser limitado na área onde pode ser montado ou acoplado, além de ser de difícil usabilidade para pacientes com lesões na corda espinal, os quais têm alta espasticidade ou rigidez muscular, dificultando o controle e a movimentação suave deste aparelho, principalmente na fase inicial da reabilitação. Lin *et al.* (2013) complementam que as limitações no design tradicional do MAS incluem sua aparência e a complexidade de instalação e ajuste do aparelho.

Asai e Kuroiwa (1999) também introduzem o “*Portable Spring Balancer*” (PSB), mostrado na Figura 2.2, o qual foi desenvolvido no Japão e é utilizado em hospitais desde 1986. Pessoas com extremidades superiores fracas podem usar esta órtese para ajudar em atividades de autocuidado e exercícios. O mecanismo do aparelho é similar ao MAS: ele suporta o braço do paciente durante as atividades do cotidiano, especialmente para alimentação, escrita, datilografia e higienização. Porém, esta órtese possui uma mola contida em um tubo de alumínio, o que auxilia movimentos ascendentes contra a gravidade, permitindo que o peso do braço seja efetivo no

movimento descendente, sendo assim classificado como um aparelho passivamente atuado. Como resultado, o PSB possibilita que o paciente tetraplégico possa realizar movimentos com sua mão de cima para baixo ou vice-versa. Como conclusão de seu estudo, os autores Asai e Kuroiwa (1999) identificaram que o aparelho PSB é mais eficiente que o, MAS na questão da auto-alimentação para pacientes tetraplégicos. Para os autores, ambos os aparelhos são eficazes, entretanto, as condições físicas dos pacientes, em relação à sua força nos músculos e tolerância, mostraram-se fatores que influenciaram na adaptação dos usuários.

Por último, os aparelhos ativamente atuados têm a mesma funcionalidade das outras duas categorias, mas difere no sentido da captação de energia, que neste caso é externa, não dependendo do pré-armazenamento da energia mecânica, sendo capazes de exercer forças maiores ou movimento de controle mais precisos, garantindo assim maior conforto e independência para a pessoa com deficiência. Pelo fato do paciente ser auxiliado por uma força motora externa, este tipo de aparelho realiza a ação da terapia física em menor grau, pois o usuário pouco exercita seus músculos na execução dos movimentos. Estes aparelhos são difíceis de categorizar de acordo com suas funcionalidades, porque o seu sistema mecatrônico lhe permite realizar mais de uma função específica. Dentre os mecanismos de atuação, pode-se encontrar, por exemplo, sistemas pneumáticos, elétricos ou híbridos. Inicialmente, estes aparelhos eram voltados para ações mais básicas dos braços, auxiliando apenas na movimentação vertical do braço, por exemplo, como se pode observar no modelo denominado “*Arm Balancer*”, tendo sua utilização focada na prática de autoalimentação, analisado pelo autor Thorpe (1986) e ilustrado na Figura 2.3. Seu sistema era constituído por um sistema de fio sobre roldanas, que ligava o braço do paciente a um contrapeso movido pela ação de um motor. Uma opção mais moderna, ilustrada na Figura 2.1(c), mostra um aparelho do tipo exoesqueleto que tem sua configuração parecida com o do modelo, MAS, porém garante os movimentos do ombro, cotovelo e da mão de forma independentes.

Figura 2.2: Portable Spring Balancer (PSB) (Fonte: adaptado de Asai e Kuroiwa, 1999)

Dentre estes aparelhos que suportam e assistem os movimentos dos membros superiores, apresentados anteriormente, existe uma classe denominada “*Sling*”. De acordo com Souza (2016), o *sling* é uma estrutura composta de um pedestal verticalizado com suportes horizontais, que ultrapassam a altura do usuário, e sustentam alças de apoio para os membros superiores se movimentarem no plano horizontal. A sustentação se faz a partir de um sistema de molas ou contrapesos. Normalmente os modelos deste aparelho tem sua base no chão, sendo independente de qualquer mobiliário, mas também há modelos que podem ser acoplados em uma mesa, cadeira ou cadeira de rodas. Pela definição, pode-se considerar o aparelho “*Arm Balancer*”, ilustrado na Figura 2.3, como um *sling* motorizado.

Souza (2016) ainda complementa que o equipamento de autoajuda *sling* permite a movimentação passiva de todo o membro superior no plano sagital (movimentos de flexão e extensão), a movimentação ativa no plano frontal (movimentos de adução e abdução) e, conseqüentemente, o envolvimento do paciente em atividades que demandam função manual: “nestas, pode-se acrescentar ao segmento corporal utensílios utilizados em tarefas, como por exemplo, na de alimentação (um talher) ou em tarefas de comunicação (um lápis)”.

Figura 2.3: “Arm Balancer” (a) acoplado em uma cadeira de rodas e (b) e (c) na atividade de alimentação do usuário. (Fonte: Thorpe, 1986)

2.4. MOTIVAÇÃO: APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

“Equipamentos que realizam sustentação do braço devido à fraqueza ou paralisia muscular podem ser utilizados durante o período de reabilitação no qual o usuário está sendo acompanhado ou durante a realização de tarefas cotidianas que ele desempenha ao longo do dia (por exemplo, alimentação e escrita), proporcionando sua independência e autonomia. Se o uso se restringir à reabilitação, o equipamento está lotado em centros de reabilitação, ambulatório de especialidades, clínicas e consultórios, e serão manuseados pelo terapeuta responsável pelo processo de intervenção daquele paciente. Neste cenário o terapeuta poderá utilizar o equipamento para manutenção ou ganho de amplitude de movimento assim como para treino funcional de atividades de vida diária. Quando auxiliando exclusivamente o desempenho de tarefas do dia a dia, o equipamento é utilizado nos diferentes espaços em que a pessoa com deficiência física ou o idoso se envolve, como por exemplo, seu domicílio, o ambiente de trabalho ou de estudo.” (Souza, 2016).

Para a elaboração de um produto como este equipamento de autoajuda, se faz necessário o envolvimento de uma equipe multidisciplinar, que consiga estabelecer a interface entre os profissionais da área da saúde, os quais são detentores do conhecimento das necessidades e dificuldades que os pacientes possuem para realizar suas funções, junto aos profissionais da área da engenharia, que utilizam técnicas de metodologia de projetos para formular um produto que atenda às necessidades do cliente, para ser utilizado de forma segura e eficaz.

Entretanto, pouco se explora na literatura acadêmica e em documentos técnicos sobre o desenvolvimento de produtos para tecnologia assistiva utilizados no processo de reabilitação, que são de suma importância nos tratamentos terapêuticos de pessoas com deficiência. Consequentemente, muitos destes produtos ofertados no mercado possuem inúmeras limitações de uso que podem comprometer a saúde do usuário, como por exemplo: são pouco ergonômicos, tanto para o paciente quanto para o terapeuta ocupacional; são de difícil montagem, regulagem e locomoção; apresentam problemas estruturais, podendo ser instáveis ou suscetíveis a falhas mecânicas.

Com o intuito de diagnosticar as limitações que estes produtos possam apresentar, Souza (2016) analisou três modelos nacionais de *slings* presentes no mercado, indicados pela Figura 2.4. De acordo com a autora, os equipamentos analisados tiveram as seguintes características: utilização para apenas um braço do paciente (uso unilateral); encaixes de perfil estrutural retangular em circular, o que dificulta sua montagem e regulagem; estrutura projetada com o centro de gravidade deslocado para fora da base de sustentação, tornando o equipamento instável; uso restrito a um tipo de mobiliário; contendo alças de apoio dos braços apenas em modelo em oito, não sendo exploradas alças mais confortáveis e que permitissem maior mobilidade do membro superior.

A partir da identificação das limitações dos *slings* envolvidos, Souza (2016) iniciou o estudo de base para um projeto sistemático, com o objetivo de se obter requisitos de melhorias junto ao usuário e características técnicas de projeto, complementando as considerações obtidas pela análise de oportunidade descrita anteriormente, para obter a especificação do produto a ser estudado, com vistas ao grau de inovação.

Figura 2.4: Equipamento para sustentação e movimentação do membro superior disponíveis no LAPITEC da FMRP-USP, em (a) modelo A, (b) modelo B e (c) modelo C (Fonte: Souza, 2016).

CAPÍTULO 3

3. REVISÃO DO ESTADO DA TÉCNICA E DA ARTE

Este capítulo apresenta a revisão do estado da técnica e da arte com o objetivo de analisar os equipamentos de sustentação e movimentação dos membros superiores que foram desenvolvidos ao longo do tempo.

3.1. REVISÃO DO ESTADO DA TÉCNICA

A fim de levantar o estado da técnica sobre o aparelho *sling* quanto ao seu uso para reabilitação, foram encontrados registros em patentes, em bases americana e brasileira.

(A) O documento US 2.631.582 A publicado em 1953 registra um mecanismo, que pode ser acoplado à cama ou outro lugar em que o paciente esteja se recuperando da doença e que por um sistema de manivelas gera deslocamento no segmento corporal que necessita ser movimentado ou suportado (Bensfield, 1950).

(a)

(b)

Figura 3.1: Patentes (a) do registro US 3.077.613 (Fonte: adaptado de Mayer, 1959, p.3) e (b) do registro US 3.373.993 (Fonte: adaptado de Oja e Schueuerman, 1968).

(B) O registro US 3.077.613 apresenta a invenção de uma barra para exercício físico de uso em leitos hospitalares, com possibilidades variadas de posicionamento (Mayer, 1959).

(C) A invenção US 3.373.993 relata um aparelho móvel para exercício terapêutico adaptável por contrapesos de molas, fixado atrás do indivíduo, cujos braços necessitam de apoio durante um determinado período de uso para poder se envolver em atividades que lhes são interessantes, como a pintura, desenho, escultura, jogos de tabuleiro ou realizar refeição sem a ajuda constante de outro indivíduo (Oja e Scheuerman, 1964).

(D) Outro documento, o US 3.683.898 refere-se a um aparelho médico ou terapêutico para ser utilizado associado à cama ou leito do indivíduo com deficiência para permitir atividades físicas que seriam impossíveis de serem feitas devido sua condição de saúde (Underwood, 1970)

Figura 3.2: Patentes (a) do registro US 3.683.898 (Fonte: adaptado de Underwood, 1970, p.1) e (b) do registro US 5.048.825 (Fonte: adaptado de Kelly, 1990, p.1).

(E) Outro registro, datado de 1990, patente número US 5.048.825 especifica um aparelho com design de grampo, portátil, para ser fixado na estrutura de portas, destinado ao exercício físico para movimentação de membro superior exclusivo para pessoas cadeirantes. Esta invenção se apresenta com alças para apoio do punho e

cotovelo, mantidas por sistema de polias e de contrapesos (halteres). É relatada a possibilidade de seu uso em diferentes ambientes, devido ao seu design em forma de grampo, sendo possível fixar-se em qualquer estrutura de porta (Kelly, 1990).

(F) A patente US 5.466.204 representa um aparelho de exercício usado para auxiliar na reabilitação de músculos dos membros superiores de pacientes em terapia. Seu desenho e propósito se assemelham ao descrito na invenção US 3.373.993 (Nearing, 1994).

(a)

(b)

Figura 3.3: Patentes (a) do registro US 5.466.204 (Fonte: adaptado de Nearing, 1994) e (b) do registro US 5.501.656 (Fonte: adaptado de Homma e Arai, 1994, p.1).

(G) O registro US 5.501.656 descreve aparelho de apoio do braço para movimento, que possibilita o usuário controlar seus movimentos com grande grau de liberdade, inclusive na realização de exercícios funcionais. O aparelho dispõe de alças de apoio distal e proximal para o antebraço, sustentadas por fios e cordas, mantidas por molas (Homma e Arai, 1994)

(H) O documento US 7.364.555 B1, consiste em um aparelho de movimentação passiva para a articulação do ombro. Inclui um suporte adaptado para o antebraço com lesão, sustentado por um sistema de dois tirantes e uma polia conectados a um cabo que é içado pelo indivíduo por outra polia fixada ao teto (Davidson, 2005).

Figura 3.4: Patentes (a) do registro US 7.364.555 B1 (Fonte: adaptado de Davidson, 2005, p.1) e (b) do registro PI 8902279 A (Fonte: adaptado de Kanawati e Philot, 1990, p.11).

No Brasil, podem ser apontados três documentos relacionados que descrevem aparelhos semelhantes ao *sling*. Em todos, os equipamentos são comercializados por empresas da área de TA.

(I) O registro PI 8902279 A, publicado em 1990, descreve aparelho terapêutico de apoio e sustentação para cabeça por meio de elásticos destinados às crianças com paralisia cerebral (Kanawati e Philot, 1990).

(J) O documento PI 9005907 A, publicado em 1992, descreve a invenção de um aparelho dinâmico e ajustável para levantar partes do corpo (cabeça, membros superiores e tronco) usado em tratamento terapêutico e fisioterapêutico. O equipamento assemelha-se a uma vara de pesca que garante o suporte das partes corporais por meio do fio de aço, molas e argolas. Este equipamento não possui sistema para encaixe da vara, a qual deve ser segurada por terceiros (Kanawati e Philot, 1990).

(K) A invenção BR 10 2012 020241-7 A2, publicada em 2015 apresenta uma solução para sustentação da cabeça de pessoas com alterações no sistema nervoso central contra a força da gravidade através de sistema mecânico (Morillo e Philot, 2012).

Figura 3.5: Patente de registro PI 8902279 A do aparelho “Levitar” (a) mostrando sua configuração e (b) como é utilizado nos usuários. (Fonte: adaptado de Kanawati e Philot, 1990)

3.2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Os próximos modelos apresentados foram encontrados em estudos científicos acerca do tema.

(A) “*Deltoid-Aid Brand Arm Conterbalance*”: desenvolvido no hospital de Minnessota (EUA) tem por objetivo a eliminação dos efeitos da gravidade para aumentar a capacidade funcional de antebraços e mãos. Também auxilia os pacientes na manutenção de boa postura, previne alongamento de músculos enfraquecidos, auxilia na manutenção da amplitude de movimento, ajuda a aliviar a espasticidades, atenua e previne o edema (AJOT, 1969). “O modelo, mostrado na Figura 3.6, possui base com design em cruz, com duas hastes verticais onde se fixa a estrutura superior, composta de duas barras horizontais. Um sistema de polias com rolamento em esferas equilibra pesos e molas através de fios de nylon que se encontram dentro do tubular em aço cromado localizada na estrutura superior. As hastes verticais podem ser ajustadas em qualquer tamanho de braço” (Souza, 2016). Caso não necessite da utilização de uma das hastes, é possível retirá-las. “*Deltoid-Aid Brand Arm*

Conterbalance é completamente independente com rodízios para mobilidade e com um aparelho de trava para estabilização” (AJOT, 1969).

Figura 3.6: “Deltoid-Aid Brand Arm Conterbalance” (a) em atividade de vida diária, atividade de lazer e treino vocacional; (b) foto do aparelho (Fonte: AJOT, 1969)

Este modelo de *sling* foi vastamente utilizado e modificado para diferentes finalidades. Worley *et al.* (1991) avaliaram a confiabilidade de três medidas clínicas de tônus musculares nos ombros e pulsos de pacientes pós-AVC utilizando um *Deltoid-Aid* adaptado. Nesta versão, um braço de suspensão foi adaptado com uma haste de equilíbrio ajustável para apoiar as extremidades superiores dos indivíduos afetados. A adaptação da suspensão do braço consistiu no uso de um *clip* giratório em cada ponto de suspensão e na substituição de um dos apoios do antebraço por um conjunto de haste de equilíbrio do punho, como observado na Figura 3.7. Segundo os autores, a adaptação foi realizada com o intuito de conceber mais liberdade de movimento em relação à rotação do ombro, supinação, pronação e flexo-extensão do antebraço.

(B) “*Swedish Arm Sling Suspension*” (AJOT, 1969): aparelho recomendado na assistência de paciente com envolvimento de patologia na musculatura do ombro, como na deltoide. Seu design se assemelha ao “*Deltoid-Aid Brand Arm Conterbalancer*”, porém mais compacta. Sua base possui o formato em “U”, onde saem duas hastes paralelas que se conectam a outra estrutura superior, de mesmo

formato que a base, a qual permite o desprendimento de fios com dois *slings* para sustentação do antebraço. Este aparelho tem sua estrutura superior ajustável em relação à distância entre os braços do usuário para ser utilizado de forma mais ergonômica. Além disso, a estrutura superior ainda possui uma junta articulada que se encontra na junção das duas barras, que possibilita o indivíduo a realizar movimentos mais amplos do braço, como a rotação lateral do ombro. Um sistema de polias e pesos está acoplado ao sistema para realizar a sustentação do braço. “O ‘*Swedish Arm Sling Suspension*’ possibilita liberdade de movimento para rotação externa e interna do ombro; abdução horizontal ou adução do ombro; extensão e flexão do cotovelo” (AJOT, 1969).

(a)

(b)

Figura 3.7: “*Deltoid-Aid Sling*” adaptado (a) suspensão dos braços adaptado; (b) utilização do aparelho de suspensão pelo usuário (Fonte: Worley *et al.*, 1991)

(C) “*Forearm Suspension*”: este aparelho foi desenvolvido por James e Orr (1984) no intuito de auxiliar os problemas decorrentes de fraqueza nos membros superiores em crianças com distrofia muscular Duchenne. Pela suspensão por cima do antebraço, o aparelho permite a movimentação no plano horizontal, eliminando os efeitos da gravidade. O pórtico construído acopla-se em uma cadeira, passando acima do nível da cabeça do usuário, e se projeta para frente, em um ponto acima do antebraço do mesmo. Esta acomodação é ligada por polias de baixo atrito até se conectar aos pesos, localizados atrás da cadeira. Estes contrapesos ajustáveis ao peso funcional do braço do usuário são presos a uma guia para evitar que balancem quando a cadeira está em movimento.

(a)

(b)

Figura 3.8: (a) “*Swedish Arm Sling Suspension*”, 1969, (J.A. Preston Corporation®) (Fonte: AJOT, 1969) e (b) “*Forearm Suspension*” (Fonte: James e Orr, 1984).

Os próximos modelos apresentados tratam de equipamentos que estão atualmente disponíveis no mercado.

(D) “*Folding Arm Suspension Frame*”: Um modelo atual, porém com uma configuração similar ao “*Deltoid-Aid Brand Arm Counterbalance*”, comentado no item (A). Este aparelho possui rodízios na sua base com o formato em “T”, o que permite a movimentação do mesmo para se acomodar ao usuário, que pode estar sentado em uma cadeira, poltrona ou cadeira de rodas. Um pórtico é acoplado a esta base e, após ultrapassar a altura da cabeça do usuário, ele se projeta para frente em uma estrutura superior rígida, no formato da em “U”. O sistema de suspensão do braço é ligado a esta estrutura superior e possui molas centrais para garantir conforto nos movimentos do usuário. Porém, devido sua rigidez nesta estrutura superior, os movimentos dos usuários são mais restritos e com um menor conforto, como se pode observar na Figura 3.9. De acordo com Souza (2016) este modelo apresenta-se com a opção de aquisição dos módulos de composição em separado, isto é, o usuário pode adquirir a

estrutura de suporte (*suspension frame*) e/ou às partes que realizam a suspensão do braço (*suspension sling*). A autora ainda complementa que os dois módulos custam aproximadamente \$451,00 (R\$ 1.677,00), sendo o *suspension sling* comercializado individualmente a \$71,00 (R\$ 264,00) e o *suspension frame* a \$380,00 (R\$ 1.413,00).

(a)

(b)

Figura 3.9: “Folding Arm Suspension Frame” (a) exemplo da utilização do aparelho; (b) sistema de suspensão do braço. (Fonte: FOLDING ARM SUSPENSION FRAME, 2015)

(E) “Swedish HelpArm”: aparelho atual que possui uma configuração similar ao “Swedish Arm Sling Suspension”, citado no item (B). A maior diferença entre estes aparelhos se encontra no pórtico que liga as bases superior e inferior, como observado na Figura 3.10. De acordo com Souza (2016): “Possui 7 pares de correias (*sling*) para punho e cotovelo e 10 pesos (variando aproximadamente de 50 a 450 gramas). Na versão atual existe apenas uma haste vertical, e o preço de venda incluindo os acessórios é de aproximadamente \$5.474,00 (R\$ 20.589,00).

(F) “NITZBON Helparm (Nitzbon©)”: Outro aparelho que se encontra atualmente no mercado. Também possui um formato similar aos citados anteriormente. Possui rodízios em sua base inferior com o formato de uma em “M”, com um pórtico que liga esta base a uma estrutura superior. Seu sistema de sustentação do braço é feito por contrapesos que estão presos e alinhados por uma

guia localizada atrás do pórtico vertical, o que permite sua movimentação. Vale ressaltar que este aparelho possui muitas opções de movimento do braço, como abdução-adução, flexão-extensão e rotação externa-interna do ombro, sendo o *sling* mais completo em relação à ação terapêutica encontrado no mercado. Segundo Souza (2016) o seu valor de venda é aproximadamente \$6.060,00 (R\$ 22.793,00).

(a)

(b)

Figura 3.10: “*Swedish HelpArm*” (a) exemplo da utilização do aparelho; (b) foto do aparelho
(Fonte: SWEDISH HELPARM, 2015)

(a)

(b)

(c)

Figura 3.11: “*NITZBON Helparm*” (Nitzbon©) em diversas posições de uso (Fonte: EURO SLING, 2015)

(G) “*Mobility Arm Sling*” para cadeira de rodas: este é um modelo mais simples e compacto que os aparelhos apresentados anteriormente por possuir sua estrutura acoplada a uma cadeira de rodas ou a uma base em X que suporta uma haste vertical, como ilustrado na Figura 3.12. Para sustentação do braço é utilizado um sistema de contrapesos que é adicionado manualmente na parte da estrutura superior do aparelho que se estende atrás da cadeira de rodas. Este possui uma junta articulada na sua estrutura superior o que também permite os movimentos de rotação lateral do ombro.

Figura 3.12: (a) “*Mobility Arm Sling*” para (b) utilização livre de mobiliário ou (C) junto a cadeira de rodas (Fonte: MOBILITY ARM SLING, 2015)

(a)

(b)

Figura 3.13: Levitar de Braços (a) Articulado e (b) Biarticulado. (Fonte: LEVITAR, 2015)

(H) “Levitar de Braços Articulado e Biarticulado”: modelo nacional e versão mais recente da patente mostrada no item (J), “o Levitar de braço é composto por um adaptador dinâmico (para ser acoplado à cadeira de rodas); uma haste regular; duas hastes circulares; um sistema de girador com rolamento; duas molas; duas faixas de tecido velcro®; argolas; mosquetões e manípulo. As hastes e o sistema girador podem ser regulados para sustentar parte do peso do braço e do antebraço de forma independente, com ajustes de altura, comprimento e inclinação. Este aparelho está ilustrado na Figura 3.13. Dependendo da dificuldade do ombro, o Levitar de Braço poderá ser biarticulado, sendo que haverá necessidade de mais uma haste circular e um sistema com rolamento e seu acoplador” (LEVITAR, 2015). O preço do Levitar pode variar de R\$ 436,00, do modelo articulado, a R\$ 617,00, do modelo biarticulado, sem incluir a base para fixação.

3.3. DISCUSSÃO SOBRE OS PROJETOS DE *SLINGS* DISPONÍVEIS

Entre as patentes e os modelos apresentados anteriormente, é possível identificar alguns padrões existentes nas estruturas dos *slings*. A fim de complementar a classificação realizada por Van Der Heide *et al.* (2013) sobre os aparelhos dinâmicos que apoiam os membros superiores, este trabalho sugere que os *slings* sejam categorizados em função da sua disposição junto ao mobiliário, podendo ser (A) independente do mobiliário, (B) fixado em cadeiras e afins (como cadeira de rodas e poltronas) e (C) fixado em mesas.

(A) *Independente do mobiliário*: este é o modelo de *sling* mais comumente utilizado e encontrado no mercado. Sua configuração é bem definida: uma base inferior, a qual é responsável pela estabilidade do aparelho, uma estrutura superior, que se localiza acima da cabeça do usuário e garante o posicionamento da haste que irá suspender os braços do mesmo, além de possuir um pórtico vertical que une as duas estruturas anteriores. Em sua grande maioria, as bases inferiores possuem uma estrutura rígida que não permite ajustes e são ligadas ao chão por rodízios para permitir a locomoção do aparelho. Normalmente estas bases são encontradas no formato em cruz (como observada na Figura 3.6), no formato em “U” (como observada na Figura 3.8) ou no formato em “M” (como observada na Figura 3.11). A estrutura superior é encontrada em quase sua totalidade com o formato em “U” (mostrado na

Figura 3.9), com uma estrutura paralela ao chão, que garante o posicionamento desejado dos braços do indivíduo, e também permite um ajuste que adequa o posicionamento dos membros superiores para o uso em diferentes pessoas. Este modelo de *sling* é utilizado apenas em um indivíduo sentado em uma cadeira, uma cadeira de rodas ou uma poltrona. Sua estrutura rígida garante a estabilidade do aparelho, possibilitando a utilização de contrapesos para sustentar os braços dos pacientes que facilitam a ação terapêutica nos mesmos. Porém, existe a desvantagem é referente à rigidez e ao grande volume do aparelho, pois dificulta sua locomoção e o seu armazenamento dentro de hospitais ou domicílios.

(B) *Fixados em cadeira e afins*: normalmente este modelo é utilizado para suspender apenas um braço, sendo configurado por uma base fixadora, a qual varia de acordo com o local da fixação, um pórtico vertical que liga a uma haste horizontal que, por sua vez, serve de apoio para as hastes de suspensão do membro superior. É possível encontrar modelos com uma estrutura rígida, mas existem também estruturas que permitem a movimentação rotacional do ombro do usuário devido a um rolamento presente no encontro do pórtico vertical com a haste horizontal, possibilitando o movimento do braço no plano horizontal, como se pode notar na Figura 3.12. Este tipo de aparelho tem uma configuração com um volume reduzido se comparado com os produtos mencionados no item anterior, o que facilita seu transporte. Já sua estabilidade é proporcionada pelo local onde ele está preso, sendo mais comumente utilizado junto a cadeiras de rodas. Vale mencionar que alguns destes aparelhos têm como desvantagem a complexidade de montagem do aparelho junto ao mobiliário.

(C) *Fixados em mesas*: este modelo tem sua configuração similar à descrita no item (B). Sua grande diferença está em sua base, responsável pelo encaixe com a mesa, sendo a opção mais difundida a fixação por meio de um grampo do tipo “C”, como ilustrado na Figura 2.2.

Outra diferenciação entre os *slings* encontrados se deve ao equilíbrio dos membros superiores dos usuários. Neste ponto foi possível observar três soluções: a utilização de um contrapeso para sustentar o braço, a utilização de um sistema com molas e hastes presas ao aparelho que garante a sustentação dos braços pela estabilidade da própria estrutura do *sling*, e a utilização de um motor responsável pela

regulagem de altura do braço. No primeiro caso, o contrapeso pode ser colocado como uma extensão da haste superior, similar a uma balança, ou pode ser acoplada ao pórtico vertical, sendo necessário neste caso um sistema de polias e uma guia onde o peso poderá correr, permitindo assim a movimentação dos braços do usuário no plano vertical, como ilustrado na Figura 3.11. No segundo caso, o aparelho deve passar por uma análise estrutural para verificar sua estabilidade da estrutura quando submetida aos esforços realizados pelos braços dos indivíduos em suas atividades da vida diária.

A partir da pesquisa realizada, notou-se que existe uma vasta gama de aparelhos destinados à sustentação e movimentação dos membros superiores, porém, no cenário nacional, os problemas começam a surgir quando os produtos ofertados ao mercado possuem um custo muito elevado e/ou não passam por uma devida verificação de estabilidade e análise de falhas.

CAPÍTULO 4

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será mostrada a abordagem utilizada no ciclo de desenvolvimento do produto, mostrando as etapas e as ferramentas que foram utilizadas neste projeto.

4.1. VISÃO DA METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO, DENTRO DO CICLO DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

Um projeto de engenharia é um processo sistemático, no qual os engenheiros geram, avaliam e especificam estruturas e seus componentes para a construção de máquinas, equipamentos ou processos cujas formas e/ou funções atendem a requisitos técnicos e restrições estabelecidas, a partir das necessidades descritas pelo usuário. Segundo Pahl *et al.* (2007), a principal tarefa do engenheiro é aplicar seus conhecimentos científicos e de engenharia para a solução de problemas técnicos e, então, obter um conjunto de requisitos e restrições advindos de tecnologia, materiais, economia, ambiente, normas reguladoras e interação com o ser humano. A criação mental de um novo produto é tarefa atribuída aos engenheiros de projeto e de produto, sendo que sua realização física é responsabilidade do engenheiro de fabricação. Portanto, o engenheiro tem o seu trabalho individual inserido em uma equipe de trabalho. Ainda segundo Pahl *et al.* (2007), o projeto é uma atividade de engenharia que:

- Afeta praticamente todas as áreas da vida humana;
- Utiliza as leis e ideais da ciência;
- Fornece pré-requisitos para a realização física da solução de ideias;
- Requer ética e responsabilidade.

Segundo Back (1983, p.10), “o projeto de um componente ou um sistema apresenta em cada caso características e peculiaridades próprias. Mas à medida que um projeto é iniciado e desenvolvido desdobra-se uma sequência de eventos, numa

ordem cronológica, formando um modelo, o qual quase sempre é comum a todos os projetos. Estes eventos ou fases do projeto são de forma gerais bastante distintos e devem ser sequenciados e encaixados de modo a transformar recursos em objetos úteis [...]”.

Basicamente a motivação para o desenvolvimento de novos produtos é a solução de um problema, caracterizando-se por três componentes:

- Uma situação inicial indesejada, ou seja, existência de uma situação insatisfatória;
- Uma situação final desejada, ou seja, alcançar uma situação satisfatória ou resultado desejado;
- Obstáculos que, num dado momento, impedem a transformação da situação inicial indesejada na situação final desejada.

O resultado da atividade de projeto é uma especificação bem detalhada do produto. A especificação exige a coleta de informações que definem totalmente o produto, conforme mostrado abaixo:

- O “conceito global” (especificando a forma, a função e o objetivo global do projeto, incluindo os benefícios dos resultados);
- O “pacote” (especificando todo o conjunto de produtos individuais que são necessários para preparar e apoiar o conceito);
- O processo pelo qual o “pacote” será criado (especificando como os vários produtos individuais no “pacote” devem ser produzidos).

As etapas acima formam uma sequência aproximada, pois na prática os projetistas ocasionalmente circulem ou retrocedam essas etapas. Há vários modelos de ciclo de desenvolvimento de produtos propostos na literatura. O modelo proposto por Pahl *et al.* (2007) apresenta as divisões deste ciclo, detalhando cada fase, conforme apresentado na Figura 4.1.

As etapas iniciais são chamadas de projeto informacional (viabilidade técnica e física) e de projeto conceitual, que constituem a primeira parte do projeto do produto. Primeiramente ocorre o levantamento das necessidades ou itens importantes para os usuários que são traduzidas em requisitos técnicos e são trazidas para o projeto conceitual com a finalidade de nortear a tomada de decisões ao longo das próximas

etapas. Já a próxima etapa do desenvolvimento do produto é denominada projeto preliminar, na qual são efetuados os pré-dimensionamentos com síntese e análise dos componentes de forma analítica e numérica, com o auxílio de programas de apoio à engenharia. Uma vez que o projeto conceitual tenha satisfeito as restrições de projeto e condições hipotéticas operacionais, segue-se para o projeto detalhado, no qual há a formalização do produto em linguagem técnica, com as definições de tolerância dimensionais, de forma e de posição.

Figura 4.1: Modelo de desenvolvimento de produtos industriais. (Fonte: Rodrigues *et al.*, 2015)

Atualmente, muitas empresas possuem uma quinta fase referente à engenharia experimental, na qual novos produtos e produtos em comercialização são testados para a determinação de sua vida útil em termos de confiabilidade, durabilidade e efetuação de melhorias, respectivamente.

Nos itens a seguir apresentam-se as ferramentas em cada fase do desenvolvimento do produto.

4.2. METODOLOGIA DE PROJETO

O desenvolvimento de novos produtos é uma tarefa importante e envolve análise de risco, uma vez que o produto (sendo este considerado de forma genérica, por exemplo, para bens de consumo, componentes mecânicos, máquinas, equipamentos, entre outros) pode resultar em sucesso ou não. O sucesso de novos produtos, principalmente bens de consumo e componentes terceirizados, depende de um grande esforço estratégico da organização em criar e manter um programa voltado para o ciclo de desenvolvimento do produto. Este ciclo deve incluir duas visões de projeto: o gerenciamento do projeto e a aplicação de técnicas de metodologia de projeto.

Como o desenvolvimento do produto é realizado por meio de pessoas, o objetivo de seguir uma metodologia de projeto é utilizar uma ferramenta que venha auxiliar e intensificar a capacidade inventiva da equipe de projetistas. Não se deve desprezar em nenhum momento a intuição das pessoas envolvidas. Desta forma, Pahl *et al.* (2007, p.6) comentam: “com os métodos de projeto, é objetivado despertar as habilidades individuais do projetista por meio de diretrizes e ajudas, potencializar sua disposição com relação à criatividade e, simultaneamente, evidenciar a necessidade de uma avaliação subjetiva do resultado”.

Os autores ainda complementam: “o projeto metódico possibilita uma racionalização eficaz do processo de projeto e produção. Nos projetos novos, os procedimentos coordenados e progressivos, inclusive em níveis parcialmente mais abstratos, possibilitam a geração de uma documentação reaproveitável das soluções. A estruturação dos problemas e tarefas facilita a percepção das possibilidades de emprego de soluções consolidadas provenientes de desenvolvimento anteriores e a utilização de catálogos de soluções. A progressiva concretização dos princípios de solução possibilita a seleção precoce e a otimização com menor volume de trabalho”.

Sendo assim, serão apresentados nos próximos itens, as fases do ciclo de desenvolvimento do produto e as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento deste projeto.

4.2.1. PROJETO INFORMACIONAL

Com a consolidação das disposições sobre o produto e sua funcionalidade, bem como seu desempenho, são traçadas as metas a respeito de prazos e custos. O setor de projetos deve identificar as especificações determinantes para a construção do produto. Segundo Pahl *et al.* (2007, p.101), “o resultado deste processo é a lista de requisitos”.

A lista de requisitos constitui o documento das especificações do produto, traduzindo o grau de atendimento desejado em cada tarefa pelo cliente. Como importante trabalho prévio para auxiliar a elaboração da lista de requisitos, Pahl *et al.* (2007) sugerem a percepção das vontades do cliente e a conversão destas em requisitos técnicos do produto a ser desenvolvido.

O termo “cliente” pode ser expandido para todas as pessoas capazes de identificar necessidades relacionadas a um produto. Portanto, o levantamento dos requisitos do usuário deve ser feito não apenas com o usuário propriamente dito, mas também com usuários secundários, os quais têm contato direto com o produto. Estes requisitos normalmente são obtidos em forma de questionários direcionados para os pontos positivos e negativos do conceito inventivo que se deseja atuar.

Uma das ferramentas utilizadas para traduzir as necessidades e vontades dos clientes em um documento técnico organizado se chama *Quality Function Deployment* (QFD). Segundo Pahl *et al.* (2007, p.34) “QFD é uma metodologia para planejamento e controle da qualidade. Ela é útil para um planejamento do produto e do processo, sistematicamente voltado ao cliente. Os requisitos do cliente são precisamente convertidos em características do produto e essas são convertidas novamente em sequenciamentos de fabricação e exigências da produção”.

Cheng e Melo Filho (2007) classificam diferentes tipos de modelos conceituais do QFD, como por exemplo: *natureza do produto* (tangíveis e intangíveis); *tipo de interface do usuário* (direto, indireto e híbrido), *Tipo de especificação* (com ou sem especificações prévias); *grau de inovação* (novo paradigma, novo para a empresa, adição de uma nova linha ou produto plataforma, reposicionamento de mercado, redução de custos); *tipo de processo de fabricação* (processos contínuos; processos discretos – montagem; fabricação; prestação de serviços e processos digitais:

reprodução, download); *etapas do ciclo de desenvolvimento de novos produtos* (identificação das necessidades do cliente, desenvolvimento e teste de conceito, projeto básico; projeto detalhado do produto e preparação para a produção).

Na classificação citada, o tipo de produto deve apresentar um conjunto de características, de acordo com sua finalidade:

- *Bens industriais* (bens físicos, tangíveis): automóveis; aeronaves; processamento de derivados de petróleo e processamento de papéis, processamento de alimentos, e também uma subclassificação em *bens de consumo* (vestuário, eletrodomésticos, acessórios automotivos e utilidades de mesa).
- *Serviços* (intangíveis): serviços em geral (curso, educação, consultorias, área de saúde, restaurantes);
- *Digitais* (intangíveis): desenvolvimento de softwares e sites da rede *internet*.

Figura 4.2: Desdobramentos de matrizes no QFD. (Fonte: Rodrigues *et al.*, 2015).

A classificação citada por Cheng e Melo Filho (2007) pode auxiliar na classificação da matriz de QFD, principalmente na escolha ou não da Matriz da Qualidade.

Nesse contexto, há várias abordagens relacionadas à estruturação ou modelo conceitual da aplicação das matrizes de QFD. Uma das classificações mais citadas na literatura pertinente é o desdobramento de quatro matrizes, que de acordo com Cheng e Melo Filho (2007) podem ser complementadas com matrizes auxiliares, como apresentado na Figura 4.2. Entre estas, a matriz de maior importância se chama “*House of Quality*” ou “Planejamento do Produto”, na qual os requisitos do cliente (ou necessidade do consumidor) são convertidos em requisitos técnicos (ou características de engenharia), ordenados em grau de importância, servido como base para as próximas fases.

4.2.2. PROJETO CONCEITUAL

O projeto conceitual tem o objetivo de produzir princípios de projeto para um produto melhorado ou uma inovação. Ele deve ser suficiente para satisfazer as exigências do consumidor e diferenciar o novo produto de outros produtos existentes no mercado. Especificamente, o projeto conceitual deve apontar quais os conceitos que serão introduzidos no novo produto para atingir os benefícios básicos resultantes no projeto informacional (Baxter, 2000).

Nesta etapa, os conhecimentos básicos e tecnológicos da engenharia, bem como a capacidade de abstração são fundamentais para nortear a busca destes conceitos e para avaliar soluções. Pahl *et al.* (2007, p.112) propõem que “no procedimento para chegar a uma solução nova e duradora, não se deve deixar conduzir somente por ideias fixas ou convencionais e se dar por satisfeito com elas. Pelo contrário, é preciso verificar cuidadosamente se caminhos inovadores e práticos que levam a solução são passíveis de implementação”.

Segundo Baxter (2000) há dois aspectos fundamentais para a obtenção de sucesso no projeto conceitual: fazer o possível para gerar o maior número de conceitos e selecionar o melhor deles.

A meta do projeto conceitual pode variar bastante dependendo do tipo de produto em desenvolvimento. Isso se deve, em grande parte, aos diversos tipos de restrições delimitas para a confecção do produto, como exemplo, restrições de geometria, custos, preferência do cliente, entre outros. Sendo assim, a atenção deve

ser concentrada principalmente nas necessidades do consumidor, resultantes do projeto informacional, e na viabilidade de fabricação do produto.

A geração de conceitos exige muita intuição, imaginação e raciocínio lógico. A maior dificuldade no projeto conceitual é liberar a mente para chegar a conceitos originais. Segundo Baxter (2000), usando simplesmente a imaginação e a intuição é possível gerar alguns conceitos novos. Contudo, aplicando técnicas de pensamento estruturadas pode-se chegar a resultados mais concisos.

As técnicas estruturadas citadas pelo autor são: análise da tarefa, análise das funções do produto, análise do ciclo de vida, concepção do estilo, semântica do produto e, por último, seleção de conceitos. Segue abaixo uma descrição das técnicas supramencionadas.

- A “análise da tarefa” parte do princípio de que todos os produtos são projetados para serem usados pelo homem de alguma forma. Ao examinar a interface homem-produto, pode-se descobrir que esta análise é geralmente complexa e pouco compreendida. A análise da tarefa explora as interações entre o produto e o usuário através de observações e análises. Os resultados dessas análises são usados para gerar novos conceitos, levando em consideração métodos ergonômicos e antropométricos.
- A “análise das funções do produto” é um tipo de análise mais analítica do produto, voltada para o consumidor. As funções do produto são apresentadas da mesma forma como são percebidas, utilizadas e avaliadas pelo consumidor, sendo que para produtos de maior complexidade ou aqueles cujas funções não são entendidas pelo consumidor, deve-se realizar pesquisas formais de mercado. Um quadro de analogias funcionais pode ser uma técnica de criatividade a ser utilizada. Esta etapa consiste no desdobramento de um fluxograma, denominada árvore funcional, na qual são dispostas a função principal do produto e as funções secundárias, que suportam e permitem a realização da função principal, exemplificada na Figura 4.3. Sequencialmente é realizada a análise morfológica, onde cada função destacada desta árvore funcional apresentará diferentes configurações ou soluções, sugeridas pela equipe técnica, para realização da escolha do melhor conjunto de solução de conceitos.

Figura 4.3: Árvore funcional de um descascador de batatas (Fonte: Baxter, 2000)

- A “análise do ciclo de vida” é usada por *designers* que pretendem diminuir a agressividade ambiental dos novos produtos. Pode-se construir um fluxo do ciclo de vida, desde a entrada de matéria prima na fábrica, passando pela produção, distribuição e uso, até o descarte final do produto. Dessa maneira, é possível propor mudanças conceituais na estrutura ou na forma do produto para melhorar etapas do ciclo de vida, como por exemplo, seu descarte.
- A “análise de valor” procura entender o valor relativo (em relação ao custo) das peças, componentes e do produto como um todo que estão presentes nas funções do projeto, baseando-se na estratégia de: identificar as funções do produto, estabelecer valores para estas funções e procurar realizar essas funções com o mínimo de custo, sem perda da qualidade. Com as funções e os seus valores delimitados, pode-se gerenciar o projeto a fim de garantir que as funções principais, indicadas pelo cliente, terão maior atenção e disponibilidade financeira para ser cumprida.
- A “concepção de estilo” é a definição da forma global do produto, embora seja necessário preocupar-se com o projeto de cada componente. Os objetivos do estilo podem ser estabelecidos a partir de outros produtos da empresa, a fim

de estabelecer uma identificação com a marca do empreendimento e com os aspectos semânticos ou simbólicos do produto.

- A “semântica do produto” é a preocupação de que cada produto deve ter uma aparência adequada a sua função. Assim, os produtos duráveis e os produtos para trabalhos pesados devem ter aspecto robusto e forte. Já os produtos engraçados devem parecer leves e alegres, enquanto os produtos para trabalhos sérios devem parecer sóbrios e eficientes.
- O “simbolismo do produto” baseia-se na ideia de que todas as pessoas têm uma auto-imagem baseada nos valores pessoais e sociais que possuem. Faz parte da natureza humana, observar os objetos que reflitam a sua auto-imagem.
- A “emoção provocada pelo produto” se preocupa em projetar os produtos para transmitir certos sentimento e emoções. Nesse caso os conceitos são definidos pelas linhas de expressão visual que transmitirá a emoção desejada.

Com a geração de um número significativo de conceito, a equipe de engenharia deve selecionar aqueles mais viáveis, construindo um conjunto de conceitos ótimos para dar continuidade no processo de desenvolvimento do produto.

4.2.3. PROJETO PRELIMINAR OU ANTEPROJETO

Segundo Pahl *et al.* (2007), com a conclusão da etapa de concepção do produto, a solução básica deve ter sido essencialmente elaborada a partir de informações sobre a estrutura de funcionamento. A configuração concreta desta ideia básica se faz nesta etapa, realizando a escolha de materiais, a definição das dimensões principais, o exame da compatibilidade espacial e a complementação das consequentes funções auxiliares por meio de sub-soluções. A configuração é desenvolvida e concluída através de uma avaliação técnico-econômica.

Como primeira etapa de trabalho, a solução preliminar é elaborada pela transcrição da lista de requisitos técnicos, gerada na fase do projeto conceitual, conforme mostrado abaixo:

- Requisitos determinantes das dimensões como potência, vazão, dimensões de interface, etc.;

- Requisitos determinantes do arranjo, como direções do fluxo ou movimento, posição, etc.;
- Requisitos determinantes de materiais, como resistência à corrosão, módulo de elasticidade, resistência à tração e outros.

Posteriormente é realizado o esclarecimento das condições espaciais determinantes ou limitantes da configuração do projeto básico, como por exemplo, afastamentos exigidos, direções a ser considerados para eixos e limitações de montagem.

Após a percepção dos requisitos determinantes em relação à configuração e as restrições espaciais, é preciso desenvolver a estrutura de produto por meio de um croqui da configuração e da escolha preliminar do material que são considerados os portadores da função principal. Inicialmente, os portadores determinantes da função principal deverão ser escolhidos, por exemplo, o volume e as dimensões externas. Em seguida, são verificadas as funções auxiliares que são necessárias para executarem as soluções indicadas no projeto informacional. Por exemplo, avaliar uma função de suporte e fixação, de forma a padronizar as peças, facilitando assim a montagem do conjunto. A partir deste ponto, segue a consolidação das funções principais pelo ajuste da configuração do projeto de acordo com as normas, prescrições, cálculos mais exatos e resultados de ensaios. Nessa fase há também o detalhamento dos componentes que são portadores das funções auxiliares, acrescentando itens padronizados e fornecedores. Feito o dimensionamento dos componentes, pode-se avaliar o projeto segundo critérios técnicos e econômicos.

No dimensionamento e seleção de material é imprescindível o conhecimento de uma condição de carga claramente definida quanto à magnitude, tipo, frequência ou intervalo de atuação. Na falta destes dados, deve-se dimensionar com hipóteses adequadas e, em seguida, estimar o tempo de ciclo de vida do produto.

A configuração final deve passar por uma análise do estado de tensões descritíveis e assim, ser analisada para qualquer condição de serviço.

4.2.4. PROJETO DETALHADO

Segundo Baxter (2000), as etapas do projeto detalhado iniciam-se com o conceito escolhido e terminam com o protótipo completamente desenvolvido e testado. O projeto detalhado está dividido em quatro fases:

- Geração de ideias, que explora todas as formas possíveis de fabricar o produto;
- Seleção de ideias, que escolhe a melhor opção em relação as especificações do projeto;
- Análise das possibilidades de falha e seus efeitos, para levantar os possíveis pontos de falha do produto;
- Construção e teste do protótipo, para aprovar ou rejeitar o projeto.

Nas fases anteriores do desenvolvimento do produto, não há necessidade de seguir rigidamente a sequência exposta, sendo possível o entrelaçamento entre elas, e em outros casos, é possível retroceder algumas etapas para melhorar um aspecto que já foi examinado ou até avançar, para conferir certos pontos do que poderão ser conflitantes no futuro.

Figura 4.4: Etapas do projeto (Fonte: Baxter, 2000)

Ao final do processo de definição da configuração do produto detalhado, deve ser tomada a decisão sobre a arquitetura do produto, ou seja, como o produto é organizado a partir dos componentes a serem montadas, a forma e função de cada um destes, além do processo de montagem, dos tipos de materiais e dos processos

de manufatura a serem usados na produção. Todo o procedimento deve ser registrado em um memorial descritivo do projeto, contendo os desenhos técnicos, análise de falhas e resultados dos testes com protótipos. A Figura 4.4 esquematiza o processo de detalhamento de um produto.

4.2.5. PREPARAÇÃO DA PRODUÇÃO

Após a conclusão da configuração proposta do produto, este modelo passa por uma avaliação em relação às especificações e análises das falhas, restando elaborar as especificações para a sua fabricação. Naturalmente, esses processos já foram pensados na fase do projeto conceitual e no anteprojeto. Os resultados desta última fase são desenhos técnicos e as especificações para a produção do protótipo. Caso o protótipo seja aceito, são feitas as últimas alterações para finalizar a documentação do projeto. Isso significa especificar os materiais, as máquinas e ferramentas a serem utilizadas. Também devem-se especificar acabamentos necessários, ou seja, tolerâncias dimensionais, de forma e posição, além de rugosidades, especificações de solda e o que for necessário para fabricar corretamente o componente especificado. Por fim, um documento é gerado contendo o tutorial para que o produto desenvolvido possa ser produzido.

4.3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO NÃO CONVENCIONAL

4.3.1. TECNOLOGIA FDM (*FUSED DEPOSITION MODELLING*)

A tecnologia FDM consiste no processo de extrusão de um termoplástico feito por um cabeçote que é alimentado por filamentos desta classe de materiais através de guias rotativas e são aquecidos por uma resistência até serem liquefeitos para depois serem depositados em uma plataforma. Este cabeçote trabalha em conjunto com a máquina FDM, a qual normalmente proporciona a movimentação do cabeçote no plano horizontal (plano xy) e a movimentação da plataforma de deposição do material no sentido vertical (eixo z). Sendo assim, esta máquina FDM tem a capacidade de gerar peças tridimensionais realizando a extrusão de novos filamentos

para construir uma camada sobre a camada anterior, até formar por completo o objeto 3D, como mostra a Figura 4.5.

Figura 4.5: Esquema simplificado do processo FDM. (Fonte: Cimenject, 2015)

Figura 4.6: Impressora 3D Stratasys™ Dimension 1200es®. (Fonte: STRATASYS, 2015)

Esta tecnologia teve grande importância para este projeto, pois possibilitou a impressão de alguns componentes mais complexos do *sling*, principalmente referente ao sistema de sustentação do membro, com rapidez e boa qualidade. Para isto, utilizou-se uma impressora 3D denominada Stratasys™ Dimension 1200es®, ilustrada na Figura 4.6, gerando as peças de material ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), polímero disponível em filamentos compatíveis com a impressora.

4.4. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

No desenvolvimento do produto do presente estudo, foram utilizadas ferramentas computacionais que permitiram a visualização e a avaliação estrutural do projeto antes de iniciar a etapa da construção do protótipo. Como ferramenta de Desenho Assistido por Computador (ou *Computer Aided Design* – CAD), a qual permite a criação de desenhos técnicos mecânicos em vistas 2D e 3D, foi utilizado o software SolidWorks® 2013. Como ferramenta de Engenharia Assistida por Computador (ou *Computer Aided Engineering* – CAE), responsável pela simulação e análise estrutural em elementos finitos do projeto, foi utilizado o software ANSYS® Workbench™ V.15.

CAPÍTULO 5

5. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DO CONCEITUAL

Este capítulo apresenta o desdobramento das fases do ciclo do desenvolvimento do produto realizadas para a escolha da configuração conceitual do *sling*.

5.1. ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO *SLING*

O fluxograma da Figura 5.1 expõe as principais etapas realizadas no projeto do *sling* com base no ciclo de desenvolvimento do produto, com indicações nas etapas concluídas neste trabalho e as etapas feitas por Souza (2016).

O projeto do *sling* surgiu com a identificação da lacuna de soluções de engenharia destinadas à terapia dos membros superiores indicada por Souza (2016), a qual deu início a fase do projeto informacional e que teve como resultado uma lista de requisitos a serem atendidos no projeto. Este trabalho iniciou-se no desenvolvimento da fase do projeto conceitual que consistiu em levantar soluções técnicas para os requisitos indicados na fase anterior. O trabalho continuou pela fase do projeto preliminar, que envolveu o pré-dimensionamento dos principais componentes do projeto e de alguns dos elementos críticos, seguidos pela fase do projeto detalhado, destinado à formalização dos desenhos técnicos para a construção do protótipo funcional, bem como estabelecimento das cadeias de tolerâncias (dimensionais e geométricas). O protótipo foi avaliado em Souza (2016), resultando em adequação dos requisitos indicados no QFD, por meio de um processo iterativo junto aos terapeutas ocupacionais da UFTM e USP/Ribeirão Preto dentro da fase conceitual e preliminar até se obter o protótipo final. Este protótipo foi então avaliado de forma qualitativa pela equipe de terapeutas ocupacionais da UFTM junto ao um paciente tetraplégico.

Figura 5.1: Fluxograma das etapas de desenvolvimento do projeto Sling.

5.2. RESULTADOS DO PROJETO INFORMACIONAL

No primeiro estágio do estudo do projeto informacional do *sling*, Souza (2016) em conjunto com o um grupo de engenheiros formulou um cartão com treze itens que expressavam características de um produto destinado à sustentação e movimentação contra a ação da força da gravidade, apresentados na Tabela 5.1. Esta lista foi entregue a dez terapeutas ocupacionais, sendo estes os usuários intermediários do produto em questão, pois eles são responsáveis em prescrever e auxiliar o paciente na utilização do aparelho. Com o intuito de levantar quais são os principais parâmetros presentes neste produto, foi solicitado aos entrevistados que pontuassem em cada item a importância de cada característica listada, de acordo com a escala numérica para 9 (muito importante), 3 (importante) e 1 (pouco importante). Juntamente com a lista, foi disponibilizada como recurso audiovisual, uma imagem do modelo A (Figura 2.4) e estimulou-se uma conversa livre e individual para descobrir quais eram as necessidades e desejos do grupo em relação ao produto.

Tabela 5.1: Descrição das necessidades do usuário identificadas para o projeto do *sling*
(Fonte: Souza, 2016)

Item	Descrição característica
Bilateral	Sustentação e movimentação unilateral ou bilateral
Flexibilidade	Uso junto a diferentes mobiliários (por exemplo, leito hospitalar e cadeira de rodas)
Montagem rápida	Facilidade de encaixar as partes do dispositivo para proceder a uso
Peso paciente	Capacidade de sustentar o(s) membro(s) sem deformação das partes
Resistência do material	Capacidade de manter a originalidade do material, sem danos após uso
Conforto	Proteção, aconchego durante o uso do dispositivo
Higienização	Possibilidade de limpeza das partes
Apoio do antebraço	Desenho do componente que está em contato com o braço para suspensão
Estabilização mão	Desenho do componente que está em contato com a mão em suspensão
Regulagem altura	Possibilidade de ajuste de altura do dispositivo à demanda do usuário
Fácil de guardar	Facilidade para armazenar, acondicionar.
Fácil de desmontar	Facilidade para separar as partes
Preço	Valor para aquisição em loja

Em seguida, Souza (2016) selecionou os itens de maior relevância, levantados na Tabela 5.1, e converteu estes parâmetros em uma linguagem técnica de engenharia. Estes parâmetros foram inseridos em uma matriz QFD apresentado no Anexo I. O preenchimento das relações na Matriz da Casa da Qualidade teve como base a pesquisa feita com os terapeutas ocupacionais. A Figura 5.2 mostra a matriz de correlação, parte da matriz QFD que mostra a correlação entre os requisitos do usuário e os requisitos técnicos, podendo ser uma relação forte (◎), relação moderada (◐), relação fraca (△) ou sem relação (sem símbolo).

Requisitos Técnicos	Simetria	Geometria	Usabilidade	Resistência Mecânica	Ergonomia	Transportabilidade	Vendabilidade		Importância (Usuário)		Argumento de Venda	Peso Absoluto	Peso Relativo (%)
Requisitos do usuário													
Bilateral	◎	◐			◐		△		3		1,5	4,5	7,1
Flexibilidade	◐	◎			◐	◐			9		1,5	13,5	21,3
Montagem Rápida		◐	◎	△					3		1,0	3,0	4,7
Resistência da Estrutura	△	◐		◎	△		◐		9		1,0	9,0	14,2
Regulagem de Altura	◐				◎				9		1,2	10,8	17,1
Armazenamento		△			△	◎	△		9		1,5	13,5	21,3
Preço				△	△	△	◎		9		1,0	9,0	14,2
Importância Absoluta	122,4	184,5	27	39	182,7	171	126	852,6				63,3	100%
Importância Relativa (%)	14,4	21,6	3,2	4,6	21,4	20,1	14,8	100%					

Figura 5.2: Parte da Matriz QFD do *sling*, denominada Casa da Qualidade que relaciona os requisitos do usuário com os requisitos técnicos em quatro graus distintos: relação forte (dois círculos ou peso 9), média (um círculo ou peso 3), fraca (triângulo ou peso 1) ou nula. (Fonte: Souza, 2016).

Como resultado da matriz QFD, os requisitos do cliente avaliados com maior grau de importância foram:

- “Flexibilidade”, correspondendo a 21,3%;
- “Armazenamento” (21,3%);

- “Regulagem de altura” (17,1%).

Nesta mesma matriz, os requisitos técnicos avaliados com maior grau de importância foram:

- “Geometria”, correspondendo a 21,6%;
- “Ergonomia” (21,4%);
- “Transportabilidade” (20,1%).

Pela análise dos resultados, conclui-se que o projeto do *sling* deveria conter as seguintes características: um projeto focado na análise estrutural que prioriza a análise de falha da estrutura e da estabilidade do aparelho; o projeto deve possuir volume compacto com o objetivo de facilitar o armazenamento e locomoção; o projeto deve ser simétrico e possibilitar o uso para um ou para os dois membros; o projeto deve buscar a intercambiabilidade em relação ao seu uso em diferentes situações e mobiliário, ou seja, ser compatível a camas hospitalares, cadeiras, poltronas, cadeiras de roda, poltronas e mesas.

5.3. PROJETO CONCEITUAL

O projeto conceitual tem o intuito de gerar soluções para cada função do projeto e, com base no projeto informacional, escolher uma configuração para iniciar ao pré-dimensionamento. Neste trabalho foram utilizadas duas ferramentas, a análise funcional e a análise morfológica.

5.3.1. ANÁLISE FUNCIONAL

A análise funcional auxilia a equipe de projetistas multidisciplinar a entender as funções básicas que o projeto visa cumprir. Neste processo é utilizada a linguagem semântica, pois torna o projeto livre de soluções técnicas existentes e direciona a busca de soluções focada nos princípios físicos. Desta forma, busca-se com esta abordagem obter funções neutras, de forma a prever novas soluções. A Figura 5.3 apresenta o desdobramento funcional do aparelho *sling*.

Figura 5.3: Estrutura funcional para o sistema *sling*.

Nota-se que a função básica ou principal deste projeto, da qual se origina as outras funções, é controlar a ação da gravidade sobre os membros superiores, sendo uma função vaga em termos de soluções técnicas. Porém a partir desta função básica é realizado o desdobramento em funções secundárias com o objetivo de encontrar todas as subfunções que o aparelho deve atender para garantir o seu funcionamento. Com as funções secundárias definidas, os projetistas podem procurar soluções técnicas para cada uma delas separadamente e, ao final, escolher o conjunto mais adequado para gerar o protótipo, priorizando os itens destacados no projeto informacional.

5.3.2. ANÁLISE MORFOLÓGICA

Na análise morfológica, algumas soluções técnicas são para as funções secundárias de maior destaque na análise funcional. A Tabela 5.2 mostra as soluções

sugeridas para cada função de projeto. O objetivo desta análise é escolher um conjunto de soluções para definir a configuração do aparelho.

Tabela 5.2: Análise morfológica do *sling*.

Funções do projeto			Soluções			
(1)			(2)		(3)	(4)
Prover deslocamento			Rodas giratórias	Rodas fixas	Rodas giratórias com trava	Cilindro emborrachado
Prover	Apoio	da Estrutura	Base única com o formato em “U”	Bases Separadas, com o formato em “X”	Base com barras paralelas e ajuste regulável	Tripé
Regular Altura			Sistema Telescópico com pino para travar	Parafuso de potência	Macaco (semelhante ao encontrado em automóveis)	
Regular Largura			Sistema Telescópico com pino para travar	Várias opções de largura soldadas na base superior	Junta deslizante com trava	Sistema “leque”
Eliminar a ação da gravidade			Engrenagem dentada (sustentação devido a geometria do aparelho)	Polia/Correia (sustentação devido ao contra peso)	Polia/Cabo de aço (sustentação devido ao contra peso)	Mosquetão/Cabo de aço/molas (sustentação devida à geometria do aparelho)
Sustentar o Membro			Faixa 8 ²	Faixa elástica	Berço para o braço	Combinação faixa 8 e luva

Com o intuito de avaliar diversas opções de projetos, foram geradas duas configurações do *sling* utilizando um conjunto de diferentes combinações das opções apresentadas na análise morfológica. Para mostrar a evolução do projeto, a Figura

² A Faixa 8 é a opção utilizada pelo *sling* avaliado no trabalho de Souza (2016) e ilustrado na Figura 2.4.

5.4(a) mostra a opção inicial da equipe de projetos. Nesta opção, os conceitos selecionados foram: rodas giratórias com trava para prover o produto com deslocamento; bases separadas no formato em “X” para opção de prover apoio da estrutura; sistema telescópico com pino de travamento na opção de regular a altura e largura; mosquetão, cabo de aço e molas na opção de eliminar a ação da gravidade; e berço para o braço na opção de sustentar o membro. Entende-se por sistema telescópico o ajuste de largura ou altura onde o pórtico possui dois perfis estruturais similares, porém com áreas distintas, o que permite a introdução e a movimentação de um perfil dentro do outro.

Figura 5.4: Desenhos tridimensionais gerado no SolidWorks® 2013 sobre o projeto *sling* resultante da análise morfológica (a) primeira opção e (b) segunda opção.

A Figura 5.4(b) mostra mais uma opção da equipe de projetos. Nesta opção, os conceitos selecionados referentes às funções de projeto da Tabela 5.2 foram respectivamente: cilindro emborrachado; base com barras paralelas e ajuste regulável; sistema telescópico com pino para travar o ajuste de altura; sistema “leque” para ajuste de largura; mosquetão, cabo de aço e molas para suspender o braço; e berço para o braço para apoiar o membro. Nesta segunda opção, o sistema de ajuste da largura do aparelho é realizado por um sistema “leque” localizado na junta estabelecida entre os pórticos verticais que permite a rotação entre eles, realizando a ação de afastamento ou aproximação das bases inferiores.

Estas duas configurações foram apresentadas a dois terapeutas ocupacionais com o intuito de avaliá-los e verificar se o aparelho atende as necessidades do cliente. Como resultado, outros requisitos foram incorporados ao projeto. Primeiramente, comentou-se sobre priorizar um design moderno e com contornos suaves, para dar impressão de uma estrutura delicada, mas levando em consideração a resistência estrutural. Depois foi levantada a possibilidade de projetar uma estrutura intercambiável, com opções para o uso com o paciente em diferentes posições, de pé ou sentado, e a utilização do aparelho junto a mesas, cadeiras, poltronas, cadeiras de rodas e camas hospitalares. E, por fim, foi abordada a questão da compactação do aparelho, a qual serviria não apenas para o seu armazenamento nos hospitais e em domicílios, mas também possibilitando a utilização do *sling* para apenas um membro de forma compacta. A Figura 5.5 e a Figura 5.6 ilustram os novos requisitos incorporados no projeto após essa reunião.

Figura 5.5: Layout do projeto *sling* mostrando a modularidade do protótipo, com ajustes na altura, na base e com uma dobra central que possibilita a atuação em um ou nos dois membros.

Figura 5.6: *Sling* como uma estrutura intercambiável, tanto na possibilidade de uso do aparelho no chão com o usuário de pé ou sentado, quanto o uso do aparelho junto a uma mesa.

Sendo assim, uma terceira opção foi formulada com base nestes novos parâmetros. A Figura 5.7 mostra o croqui desta configuração, que teve as seguintes soluções das funções de projetos: rodas giratórias com trava; base com barras paralelas e ajuste regulável; parafuso de potência para ajuste de altura; junta deslizante com trava para ajuste de largura; mosquetão, cabo de aço e molas para suspender o braço; faixa 8 para acomodar o membro.

Figura 5.7: Croqui da terceira opção do projeto *sling* resultante da reunião interdisciplinar.

A Figura 5.7 ainda revela os ajustes pensados para o protótipo, sendo eles: (A) junta articulada que permite dobra ou fechamento do aparelho em seu ponto médio, possibilitando a utilização do mesmo para um ou dois membros além de auxiliar no seu armazenamento; (B) junta deslizante com trava que permite a movimentação do braço no plano horizontal; (C) regulagem de altura da estrutura superior do *sling*; (D) movimentação das bases para que elas fiquem paralelas mesmo quando o aparelho estiver fechado; (E) deslocamento da estrutura principal do *sling* em relação à base para alterar seu centro de gravidade e possibilitar a sua utilização na posição fechada para apenas um membro.

Ao se discutir o projeto com a equipe de engenheiros envolvidos, algumas mudanças foram apresentadas antes a avaliação final do grupo de terapeutas

ocupacionais. Primeiramente, optou-se por utilizar um sistema telescópico com um pino de trava, semelhante a regulagens em cadeiras de rodas, para o ajuste de altura destacado como item C na Figura 5.7. Nesta mesma figura, para o ajuste da largura dos braços do usuário, indicado pelo item B, optou-se pela solda de diversas opções de ganchos na estrutura que permite o rápido encaixe do mosquetão, responsável pela ligação do subconjunto de sustentação do braço com a estrutura principal do *sling*, na posição mais ergonômica para o paciente. Estas decisões foram tomadas com base nos custos dos itens e no critério de estabilidade da estrutura.

Figura 5.8: Configuração do *sling* avaliado pelo grupo de terapeutas ocupacionais, com a inclusão das barras de fixação entre bases. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.

Em prol da estabilidade do equipamento, também foram incluídas no projeto duas barras para ligarem com as bases móveis, mostrada na Figura 5.8. Como o usuário deve ser alocado abaixo da haste vertical superior, sendo que este pode estar em uma cadeira de rodas ou em uma cama hospitalar, as barras de fixação entre bases foram projetadas para que seu perfil encaixasse com fissuras presentes na base, possibilitando a sua inclusão e remoção no equipamento com facilidade.

Para a sustentação do braço, a solução inicial de utilizar mosquetão ligado a um sistema de cabo de aço, molas e uma haste paralela ao braço foi mantida. Porém,

Souza (2016) sugeriu duas opções de alças de apoio ao membro, como ilustrado na figura XX.

Figura 5.9: Esboço final do conceito da alça de sustentação do braço (a) modelo em “8” e (b) modelo em “V” invertido. (Fonte: Souza, 2016)

Figura 5.10: *Mock-up* da configuração elegida para dar continuidade ao projeto do *sling*, com os nomes de suas estruturas.

5.3.3. RESULTADO DA AVALIAÇÃO DO SLING PELO GRUPO DE TERAPEUTAS OCUPACIONAIS

Com configuração do *sling* estabelecida, foram realizadas reuniões com terapeutas ocupacionais para a avaliação das características técnicas, desdobradas em funções de projeto. Segundo Souza (2016), com a identificação dos participantes pelos critérios de inclusão, cinco terapeutas da cidade de Ribeirão Preto/SP e seis do município de Uberaba/MG, totalizando onze terapeutas ocupacionais constituíram a amostra.

Para a realização de uma avaliação eficaz, um protótipo funcional em escala real foi fabricado, para que o grupo de terapeutas pudesse interagir com o *sling* e apontar os pontos positivos e negativos desta configuração, listado na Tabela 5.3. Na avaliação, todos os avaliadores tiveram que montar e desmontar o *sling*, além de simular a utilização com o paciente. Como comenta Souza (2016), quando perguntados sobre o que mudariam no protótipo, apontaram: diminuiriam o peso, facilitariam a desmontagem, alterariam a forma de ajuste da regulação de altura e modificariam o sistema que permite o movimento do braço (que estava difícil e limitado).

Tabela 5.3: Relação dos aspectos positivos e negativos elencados pelos terapeutas (Fonte: Souza, 2016)

<i>Pontos positivos</i>	<i>Pontos negativos</i>
Interessante	Necessita ajuste
Fácil de guardar	Movimentação braço limitada
Não ocupa espaço	Montagem difícil (encaixe peças)
Versátil	Desmontagem difícil (desencaixe de peças)
Funcional	Pesado
Fantástico	Instável na base

Assim, após a identificação de inadequações técnicas que incomodaram os terapeutas ocupacionais, foram sugeridas as seguintes mudanças no projeto, ilustradas pela Figura 5.11:

- Alterar sistema de encaixe da haste vertical na base [a], melhorando a estabilidade da estrutura;
- Substituir os ganchos soldados na estrutura principal do *sling* [b] por uma estrutura que permita movimento do braço no plano frontal para sistema de deslizamento;
- Alterar a solução proposta no ajuste de regulagem da altura do equipamento [c];
- Ajustar as alças de apoio do braço (alça do punho com dimensões diferentes e alça do cotovelo com dimensões iguais) [d].

Figura 5.11: Protótipo funcional do *sling*, sendo [a], [b], [c] e [d] itens sugeridos para passar por alterações sugeridos na avaliação dos terapeutas; [e] e [f] itens acrescentados pelo Autor e Souza (Fonte: Souza, 2016)

5.3.4. MELHORIA NO PROTÓTIPO SLING

Atentando-se as dificuldades apresentadas anteriormente foram apresentadas algumas soluções para serem aplicadas no protótipo. Primeiramente, para possibilitar a mobilidade do braço do usuário no plano horizontal, propõe-se a inclusão de um eixo fixado na haste vertical superior que fosse compatível com um rolamento de deslizamento axial e que, contendo uma carcaça que permite o encaixe com o mosquetão, possibilitasse a ligação com o sistema de sustentação dos membros superiores, como está ilustrado na Figura 5.12. Com esta solução, o braço do usuário pode correr livre neste plano, não necessitando de trava, segundo o grupo de terapeutas avaliadores. Outra mudança foi a inclusão de mais uma opção de encaixe no cabo de aço, o que permite um ajuste “fino”, ou mais preciso, em relação a altura do braço da paciente.

Figura 5.12: Nova opção para o acoplamento do sistema de movimentação e sustentação do membro superior do *sling*. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.

Em relação ao sistema de regulação de altura, algumas propostas foram apresentadas para sanar os problemas levantados pelos terapeutas ocupacionais. Para garantir a concentricidade entre o furo responsável pela regulação de altura

encontrada nas hastes verticais e diminuir o peso da estrutura, foi realizado um rasgo na lateral da haste vertical superior com o intuito de encaixar um parafuso-guia entre estes dois componentes, como é ilustrado na Figura 5.13. Ademais, foram incluídos pinos com molas, similares aos utilizados em cadeiras de rodas, os quais foram presos à estrutura, possibilitando travar o sistema de altura, ou deixar a estrutura correr livre, como indicado na Figura 5.14.

Figura 5.13: Nova configuração da haste vertical superior do *sling*. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.

A sensação de instabilidade do *sling* citada pelos terapeutas foi devido à presença em um rolamento axial que está localizado entre a base e a haste vertical superior e estava dimensionado com certa folga para possibilitar o encaixe. Para suprir este problema foi dimensionado um sistema mais robusto, com dois rolamentos axiais em cada base, para proporcionar o mínimo de folga possível para o sistema. A Figura

5.15 mostra a vista explodida da parte inferior do *sling* com destaque para este sistema aonde se encontram os rolamentos.

Figura 5.14: Detalhe na nova configuração do sistema de regulagem de altura. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.

Figura 5.15: Vista explodida da parte inferior do conjunto *sling*. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.

Por fim, para melhorar o posicionamento entre as bases, incluiu-se no projeto um sistema de articulações junto com dois segmentos do perfil estrutural de alumínio que foram acoplados nas extremidades traseiras de cada base, deixando a base mais rígida e auxiliando também na movimentação realizada para troca da configuração do *sling* de “aberto” para “fechado”. A Figura 5.16 mostra a configuração final do *sling* em suas duas configurações.

Figura 5.16: *Sling* final na (a) configuração aberta e (b) configuração fechada. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.

CAPÍTULO 6

6. PROJETO PRELIMINAR

Neste capítulo será realizado um dimensionamento da estrutura, tendo como base à análise estática dos principais elementos que compõem o projeto, e o projeto das molas que serão utilizadas para sustentar os membros superiores.

6.1. PRÉ-DIMENSIONAMENTO DO *SLING*

Para iniciar o pré-dimensionamento, se faz necessário o conhecimento dos espaços do ambiente e dos objetos que o projeto se adaptará: dimensões dos vãos de portas, espaços internos de edifícios e casas bem como as dimensões de cadeiras de rodas e camas hospitalares. Como foi discutido anteriormente, o *sling* possui duas configurações de uso: configuração “aberta”, ilustrada na Figura 5.16(a), que deverá ter dimensões apropriadas para envolver uma pessoa em uma cadeira de rodas ou em uma cama hospitalar; e configuração “fechada”, ilustrada na Figura 5.16(b), que deverá ter dimensões apropriadas para o transporte do *sling* dentro de edifícios ou casa além de ser o mais compacto possível para auxiliar no seu armazenamento, sendo em casas ou nos centros de reabilitações. As principais dimensões do *sling* em sua configuração aberta estão apresentadas na Figura 6.1.

Figura 6.1: Principais dimensões do *sling* aberto (a) vista frontal e (b) vista lateral.

Para iniciar a escolha das dimensões do *sling* foi necessário conhecer as posições anatômicas do ser humano na posição sentado, para o paciente, e de pé, para o terapeuta ocupacional. Para isso, utilizou-se da estimativa do comprimento de partes do corpo sentado dado por Iida (2005), ilustrado na Figura 6.2, em conjunto com a estimativa das alturas medianas, máxima e mínima, entre pessoas de ambos os sexos com idade entre 8 a 75 anos do Censo de 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esta pesquisa aponta uma altura mediana mínima de 129,7 cm e a máxima de 173,0 cm. Opções para pessoas com até 2,0 metros de altura também foram consideradas.

Figura 6.2: Estimativa do comprimento de partes do corpo sentado, em função da estatura H. (Iida, 2005)

Dados referentes ao alcance manual frontal de uma pessoa em pé ou sentada em uma cadeira de rodas foram obtidas com base na Norma Brasileira ABNT NBR 9050 para Acessibilidade e edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos (2004), ilustrada pela Figura 6.3 e Figura 6.4. Esta mesma norma também fornece as dimensões da área ocupada por uma pessoa utilizando uma cadeira de rodas e as dimensões padronizadas de uma porta, mostrada pela Figura 6.5 e Figura 6.6, respectivamente.

Figura 6.3: Alcance manual frontal de uma pessoa em pé, medida em metros. (Fonte ABNT NBR 9050, 2004, p.9)

Figura 6.4: Alcance manual frontal de uma pessoa sentada em uma cadeira de rodas, medida em metros (Fonte ABNT NBR 9050, 2004, p.10)

Figura 6.5: Dimensões em metros do módulo de referência da área ocupada por uma pessoa utilizando uma cadeira de rodas. (Fonte ABNT NBR 9050, 2004, p.6)

Figura 6.6: Dimensões em metros de portas com revestimento e puxador horizontal. (Fonte ABNT NBR 9050, 2004, p.52)

O dimensionamento do *sling* teve início com a definição da largura entre bases “*l*” (Figura 6.1) que deve ser compatível com a entrada de uma cadeira de rodas ou de uma cama hospitalar. Realizando uma pesquisa sobre as dimensões de camas hospitalares, tomou-se como base a largura de uma cama Fowler que contém 880,0 mm de largura (Cama Fowler, 2015). Decidiu-se que seria aplicada uma margem dimensional de 1,5 em relação a esta largura para garantir a adaptabilidade em outras camas hospitalares. Sendo assim, assumiu-se a largura máxima uma cama hospitalar como sendo de 1320,0 mm. Comparando o valor da largura da área ocupada por uma pessoa sentada de uma cadeira de rodas, mostrada na **Error! Reference source not found.**, sendo de 800,0 mm, com o valor largura da cama hospitalar estabelecida anteriormente, sendo que a largura entre bases “*l*” do *sling* deve ter o maior valor dentre as duas opções, ou seja, de 1320,0 mm.

Dando sequência ao projeto preliminar, combinou-se os dados da estatura média “*H*” do Censo de 2010 com a relação da distância entre os braços de $0,229 \cdot H$, indicado na Figura 6.2, resultando em uma distância entre braços “*a*” (Figura 6.1) mínima de 296,0 mm. Não há necessidade de calcular a distância máxima entre os braços pois o equipamento será projetado para o membro se movimentar até encostar na haste vertical do *sling*, tendo a largura de 1320,0 mm. Já a altura dos braços “*H_b*” (Figura 6.1) foi estabelecida de acordo com a Norma da ABNT NBR 9050 (2004), mostrado no item A3 da Figura 6.4, a qual varia no intervalo de 750,00 mm a 900,0

mm. A altura da parte inferior da articulação " H_{es} " (Figura 6.1) foi estabelecida de forma a ser ergonômica para o terapeuta que irá manusear a articulação e a subsistema de sustentação dos membros, sendo assim esta altura terá sua mediana definida pelo alcance máximo mostrado no item E1 da Figura 6.3, tendo o valor de 1550,0 mm.

A altura de ajustador da altura do aparelho " H_r " (Figura 6.1) foi estabelecida em relação à altura ergonômica para uma pessoa que trabalha em pé, indicado pelo item C1 ilustrado na Figura 6.3, definido neste projeto com o valor de 990,0 mm. A altura máxima do *sling* " H_{max} " (Figura 6.1) deve ser menor que a altura do vão da porta adaptada ao valor 2,10 metros, mostrado na Figura 6.6. Por fim, foi sugerido que o comprimento da base " c " (Figura 6.1) tivesse o valor de 1200,0 mm, para contemplar todo o comprimento da cadeira de rodas ilustrado na Figura 6.5, e a distância entre a parte frontal da base e a haste vertical " b " (Figura 6.1) tivesse o valor de 600,0 mm. A Tabela 6.1 mostra as dimensões principais do *sling* comentadas anteriormente.

Tabela 6.1: Principais dimensões do *sling*

Dimensões do <i>Sling</i>	Símbolos	Comprimento [mm]
Altura máxima	H_{max}	1725,0
Altura da parte inferior da articulação	H_{es}	1550,0
Altura do ajuste de altura do aparelho	H_r	990,0
Altura dos braços do usuário	H_b	Entre 750,0 a 900,0
Distância entre os braços do usuário	a	Entre 296,0 a 396,0
Distância entre a parte frontal da base e a haste vertical	b	600,0
Comprimento da base do <i>sling</i>	c	1200,0
Largura entre as bases	l	1320,0

6.2. DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS

Como próxima etapa do projeto preliminar, definiu-se a forma e os materiais dos elementos que constituem o *sling*. Nos equipamentos hospitalares, utilizam-se elementos metálicos como alumínio, aço inox e aços tratados quimicamente para não

sofrerem corrosão para componentes estruturais. Dentre estes materiais, o mais indicado para o caso do *sling* é o alumínio, devido a sua baixa densidade se comparado com os aços, o que facilitará a manipulação do aparelho pelo terapeuta ocupacional.

Devido às dobras na haste vertical superior, a estrutura principal foi projetada para utilizar componentes tubulares de seção circular, o que também facilita na aplicação do sistema telescópico para o ajuste de altura. De acordo com Buzinelli (2000), o alumínio mais indicado para esta aplicação é o A₆₀₆₁, pois além de ser encontrado em perfil tubular, este material é utilizado resistente a esforços mecânicos, comumente utilizados em estruturas mecânicas, civis e navais.

Contudo, devido à falta de tubos de alumínio em São Carlos e região, aliado ao curto período destinado a construção do protótipo, optou-se por realizar fabricação do protótipo com uma estrutura tubular de aço-carbono 1020. Este material também possui propriedades mecânicas adequadas para ser utilizado em componentes estruturais, porém tem a desvantagem de ser um material de maior densidade, resultando no aumento considerável na massa do aparelho projetado, além de necessitar de um revestimento para evitar corrosão.

Em seguida foram escolhidas as dimensões da estrutura principal do *sling*, a qual contém três componentes: a base móvel, a haste vertical inferior e a haste vertical superior, como observada na Figura 5.10. Observando catálogos de fornecedores de tubos de aço, optou-se para realizar a primeira análise, o tubo com diâmetro de $1\frac{1}{2}$ " (ou 38,10 mm) com espessura de 1,00 mm para a haste vertical inferior e o tubo com diâmetro de $1\frac{1}{4}$ " (ou 31,75 mm) com espessura de 2,00 mm para a haste vertical superior.

Optou-se também por utilizar perfis estruturais de alumínio, ilustrado na Figura 6.7, que devido à geometria com ranhuras, permite a sua fácil adaptação e montagem em relação a outros componentes, como se pode notar na Figura 6.8.

(a)

(b)

Figura 6.7: Perfis estruturais de alumínio (a) exemplo de montagem e (b) configuração com largura de 45 mm e ranhura de 10 mm. (Fonte: BOSCH, 2015)

(a)

(b)

Figura 6.8: Componentes que podem ser acoplados ao perfil estrutural de alumínio (a) rodízio e (b) articulação. (Fonte: BOSCH, 2015)

Após a escolha dos materiais e dos perfis da estrutura principal além das dimensões presentes na Tabela 6.1, foi possível gerar um croqui com as principais cotas, com o objetivo de facilitar a visualização para os cálculos das deformações e

falhas. Este croqui se encontra na Figura 6.9. A Figura 6.11 mostra a configuração do *sling* antes da análise estática.

Figura 6.9: Vista frontal do croqui do *sling*. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.

Figura 6.10: Detalhe no ajuste de altura do *sling* presente na Figura 6.9, com destaque para as dimensões dos tubos. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.

Figura 6.11: Configuração do *sling* para a análise de deformações e falhas em elementos finitos. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.

Para realização das análises de deformações e falhas, bem como para o dimensionamento do sistema de sustentação dos membros superiores, estimou-se a massa de um braço com base na pesagem no Laboratório de Anatomia da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) de uma amostra seca que continha este membro junto com parte tronco, resultando em um valor de 3,9 kg. Porém, considerando os líquidos presentes no braço de uma pessoa, a massa deste membro foi superestimada em 5 kg.

6.3. VERIFICAÇÃO ESTATICA PELA ANÁLISE DOS ELEMENTOS FINITOS

Utilizando o desenho em formato CAD (*Computer Aided Design*) do *sling*, ilustrado na Figura 6.11, foi possível realizar sua análise estática com a utilização de uma ferramenta CAE (*Computer Aided Engineering*) denominada ANSYS® Workbench™ V.15. Para aplicação deste modelo numérico assume-se que os materiais utilizados, no caso alumínio e aço, são transversalmente isotrópicos.

Segundo Callister (2000), para o aço 1020 a tensão no limite de escoamento é de 210 MPa e a tensão de ruptura é de 380 MPa. Buzinelli (2000) elucida as propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061-T6 já levando em consideração os devidos coeficientes de segurança, sendo a resistência à ruptura por tração “ σ_{tr} ” de 111,00 MPa e a resistência ao escoamento por tração “ σ_{te} ” de 109,00 MPa.

Para realizar a análise em elementos finitos, optou-se por dividir o conjunto do *sling* em duas partes: superior e inferior. Na parte superior encontram-se as hastes verticais superiores, a articulação central e o rolamento de deslizamento axial junto com sua carcaça que fornece apoio ao sistema de sustentação do membro superior, enquanto o resto da estrutura pertence à parte inferior.

6.3.1. ANÁLISE DA PARTE SUPERIOR DO *SLING* EM CONFIGURAÇÃO ABERTA

Figura 6.12: Condições de contorno e restrições aplicadas a parte superior do *sling* na configuração aberta.

Primeiramente foram definidas as condições de contorno (cargas) e restrições (apoios) na parte superior do *sling*. Como observado na Figura 6.12, foram inclusas a ação da gravidade, indicada pelo item A, e as forças de reação de 49,05 N, devido ao

peso do braço ($F = m \cdot g = 5 \cdot 9,81 = 49,05 \text{ N}$), indicadas pelos itens F e G, as quais agem diretamente na carcaça do rolamento de deslizamento axial. Além disso, os furos da haste vertical superior que estão em contato com os pinos responsáveis pela regulação de altura do aparelho foram considerados como apoios engastados, indicados pelos itens B, C, D e E, tornando possíveis os cálculos das reações que serão aplicadas no pino presente na parte inferior do *sling*.

Para implementar a análise em elementos finitos, torna-se relevante criar uma malha adequada para a aplicação. Para o caso do *sling*, aplicou-se o elemento 3D denominado “tetraetro” com tamanho definido de 5 mm, para a haste vertical superior e 2 mm para o restante dos componentes. A escolha deste tipo de elemento se deve a significativa redução da complexidade do modelo e do tempo de processamento computacional. A Figura 6.13 mostra o refinamento dos principais componentes da parte superior do *sling*.

Figura 6.13: Malha de elementos finitos dos principais elementos da parte superior do *sling* gerada no ANSYS®.

O software ANSYS® também exibe diversos parâmetros como a quantidade de elementos, o número de nós, a qualidade da malha, as reações de apoio da estrutura e os resultados das análises de deslocamento, deformação, tensão e energia do componente ou conjunto em questão.

Para a parte superior do *sling*, a malha analisada apresentou 295539 elementos e 529948 nós. Avalia-se a propriedade da malha através de sua métrica observando a qualidade dos elementos e a relação de aspecto. O parâmetro da qualidade dos elementos é avaliado em uma faixa variável entre 0 a 1, sendo que 1 aponta um sólido perfeito e 0 mostra que o volume do elemento é nulo ou negativo. A relação de aspecto não possui valor de fundo de escala, no entanto, valores mais próximos a 1 indicam elementos próximos aos equiláteros. A Figura 6.14 e Figura 6.15 apresentam os parâmetros de métrica da malha.

Figura 6.14: Gráfico da qualidade dos elementos da malha da parte superior do *sling*.

Figura 6.15: Gráfico da relação de aspecto dos elementos da malha na parte superior do *sling*.

Figura 6.16: Resultado gerado na simulação computacional para o deslocamento total da parte superior do *sling* na configuração aberta.

Figura 6.17: Resultado gerado na simulação computacional para tensão equivalente de von-Mises da parte superior do *sling* na configuração aberta.

O programa também proporciona as médias da qualidade dos elementos e da relação de aspecto, sendo para a parte superior do *sling* na configuração aberta de 0,764 e 2,104 respectivamente, ou seja, a malha apresenta qualidade satisfatória.

Por fim, executou-se o processamento do modelo com o intuito de obter soluções referentes ao deslocamento total “ ε ” e a tensão equivalente de von-Mises “ σ ”, resultando com os valores máximos de 1,1852 mm e 52,188 MPa, respectivamente, mostrados na Figura 6.16 e na Figura 6.17. O software ainda fornece o deslocamento em relação ao eixo y, tendo valor máximo de 1,1828 mm. A razão entre deslocamento vertical com a altura da haste vertical superior, a qual possui a dimensão de 812 mm, pode dar a noção aproximada da porcentagem de deslocamento resultante desta análise. Neste caso o valor é 0,001446, menor que o valor de 0,002 que delimita o regime elástico. A tensão equivalente também está abaixo da tensão de escoamento para o alumínio, material da articulação central onde se encontra o ponto de maior tensão da análise.

6.3.2. ANÁLISE DO CONJUNTO INFERIOR DO *SLING* EM CONFIGURAÇÃO ABERTA

Seguindo a mesma lógica aplicada para a parte superior, as forças e os momentos nos apoios fixos resultantes da simulação anterior proporcionaram as condições de contorno aplicadas nos pinos responsáveis pela regulagem de altura do aparelho. Como restrição, considerou-se que os rodízios atuam como apoios engastados. A Figura 6.18 mostra o conjunto em questão e a posição das cargas e apoios e a Figura 6.19 mostra exatamente onde foram aplicadas as cargas.

Para geração da malha deste conjunto, aplicou-se novamente o elemento 3D denominado tetraetro com tamanho de 6 mm para elemento com geometrias simples, 4 mm para elementos mais complexos e com tamanho de 1 mm para os pinos que sofrem os esforços. Como resultado, a malha gerada teve um total de 1317538 elementos e 2489267 nós. A Figura 6.20 mostra o refinamento da malha em algumas regiões.

Figura 6.18: Posição das condições de contorno e das restrições na parte inferior do *sling* da configuração aberta.

Figura 6.19: Posição das condições de contorno nos pinos responsáveis pela regulação de altura do *sling*.

Figura 6.20: Refinamento da malha em algumas regiões da parte inferior do *sling* (a) o ajuste de altura e (b) o assentamento do rolamento com a base inferior.

Analisando os parâmetros de métrica da malha, mostrados na Figura 6.21 e Figura 6.22, além de conhecer a média da qualidade dos elementos sendo de 0,748 e a média da relação de aspecto sendo de 2,569, conclui-se que a malha apresenta uma qualidade inferior à análise anterior, mas ainda se enquadra em padrões de uma qualidade satisfatória.

Figura 6.21: Gráfico da qualidade dos elementos da malha da parte inferior do *sling*.

Figura 6.22: Gráfico da relação de aspecto dos elementos da malha da parte inferior do *sling*.

Figura 6.23: Resultado gerado na simulação computacional para o deslocamento total da parte inferior do *sling* na configuração aberta.

Novamente foi executado o processamento do modelo, resultando no valor máximo de 0,164 mm para o deslocamento total “ ε ”, e de 333,07 MPa para a tensão equivalente de von-Mises “ σ ”, mostrados na Figura 6.23 e Figura 6.24, respectivamente. Devido à geometria extremamente complexa de diversos elementos que compõem esta parte da estrutura do *sling*, mesmo com um refinamento aceitável, o modelo apresentou um ponto concentrador de tensão, na região do contato de um

parafuso com o perfil estrutural de alumínio, apontando um valor de tensão máxima muito alta. Avaliando os pontos vizinhos a este ponto de tensão máxima, apenas foram encontradas tensões com valores abaixo de 36,729 MPa, concluindo que este valor muito alto pode ser desprezado.

Figura 6.24: Resultado gerado na simulação computacional para tensão equivalente de von-Mises da parte inferior do *sling* na configuração aberta.

Figura 6.25: Resultado gerado na simulação computacional para tensão equivalente de von-Mises nos pinos responsáveis pela regulagem de altura do sistema.

6.3.3. ANÁLISE DO SLING NA CONFIGURAÇÃO FECHADA

A análise de elementos finitos do *sling* em sua configuração fechada foi feita de modo similar à análise realizada para sua configuração aberta, sendo feita a mesma divisão da estrutura em parte superior e inferior, e ainda utilizando a mesma malha. Porém neste caso é analisado o peso de um braço na posição mais crítica como pode ser observado na Figura 6.26. Nesta figura apresenta a força da gravidade, indicada pelo item A, a força de reação devido ao peso do braço, indicado pelo item B, e os apoios engastados, indicados pelos itens C, D, E e F.

Figura 6.26: Condições de contorno e restrições aplicadas a parte superior do *sling* na configuração fechada.

Executando o processamento do modelo foi obtido um valor máximo de 145,73 MPa para a tensão equivalente de von-Mises “ σ ”. Novamente, observando a Figura 6.27 e a Figura 6.28, esta tensão máxima se encontra em um ponto concentrador de tensões, localizado na região que o parafuso está em contato com a articulação e a

haste vertical superior. Nos demais elementos desta estrutura, foram encontradas tensões equivalentes com valores abaixo de 50 MPa.

Figura 6.27: Resultado gerado na simulação computacional para tensão equivalente de von-Mises da parte superior do *sling* na configuração fechada.

Também foi obtido o valor máximo de 2,462 mm para o deslocamento total “ ε ” localizado na articulação central, como observado na Figura 6.29. Apenas o deslocamento no eixo y teve o valor máximo de 2,1853 mm, mostrando que a parte superior do sling nesta configuração e com estas condições de contorno pode apresentar uma deformação relevante, podendo acarretar em falhas mesmo com a análise da tensão mostrando valores abaixo da tensão de ruptura. Devido a este dado, se faz necessário um novo dimensionamento da articulação superior para garantir que as deformações desenvolvidas ainda estejam dentro do regime elástico.

Figura 6.28: Tensão equivalente de von-Mises da Figura 6.27 com ênfase na articulação.

Figura 6.29: Resultado gerado na simulação computacional para o deslocamento total da parte superior do *sling* na configuração fechada.

Aplicando a mesma metodologia realizada na configuração aberta do *sling* para encontrar as condições de contorno da parte inferior do aparelho, obteve-se para o deslocamento total “ ε ” o valor máximo de 1,024 mm e para a tensão equivalente de von-Mises “ σ ” um valor máximo de 148,92 MPa. A Figura 6.30 e a Figura 6.31 mostram estes resultados. Novamente, esta tensão máxima se encontra no parafuso que liga o rodízio com a base inferior, sendo que o restante da estrutura possui tensões inferiores a 60 MPa, como mostrado na Figura 6.32. O software também revelou que o deslocamento no eixo y tem o valor máximo de 0,37747 mm na região da articulação.

Figura 6.30: Resultado gerado na simulação computacional para o deslocamento total da parte inferior do *sling* na configuração fechada.

Figura 6.31: Resultado gerado na simulação computacional para tensão equivalente de von-Mises da parte inferior do *sling* na configuração fechada.

Figura 6.32: Tensão equivalente de von-Mises da Figura 6.31 com no parafuso que liga a base ao rodízio.

Com a finalização da análise em elementos finitos foi possível concluir que o projeto do *sling* está bem dimensionado para o uso na configuração aberta, utilizando a hipótese que a massa média de um braço é de 5 kg. Porém, na configuração fechada, a análise apontou uma grande deformação na articulação, item que deve ser reformulado nos trabalhos futuros.

6.4. SISTEMA DE SUSTENTAÇÃO DOS MEMBROS SUPERIORES: PROJETO DE MOLAS

Para a sustentação dos membros superiores em um projeto de *sling* é comum encontrar duas soluções: a sustentação por meio de um contrapeso, como indicado na Figura 3.12; ou a sustentação pela estrutura, indicado na Figura 3.13(b). Neste último caso, para suavizar os movimentos e garantir maior conforto para o indivíduo que está manuseando o *sling*, pode-se utilizar um conjunto de molas. Neste projeto optou-se pela utilização destas molas de extensão para sustentação dos membros com uma configuração similar ao mostrado na Figura 3.9(b), mas com a inclusão de duas molas paralelas, indicadas pela Mola 2 mostrado na Figura 6.33. Como observado na literatura e em aparelhos similares que utilizam molas para sustentação do braço, o conjunto de molas paralelas que sustentam os membros superiores é normalmente dotado de molas idênticas, sendo assim, neste projeto esta configuração também foi adotada. Outro fator que influenciou esta decisão foi devido ao fato de não ter sido realizado um estudo biomecânico do membro superior, mas como a massa do membro superior está superestimada e tomando como base que o paciente que irá utilizar o *sling* não tem força nos músculos para exercer uma carga extra no equipamento, considerou-se idênticas as forças de reação nas malas devido ao peso do braço.

A configuração deste projeto apresenta uma mola (Mola 1) em série com um conjunto de duas molas idênticas em paralelo (Mola 2). De acordo com a teoria sobre projetos de molas descritas no item A.1 do Apêndice I, em particular na Figura A.1 pode-se notar que a força em cada mola pertencente ao conjunto de molas em série é igual à força aplicada em todo o conjunto. Já a força aplicada em uma mola pertencente ao conjunto de molas em paralelo é igual a uma parcela da força total

aplicada no conjunto. Sendo assim, a Mola 1 será projetada para suspender o peso do braço de uma pessoa, pois é a mola que está em série, e a Mola 2, a qual está em paralelo, será projetada para suspender a metade do peso do braço do paciente.

Figura 6.33: Sistema de sustentação dos membros superiores do *sling*, com destaque para as molas de extensão. Desenho gerado no SolidWorks® 2013.

6.4.1. CÁLCULO DA MOLA 1

Antes de iniciar os cálculos para o projeto de molas dado no item A.1 do Apêndice I, é necessário definir alguns parâmetros como intervalo de força na mola, intervalo de deflexão da mola, o tipo de fio que será utilizado, o diâmetro do fio e o índice de mola.

O projeto desta mola será baseado no peso do braço de um paciente, que pode variar devido ao movimento do membro e a própria posição corporal do indivíduo. Considerou-se que este peso pode variar de 2 kgf (ou $F_{min}=19,62$ N) a 5 kgf (ou $F_{máx}=49,05$ N). Para a estimativa inicial, definiu-se que o intervalo de deflexão da mola fosse um intervalo pequeno, para não haver muita variação da altura do braço nos diversos pacientes e mesmo assim auxiliar na movimentação do membro, estipulando um valor médio próximo de 72 mm. Em relação ao material, os cálculos foram realizados para molas utilizando o fio musical (tipo de material mostrado na Tabela

A.1). Dentre as opções tabeladas de molas de extensão, optou-se pela configuração com o diâmetro do fio da mola de valor 2,20 mm e diâmetro externo da espira com 19,50 mm, resultando em um diâmetro médio da espira de 17,30 mm. O índice de mola “ C ” é definido pela razão entre o diâmetro de espira “ D ” e o diâmetro de fio “ d ”, como mostra a Equação 6.1, sendo que o intervalo preferido para “ C ” está entre 4 e 12. Para este caso, o índice de mola tem o valor de 7,86.

$$C = \frac{D}{d} \quad \text{Equação 6.1}$$

No próximo passo deve-se encontrar a tensão inicial da espira “ τ_i ”, dada pela média das seguintes equações:

$$\tau_i \cong -4,231C^3 + 181,5C^2 - 3387C + 28640 \quad \text{Equação 6.2}$$

$$\tau_i \cong -2,987C^3 + 139,7C^2 - 3427C + 38404 \quad \text{Equação 6.3}$$

Sendo “ τ_i ” expressa em psi. Realizando os cálculos com o índice de mola estipulado anteriormente, obtém-se que a tensão inicial da espira “ τ_i ” é de 14906,66 psi ou 102,78 MPa.

Para que a mola de extensão atue como dispositivo armazenador de energia potencial deve-se trabalhar com forças superiores a força de pré-carga “ F_i ”, a qual é responsável pela expansão inicial desta mola.

$$\tau_i = K_s \frac{8F_i D}{\pi d^3} \quad \text{Equação 6.4}$$

$$K_s = \left(1 + \frac{0,5}{C}\right) \quad \text{Equação 6.5}$$

Determinando o valor do fator de cisalhamento direto “ K_s ” dado na Equação 6.5, é possível encontrar o valor da força de pré-carga “ F_i ” pela Equação 6.4. Neste caso, o valor da força de pré-carga “ F_i ” é de 23,36 N, com o valor fator de cisalhamento direto “ K_s ” sendo de 1,06.

Antes de prosseguir, é importante determinar a força média “ F_m ” e a força alternada “ F_a ” aplicada nesta mola, resultantes da relação entre a variação do peso do braço dos pacientes, “ $F_{m\acute{a}x}$ ” e “ F_{min} ”, dadas pela Equação 6.6 e Equação 6.7:

$$F_m = \left(\frac{F_{m\acute{a}x} + F_{min}}{2} \right) = \left(\frac{49,05 + 19,62}{2} \right) = 34,335 \text{ N} \quad \text{Equação 6.6}$$

$$F_a = \left(\frac{F_{m\acute{a}x} - F_{min}}{2} \right) = \left(\frac{49,05 - 19,62}{2} \right) = 14,715 \text{ N} \quad \text{Equação 6.7}$$

Como resultado, a força média “ F_m ” tem o valor de 34,335 N e a força alternada “ F_a ” tem o valor de 14,715 N.

Dando continuidade, deve-se calcular a tensão média “ τ_m ” e a tensão mínima “ τ_{min} ” utilizando a Equação 6.4, porém substituindo a força de pré-carga “ F_i ” pela força média “ F_m ” e a força mínima “ F_{min} ”, respectivamente, chega-se na tensão média “ τ_m ” de 207,65 MPa e na tensão mínima “ τ_{min} ” de 118,66 MPa.

Como próximo passo, deve-se encontrar o fator de Wahl “ K_w ” e a tensão de cisalhamento alternada “ τ_a ” dada pelas seguintes equações:

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad \text{Equação 6.8}$$

$$\tau_a = K_w \frac{8F_a D}{\pi d^3} \quad \text{Equação 6.9}$$

Substituindo os valores nestas equações, encontra-se o fator de Wahl “ K_w ” com o valor 1,19 e a tensão de cisalhamento alternada “ τ_a ” com o valor de 72,29 MPa.

Como próximo passo, deve-se encontrar o limite de resistência à tração “ S_{ut} ”, o limite de resistência ao cisalhamento “ S_{us} ” e a resistência ao escoamento sob tração para o corpo da espira “ S_{ys} ”. De acordo com Norton (2004), o limite de resistência à tração é encontrado pela seguinte equação:

$$S_{ut} = Ad^b \quad \text{Equação 6.10}$$

Sendo “ A ” e “ b ” são definidos pela Tabela A.1 encontrado no Apêndice I, para materiais de arame nos intervalos de diâmetro especificados. Neste caso o material é o fio musical, indicado pelo número da ASTM como A228.

Em relação à resistência ao cisalhamento, testes bastante abrangentes mostraram que uma estimativa razoável do limite de resistência à torção de materiais usada comumente em molas é de 67% do limite de resistência do material, como mostrado na equação a seguir.

$$S_{us} \cong 0,67 S_{ut} \quad \text{Equação 6.11}$$

Para completar, a Tabela A.2 do Apêndice I mostra valores recomendados de resistência para escoamento, sob condições estáticas, do corpo da espira e extremidades para torção e flexão. Para o fio musical (A228) a resistência máxima de escoamento de torção segue a seguinte relação:

$$S_{ys} \cong 0,45 S_{ut} \quad \text{Equação 6.12}$$

Realizando o cálculo pela Equação 6.10, com os dados da Tabela A.1 para o fio musical (A228), encontra-se o valor de 1518,68 MPa para o limite de resistência à tração " S_{ut} ". Com este resultado aplicado na Equação 6.11, encontra-se o valor de 1012,96 MPa para o limite de resistência ao cisalhamento " S_{us} ". Utilizando o resultado do limite de resistência à tração e aplicando na Equação 6.12, encontra-se o resultado 683,41 MPa para a resistência ao escoamento sob tração para o corpo da espira " S_{ys} ".

Neste momento do projeto, deve-se decidir se as molas são jateadas ou não-jateadas para definir limite de resistência relativo às tensões alternadas, encontrado nas próximas equações:

$$S_{ew} \cong 45,0 \text{ kpsi (310 MPa)} \quad \text{para molas não-jateadas} \quad \text{Equação 6.13}$$

$$S_{ew} \cong 67,5 \text{ kpsi (465 MPa)} \quad \text{para molas jateadas} \quad \text{Equação 6.14}$$

Decidiu-se que as molas utilizadas no projeto são não-jateadas, sendo assim, o limite de resistência relativo às tensões alternadas " S_{ew} " tem o valor de 310 MPa.

Já o limite de resistência à fadiga sob carregamento alternado é dado pela seguinte equação:

$$S_{es} = 0,5 \frac{S_{ew} S_{us}}{S_{us} - 0,5 S_{ew}} \quad \text{Equação 6.15}$$

Substituindo os valores na Equação 6.15, tem-se que valor do limite de resistência à fadiga sob carregamento alternado “ S_{es} ” é de 183,00 MPa.

Uma forma de avaliar se ocorrerão falhas mecânicas no projeto de molas é observar os coeficientes de segurança. Se estes valores estiverem com valores acima de 1, então o projeto está bem dimensionado. E o coeficiente de segurança para uma carga dinâmica nas espiras é calculado segundo a seguinte equação:

$$N_{fs} = \frac{S_{es}(S_{us} - \tau_{min})}{S_{es}(\tau_m - \tau_{min}) + S_{us}\tau_a} \quad \text{Equação 6.16}$$

Realizando as substituições dos valores da Equação 6.16, tem-se que o valor do coeficiente de segurança para uma carga dinâmica nas espiras “ N_{fs} ” é de 1,99.

As tensões nos ganchos de extremidade também precisam ser calculadas. Utilizando os parâmetros observados na Figura A.15(a), descrito no item A.3 do Apêndice I, as tensões devidas à flexão nos ganhos são determinadas a partir das seguintes equações:

$$C_1 = \frac{2R_1}{d} = \frac{2D}{2d} = C \quad \text{Equação 6.17}$$

$$K_b = \frac{4C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)} \quad \text{Equação 6.18}$$

$$\sigma_a = K_b \frac{16DF_a}{\pi d^3} + \frac{4F_a}{\pi d^2} \quad \text{Equação 6.19}$$

$$\sigma_m = K_b \frac{16DF_m}{\pi d^3} + \frac{4F_m}{\pi d^2} \quad \text{Equação 6.20}$$

$$\sigma_{min} = K_b \frac{16DF_{min}}{\pi d^3} + \frac{4F_{min}}{\pi d^2} \quad \text{Equação 6.21}$$

Substituindo os valores nas equações anteriores, pode-se encontrar que o fator de concentração de tensão “ K_b ” para a flexão em um fio curvo tem o valor de 1,10. A partir dele encontram-se os valores das tensões de flexão no gancho com os seguintes valores: $\sigma_a=138,37$ MPa; $\sigma_m=322,87$ MPa; e $\sigma_{min}=184,50$ MPa.

Convertendo a resistência de endurance torcional em uma resistência de endurance por tração pela relação utilizada na Equação 6.11, pode-se determinar o coeficiente de segurança à fadiga para o gancho em flexão como segue nas equações:

$$S_e = \frac{S_{es}}{0,67} \quad \text{Equação 6.22}$$

$$N_{fA} = \frac{S_e(S_{ut} - \sigma_{min})}{S_e(\sigma_m - \sigma_{min}) + S_{ut}\sigma_a} \quad \text{Equação 6.23}$$

Como resultado, a resistência de endurance por tração “ S_e ” tem o valor de 264,305 MPa e o coeficiente de segurança à fadiga no gancho em flexão “ N_{fA} ” tem o valor de 1,07.

A Figura A.15(b) mostra que a tensão de torção no gancho é dada em função do raio “ R_2 ”. Pelo item A.3 do Apêndice I a razão deste raio com o raio do fio da mola “ C_2 ” deve ser maior que 4, como mostra a seguinte relação.

$$C_2 = \frac{2R_2}{d} > 4 \quad \text{Equação 6.24}$$

Adotando arbitrariamente o valor de C_2 igual a 5, pode-se calcular o valor do fator de Wahl “ K_{w2} ” para este caso e, posteriormente, realizar os cálculos das tensões de torção no gancho como segue nas equações:

$$K_{w2} = \frac{4C_2 - 1}{4C_2 - 4} \quad \text{Equação 6.25}$$

$$\tau_{Ba} = K_{w2} \frac{16DF_a}{\pi d^3} \quad \text{Equação 6.26}$$

$$\tau_{Bm} = K_{w2} \frac{16DF_m}{\pi d^3} \quad \text{Equação 6.27}$$

$$\tau_{Bmin} = K_{w2} \frac{16DF_{min}}{\pi d^3} \quad \text{Equação 6.28}$$

Como resultado, o fator de Wahl “ K_{w2} ” tem valor de 1,17 e os valores das tensões de torção no gancho têm os seguintes valores: $\tau_{Ba}=71,03$ MPa; $\tau_{Bm}=165,73$ MPa; e $\tau_{Bmin}=94,70$ MPa.

O coeficiente de segurança do gancho em torção “ N_{fB} ” é calculado usando a seguinte equação:

$$N_{fB} = \frac{S_{es}(S_{us} - \tau_{Bmin})}{S_{es}(\tau_{Bm} - \tau_{Bmin}) + S_{us}\tau_{Ba}} \quad \text{Equação 6.29}$$

Sendo assim, este coeficiente de segurança tem o valor de 1,99. Como os três coeficientes de segurança são maiores que um, a mola está bem dimensionada. Para definir as características de projeto da mola, deve-se encontrar a constante de mola, o número de total de espiras, o comprimento livre da mola e a deflexão máxima.

A constante da mola “ k ” é definida a partir dos dois valores especificados de força correspondentes à sua deflexão relativa:

$$k = \frac{F_{max} - F_{min}}{y} \quad \text{Equação 6.30}$$

Para este caso, a constante de mola tem o valor de 408,75 N/m. A partir deste valor, pode-se encontrar o número de espiras ativas “ N_a ” satisfazendo a seguinte equação:

$$N_a = \frac{d^4 G}{8D^3 k} \quad \text{Equação 6.31}$$

Sendo “ G ” o módulo de elasticidade transversal do fio da mola. De acordo com Chiverni (2011), o fio musical A228 com diâmetro entre 1,63 e 3,18 possui o módulo de elasticidade transversal igual a 81,0 GPa.

A partir Equação 6.31 chega-se ao um número de 112,07 espiras ativas. Arredondando este valor para um número mais exato, optou-se pela escolha de $112\frac{1}{4}$ espiras, ou seja, 112,25 espiras, uma vez que a tolerância de fabricação não pode alcançar precisão melhor que esta.

O número total de espiras no corpo “ N_t ” e comprimento do corpo “ L_b ” são dadas pelas equações abaixo:

$$N_t = N_a + 1 \quad \text{Equação 6.32}$$

$$L_b = N_t d \quad \text{Equação 6.33}$$

Como resultado das expressões acima, foram dimensionados 113,25 para o número total de espiras no corpo “ N_t ” e 249,15 mm para o comprimento do corpo “ L_b ”.

O comprimento livre “ L_f ” pode ser determinado se for considerado que o comprimento de um gancho-padrão é igual ao diâmetro inferior da espira.

$$L_f = L_b + 2L_{gancho} \quad \text{Equação 6.34}$$

Logo, este comprimento livre da mola tem o valor de 279,35 mm.

Por fim, a deflexão máxima para alcançar a maior das duas forças especificadas é dada pela seguinte equação:

$$y = \frac{F_{max} - F_i}{k} \quad \text{Equação 6.35}$$

Sendo esta deflexão máxima de 62,86 mm.

A Tabela A.1 do Apêndice II foi feita para facilitar a visualização dos cálculos apresentados, indicando os dados de entrada e de saída do projeto. Os parâmetros de especificações do projeto segue na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Especificações do projeto da Mola 1

Parâmetros	Símbolos	Valores
Tipo do fio	-	Fio musical
Diâmetro do fio	d	2,20 mm
Diâmetro externo da espira	OD	19,50 mm
Número total de espiras	N_t	91
Comprimento livre da mola	L_f	279,35 mm

6.4.2. CÁLCULO DA MOLA 2

Como comentado anteriormente, a Mola 2 age em paralelo com outra mola idêntica no sistema de sustentação do braço, sendo assim a força considerada para o dimensionamento desta mola será a metade da força utilizada para o cálculo da Mola 1. Portanto, a força aplicada sobre esta mola pode variar de 2,5 kgf (ou $F_{máx}=24,525$ N) a 1 kgf (ou $F_{min}=9,81$ N). Estipulou-se, de maneira análoga ao dimensionamento da mola anterior, que a estimativa inicial do intervalo de deflexão desta mola seria de 30 mm e o material da mola fosse o fio musical. Dentre as opções tabeladas de molas de extensão, optou-se pela configuração com o diâmetro do fio da mola de valor 2,00 mm e diâmetro médio de espira de 16,20 mm. Sendo assim, o índice de mola “C” tem seu valor 8,10.

Tabela 6.3: Especificações do projeto da Mola 2

Parâmetros	Símbolos	Valores
Tipo do fio	-	Fio musical
Diâmetro do fio	d	2,00 mm
Diâmetro externo da espira	OD	18,20 mm
Número total de espiras	N_t	79
Comprimento livre da mola	L_f	186,40 mm

Os cálculos realizados para esta mola tiveram as mesmas considerações utilizadas para os cálculos realizados no dimensionamento da Mola 1. Na Tabela A.2 do Apêndice II são apresentados os resultados deste pré-dimensionamento, bem como os coeficientes de segurança. Os parâmetros de especificações do projeto são apresentados na Tabela 6.3.

6.5. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE SUSTENTAÇÃO DOS MEMBROS SUPERIORES

A Figura 6.33 ilustra o sistema de sustentação dos membros superiores que foi dimensionado para a medida do antebraço de 0,25 metros, indicada pela Norma Brasileira ABNT NBR 9050 (2004) ilustrada no item M.3 da Figura 6.4. A Figura 6.34(a)

mostra a configuração deste aparelho que possui as molas já definidas, as quais são ligadas a um eixo de alumínio por peças feitas de polímero ABS confeccionadas pela impressora 3D denominada Stratasys™ Dimension 1200es®. Estas peças permitem o encaixe para os ganchos das molas, sendo que duas delas estão presas na extremidade do eixo de alumínio e a outra corre livre neste eixo, mas contém uma trava para que o usuário possa escolher a melhor angulação do braço.

O alumínio A6061 foi escolhido como material do eixo, pois o sistema de sustentação do membro superior deve ser o mais leve possível para que os terapeutas ocupacionais possam manusear este conjunto com tranquilidade, mesmo quando está suportando o peso dos braços do indivíduo. As dimensões escolhidas para realizar a análise estática estão na Figura 6.34(b). Como comentado anteriormente, estimou-se que o braço do indivíduo produz a mesma força de reação nas duas molas que o sustenta. Como foi estipulado que o peso de um braço é de 5 kgf, as molas que suspende este membro recebem a carga de 2,5 kgf. A fim de estipular uma medida inicial para o eixo de alumínio, optou-se por um eixo de $\frac{5}{8}$ " (ou 15,87 mm).

(a)

(b)

Figura 6.34: Parte do conjunto de sustentação dos membros superiores (a) vista isométrica e (b) desenho técnico da vista lateral com cotas das posições relativas das molas e do diâmetro do cilindro que conecta as peças. Medida em milímetros. Desenhos gerados no SolidWorks® 2013.

A Figura 6.35 mostra o gráfico dos esforços solicitantes do eixo de alumínio, calculado a partir dos esforços de reação em cada mola. Os valores dos esforços se encontram na Tabela 6.4. Buzinelli (2000) elucida as propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061-T6 já levando em consideração os devidos coeficientes de segurança, sendo a resistência à ruptura por tração “ σ_{tr} ” de 111,00 MPa e a resistência ao escoamento por tração “ σ_{te} ” de 109,00 MPa.

Figura 6.35: Gráfico dos esforços solicitantes no sistema de sustentação dos membros superiores da Figura 6.34 sendo (a) a força cortante e (b) o momento fletor.

Tabela 6.4: Valores dos esforços solicitantes da Figura 6.35.

Esforços solicitantes	Símbolos	Valores
Força Cortante	V_y	-22,525 N
Momento Fletor	M_{fz}	min 0
		máx -2,816 N.m

6.5.1. VERIFICAÇÃO DA TENSÃO DE FLEXÃO ATUANTE

A tensão normal máxima decorrente da ação do momento fletor é dada pela Equação 6.36:

$$\sigma_{max} = \frac{M \cdot c'}{I} \quad \text{Equação 6.36}$$

Sendo “ σ_{max} ” a tensão normal máxima no elemento, “ M ” o momento interno resultante da somatória dos momentos fletores, “ I ” o momento de inércia da área da seção transversal, dado pela Equação 6.37 para caso da geometria de um cilindro, e “ c' ” a distância perpendicular do eixo neutro ao ponto mais afastado do elemento estudado.

$$I = \frac{\pi}{4} r^4 \quad \text{Equação 6.37}$$

Sendo “ r ” o raio do eixo.

A Equação 6.38 mostra o resultado do cálculo da tensão máxima decorrente da ação do momento fletor, relevando que este valor está muito abaixo do valor da tensão de resistência ao escoamento por tração.

$$\sigma_{max} = \frac{2,816 \cdot \frac{0,01587}{2}}{\frac{\pi}{4} \left(\frac{0,01587}{2}\right)^4} \cdot 10^{-6} = 7,176 \text{ MPa} \quad \text{Equação 6.38}$$

6.5.2. VERIFICAÇÃO DA TENSÃO DE CISALHAMENTO ATUANTE

A tensão de cisalhamento é uma combinação entre a força cortante e a geometria do elemento que sofre tal solicitação, dada pela Equação 6.39:

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \quad \text{Equação 6.39}$$

Sendo “ τ ” a tensão de cisalhamento no ponto localizado a uma distância “ y' ” do eixo neutro do elemento; “ V ” a força cortante resultante interna; “ I ” o momento de inércia da seção transversal; “ t ” a largura da área da seção transversal medida na altura “ y' ”; e “ Q ” é o momento de primeira ordem da área “ A' ” em torno do eixo neutro, que pode ser expressa pela Equação 6.40.

$$Q = \frac{\pi r^2}{2} \cdot \frac{4r}{3\pi} = \frac{2r^3}{3} \quad \text{Equação 6.40}$$

Realizando as devidas substituições, o cálculo para encontrar a tensão de cisalhamento devido à força cortante em eixos é dada pela Equação 6.41:

$$\tau = \frac{V \cdot \left(\frac{2r^3}{3}\right)}{\left(\frac{\pi r^4}{4}\right) \cdot 2r} = \frac{4}{3} \frac{V}{\pi r^2} = \frac{4}{3} \frac{22,525}{\pi \left(\frac{0,01587}{2}\right)^2} \cdot 10^{-6} = 0,152 \text{ MPa} \quad \text{Equação 6.41}$$

Para a situação estudada, a tensão de cisalhamento no eixo de alumínio tem o valor máximo de 0,152 MPa. Ao utilizar a relação dada por Hibbeler (2006), exposta na Equação 6.42, entre a tensão de resistência ao cisalhamento “ τ_{cr} ” e a tensão de resistência à tração “ σ_{tr} ”, considerada em 60%, pode-se considerar que a tensão de resistência ao escoamento por cisalhamento “ τ_{ce} ”. Como mencionado, Buzinelli (2000) comenta que a resistência à ruptura por tração “ σ_{tr} ” do alumínio 6061-T6 é de 111,00 MPa, concluindo que a tensão de resistência ao escoamento por cisalhamento tem um valor próximo a 66,6 MPa. Como esta tensão para o eixo de alumínio é menor que a tensão admissível, o eixo está bem dimensionado.

$$\tau_{cr} = 0,6 \text{ a } 0,8 \sigma_{tr} \quad \text{Equação 6.42}$$

CAPÍTULO 7

7. FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Neste capítulo serão expostos quais os processos de fabricação foram utilizados para gerar os componentes deste projeto e realizar sua montagem.

7.1. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Como resultado do dimensionamento das estruturas do *sling*, uma lista de itens e desenhos técnicos foi gerada com o intuito de analisar como seria fabricada cada peça. Entre os processos convencionais de fabricação, utilizou-se para este projeto a usinagem de peças metálicas em máquinas como o torno e a fresa. Muitas das peças usinadas foram soldadas a outros itens para compor uma só peça. Além disso, utilizou-se uma máquina de dobra hidráulica para a confecção de alguns tubos e a manufatura aditiva para a geração de peças mais complexas, especificamente a tecnologia FDM (*Fused Deposition Modelling*).

Inicialmente foi analisada a peça referente à haste vertical superior. Esta possui um perfil tubular de seção circular com algumas curvas. Para realizar estas curvas no tubo de aço-carbono 1020, utilizou-se uma dobradeira hidráulica que permitiu a respeitar com precisão as dimensões especificadas no desenho técnico da Figura 7.1(a). Além da dobra, a haste vertical superior passou pelo processo de furação na sua parte lateral, para dar opções no ajuste da altura do aparelho, e pelo processo de soldagem dos ganchos que predem o sistema de sustentação dos membros superiores e da flange que será acoplada a articulação central do aparelho por meio de parafusos, como indicado na Figura 7.1(b). Com a finalização da peça, esta foi revestida com algumas camadas de tinta branca para evitar a degradação do aço.

Em seguida foi analisada a haste vertical inferior, a qual também se trata de uma estrutura tubular de seção circular de aço-carbono 1020. Na parte inferior deste perfil é soldado uma peça usinada em um torno para que possa assentar o primeiro rolamento em sua parte superior e também possui uma rosca para que possa travar o segundo rolamento em sua parte inferior como observado na Figura 5.15. Na parte

superior deste perfil são feitas alguns furos que passam os pinos para travar o sistema de regulagem de altura. O desenho técnico deste componente está na Figura 7.2.

Figura 7.1: Desenhos técnicos da haste vertical superior com destaque (a) no seu dimensionamento e curvatura, e (b) na posição para realizar a furação e soldagem.

Como existe uma folga grande entre a haste vertical superior e inferior, foi usinada uma peça de alumínio para tornar este encaixe mais justo. Esta peça possui um perfil cônico em seu interior para facilitar o encaixe com a haste vertical superior e possui um diâmetro externo que permite o encaixe com a haste vertical inferior. Suas dimensões principais são mostradas na Figura 7.3.

Os próximos itens usinados foram às peças que unem a haste vertical inferior com a base do *sling* e os assentamentos inferiores do rolamento, ambos ilustrados na Figura 5.15. Os desenhos técnicos destas duas peças estão na Figura 7.4 e Figura 7.5. O 6061-T6 foi o material designado para ambas às peças.

Figura 7.2: Desenho técnico da haste vertical inferior.

Figura 7.3: Desenho técnico do ajuste entre tubos.

Os itens restantes de alumínio que foram usinados são: barra que une as duas bases através do encaixe nas fissuras do perfil alumínio, o eixo que pertence ao

sistema de sustentação do braço e a articulação inspirada na articulação já existente no catálogo do perfil alumínio. O desenho técnico deste último item está na Figura 7.6.

Figura 7.4: Peça de ligação entre a base e a estrutura principal do *sling*.

Figura 7.5: Assentamento dos rolamentos axiais.

Figura 7.6: Desenho técnico de uma das metades da articulação compatível com o perfil alumínio.

Optou-se por fabricar algumas peças pelo processo de FDM, sendo estas algumas dos componentes do sistema de sustentação do braço, observados na Figura 6.34(a). A escolha de imprimir estas peças foi devido a curto tempo de fabricação e a possibilidade de gerar peças complexas. Porém as peças são do polímero ABS sendo este um polímero que não possui características mecânicas adequadas para fazer parte de um projeto estrutural. Como o esforço nesta peça não é elevado optou-se pelo uso da manufatura aditiva devido ao curto tempo para a montagem e a avaliação do aparelho junto aos terapeutas, além da disponibilidade deste recurso no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos/SP (USP).

Por fim foram compradas algumas peças referentes ao perfil estrutural de alumínio, que foi utilizado como base do aparelho *sling*, além dos rodízios, articulações e parafusos específicos para serem utilizados junto a esta estrutura. O pino com mola, responsável por travar o sistema de ajuste de altura, também foi outro item obtido pelo mercado.

7.2. MONTAGEM E AVALIAÇÃO DO SLING

Após a fabricação e compra dos itens restantes foi realizada a montagem do *sling* para ser avaliado por dois grupos de terapeutas ocupacionais, como explica Souza (2016). Como resultado da primeira avaliação, os terapeutas ocupacionais identificaram alguns problemas e dificuldades para utilizar o *sling*. Estas dificuldades foram apresentadas no Capítulo 5.3.4, que retomou a fase do projeto conceitual, pois o projeto teve que rever algumas soluções. Sendo assim, a Figura 7.7 mostra a foto do aparelho montado após as modificações sugeridas e pronto para a segunda avaliação.

Figura 7.7: *Sling* montado para passar pela segunda avaliação do grupo de terapeutas ocupacionais.

O processo de avaliação está relatado em Souza (2016), a qual concluiu que o conceito e a proposta do projeto do *sling* proporcionaram resultados satisfatórios de operacionalização e uso, a partir das características técnicas extraídas durante a fase do projeto informacional. Um ponto bem avaliado foi em relação à facilidade de

movimentação do braço no plano horizontal, devido à inclusão da guia com um mancal de deslizamento que suporta ao sistema de sustentação dos membros superiores.

O protótipo também passou por algumas sessões com um paciente tetraplégico para confirmar se o aparelho atende as necessidades do cliente. Foi relatado que o aparelho não apresentou problemas quando já montado e, com poucas sessões de uso, o paciente teve uma melhora significativa na movimentação de um dos braços no plano horizontal, ressaltando mais uma vez a contribuição da melhora destacada no parágrafo anterior.

Figura 7.8: *Sling* sendo utilizado por um paciente tetraplégico. Estudo foi aprovado pelo Comissão Nacional de Ética em Pesquisa (Número do Parecer: 689.103, Data da Relatoria: 25/06/2014).

Com a finalização do protótipo, restaram alguns itens de projeto que ainda devem passar por algumas reformulações: primeiro a mudança do material da estrutura vertical superior e inferior de aço para alumínio para diminuir o peso da estrutura e também utilizar um material mais indicado para o uso hospitalar; reconfiguração da articulação central do *sling* para diminuir a deformação existente quando o aparelho estiver sendo utilizado em sua configuração fechada; mudança da localização do mancal de deslizamento próximo à base do aparelho, o que permite que o *sling* tenha a configuração aberta e fechada, para um local na região superior

da haste vertical superior, para diminuir os efeitos da folga gerada por este tipo de mancal; e o reforço da estabilidade entre a base e a haste vertical inferior.

CAPÍTULO 8

8. CONCLUSÃO

No Brasil, alguns produtos destinados à área da saúde, como equipamentos de reabilitação e autoajuda, são ofertados ao mercado sem passar por uma análise em engenharia, quando não são confeccionados pelos próprios terapeutas ocupacionais nas clínicas de reabilitação, podendo ofertar produtos susceptíveis a falhas, os quais comprometem a saúde e integridade do usuário.

Com o intuito de sanar esta lacuna, este trabalho focou no desenvolvimento do projeto de um equipamento denominado *sling*, cuja função é prover sustentação e movimentação de membros superiores para atender pessoas enfermas ou com deficiências que apresentam incapacidade e/ou distúrbios neuromotoras ou musculoesqueléticas que afetam suas habilidades de executar atividades com estes membros. A utilização deste equipamento é de suma importância sendo um recurso voltado para melhoria da qualidade de vida deste grupo de indivíduos, pois busca a independência da pessoa com deficiência para diversas tarefas manuais, como a auto alimentação e a auto higienização, além de possuir um cunho terapêutico, utilizado também para fortalecimento dos músculos associados ao membro superior.

Para elaboração dos conceitos e soluções do *sling*, utilizou-se de ferramentas de metodologia de projeto, as quais foram fundamentais para o desenvolvimento do produto, pois auxiliou o projetista a entender as necessidades dos usuários intermediários, no caso terapeutas ocupacionais, possibilitando a sua tradução em um linguajar mais técnico, além de ordená-los por graus de importância. O produto também foi dividido em diversas funções de projetos independentes, sendo que para cada uma foram especuladas diversas soluções técnicas para que no final fosse eleito, junto com os usuários, o melhor conjunto de soluções para compor o projeto. Vale ressaltar que estas ferramentas induziram o projetista a procurar soluções não convencionais referentes às encontradas nas patentes e nos produtos comerciais existentes.

Sendo assim, esta iteração e interação dos usuários intermediários com o projetista através das etapas do desenvolvimento do produto se mostrou

imprescindível para a escolha dos principais conceitos do projeto. A partir da visualização e utilização do projeto por meio de um protótipo funcional, possibilitou o entendimento e a avaliação de cada solução sugerida pelo projetista por parte do grupo de terapeutas ocupacionais, resultando na discussão e inclusão de novos parâmetros para serem revistos na fase do projeto conceitual, a fim de adequar alguns subconjuntos do aparelho.

Devido a este feedback, foram gerados novos conceitos até se obter a solução construtiva mais adequada, que cominou na reformulação do protótipo funcional. Em outra avaliação do protótipo do *sling* junto ao grupo de terapeutas ocupacionais, o projeto mostrou que houve uma melhora significativa comparada com o modelo apresentado anteriormente, atendendo grande parte dos requisitos do usuário e tendo como principais destaques a facilidade e conforto na movimentação do braço no plano horizontal, além da possibilidade da utilização do aparelho para um ou para os dois membros, o que também possibilita a compactação do *sling*, facilitando seu armazenamento nas clínicas de reabilitação. Outro ponto de grande destaque do projeto é a possibilidade da utilização deste aparelho em conjunto a diversos mobiliários, como cadeiras, cadeiras de rodas e camas hospitalares.

As soluções apresentadas para este projeto possuem um caráter inovador referente aos aparelhos similares encontrados no mercado, o que viabilizou o registro de patente com o número do processo 15.1.3118.18.1, tendo sua abertura realizada na data 22/10/2015.

As ferramentas computacionais de CAD e CAE foram fundamentais no processo de análise estrutural, na fabricação dos componentes e na montagem do conjunto. De acordo com a análise em elementos finitos, o *sling* projetado se mostrou apto para trabalhar em sua configuração aberta, ou seja, quando é utilizado para os dois membros do indivíduo. Porém, para a configuração fechada, ou para o uso unilateral, a análise indicou alguns pontos concentradores de tensão e também uma deformação considerável na articulação central. Estes últimos pontos deverão ser revistos em trabalhos futuros.

Outro ponto de melhoria foi referente ao peso do protótipo. Na avaliação feita pelos terapeutas ocupacionais foi apontado que a grande dificuldade para ajustar a altura do *sling* era devido ao peso da estrutura superior. Mesmo com o fato do

protótipo ter sido fabricado com o material diferente do escolhido na etapa do projeto conceitual, sendo utilizado tubos de aço 1020 para a confecção da estrutura principal do devido à falta de disponibilidade de tubos de alumínio em São Carlos e região, o projeto deve passar por um estudo de redução da massa, que envolve um estudo de DOE e otimização.

Por fim, para este produto estar apto a ser produzido e disponibilizado no mercado, deve-se realizar um estudo clínico, junto ao usuário final, ou seja, com os pacientes que possuem deficiência ou dificuldades motoras nos membros superiores, para analisar de forma clínica, a melhoria da força muscular do indivíduo ao utilizar o aparelho *sling*, como por exemplo, a realização de eletromiografias.

Este trabalho também identificou uma lacuna na utilização da metodologia de projetos voltados para o ciclo de desenvolvimento de produtos industriais em equipamentos voltados para a área da saúde, principalmente devido ao fato que as soluções nesta área requerem um alto grau de personalização. Sendo assim, se faz necessário um modelo de referência para o desenvolvimento de produtos voltados para a área de Tecnologia Assistiva.

REFERÊNCIAS

ABBRUZZESE, K. et al. An innovative design for an Assistive Arm Orthosis for stroke and muscle dystrophy. Bioengineering Conference (NEBEC), 2011 IEEE 37th Annual Northeast, 2011, IEEE. p.1-2.

ABNT, N. 9050. **Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e, edificações** 2004.

AJOT. New for Therapy. Immediate Patient Activity plus Progressive Therapy. *American Journal Occupational Therapy*, March-April, 1969. p.186.

AJOT. Occupational Therapy Equipment for Rehabilitation. *American Journal Occupational Therapy*, November-December, v. XXII, 1969. p.472.

ASAI, N.; KUROIWA, S. Comparison of Portable Spring Balancer with Mobile Arm Support in Aiding Self-Feeding in Quadriplegic Patients with High Cervical Injuries- Rate of Adaptation to Both Devices. **Journal of Physical Therapy Science**, v. 11, n. 1, p. 11-17, 1999. ISSN 0915-5287.

BACK, N. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Guanabara Dois, 1983. ISBN 8570300131.

BAXTER, M. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. Edgard Blucher, 2000. ISBN 8521202652.

BENSFIELD, Nicholas W. **Portable adjustable manipulating apparatus**. US n. 2631582, 14 Aug. 1950.

BOSCH. Disponível em:< <https://www.logismarket.ind.br/ip/bosch-rexroth-perfis-de-aluminio-perfis-de-aluminio-737348.pdf> >. Acesso em 15 Dez. 2015

BUZINELLI, D. V. **Dimensionamento de elementos estruturais em alumínio**. 2000. Universidade de São Paulo

BÜHLER, C. Approach to the analysis of user requirements in assistive technology. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 17, n. 2, p. 187-192, 1996. ISSN 0169-8141.

CALLISTER JR., W.D. **Material Science and Engineering: An Introduction**, 5ª Edição. Editora John Wiley & Sons, 2000. 852p.

CAMA FAWLER. Disponível em:< <http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-698830866-cama-fawler-hospitalar-manual-c-elevaco-de-leito-cm-011b- JM> >.

Acesso em 15 Dez. 2015

CAT: **Comitê de Ajudas Técnicas**. Subsecretaria Nacional de Promoção dos Direitos da Pessoa com Deficiência. Tecnologia Assistiva. Brasília: CORDE, 2009.

CAVALCANTI, A.; GALVÃO, C. Terapia Ocupacional: fundamentação & prática. **Rio de Janeiro: Guanabara**, 2007.

CGEE. **Relatório Final. Mapeamento de Competências em Tecnologia Assistiva**. Brasília: CGEE, 2012

CHAU, T.; MOGHIMI, S.; POPOVIC, M. R. Knowledge translation in rehabilitation engineering research and development: A knowledge ecosystem framework. **Archives of physical medicine and rehabilitation**, v. 94, n. 1, p. S9-S19, 2013. ISSN 0003-9993.

CHENG, L. C. **QFD: desdobramento da função qualidade na gestão de desenvolvimento de produtos**. Blücher, 2007. ISBN 8521204132.

CHIVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais P 165 – 230. São Paulo, 2011.

CIF: **Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde**. São Paulo: EDUSP; 2004.

CIMJECT. Disponível em:<<http://www.eos-gmbh.de>>. Acesso em 15 Dez. 2015

COSCIA, M. et al. The effect of arm weight support on upper limb muscle synergies during reaching movements. **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, v. 11, n. 1, p. 22, 2014. ISSN 1743-0003.

DAVIDSON, John. **Self-assisted shoulder passive range of motion apparatus**. US Int Cl: A61h 1/2; A63b 23/12 n. 7364555 B1, 1 Jun. 2005.

ENDERLE, J.; BRONZINO, J. Bioelectric phenomena. **Introduction to Biomedical Engineering**, v. 3, p. 79-138, 2011.

EUA. Public Law 108-264. Assistive Technology Act of 2004. To support programs of grants to States to address the assistive technology needs of individuals with disabilities, and for other purposes. **U.S. Government Printing Office**, Washington, DC, 2004.

EURO SLING. Disponível em:< <http://www.elderstore.net/euro-sling-counter-balance.aspx> >. Acesso em 15 Dez. 2015

FOLDING ARM SUSPENSION FRAME. Disponível em:< <http://www.rehabmart.com/product/folding-arm-suspension-frame-9886.html> >. Acesso em 15 Dez. 2015

FRANÇANI, C. O.; SIMÕES, E. M.; BRACCIALLI, L. M. P. Tecnologia assistiva: desenvolvimento de recursos de baixo custo. **Revista Ciência em Extensão**, v. 5, n. 2, p. 108, 2009. ISSN 1679-4605.

HARVEY, P. D. **Engineering properties of steel**. American Society for Metals Metals Park, Ohio, 1982. ISBN 0871701448.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. Pearson Prentice Hall, 2006. ISBN 8587918672.

HOMMA, Keiko; ARAI, Tatsuo, inventors; AGENCY OF INDUSTRIAL SCIENCE & TECHNOLOGY; MINISTRY OF INTERNATIONAL TRADE & INDUSTRY OF JAPAN, assignees. **Arm motion support apparatus**. US Int. CI A61h1/00 n. 5501656, 26 Aug. 1994.

IIDA, I. Ergonomia: Projeto e execução. **Ergonomia: Projeto e execução**, 2005.

JAMES, W.; ORR, J. Upper limb weakness in children with Duchenne muscular dystrophy-a neglected problem. **Prosthetics and orthotics international**, v. 8, n. 2, p. 111-113, 1984. ISSN 0309-3646.

KADIR, S. A.; JAMALUDIN, M. Universal Design as a Significant Component for Sustainable Life and Social Development. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 85, p. 179-190, 2013. ISSN 1877-0428.

KALACHE, A.; VERAS, R. P.; RAMOS, L. R. O envelhecimento da população mundial: um desafio novo. **Rev Saúde Pública**, v. 21, n. 3, p. 200-10, 1987.

KANAWATI, Gisleine Cavalheiro Martin; PHILOT, George Guarany. **Dispositivo de apoio e sustentação para crianças**. BR Int CI A61h 1/00, 20 nov. 1990.

_____. **Dispositivo dinâmico e ajustável para levitação das partes do corpo humano**. BR Int CI A61h 1/2 n. 905907 A, 16 nov. 1990.

KELLY, Peggy L., **Portable doorway and floor stand exerciser for use by wheelchair occupants**. US Int CI A63b 21/06, 14 Sep. 1990.

LEVITAR. Disponível em:< http://www.expansao.com/tecnologia_dinamica_produto.htm >. Acesso em 15 Dez. 2015

LIN, C. H. et al. Validity and reliability of a novel device for bilateral upper extremity functional measurements. **Comput Methods Programs Biomed**, Mar 2014. ISSN 1872-7565. Available at: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24690377> >.

LIN, P.-Y.; SHIEH, W.-B.; CHEN, D.-Z. A theoretical study of weight-balanced mechanisms for design of spring assistive mobile arm support (MAS). **Mechanism and Machine Theory**, v. 61, p. 156-167, 2013. ISSN 0094-114X.

MAYER, Edwin H., inventor; SIMMONS COMPANY, assignee. **Exercise bar for bed**. US n. 3077613, 6 Nov. 1959.

MOBILITY ARM SLING. Disponível em:< <http://www.elderstore.net/mobility-arm-sling.aspx> >. Acesso em 15 Dez. 2015

MORILLO, Danilo Martin; PHILOT, Gisleine Martin, inventores; EXEMPLO INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE PRODUTOS ORTOPÉDICOS LTDA, titular. **Sustentador antigravitacional dinâmico da cabeça**. BR Int Cl: A63B21/00; A63B21/06; A63B21/16; A63B23/025; A63B24/00; A61 H99/00 n. 10 2012 020241-7 A2, 13 ago. 2012.

NEARING, Charles H., inventor; ACTIVEAID INC., assignee. **Upper body exercise apparatus**. US n. 5466204, 15 Feb. 1994.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. Tradução: João Batista de Aguiar, José Manuel de Aguiar: Porto Alegre: Bookman 2004.

OH, S. J.; UNNIKRISHNAN, R. Infusing assistive technology in undergraduate engineering education. Interdisciplinary Engineering Design Education Conference (IEDEC), 2012 2nd, 2012, IEEE. p.46-50.

OJA, Carl W.; SCHEUERMAN, Richard L., **Resistance exerciser and brakeable mobile carriage**. US n. 3373993, 26 Oct. 1964.

PAHL, G. et al. **Engineering design: a systematic approach**. Springer, 2007. ISBN 1846283191.

PHILOT, G. G.; KANAWATI, G. C. M. **DISPOSITIVO DINÂMICO E AJUSTÁVEL PARA LEVITAÇÃO DAS PARTES DO CORPO HUMANO**. Brasil. PI 9005907-7 B1 1990.

PLOS, O. et al. A Universalist strategy for the design of Assistive Technology. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 42, n. 6, p. 533-541, 2012. ISSN 0169-8141.

RAHMAN, T. et al. Towards the control of a powered orthosis for people with muscular dystrophy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine**, v. 215, n. 3, p. 267-274, 2001. ISSN 0954-4119.

Rodrigues, A.R.; Souza, A.F.; Braghini Júnior, Brandão, L. C.; Silveira, Z.C. (2015) **Desenho técnico mecânico: projeto e fabricação no desenvolvimento de produtos industriais**. Campus-Elsevier. 1ª. edição. p. 1-93.

SORIANO, H. L.; LIMA, S. D. S. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas Vol. 48**. Edusp, 2003. ISBN 8531407303.

SOUZA, A. C. A. **“Avaliação dos dispositivos destinados ao uso de sustentação e movimentação de membros superiores e proposta da melhoria do projeto baseada na integração QFD e Análise Funcional”**, 2016. 178 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia – EESC/FMRP/IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

STRATASYS. Disponível em:< <http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series/mojo> >. Acesso em 12 Dez. 2015

SWEDISH HELPARM. Disponível em:< <http://www.elderstore.net/swedish-sling.aspx> >. Acesso em 15 Dez. 2015

THORPE, T. E. A power-assisted arm balancer. *J Med Eng Technol.* Sep-Oct, v.10, n. 5, 1986. p.248-51.

UNDERWOOD, Timothy J., inventor; HUMPHREY, ELEVATOR AND TRUCK COMPANY, assignee. Therapeutic apparatus. US Int Cl A61h 1/2 n. 36883398, 26 Oct. 1970.

UNIT - ISO 9999:2011; **Productos de apoyo para personas com discapacidad -** Clasificación y terminología.

VAN DER HEIDE, L. A. et al. An overview and categorization of dynamic arm supports for people with decreased arm function. **Prosthetics and orthotics international**, p. 0309364613498538, 2013. ISSN 0309-3646.

VARELA, R. C. B.; OLIVER, F. C. A utilização de Tecnologia Assistiva na vida cotidiana de crianças com deficiência. **Ciência & Saúde coletiva [online]**, v. 18, n. 6, p. 1773-1784, 2013.

WORLEY, J. S. et al. Reliability of three clinical measures of muscle tone in the shoulders and wrists of poststroke patients. **American Journal of Occupational Therapy**, v. 45, n. 1, p. 50-58, 1991. ISSN 0272-9490.

APÊNDICE I

A. PROJETO DE MOLAS

Segundo Norton (2004, p.693), molas são projetadas para prover uma força de tração, compressão ou um torque, ou principalmente armazenar energia, e podem ser dividida nessas quatro categoriais gerais. As molas ainda podem ser classificadas de acordo com sua configuração física, podendo ser separadas em molas de fio, molas planas, molas arruela e molas enroladas planas. Especificamente, as molas de fio aparecem na forma de molas helicoidais de compressão, molas helicoidais de extensão e molas helicoidais de torção. Este item é focado em molas helicoidais de extensão, as quais auxiliam na sustentação dos membros superior do dispositivo projetado no presente estudo.

Independente da configuração da mola, esta possui uma constante de mola “ k ”, definida como inclinação da sua curva força-deflexão. Se a inclinação for constante, a mola é linear e “ k ” pode ser definida como escrito na Equação A.1:

$$k = \frac{F}{y} \quad \text{Equação A.1}$$

Sendo “ F ” a força aplicada sobre a mola e “ y ” a sua deflexão.

Quando várias molas são combinadas, a constante de mola resultante depende do fato de a combinação ser em série ou em paralelo, como observado na Figura A.1. Combinações em séries caracterizam-se por ter a mesma força presente em todas as molas com cada uma contribuindo um pouco com a deflexão total. Já o conjunto de molas em paralelo tem a mesma deflexão e a força total é dividida individualmente entre as molas. A constante de mola para o conjunto de molas em paralelo é dada pela Equação A.2, e para o conjunto de molas em série é dado pela Equação A.3.

$$k_{total} = k_1 + k_2 + \dots + k_n \quad \text{Equação A.2}$$

$$\frac{1}{k_{total}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad \text{Equação A.3}$$

Figura A.1: Combinações de molas helicoidais de extensão (a) em série e (b) em paralelo.

(Fonte: Norton, 2004, p.695)

A.3.1. MATERIAIS PARA MOLAS

Segundo Norton (2004, p.697), existe uma quantidade limitada de materiais e ligas adequados para o uso como material de mola. Estes materiais devem ter uma resistência à tração alta, um ponto de escoamento alto e um módulo de elasticidade baixo a fim de proporcionar máximo armazenamento de energia. A maior parte das molas de uso não intenso é produzida com fio circular ou retangular de aço repuxado, trabalhado a frio, ou a partir de tiras planas finas laminadas a frio.

O arame de seção circular é de longe o material mais utilizado em molas. Encontra-se disponível em um conjunto de ligas e grande intervalo de tamanhos. O projetista deve tentar utilizar os tamanhos disponíveis para ligas comuns de aço, identificado pelo número ASTM, para obter melhor custo e disponibilidade.

A Figura A.2 é um gráfico semilogarítmico da resistência à tração de arame versus diâmetro de fio resultante de testes feitos alguns materiais. Os dados de cinco dos materiais mostrados na figura (aços A227, A228, A229, A232 E A401) podem ser

descritos com grande grau de aproximação com uma função exponencial, dada pela Equação A.4.

$$S_{ut} = Ad^b \quad \text{Equação A.4}$$

Sendo “A” e “b” são definidos pela Tabela A.1, para materiais de arame nos intervalos de diâmetro especificados. Essas funções empíricas fornecem uma maneira conveniente de calcular as resistências à tração de arames de aço.

Figura A.2: Resistências mínimas sob tração de fios de molas, identificados pelo número ASTM. (Fonte: Norton, 2004, p.699)

Em relação à resistência ao cisalhamento, testes bastante abrangentes mostraram que uma estimativa razoável do limite de resistência à torção de materiais usada comumente em molas é de 67% do limite de resistência do material, como segue na Equação A.5.

$$S_{us} \cong 0,67 S_{ut} \quad \text{Equação A.5}$$

Tabela A.1: Coeficientes e expoentes para a Equação 6.10 (Fonte: Norton, 2004, p.699)

N° ASTM	Material	Intervalo		Expoente b	Coeficiente A		Fator de correlação
		mm	in		MPa	psi	
A227	Repuxado a frio	0,5-16	0,020-0,625	-0,182 2	1753,3	141040	0,998
A228	Fio musical	0,3-6	0,010-0,250	-0,162 5	2153,5	184649	0,9997
A229	Revenido em óleo	0,5-16	0,020-0,625	-0,183 3	1831,2	146780	0,999
A232	Cromo-v	0,5-12	0,020-0,500	-0,145 3	1909,9	173128	0,998
A401	Cromo-s	0,8-11	0,031-0,437	-0,093 4	2059,2	220779	0,991

A.3.2. MOLAS HELICOIDAIS DE EXTENSÃO

Exemplos de molas, bem como parâmetros dimensionais para molas helicoidais padronizadas, são mostrados na Figura A.3. O diâmetro do fio é “ d ”, o diâmetro médio da espira é “ D ” (sendo $D = \frac{OD-ID}{2}$), e essas duas dimensões, juntamente com o comprimento livre “ L_f ” e o número de espiras “ N_t ” ou passo de espira “ p ”, são utilizados para definir a geometria da mola para fins de cálculo e fabricação. A seguir serão mostrados os parâmetros necessários para o dimensionamento das molas helicoidais de extensão.

- **Espiras ativas**

Todas as espiras no corpo da mola são consideradas espiras ativas, mas tipicamente uma espira é adicionada ao número de espiras ativas para obter um corpo de comprimento “ L_b ”.

$$N_t = N_a + 1 \quad \text{Equação A.6}$$

$$L_b = d \cdot N_a \quad \text{Equação A.7}$$

Figura A.3: Dimensões de uma mola de extensão. (Fonte: Norton, 2004, p.722)

- **Índice de molas**

O índice de mola “ C ” é a razão entre o diâmetro de espira “ D ” e o diâmetro de fio “ d ”. O intervalo preferido para “ C ” está entre 4 e 12. Quando $C < 4$, a mola é de difícil fabricação e quando $C > 12$ tem propensão à flambagem e também se entrelaça facilmente quando manipulada em quantidades.

$$C = \frac{D}{d} \quad \text{Equação A.8}$$

- **Constante de mola para molas de extensão**

Espiras de molas de extensão são enroladas de forma apertada, e o fio é torcido à medida que é enrolado, criando assim uma pré-carga “ F_i ” nas espiras que deve ser superada quando se quer separá-las. Segundo Norton (2004, p.723), a constante de mola pode ser expressa na equação Equação A.9.

$$k = \frac{F - F_i}{y} = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad \text{Equação A.9}$$

Sendo “ F ” a força axial aplicada na mola, “ D ” o diâmetro médio das espiras, “ d ” o diâmetro do fio, “ N_a ” o número de espiras ativas e “ G ” o módulo de cisalhamento do material.

- **Pré-carga de espiras em molas de extensão**

A pré-carga “ F_i ” pode ser controlada, até certo ponto, durante o processo de fabricação de molas, e deve ser especificada de maneira a manter as tensões iniciais dentro do intervalo preferencial, como mostrado na Figura A.4. As expressões da aproximação cúbica das funções que foram ajustadas à esta curva são dadas pela Equação A.10 e Equação A.11.

$$\tau_i \cong -4,231C^3 + 181,5C^2 - 3387C + 28640 \quad \text{Equação A.10}$$

$$\tau_i \cong -2,987C^3 + 139,7C^2 - 3427C + 38404 \quad \text{Equação A.11}$$

Sendo “ τ_i ” expressa em psi. A média dos dois valores calculados com o uso dessas funções pode ser considerada como um bom valor inicial para a tensão na espira.

Figura A.4: Intervalo preferido de tensão inicial em molas de extensão como uma função do índice de mola. (Fonte: Norton, 2004, p.724)

- **Deflexão de molas de extensão**

A deflexão de espiras é calculada a partir da Equação A.12.

$$y = \frac{8(F - F_i)D^3 N_a}{d^4 G} \quad \text{Equação A.12}$$

- **Tensão em espiras de molas helicoidais de extensão**

Ao aplicar uma carga “ F ” em uma mola helicoidal de extensão, consequentemente existirão duas componentes de tensão em cada seção transversal de uma espira: uma tensão de cisalhamento por torção devida ao torque “ T ” e uma tensão de cisalhamento devido à força cortante “ F ”. Pode-se escrever esta tensão máxima de cisalhamento como enunciado na Equação A.13 e Equação A.14.

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A} = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad \text{Equação A.13}$$

$$\tau_{max} = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad \text{Equação A.14}$$

$$K_s = \left(1 + \frac{0,5}{C}\right) \quad \text{Equação A.15}$$

A manipulação feita pela Equação 6.4 e Equação 6.5, colocou o termo de cisalhamento direto na forma de um fator de cisalhamento direto “ K_s ”.

Devido à curva do fio na forma de espira, existe uma concentração de tensão na superfície interna da curvatura. Para mensurar esta concentração, determinou-se o fator de concentração de tensões para esta aplicação e definiu o fator de Wahl “ K_w ”, que inclui tanto o efeito das tensões diretas de cisalhamento quanto à concentração de tensões devido à curvatura.

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad \text{Equação A.16}$$

$$\tau_{max} = K_w \frac{8FD}{\pi d^3} \quad \text{Equação A.17}$$

Uma vez que o fator de Wahl inclui ambos os efeitos, pode-se separá-los em um fator de curvatura “ K_c ” e em fator de tensão de cisalhamento direta “ K_s ” dada pela Equação A.18.

$$K_w = K_s K_c \quad \text{Equação A.18}$$

- **Tensões de extremidade em molas de extensão**

Os ganchos e laços padrão possuem dois pontos de alta tensão, como mostrado na Figura A.5. A máxima tensão de torção ocorre no ponto B, onde o raio de flexão é mínimo. Existe também uma componente de tensão devido à flexão no ponto A do gancho ou do laço, uma vez que a extremidade é carregada com uma viga curva. Definiu-se um fator de concentração de tensão “ K_b ” para a flexão em um fio curvo. A tensão no ponto A é encontrada a partir da Equação A.19.

$$\sigma_A = K_b \frac{16DF}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad \text{Equação A.19}$$

sendo

$$K_b = \frac{4C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)} \quad \text{Equação A.20}$$

$$C_1 = \frac{2R_1}{d} \quad \text{Equação A.21}$$

E “ R_1 ” é o raio médio do laço, como mostra a Figura A.5. Para uma extremidade padrão, o raio médio do laço é idêntico ao raio médio de espira.

A tensão de torção no ponto B é encontrada pela Equação A.22.

$$\tau_B = K_{w2} \frac{8DF}{\pi d^3} \quad \text{Equação A.22}$$

sendo

$$K_{w2} = \frac{4C_2 - 1}{4C_2 - 4} \quad \text{Equação A.23}$$

$$C_2 = \frac{2R_2}{d}$$

Equação A.24

“ R_2 ” é o raio do lado flexionado, como mostrado na Figura A.5, e “ C_2 ” deve ser maior que 4.

Figura A.5: Pontos de máxima tensão no gancho ou laço de uma mola de extensão. (Fonte: Norton, 2004, p.724)

- **Resistência de materiais para molas de extensão**

A Tabela A.2 mostra valores recomendados de resistência para escoamento, sob condições estáticas, do corpo da espira e extremidades para torção e flexão.

Tabela A.2: Resistências máximas de escoamento de torção S_{ys} e flexão S_y para molas helicoidais de extensão em aplicações estáticas. (Fonte: Norton, 2004, p.725)

Material	Percentual máximo do limite de resistência à tração		
	S_{ys} em torção		S_y em flexão
	Corpo	Extremidade	Extremidade
Aço-carbono repuxado a frio (por exemplo, A227, A228)	45%	40%	75%
Aço-carbono endurecido e revenido e aço de baixa liga (por exemplo, A229, A230, A232, A401)	50	40	75
Aço inox. austenítico e ligas não ferrosas (por exemplo, A313, B134, B159, B197)	35	30	55

- **Dimensionamento de molas helicoidais de extensão**

Com frequência é conveniente, em problemas de dimensionamento de molas de extensão, pressupor um índice de mola e um diâmetro de fio. O diâmetro médio pode ser encontrado a partir da Equação 6.1. O valor assumido de índice de mola pode ser utilizado com a Equação 6.2 e Equação 6.3 para gerar valores iniciais aproximados das tensões no enrolamento de espiras. Utilizando este valor inicial de tensão, a pré-carga na espira " F_i " pode ser calculada com o uso da Equação 6.4. As tensões de espira e extremidade podem ser encontradas a seguir e é possível fazer os ajustes apropriados aos valores assumidos para que se obtenham valores aceitáveis dos coeficientes de segurança.

A deflexão ou o número de espiras podem ser encontrados a partir da Equação A.12 com um deles assumido ou especificado. A constante de mola pode ser encontrada utilizando a máxima força de projeto e a pré-carga em combinação com as deflexões assumidas ou calculadas na Equação A.9.

Segundo Norton (2004, p.726), os coeficientes de segurança para carga estática é calculado segundo a Equação A.25.

$$N_s = \frac{S_{ys}}{\tau} \quad \text{Equação A.25}$$

E o coeficiente de segurança para uma carga dinâmica é calculado segundo a Equação A.26.

$$N_{fs} = \frac{S_{es}(S_{us} - \tau_i)}{S_{es}(\tau_m - \tau_i) + S_{us}\tau_a} \quad \text{Equação A.26}$$

Sendo que o limite de resistência à fadiga sob carregamento alternado é dado pela Equação A.27.

$$S_{es} = 0,5 \frac{S_{ew}S_{us}}{S_{us} - 0,5S_{ew}} \quad \text{Equação A.27}$$

O limite de resistência relativo às tensões alternadas pode ser encontrado na Equação A.28 e Equação A.29.

$$S_{ew} \cong 45,0 \text{ kpsi (310 MPa)} \quad \text{para molas não-jateadas} \quad \text{Equação A.28}$$

$$S_{ew} \cong 67,5 \text{ kpsi (465 MPa)} \quad \text{para molas jateadas} \quad \text{Equação A.29}$$

Norton (2004, p.726) ainda chama atenção para a necessidade de encontrar os valores de tensão de flexão, o limite de resistência à fadiga sob tração e a resistência ao escoamento sob tração. A relação de von Mises entre torção e cisalhamento pode ser utilizada para converter dados disponíveis de fadiga torcional a dados de resistência à tração. É possível dividir os dados relativos à torção por 0,577 para obter os dados relativos à resistência à tração.

APÊNDICE II

A. RESULTADOS DO CÁLCULO DE MOLAS

Neste capítulo serão apresentadas as tabelas com os resultados dos cálculos do projeto de molas apresentado no item 7.3, indicando os parâmetros de entrada e de saída do projeto.

A.1. TABELA PARA A MOLA 1

Tabela A.1: Projeto de uma mola helicoidal de extensão – MOLA 1

ENTRADA	VARIÁVEL	SAÍDA	UNIDADE	COMENTÁRIO
49,05	$F_{máx}$		N	Força máxima na mola
19,62	$F_{mín}$		N	Força mínima na mola
72,00	y_i		mm	Deflexão estimada para a mola
2,20	d		mm	Diâmetro do fio
17,30	D		mm	Diâmetro médio da espira
	C	7,86		Índice de mola
	τ_i	120,78	MPa	Tensão inicial da espira
	K_s	1,06		Fator de cisalhamento
	F_i	23,36	N	Força de pré-carga
	F_m	34,335	N	Força média na mola
	F_a	14,715	N	Força alterada na mola
	τ_m	207,65	MPa	Tensão média na espira

τ_{min}	118,66	MPa	Tensão mínima da espira
K_w	1,19		Fator de Wahl
τ_a	72,29	MPa	Tensão de cisalhamento alternada
S_{ut}	1518,68	MPa	Limite de resistência à tração
S_{us}	1012,96	MPa	Limite de resistência ao cisalhamento
S_{ys}	683,41	MPa	Resistência ao escoamento sob tração
S_{ew}	310,00	MPa	Limite de resistência relativo às tensões alternadas
S_{es}	183,00	MPa	Limite de resistência à fadiga sob carregamento alternado

N_{fs}	1,99		Coeficiente de segurança para uma carga dinâmica nas espiras
----------	------	--	--

K_b	1,10		Fator de concentração de tensão
σ_a	138,37	MPa	Tensão de flexão no gancho para uma força alternada
σ_m	322,87	MPa	Tensão de flexão no gancho para uma força média
σ_{min}	184,50	MPa	Tensão para uma força mínima
S_e	264,305	MPa	Resistência de endurance por tração

N_{fA}	1,07		Coeficiente de segurança à fadiga no gancho em flexão
----------	------	--	---

K_{w2}	1,17		Fator de Wahl
τ_{Ba}	71,03	MPa	Tensão de torção no gancho para uma força alternada

τ_{Bm}	165,73	MPa	Tensão de torção no gancho para uma força alternada
τ_{Bmin}	94,70	MPa	Tensão de torção no gancho para uma força mínima
N_{fB}	1,99		Coeficiente de segurança à fadiga do gancho em torção
k	408,75	N/m	Constante da mola
N_a	112,25		Número de espiras ativas
N_t	113,25		Número de espiras no corpo
L_b	249,15	mm	Comprimento do corpo
L_f	279,35	mm	Comprimento livre
y_r	62,86	mm	Deflexão real da mola

A.2. TABELA PARA A MOLA 2

Tabela A.2: Projeto de uma mola helicoidal de extensão – MOLA 2

ENTRADA	VARIÁVEL	SAÍDA	UNIDADE	COMENTÁRIO
24,53	$F_{m\acute{a}x}$		N	Força máxima na mola
9,81	F_{min}		N	Força mínima na mola
30,00	y_i		mm	Deflexão estimada para a mola
2,00	d		mm	Diâmetro do fio
16,20	D		mm	Diâmetro médio da espira
	C	8,10		Índice de mola

τ_i	100,28	MPa	Tensão inicial da espira
K_s	1,06		Fator de cisalhamento
F_i	18,32	N	Força de pré-carga
F_m	17,168	N	Força média na mola
F_a	7,358	N	Força alterada na mola
τ_m	93,99	MPa	Tensão média na espira
τ_{min}	53,71	MPa	Tensão mínima da espira
K_w	1,18		Fator de Wahl
τ_a	44,83	MPa	Tensão de cisalhamento alternada
S_{ut}	1545,28	MPa	Limite de resistência à tração
S_{us}	1030,71	MPa	Limite de resistência ao cisalhamento
S_{ys}	695,38	MPa	Resistência ao escoamento sob tração
S_{ew}	310,00	MPa	Limite de resistência relativo às tensões alternadas
S_{es}	182,44	MPa	Limite de resistência à fadiga sob carregamento alternado

N_{fs}	3,33		Coeficiente de segurança para uma carga dinâmica nas espiras
----------	------	--	--

K_b	1,10		Fator de concentração de tensão
-------	------	--	---------------------------------

σ_a	85,91	MPa	Tensão de flexão no gancho para uma força alternada
------------	-------	-----	---

σ_m	200,45	MPa	Tensão de flexão no gancho para uma força média
------------	--------	-----	---

σ_{min}	114,54	MPa	Tensão para uma força mínima
S_e	273,516	MPa	Resistência de endurance por tração
N_{fA}	2,50		Coeficiente de segurança à fadiga no gancho em flexão
K_{w2}	1,19		Fator de Wahl
τ_{Ba}	45,05	MPa	Tensão de torção no gancho para uma força alternada
τ_{Bm}	105,12	MPa	Tensão de torção no gancho para uma força alternada
τ_{Bmin}	60,07	MPa	Tensão de torção no gancho para uma força mínima
N_{fB}	3,33		Coeficiente de segurança à fadiga do gancho em torção
k	490,50	N/m	Constante da mola
N_a	78		Número de espiras ativas
N_t	79		Número de espiras no corpo
L_b	158	mm	Comprimento do corpo
L_f	186,40	mm	Comprimento livre
y_r	12,66	mm	Deflexão real da mola

ANEXO I

Requisitos do Usuário	Características Técnicas											
	Simetria	Geometria	Usabilidade	Resistência Mecânica	Ergonomia	Transportabilidade	Vendabilidade		Importância (Usuário)	Argumento de Venda	Peso Absoluto	Peso Relativo (%)
Bilateral	⊙	○			○		Δ		3	1,5	4,5	7,1
Flexibilidade	○	⊙			○	○			9	1,5	13,5	21,3
Montagem Rápida		○	⊙	Δ					3	1,0	3,0	4,7
Resistencia da Estrutura	Δ	○		⊙	Δ	○			9	1,0	9,0	14,2
Regulagem de Altura	○				⊙				9	1,2	10,8	17,1
Armazenamento		Δ			Δ	⊙	Δ		9	1,5	13,5	21,3
Preço				Δ	Δ	Δ	⊙		9	1,0	9,0	14,2
Importância Absoluta	122,4	184,5	27	39	182,7	171	126	852,6			63,3	100%
Importância Relativa (%)	14,41	21,6	3,2	4,6	21,4	20,1	14,8	100%				