

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO DE UMA CADEIRA
DE RODAS MODULAR**

Por

Ana Helena Perez Costa

Brasília, 13 de julho de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

PROJETO DE UMA CADEIRA DE RODAS MODULAR

Por

Ana Helena Perez Costa

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

Prof. Antônio Manoel Dias Henriques,
UnB/ENM(Orientador)

Prof^ª. Aida Alves Fadel, UnB/ENM

Prof^ª. Dianne Magalhães Viana, UnB/ENM

Brasília, 13 de julho de 2018

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha família, em especial aos meus pais que sempre investiram tanto na minha educação e incentivaram todos os meus sonhos; por todo o apoio, ensinamentos e oportunidades que eles me proporcionaram. Obrigado por cada noite sem dormir por que eu ainda estava estudando, por cada incentivo quando pensei em desistir e por sempre buscarem o meu melhor. Ao meu irmão pelas incontáveis horas de discussões sobre a engenharia mecânica (para o desespero dos nossos pais), por sempre ser meu maior exemplo e incentivo e pelos momentos de descontração. À Milke, pela companhia nas infinitas horas de estudo, pelo apoio nas inúmeras discussões sobre a engenharia (mesmo que unilateral) e por sempre me receber com o rabo abanando, alegrando até os dias mais frustrantes. Às minhas avós, pelo apoio, pelo carinho e por nunca me deixarem descuidar dos estudos.

Agradeço aos amigos do curso pelos fins de semana e madrugadas de estudo, pelos ensinamentos, sem os quais não estaria aqui, e por abrirem os meus olhos para as oportunidades que a Universidade oferece. Aos amigos fora do curso por gerarem as ocasionais distrações, necessárias para manter o foco quando preciso, e pela torcida para chegar até aqui. À equipe de Vôlei da UnB por terem me acolhido, por todos os campeonatos, amistosos e treinos e por terem tornado esta uma das principais experiências de crescimento pessoal que tive na Universidade.

A todos os professores do departamento que me inspiraram a seguir neste rumo, tornando as disciplinas que lecionam interessantes, desafiadoras e gratificantes e por terem nos incentivado a buscar mais conhecimento. Em especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Antônio Manoel, por todo o apoio para transformar este trabalho na sua melhor versão possível. A TECMEC por ter me dado a motivação necessária para continuar na área e pelos conhecimentos adquiridos. Aos funcionários do departamento que sempre se esforçam para nos permitir as condições mais propícias possíveis para os estudos.

Aos funcionários do INMETRO pelo apoio prestado para o desenvolvimento deste trabalho. A CAPES e a Universidade de Utah por terem me proporcionado a oportunidade de participar do Programa Ciências sem Fronteira, cujos aprendizados foram fundamentais na elaboração deste trabalho. Ao Dr. Merryweather e Dr. Bloswick por terem me recebido no Laboratório de Ergonomia e Segurança da Universidade e por todo o conhecimento transmitido.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo o projeto de uma cadeira de rodas modular com dimensões ajustáveis. A motivação surgiu a partir da constatação da dificuldade de crianças de baixa renda terem cadeiras de rodas adequadas ao seu tamanho durante toda a infância, assim acabam recebendo cadeiras muito grandes ou se tornam maiores que a cadeira em um curto espaço de tempo. Dessa forma, as crianças estão propensas a diversos problemas de saúde causados por uma cadeira inapropriada. Portanto, a partir de um estudo histórico do desenvolvimento da cadeira de rodas e das soluções já existentes para problemas similares, as alternativas de resolução do problema foram levantadas. Em seguida, um estudo ergonômico da adaptação da cadeira de rodas ao corpo humano (cada um com suas dimensões próprias) é realizado, além da consulta à potenciais usuários para a definição da configuração mais adequada à situação. Define-se, então, a configuração final como uma cadeira de rodas com 4 rodas, estrutura rígida e com propulsão manual realizada por meio de aro propulsor. Em seguida, é realizado o dimensionamento estático de toda a estrutura utilizando-se do software Ansys para simulações e verificação estrutural baseada em forças de ensaios propostos pela ABNT NBR ISO 7176:8 (ABNT, 2009b) conjuntamente com um estudo dos materiais a serem utilizados na confecção da cadeira de rodas, buscando a solução mais barata e leve. Dimensiona-se e seleciona-se, ainda, todos os componentes necessários para o funcionamento da cadeira de rodas incluindo rolamentos, rodas e parafusos. Finalmente, obtém-se a estrutura de uma cadeira de rodas com ajuste de dimensões por meio de tubos concêntricos com tubos externos em PVC e barras internas em alumínio cujo custo total é de R\$ 1268,60. Além disso, são apresentados os desenhos de fabricação do projeto para que um protótipo possa ser desenvolvido futuramente.

Palavras-chaves: Cadeira de Rodas. Modular. Ergonomia.

Abstract

This paper proposes the design of a modular wheelchair with adjustable dimensions. The proposal is based in a difficulty faced by low-income children of having appropriate wheelchairs that fit them during their whole childhood, therefore they end up with wheelchairs that are too large for them or they quickly overgrow the chair. They are, hence, at risk to develop several health issues due to an incorrectly sized wheelchair. Thus, starting from a historical study of the development of wheelchairs and existing solutions to similar problems, the solution possibilities are raised. Then, an ergonomics study of how to adapt the wheelchair to the human body (each with its own dimensions) is performed, and potential users are consulted to determine the most appropriate configuration in this case. The final configuration is defined as a wheelchair with 4 wheels, rigid structure and push-rim as the form of manual propulsion. Then, the whole structure is dimensioned statically utilizing the Ansys software to verify structural integrity based on forces applied according to ABNT NBR ISO 7176:8 (ABNT, 2009b) in conjunction with a study of material looking for the lightest and cheapest solution. All the necessary components for the wheelchair's operation, including bearings, wheels and screws are dimensioned and selected. Finally, a wheelchairs structure with the dimensions being adjusted with concentric tubes where the external tube is made of PVC and the internal bar is aluminum which generated a total cost of the wheelchair of R\$ 1268,60. In addition, the manufacturing drawings of the project are presented so that a prototype can be developed in the future.

Key-words: Wheelchair. Modular. Ergonomics.

Lista de Figuras

Figura 1 – Cama de Criança sobre Rodas - Vaso Grego. (KAMENETZ, 1969) . . .	5
Figura 2 – Primeira Representação de uma Cadeira de Rodas - Detalhe de um Sarcófago Chinês. (KAMENETZ, 1969)	6
Figura 3 – A Fonte da Juventude (CRANACH, 1546)	6
Figura 4 – Desenho da Cadeira do Rei Philip II da Espanha (KAMENETZ, 1969)	7
Figura 5 – " <i>Roulettes</i> " - Cadeira do rei Louis XIV (CHATELAIN, 1713)	7
Figura 6 – Cadeira com Auto-Propulsão de Stephan Farfler (KAMENETZ, 1969) .	7
Figura 7 – <i>Bath Chair</i> de John Dawson	8
Figura 8 – Cadeira de Rodas do Século XVIII (CARRIEL, 2007)	8
Figura 9 – Cadeira de Rodas de Madeira (1894) (CARRIEL, 2007)	9
Figura 10 – Cadeira de Rodas Dobrável - Everest Jennings (INDIVIDUAL ABILITIES, 2016)	9
Figura 11 – Cadeiras de Rodas no Esporte Paralímpico	10
Figura 12 – Cadeira de Rodas Motorizada (OTTOBOCK, 2017a)	11
Figura 13 – Cadeira de Rodas Ortoestática (RAMOS; FONTES, 2017)	11
Figura 14 – Cadeira de Rodas com Ativação por Voz (SUK; KOJIMA, 2008) (a) Dispositivo de entrada: microfone (b) Dispositivo de reconhecimento e tela sensível ao toque (c) Dispositivo de controle analógico	11
Figura 15 – Ilustração do Modelo de Cadeira de Rodas Desenvolvida por Huckstep (CARRIEL, 2007)	12
Figura 16 – Cadeira de PVC com Estrutura Metálica (FREE WHEELCHAIR MISSION, 2017)	12
Figura 17 – Cadeira " <i>Mekong</i> "(MOTIVATION, 2017)	13
Figura 18 – Cadeira de Rodas Infantil da Thomashilfen (SUNRISE MEDICAL, 2017)	13
Figura 19 – Patente US 5564786A (PEEK et al., 1994)	14
Figura 20 – Patente US 6302429B1 (FRIEDRICH, 1999)	14
Figura 21 – Patente US 3937490A (NASR, 1973)	14
Figura 22 – Cadeira de Rodas Flexx (KARMAN, 2017)	15
Figura 23 – Cadeira de Rodas Ottobock Start M3 Hemi (OTTOBOCK, 2017b) . .	15
Figura 24 – <i>Carrier Wheelchair</i> (YANKO DESIGN, 2009)	16

Figura 25 – <i>Mountain Trike</i> (MOUNTAINTRIKE, 2018)	16
Figura 26 – CTC 41 (PAPUGA, 2012)	17
Figura 27 – Segmentos Corporais Baseado em Dados de Drillis e Contini (BLOSWICK, 2015b)	19
Figura 28 – Modelo Plástico Articulado (BLOSWICK, 2015b)	20
Figura 29 – Componentes da Cadeira de Rodas (OMS, 2012)	21
Figura 30 – Largura do Assento e do Quadril. Modificado de (OMS, 2012)	22
Figura 31 – Ângulo do Cotovelo (θ) e Ângulo de Contato com o Aro de Propulsão (β). Modificado de (MEDOLA, 2013)	23
Figura 32 – Dimensões para Definição da Altura do Encosto (OMS, 2012)	24
Figura 33 – Comprimento da Estrutura (OMS, 2012)	26
Figura 34 – Ângulo de Flexão do Joelho (BLOCO AUTOCAD, 2015)	27
Figura 35 – Formato Recomendado da Almofada (OMS, 2012)	29
Figura 36 – Aro Propulsor <i>Natural-Fit Handrim</i> (DIERUF et al., 2008)	30
Figura 37 – Revestimento de Silicone para o Aro Propulsor (ORTHO PAUHER, 2017)	30
Figura 38 – Aro Dactilo-Anatômico (MEDOLA, 2013)	30
Figura 39 – Cadeira de Rodas Feita em Tubos de PVC (OPEN WHEELCHAIR FOUNDATION, 2017)	31
Figura 40 – “ <i>The Lindde Wheel Chair</i> ” (CARRIEL, 2007)	32
Figura 41 – Cadeira de Rodas em Bambu Laminado (CARRIEL, 2014)	32
Figura 42 – Pneu com Enchimento a Ar (WHEELIN MOBILITY, 2017)	33
Figura 43 – Pneu de Borracha de Uretano (WHEELIN MOBILITY, 2017)	34
Figura 44 – Pneu com Enchimento de Espuma (WHEELIN MOBILITY, 2017)	34
Figura 45 – Estrutura de Quadro Dobrável (MOBILITY BASICS, 2017)	35
Figura 46 – Estrutura de Quadro Rígida (MOBILITY BASICS, 2017)	35
Figura 47 – DCL da Cadeira de Rodas. Modificado de (WINTER; HOTCHKISS, 2017)	36
Figura 48 – Diagrama de Corpo Livre da Cadeira de Rodas sobre um Plano Inclinado. Modificado de (BECKER, 2002)	37
Figura 49 – Diagrama de Corpo Livre da Cadeira de Rodas sobre Plano Inclinado Lateral. Modificado de (BECKER, 2002)	39
Figura 50 – Ângulo de Tombamento. Modificado de (WINTER; HOTCHKISS, 2017)	40
Figura 51 – Esquema das Partes do Corpo (ARAUJO, 2006)	41
Figura 52 – Exemplo de Estrutura de uma Cadeira de Rodas	41
Figura 53 – Simplificação de um Peça da Estrutura	41
Figura 54 – Diagrama de Corpo Livre da Barra	42
Figura 55 – Diagrama de Esforço Cortante na Viga	42
Figura 56 – Diagrama de Momento Fletor na Viga	42
Figura 57 – Elemento de Tensão Genérico (SHIGLEY et al., 2005)	44
Figura 58 – Rodas Anti-tombo (ORTOPONTO, 2018)	52

Figura 59 – Puxa/Empurra(SPORTAID, 2018)	54
Figura 60 – Trava Tesoura(SPORTAID, 2018)	54
Figura 61 – Sistema de Trava com Pistão (INDEMEDICAL, 2018)	54
Figura 62 – Esquema de Funcionamento das Peças Extras para Ajuste de Dimensão	55
Figura 63 – Versão Final da Estrutura	59
Figura 64 – 1ª Versão da Geometria da Estrutura	60
Figura 65 – 2ª Versão da Geometria da Estrutura	60
Figura 66 – Abraçadeira para Instalação das Rodas Frontais	61
Figura 67 – 3ª Versão da Geometria da Estrutura	61
Figura 68 – 4ª Versão da Geometria da Estrutura	62
Figura 69 – 5ª Versão da Geometria da Estrutura	63
Figura 70 – Roda Traseira Baxmann (MAGAZINE MEDICA, 2018)	64
Figura 71 – Detalhe do Encaixe da Roda Traseira na Estrutura	64
Figura 72 – Roda Frontal (GIRIMOI RECREACOES, 2018)	65
Figura 73 – Montagem da Roda Frontal	65
Figura 74 – Roda Frontal de uma Cadeira de Rodas Comercial	66
Figura 75 – Montagem do Eixo da Roda Frontal	66
Figura 76 – Configuração e DCL do Eixo da Roda Frontal	67
Figura 77 – Diagrama de Esforço Cortante do Eixo da Roda Frontal	67
Figura 78 – Diagrama de Momento Fletor do Eixo da Roda Frontal	68
Figura 79 – Detalhes de Encaixe do Apoio de Pé da Cadeira de Rodas Projetada .	71
Figura 80 – Detalhe do Encaixe do Apoio de Pé por Meio de Abraçadeiras em Cadeira de Rodas Comercial	72
Figura 81 – Apoio de Pé de uma Cadeira de Rodas Comercial (OESTE MED, 2018)	72
Figura 82 – Detalhe de Almofada para Apoio de Braço (OPEN WHEELCHAIR FOUNDATION, 2017)	73
Figura 83 – Sistema de Trava Ortomix (ORTOMIX, 2018)	74
Figura 84 – Modelo de Funcionamento do Método de Elementos Finitos (BHASKARAN, 2018)	76
Figura 85 – Elemento Infinitesimal (BHASKARAN, 2018)	77
Figura 86 – Malha Utilizada	79
Figura 87 – Força de 550N Aplicada na Barra Central da Estrutura	80
Figura 88 – Deflexão Sofrida pela Barra Central da Estrutura	80
Figura 89 – Tensão Normal no Eixo X Sofrida pela Barra Central da Estrutura . .	81
Figura 90 – Tensão Normal no Eixo Y Sofrida pela Barra Central da Estrutura . .	81
Figura 91 – Tensão Normal no Eixo Z Sofrida pela Barra Central da Estrutura . .	81
Figura 92 – Tensão de Cisalhamento Sofrida pela Barra Central da Estrutura . . .	82
Figura 93 – Fator de Segurança com Força Aplicada na Barra Central da Estrutura	82
Figura 94 – Força Aplicada na Barra Frontal da Estrutura	83
Figura 95 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura	83
Figura 96 – Fator de Segurança com Força Aplicada na Barra Frontal da Estrutura	84

Figura 97 – Força Distribuída Aplicada na Barra Frontal da Estrutura	84
Figura 98 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura com Força Distribuída	85
Figura 99 – Fator de Segurança com Força Distribuída Aplicada na Barra Frontal da Estrutura	85
Figura 100 – Força de 550N Aplicada na Barra Traseira da Estrutura	86
Figura 101 – Deflexão Sofrida pela Barra Traseira da Estrutura	86
Figura 102 – Fator de Segurança com Força Aplicada na Barra Traseira da Estrutura	87
Figura 103 – Força Peso Distribuída pela Estrutura	87
Figura 104 – Deflexão Sofrida pela Estrutura com a Força Peso Distribuída	88
Figura 105 – Fator de Segurança na Estrutura com a Força Peso Distribuída	88
Figura 106 – Deflexão Sofrida pela Barra Central da Estrutura de PVC Residencial .	89
Figura 107 – Tensão Equivalente com Força Concentrada Aplicada na Barra Central da Estrutura de PVC Residencial	90
Figura 108 – Força Concentrada Aplicada na Barra Central da Estrutura de PVC Residencial	90
Figura 109 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial .	91
Figura 110 – Fator de Segurança com Força Concentrada Aplicada na Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial	91
Figura 111 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura com Tubos de Aço Galvanizado	92
Figura 112 – Fator de Segurança com Força Concentrada Aplicada na Barra Central da Estrutura com Tubos de Aço Galvanizado	92
Figura 113 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial com Barra Interna de Aço	93
Figura 114 – Fator de Segurança com Força Concentrada Aplicada na Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial com Barra Interna de Aço	93
Figura 115 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial com Barra Interna de Alumínio	94
Figura 116 – Fator de Segurança com Força Concentrada Aplicada na Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial com Barra Interna de Alumínio	94
Figura 117 – Deflexão Sofrida pela Barra Traseira da Estrutura de PVC Residencial	95
Figura 118 – Fator de Segurança com Força Concentrada Aplicada na Barra Traseira da Estrutura de PVC Residencial	95
Figura 119 – Deflexão da Estrutura de PVC Residencial com Força Distribuída	96
Figura 120 – Fator de Segurança com Força Distribuída Aplicada na Estrutura de PVC Residencial	96
Figura 121 – Ângulo e Posicionamento das Forças Descendentes a Serem Aplicadas nos Apoios para Braços. (ABNT, 2009b)	97
Figura 122 – Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Braço	98
Figura 123 – Deflexão da Estrutura com a Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Braço	98

Figura 124–Fator de Segurança na Estrutura com a Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Braço	99
Figura 125–Localização das Cargas Descendentes a Serem Aplicadas nos Apoios para os Pés. (ABNT, 2009b)	100
Figura 126–Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Pé	100
Figura 127–Deformações Causadas Pela Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Pé	101
Figura 128–Fator de Segurança Devido à Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Pé	101
Figura 129–Deflexão nos Apoios para os Pés com Prendedor de Apoio de Pé em Aço SAE 1020	102
Figura 130–Fator de Segurança nos Apoios para os Pés com Prendedor de Apoio de Pé em Aço SAE 1020	102
Figura 131–Deflexão nos Apoios para os Pés com Apoio de Pé em Alumínio	103
Figura 132–Fator de Segurança nos Apoios para os Pés com Apoio de Pé em Alumínio	103
Figura 133–Deflexão nos Apoios para os Pés com Tubos Externos em Alumínio	104
Figura 134–Fator de Segurança nos Apoios para os Pés com Tubos Externos em Alumínio	104
Figura 135–Localização da Força Ascendente na Bengala. (ABNT, 2009b)	105
Figura 136–Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala	106
Figura 137–Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala	106
Figura 138–Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala	107
Figura 139–Localização e Direção da Força Ascendente no Apoio de Braço. (ABNT, 2009b)	108
Figura 140–Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Braço	108
Figura 141–Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala	109
Figura 142–Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala	109
Figura 143–Localização e Direção da Força Ascendente no Apoio de Pé. (ABNT, 2009b)	110
Figura 144–Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Pé	111
Figura 145–Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Pé	111
Figura 146–Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Pé	112
Figura 147–Localização da Força Ascendente na Bengala. (ABNT, 2009b)	113
Figura 148–Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala	113

Figura 149–Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala	114
Figura 150–Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala	114
Figura 151–Estrutura da Cadeira de Rodas com 4 Barras Verticais no Encosto	115
Figura 152–Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala com Quatro Barras no Encosto	115
Figura 153–Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala com Quatro Barras no Encosto	115
Figura 154–Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala com Quatro Barras no Encosto e Joelho Duplo em Aço SAE 1020	116
Figura 155–Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala com Quatro Barras no Encosto e Joelho Duplo em Aço SAE 1020	116
Figura 156–Montagem do Eixo da Roda Frontal	118
Figura 157–DCL do Encaixe da Roda Traseira	120
Figura 158–Diagrama de Esforço Cortante no Encaixe da Roda Traseira	121
Figura 159–Diagrama de Momento Fletor do Encaixe da Roda Traseira	121
Figura 160–Aplicação das Forças no Encaixe da Roda Traseira	122
Figura 161–Fator de Segurança Gerado no Encaixe da Roda Traseira	122
Figura 162–Aplicação das Forças no Encaixe da Roda Traseira com Fillet	123
Figura 163–Fator de Segurança Gerado no Encaixe da Roda Traseira com Fillet	123
Figura 164–Deflexão Sofrida pelo Garfo da Roda Frontal	124
Figura 165–Fator de Segurança na Estrutura do Garfo da Roda Frontal	124
Figura 166–Deflexão Sofrida pela Estrutura Modificada do Garfo da Roda Frontal	125
Figura 167–Fator de Segurança na Estrutura Modificada do Garfo da Roda Frontal	125
Figura 168–Deflexão Sofrida pela Estrutura do Garfo da Roda Frontal em ABS	126
Figura 169–Fator de Segurança no Garfo da Roda Frontal em ABS	126
Figura 170–Referência das Medidas do Corpo Humano para o Dimensionamento da Cadeira de Rodas. Modificado de: (OMS, 2012)	127
Figura 171–Ângulo do Cotovelo (θ) e Ângulo de Contato com o Aro de Propulsão (β). Modificado de (MEDOLA, 2013)	128
Figura 172–Modelo Final da Cadeira de Rodas Modular	136

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dados Antropométricos de Crianças Brasileiras entre 10 e 15 anos Ob- tidos em uma Escola Municipal em Itapeva - SP. (a) Gênero Feminino (b) Gênero Masculino (VAQUEIRO et al., 2015)	20
Tabela 2 – Síntese das Dimensões Principais da Cadeira de Rodas	28
Tabela 3 – Ângulo de Tombamento em Função da Geometria da Cadeira de Rodas (WINTER; HOTCHKISS, 2017)	40
Tabela 4 – Tabela da Distribuição de Peso para as Partes do Corpo (ARAUJO, 2006)	41
Tabela 5 – Números de Penalização para Cada um dos Fatores	45
Tabela 6 – Patentes Americanas de Sistemas de Propulsão por Alavancas (CAR- RIEL, 2014)	48
Tabela 7 – Vantagens e Desvantagens no Número de Rodas da Cadeira	49
Tabela 8 – Matriz de Decisão do Número de Rodas a Serem Utilizadas na Cadeira de Rodas	49
Tabela 9 – Matriz de Decisão da Estrutura a Ser Utilizada na Cadeira de Rodas .	50
Tabela 10 – Vantagens e Desvantagens dos Tipos de Pneu	51
Tabela 11 – Matriz de Decisão para Utilização da Roda Anti-Tombo	51
Tabela 12 – Materiais Analisados para a Estrutura da Cadeira de Rodas	52
Tabela 13 – Vantagens e Desvantagens dos Sistemas de Travamento	53
Tabela 14 – Matriz de Decisão do Tipo de Trava a Ser Utilizado na Cadeira de Rodas	54
Tabela 15 – Matriz de Decisão do Sistema de Ajuste de Dimensões	56
Tabela 16 – Resumo das Definições de Cada Sistema da Cadeira de Rodas	56
Tabela 17 – Dimensões do Tubo de PVC Industrial Utilizado	62
Tabela 18 – Fatores de Cálculo X e Y para Rolamentos Rígidos de Esferas (SKF, 2015)	70
Tabela 19 – Lista de Materiais por Componente da Cadeira de Rodas	75
Tabela 20 – Propriedades Mecânicas dos Materiais Utilizados na Montagem da Ca- deira de Rodas	75
Tabela 21 – Dimensões do Tubo de PVC Residencial Roscado Utilizado	89
Tabela 22 – Propriedades Mecânicas do PVC Residencial (MATWEB, 2018e) . . .	89

Tabela 23 – Dados dos Tubos de Aço Galvanizado	92
Tabela 24 – Forças Descendentes a Serem Aplicadas nos Apoios para Braços. (ABNT, 2009b)	97
Tabela 25 – Forças Descendentes a Serem Aplicadas nos Apoios para Pés. (ABNT, 2009b)	99
Tabela 26 – Dimensão das Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala. (ABNT, 2009b)	105
Tabela 27 – Dimensão das Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Braço. (ABNT, 2009b)	107
Tabela 28 – Dimensão das Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Pé. (ABNT, 2009b)	110
Tabela 29 – Dimensão das Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala. (ABNT, 2009b)	112
Tabela 30 – Resultados das Simulações no Modelo Final	117
Tabela 31 – Fatores para Área de Cisalhamento por Rasgamento de Roscas (NORTON, 2013)	119
Tabela 32 – Dimensões Principais das Roscas de Parafusos Métricos Padrão ISO (NORTON, 2013)	120
Tabela 33 – Recomendações para Medição do Corpo Humano. (OMS, 2012)	128
Tabela 34 – Transformar as Medidas do Corpo em Dimensões da Cadeira de Rodas	129
Tabela 35 – Quadro de Manutenção	132
Tabela 36 – Tabela de Custos de Peças Compradas	133
Tabela 37 – Tabela de Custos de Peças Produzidas	134

Lista de símbolos

Símbolos Latinos

A	Área Frontal da Cadeira de Rodas [m^2]
C_x	Coefficiente de Penetração Aerodinâmica [-]
D	Diâmetro Externo [m]
d	Diâmetro Interno [m]
d_{aro}	Diâmetro do Aro da Roda [m]
e	Espessura [m]
F	Força [N]
I	Momento de Inércia [m^4]
L	Distância [m]
M	Momento Fletor [Nm]
P	Potência [W]
Q	Momento Estático [m^3]
R	Resistência [N]
R_a	Resistência do ar [N]
V	Esforço Cortante [N]
v_x	Velocidade Longitudinal da Cadeira de Roda [m/s]
v_{vento}	Velocidade do Vento [m/s]

Símbolos Gregos

θ	Ângulo de Cotovelo
β	Ângulo de Contato com o Aro Propulsor

φ	Ângulo de Flexão do Joelho
γ	Ângulo de Inclinação da Rampa
θ_{tomb}	Ângulo de Tombamento
ρ_{ar}	Densidade do Ar [kg/m^3]
μ	Coefficiente de Rolagem
τ	Tensão de Cisalhamento [MPa]
σ	Tensão Normal [MPa]

Subscritos

adm	Admissível
rf	Roda Frontal
rt	Roda Traseira
x	Direção x
y	Direção y

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CG	Centro de Gravidade
DCL	Diagrama de Corpo Livre
FS	Fator de Segurança
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial de Saúde
PETG	Poli Tereftalato de Etileno Glicol
PLA	Plástico de Poliacido Láctico

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.1.1	Objetivo	1
1.2	Metodologia	2
1.3	Requisitos de Projeto	2
1.3.1	Necessidades	2
1.3.2	Expectativas	3
1.4	Divisão do Trabalho	3
2	CONTEXTUALIZAÇÃO	5
2.1	Histórico	5
2.2	Mercado Hoje	11
2.2.1	Modularidade	13
2.3	Perspectivas Futuras	15
3	ERGONOMIA	18
3.1	Antropometria	18
3.2	Dimensionamento da Cadeira	21
3.2.1	Profundidade do Assento	21
3.2.2	Largura do Assento	22
3.2.3	Inclinação do Assento	22
3.2.4	Altura do Assento em Relação ao Eixo da Roda Traseira	23
3.2.5	Altura do Encosto	23
3.2.6	Inclinação do Encosto	24
3.2.7	Posição da Roda Traseira	24
3.2.8	Inclinação das Rodas Traseiras	25
3.2.9	Rodas Dianteiras	25
3.2.10	Apoio para os Pés	26
3.2.11	Apoio para os Braços	27
3.2.12	Síntese das Dimensões	28

3.3	Componentes	28
3.3.1	Almofada	28
3.3.2	Aros de Propulsão	29
3.4	Materiais	30
3.4.1	Estrutura da Cadeira	30
3.4.2	Rodas	32
3.4.3	Pneu	33
3.4.3.1	Pneus com Enchimento a Ar	33
3.4.3.2	Pneus de Uretano	33
3.4.3.3	Pneus com Enchimento de Espuma	34
3.5	Estrutura do Quadro	34
3.5.1	Estrutura Dobrável	34
3.5.2	Estrutura Rígida	35
	4 ANÁLISE ESTRUTURAL	36
4.1	Forças na Cadeira de Rodas	36
4.2	Tensões Estáticas na Cadeira de Rodas	40
4.3	Fator de Segurança	44
	5 PROJETO CONCEITUAL	47
5.1	Tipo de Propulsão	47
5.2	Número de Rodas	48
5.3	Estrutura	49
5.4	Tipo de Roda e Pneu	50
5.4.1	Rodas Traseiras	50
5.4.2	Rodas Dianteiras	50
5.5	Dispositivo Anti-tombo	51
5.6	Material	52
5.7	Travamento	53
5.8	Sistema de Ajuste de Dimensões	55
5.9	Configuração	56
	6 DETERMINAÇÃO INICIAL DA GEOMETRIA	57
6.1	Dimensões	57
6.2	Dimensionamento dos Tubos	58
6.2.1	Diâmetro	58
6.2.2	Comprimento	58
6.3	Estrutura	58
6.3.1	Primeira Versão	59
6.3.2	Segunda Versão	60
6.3.3	Terceira Versão	61
6.3.4	Quarta Versão	62

6.3.5	Quinta Versão	62
6.4	Rodas Traseiras	63
6.5	Rodas Frontais	64
6.6	Eixo da Roda Frontal	66
6.7	Rolamentos	68
6.7.1	Rolamentos Roda Frontal	68
6.7.2	Rolamentos Roda Traseira	69
6.7.3	Rolamentos de Direção da Roda Frontal	70
6.8	Apoios de Pé	71
6.9	Apoios de Braço	72
6.10	Trava	73
6.11	Assento	74
6.12	Encosto	74
6.13	Material	74
	7 ANÁLISES ESTRUTURAIS ESTÁTICAS	76
7.1	Ansys	76
7.1.1	Princípios Básicos	76
7.1.2	Modelo Matemático	77
7.1.3	Malha	78
7.1.4	Condições de Contorno	79
7.2	Sustentação do Peso do Usuário	79
7.2.1	Análise da Versão 4	79
7.2.1.1	Força Peso na Barra Central	79
7.2.1.2	Força Peso na Barra Frontal	82
7.2.1.3	Força Peso na Barra Traseira	85
7.2.1.4	Força Peso Distribuída	87
7.2.2	Análise da Versão 5	88
7.2.2.1	Força Peso na Barra Central	89
7.2.2.2	Força Peso na Barra Frontal	90
7.2.2.3	Força Peso na Barra Traseira	94
7.2.2.4	Força Peso Distribuída	95
7.3	Ensaio da Norma ABNT NBR ISO 7176:8	97
7.3.1	Apoio para Braços: Resistência às Forças Descendentes	97
7.3.2	Apoio para os Pés: Resistência às Forças Descendentes	99
7.3.3	Aros de Impulsão	104
7.3.4	Apoio para Braços: Resistência às Forças Ascendentes	107
7.3.5	Apoio para os Pés: Resistência às Forças Ascendentes	110
7.3.6	Empunhadura: Resistência às Forças Ascendentes	112
7.4	Síntese da Análise	117

	8	DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES MECÂNICOS	118
8.1		Parafusos	118
8.2		Suporte da Roda Traseira	120
8.3		Garfo da Roda Frontal	123
	9	MONTAGEM E MANUTENÇÃO	127
9.1		Definição das Medidas	127
9.2		Contagem dos Componentes Necessários	129
9.3		Montagem	129
9.4		Manutenção	132
	10	CUSTOS	133
10.1		Peças Adquiridas	133
10.2		Peças Fabricadas	133
	11	CONCLUSÃO	135
11.1		Trabalhos Futuros	136
		REFERÊNCIAS	138
		APÊNDICES	144
		APÊNDICE A – RESULTADO DOS QUESTIONÁRIOS <i>ON-LINE</i>	145
		APÊNDICE B – CÓDIGO MATLAB - DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATERIAL NECESSÁRIA	147
B.1		Comprimento do Tubo de PVC	147
B.2		Quantidade de Tubos Internos	151
B.3		Quantidade de Parafusos	155
		ANEXOS	159
		ANEXO A – TABELAS PHEASANT	160
		ANEXO B – RECOMENDAÇÕES DE RESISTÊNCIA, DURABILIDADE E SEGURANÇA (CARRIEL, 2014)	162

1 Introdução

1.1 Contextualização

Das 65 milhões de pessoas que precisam de uma cadeira de rodas no mundo, 20 milhões não tem acesso a uma. Calcula-se, ainda, que apenas uma minoria das pessoas tem acesso a uma cadeira apropriada, ou seja, que atende às necessidades do usuário e do ambiente, proporciona ajuste e suporte postural adequados e é segura e durável (OMS, 2008). No caso de crianças, o acesso a uma cadeira de rodas adequada se torna ainda mais importante pois é essencial para que elas tenham acesso à educação e possam se desenvolver e se especializar para serem empregadas futuramente.

(CARRIEL, 2007, p. 32) cita a necessidade do uso de tecnologias assistivas (como cadeiras de rodas) como potencializador das desigualdades sociais: "Uma das maiores dificuldades para oferecer alternativas de acessibilidade com grau de conforto, segurança e eficiência a esses indivíduos é o custo do produto. Por outro lado, é possível encontrar alguns desenvolvimentos projetuais que não atendem muito as necessidades de reabilitação físicas e/ou fisiológicas, mas superam plenamente as necessidades cognitivas e financeiras da população. Embora seja um risco à saúde, o uso desses artefatos é uma alternativa que favorece a integração social e permite, parcialmente, que pessoas com necessidades assistivas sejam beneficiadas."

Percebe-se, então, que um dos maiores desafios no projeto de uma cadeira de rodas é atender todas as necessidades que garantem saúde e segurança para os usuários mantendo custos baixos para permitir o acesso generalizado da população. Dessa forma, permite a colaboração e integração do indivíduo na sociedade, uma vez que uma cadeira de rodas apropriada é essencial para que o indivíduo possa trabalhar e contribuir para a sociedade, o que colabora com a saúde mental do usuário.

1.1.1 Objetivo

Portanto, o objetivo deste trabalho é o projeto de uma cadeira de rodas com as seguintes características:

Baixo Custo

Dimensões Adaptáveis (para acompanhar o crescimento da criança sem que haja necessidade de substituição da cadeira com frequência)

Atender os requisitos ergonômicos para proporcionar adequação postural

Dessa forma, a criança pode usufruir de uma cadeira de rodas apropriada durante todo seu crescimento sem custos excessivos, sem ter que usar cadeiras muito maiores ou menores que suas dimensões. Cadeiras não apropriadas podem causar problemas nos ombros devido à dificuldade de propulsão, desvios de coluna devido à falta de suporte postural, lesões de pele (úlceras de pressão) devido à áreas de contato incorretas com o assento, entre outras (OMS, 2012) e (MEDOLA, 2013).

1.2 Metodologia

O trabalho foi desenvolvido seguindo metodologia de projeto, se iniciando com um projeto conceitual onde se determinou os requisitos para viabilidade, verificadas as alternativas já existentes no mercado e suas limitações e realizadas matrizes de decisão para identificar a melhor solução entre as possibilidades abordadas. Além disso, é realizado uma análise de forças que atuam no sistema para posterior dimensionamento da estrutura.

Em seguida, é realizado o projeto intermediário, onde foi feito o dimensionamento estático da estrutura com base na norma ABNT NBR ISO 7176:8 (ABNT, 2009b) com método de elementos finitos, seleção de componentes, análise e escolha de materiais. Além disso, foi realizado um manual de montagem e manutenção da cadeira de rodas, análise de custo, e desenhos técnicos.

Por fim, o projeto de detalhamento apresentou desenhos de fabricação e de conjunto com ajustes e tolerâncias suficientes para a elaboração de um protótipo, que não foi abordado neste trabalho.

1.3 Requisitos de Projeto

Para obter um projeto que atenda em larga escala os potenciais usuários é preciso definir os requisitos de projeto, separados em: necessidades e expectativas.

1.3.1 Necessidades

As necessidades consistem em fatores que devem absolutamente ser satisfeitos para que o projeto seja considerado viável.

Custo mínimo

Peso mínimo

Resistente à fatores externos (sol e chuva)

Dimensões máximas: comprimento de 1050mm e largura de 750mm (ABNT, 2009a)

1.3.2 Expectativas

As expectativas devem ser satisfeitas na medida do possível no projeto, no entanto não são obrigatórias.

Baixa manutenção

Vida útil: 8 anos

Compactável

Resistente à terrenos irregulares*

Dimensões mínimas*

*De acordo com (OMS, 2008), o projeto da cadeira de rodas para pessoas de baixa renda deve contemplar estes quesitos uma vez que estes moram em casas ou barracas pequenas que não respeitam as normas de acessibilidade (rampas, largura entre paredes, etc.). Deve-se considerar, ainda, que as ruas nestas áreas não são pavimentadas e que as condições climáticas e de terreno são, muitas vezes, extremas.

1.4 Divisão do Trabalho

A divisão realizada por capítulos foi feita da seguinte forma: o primeiro capítulo apresenta uma introdução com os objetivos e requisitos de projeto. Em seguida, o capítulo 2 apresenta o histórico da cadeira de rodas, desde o primeiro registro que se possui até as soluções mais modernas. Dá-se destaque, ainda, para as variedades existentes no mercado relativo a modularidade e ajuste de dimensões, que é o foco deste trabalho.

Em seguida, o capítulo 3 faz uma passagem pelos conceitos de ergonomia necessários para o projeto da cadeira de rodas, incluindo a antropometria dos usuários, as dimensões necessárias para o suporte correto da postura do usuário da cadeira de rodas além de outros componentes essenciais para o seu funcionamento. O capítulo 4, então, faz uma análise estrutural da cadeira de rodas citando as forças e as tensões que atuam sobre a estrutura e a necessidade de a dimensionar de acordo. Inclui, ainda, a definição do fator de segurança de projeto.

Dando prosseguimento, o capítulo 5 apresenta o projeto conceitual, explicitando as alternativas estudadas e as decisões realizadas para selecionar a concepção preliminar.

Dando continuidade com o projeto intermediário e de detalhamento, no capítulo 6 é apresentado o desenvolvimento da geometria da cadeira de rodas, incluindo o processo de determinação das dimensões críticas da cadeira de rodas, o desenvolvimento da estrutura em software SolidWorks® até a obtenção de uma configuração final, seleção dos rolamentos, do eixo da roda frontal e de componentes como trava, rodas e almofadas.

O capítulo 7 apresenta as simulações utilizando o Método de Elementos Finitos por meio do software Ansys®, buscando verificar a integridade da estrutura quando as forças de ensaios propostos pela ABNT NBR ISO 7176:8 (ABNT, 2009b) são aplicadas sobre a mesma. Assim, as modificações de geometria e material necessários para garantir a segurança da estrutura são realizados.

Já no capítulo 8, são dimensionados componentes que não foram determinados na primeira etapa de simulação como os parafusos, garfo da roda frontal e o suporte da roda traseira.

Em seguida, os capítulos 9 e 10 apresentam as recomendações de montagem e manutenção da cadeira de rodas e os custos para tal, respectivamente. Por fim, o capítulo 11 apresenta as conclusões do trabalho.

2 Contextualização

2.1 Histórico

Apesar da invenção da cadeira e da roda terem ocorrido por volta de 4000 a.C., o primeiro registro da combinação da roda com mobílias é de uma imagem em um vaso grego de uma cama de criança que possuía rodas em cerca de 530 a.C (Figura 1). No entanto, a combinação da cadeira com as rodas só é registrada cerca de mil anos depois em uma escultura de pedra na China em 525 d.C. (Figura 2). Antes disso, os deficientes, lesionados ou doentes eram transportados em macas ou palanquins. Além disso, uma outra forma de transporte de pessoas (desde o século 3) é o carrinho de mão. Em 1546, o pintor Lucas Cranach retrata (no canto inferior esquerdo da obra) o transporte de velhos e inválidos até a Fonte da Juventude de formas diversas: carregados nos ombros de homens, em carrinhos de mão, carruagens e macas (Figura 3).



Figura 1 – Cama de Criança sobre Rodas - Vaso Grego. (KAMENETZ, 1969)



Figura 2 – Primeira Representação de uma Cadeira de Rodas - Detalhe de um Sarcófago Chinês. (KAMENETZ, 1969)



Figura 3 – A Fonte da Juventude (CRANACH, 1546)

Por volta do século XVI, colocava-se pequenas rodas em cadeiras ou poltronas para deficientes ou idosos. No entanto, as rodas eram mais utilizadas para o transporte da cadeira em si e não das pessoas. No entanto, essas cadeiras eram feitas em casos individuais e apenas pelos mais ricos. Um dos grandes destaques dessa época é a cadeira de rodas feita por Jehan Lhermite para o rei da Espanha, Philip II, em 1595 (Figura 4). Ela apresentava apoio para os pés ajustável, quatro rodas pequenas, além de ser reclinável. No entanto, dependia de empregados para a locomoção já que não possuía auto-propulsão. O rei Philip II virou um marco na história da cadeira de rodas uma vez que vários outros

nobres procuraram desenvolver cadeiras para locomoção dentro de casa. Na França em 1686, o rei Louis XIV chegou a possuir mais de 20 cadeiras (Figura 5) em seu castelo para o seu conforto (e de seus convidados).



Figura 4 – Desenho da Cadeira do Rei Philip II da Espanha (KAMENETZ, 1969) Figura 5 – "Roulettes" - Cadeira do rei Louis XIV (CHATELAIN, 1713)

Uma das primeiras cadeiras com auto-propulsão foi criada pelo relojoeiro paraplégico Stephan Farfler. Com três rodas, a cadeira utilizava um sistema de engrenagens com duas manivelas para girar a roda dianteira e gerar o deslocamento (Figura 6).

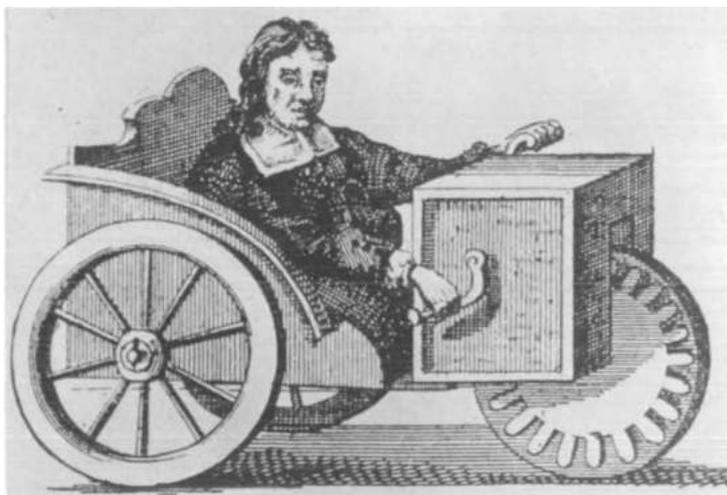
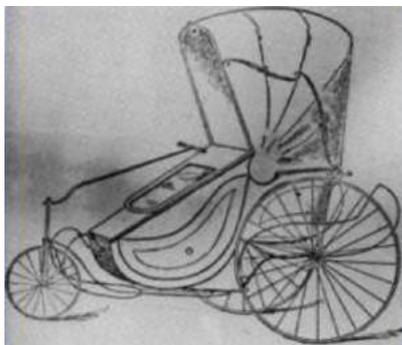


Figura 6 – Cadeira com Auto-Propulsão de Stephan Farfler (KAMENETZ, 1969)

Como mencionado anteriormente, as cadeiras de rodas não eram exclusivas para deficientes; os nobres e ricos utilizavam como forma de locomoção para ter mais conforto. Nesse contexto, surgiu, em 1798, a cadeira chamada de "Bath Chair", feita por John Dawson na cidade de Bath, Inglaterra (Figura 7). Ela era utilizada para transporte nos spas na Europa (quase como um táxi). Era feita de ferro e tinha duas rodas traseiras grandes e uma pequena na frente além de possuir uma barra de direção que permitia ao

usuário o controle do caminho enquanto alguém empurrava a cadeira para que esta se movesse. Apesar de ser muito pesada e pouco confortável, dominou o mercado de cadeiras de rodas até o século XIX.



(a) (SAWATZKY, 2002)



(b) (BBC, 2017)

Figura 7 – *Bath Chair* de John Dawson

No século XVIII, o conforto dos nobres era a prioridade das cadeiras de rodas e, portanto, muitos modelos foram criados com isso em mente. Na Figura 8 percebe-se uma configuração com guarda sol e com as rodas extremamente afastadas para se adequar ao grande volume das roupas utilizadas na época.

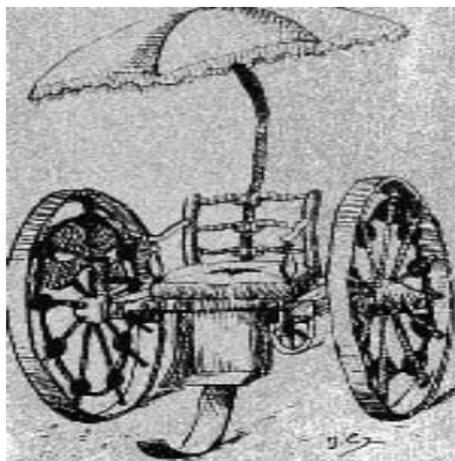


Figura 8 – Cadeira de Rodas do Século XVIII (CARRIEL, 2007)

Nos anos seguintes, várias mudanças surgiram que aproximaram a cadeira de rodas ao padrão mais conhecido da atualidade. Foram implementados: as rodas traseiras grandes o suficiente para serem giradas pelo próprio usuário, aros nas rodas traseiras (1881), encosto reclinável, o apoio para os pés se tornou duas pranchas em vez de uma. No entanto, a mudança mais significativa ocorreu graças ao avanço tecnológico da bicicleta com a utilização de rodas de borracha (substituindo a madeira ou o ferro). Essa implementação foi realizada na cadeira de rodas no final do século XIX.

Nos Estados Unidos, a entrada da cadeira de rodas ocorreu devido à Guerra Civil Americana (1861-1865), e a primeira patente do objeto foi em 1894. A cadeira, feita toda de madeira, pode ser vista na Figura 9 e foi usada no mundo inteiro por um longo período.



Figura 9 – Cadeira de Rodas de Madeira (1894) (CARRIEL, 2007)

Em 1933, outro avanço significativo foi realizado, também nos EUA, devido ao desenvolvimento do carro. O engenheiro mecânico Harry Jennings desenvolveu uma cadeira de rodas dobrável para o amigo Herbert Everest, que ficou paraplégico depois de um acidente em uma mina, pois viu-se necessário uma cadeira que pudesse ser transportada dentro dos veículos que estavam surgindo. A cadeira que deu origem à companhia Everest & Jennings (que dominou o mercado de cadeiras de rodas por muitos anos) pode ser vista na Figura 10 e se assemelha muito à cadeira de rodas tradicionalmente utilizada em hospitais. Era feita com tubos de aço e era bem mais leve que as alternativas da época.



Figura 10 – Cadeira de Rodas Dobrável - Everest Jennings (INDIVIDUAL ABILITIES, 2016)

A cadeira de rodas passou a ser uma representação da pessoa com deficiência após os soldados feridos nas duas grandes guerras mundiais serem vistos nelas. Era comum o pensamento que estes eram incapazes de cuidar de si mesmos ou de contribuir para a sociedade. Nesse contexto, surgiu o esporte como terapia para os soldados com lesões me-

dulares e, em 1960, as Paralimpíadas. O esporte paralímpico possibilitou diversos avanços nas cadeiras de rodas para gerar maior eficiência nas competições (Figura 11).



(a) (RONCHI, 2014)



(b) (RONCHI, 2014)



(c) (THE TELEGRAPH, 2016)

Figura 11 – Cadeiras de Rodas no Esporte Paralímpico

No Brasil, a cadeira de rodas inventada por Joaquim Marques de Oliveira e Souza, cuja imagem não foi encontrada, foi o primeiro objeto a ter sua patente requisitada em 1830. O então imperador, D. Pedro I, concedeu exclusividade sobre o objeto por 10 anos

de acordo com o Art. 1º da “Lei de 28 de agosto de 1830”.

2.2 Mercado Hoje

Atualmente, a variedade de modelos de cadeiras de rodas é gigantesca. Muitas soluções foram criadas para os mais diversos tipos de limitações: cadeira de rodas motorizada (Figura 12) para aqueles sem força ou movimento para a propulsão manual, cadeira de rodas orto estática (ou "*Stand-Up*") que levanta permitindo ao usuário ficar numa posição ereta como se estivesse em pé (Figura 13) para alcançar objetos, cadeira de rodas motorizada com ativação por voz (Figura 14) para aqueles sem controle nenhum dos membros superiores e assim por diante.



Figura 12 – Cadeira de Rodas Motorizada (OTTOBOCK, 2017a) Figura 13 – Cadeira de Rodas Ortoestática (RAMOS; FONTES, 2017)

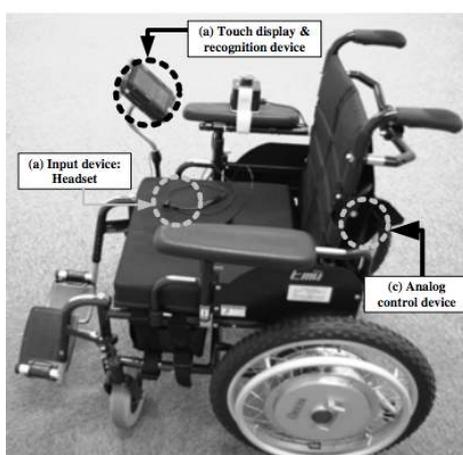


Figura 14 – Cadeira de Rodas com Ativação por Voz (SUK; KOJIMA, 2008) (a) Dispositivo de entrada: microfone (b) Dispositivo de reconhecimento e tela sensível ao toque (c) Dispositivo de controle analógico

No entanto, as opções de cadeiras de rodas a preços acessíveis são bem menos abrangentes e não costumam respeitar todas as recomendações de segurança e conforto. Mesmo assim, esforços consideráveis foram realizados na busca do acesso total às tecnologias assistivas. O médico inglês, Huckstep, desenvolveu um protótipo (Figura 15)

juntamente com um programa social em Uganda que busca apoiar as vítimas de minas terrestres.

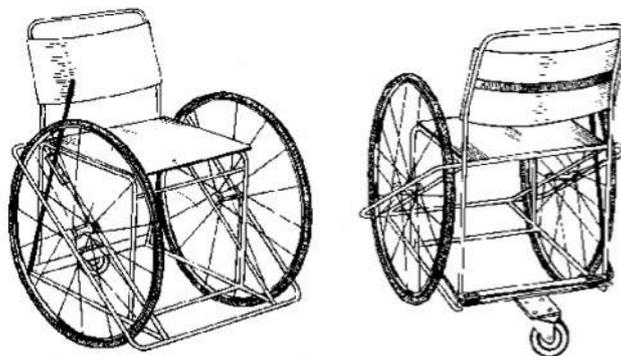


Figura 15 – Ilustração do Modelo de Cadeira de Rodas Desenvolvida por Huckstep (CARRIEL, 2007)

Um projeto que já atuou em 93 países subdesenvolvidos fornecendo cadeiras de rodas para os mais necessitados, o "*Free Wheelchair Mission*" consegue reduzir significativamente o custo do equipamento ao aproveitar uma cadeira de PVC e adicionar uma estrutura metálica como é visto na Figura 16. Outro projeto similar é da fundação "*Motivation*" da Inglaterra, que também atua em países subdesenvolvidos (mais de 120 países). O principal produto da fundação é o "*Mekong*" (Figura 17), cadeira com três rodas que é ideal para terrenos irregulares. Neste caso, a preocupação com os fatores de conforto e saúde do usuário é bem mais evidente com ajustabilidade nas dimensões do assento e posicionamento do apoio para os pés, além de uma almofada apropriada.



Figura 16 – Cadeira de PVC com Estrutura Metálica (FREE WHEELCHAIR MISSION, 2017)



Figura 17 – Cadeira "Mekong"(MOTIVATION, 2017)

2.2.1 Modularidade

Alguns projetos de cadeiras de rodas têm buscado proporcionar uma maior versatilidade de dimensões trabalhando com conceitos modulares. Nesse sentido, os produtos para crianças são os principais motivadores. Uma cadeira de rodas da Thomashilfen possui um modelo com ajuste de largura e profundidade do assento para crianças. No entanto, apresenta uma solução cara que mais se assemelha à um carrinho de bebê, o que limita a liberdade da criança para explorar e ter independência. A Figura 18 mostra as possibilidades de ajuste do assento e a configuração da cadeira.



Figura 18 – Cadeira de Rodas Infantil da Thomashilfen (SUNRISE MEDICAL, 2017)

Existem duas patentes nos EUA, já expiradas, que também se utilizam do conceito de ajuste de dimensões. A US pat. 5564786A, mostrada na Figura 19, se trata de uma estrutura com trilhos laterais com furos igualmente espaçados e um tubo central englobado telescopicamente para ajuste da dimensão. Já a US pat. 6302429B1 foi criada para ser uma cadeira mutável entre quadro rígido e quadro dobrável além de outras permutações.

Para tal, possui um sistema parecido com a patente anterior mas com tubos de seção circular e com ajuste na altura do encosto e no comprimento da cadeira, visível na Figura 20.

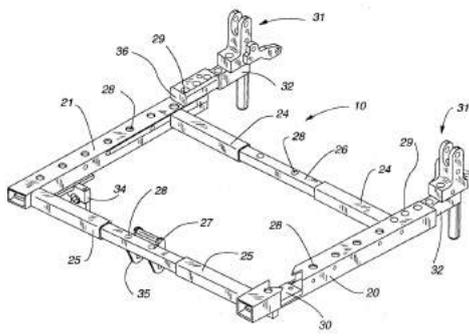


Figura 19 – Patente US 5564786A (PEEK et al., 1994)

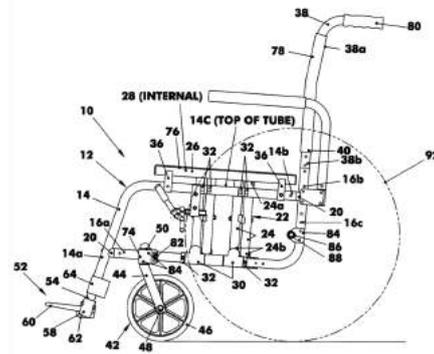


Figura 20 – Patente US 6302429B1 (FRIEDRICH, 1999)

Nessa mesma linha, a cadeira de rodas da US pat. 3937490A também possui ajustabilidade com tubos telescópicos. Neste caso, os ajustes podem ser realizados na largura do assento e do encosto, a altura do assento e dos apoios de braço além da profundidade do assento. A diferença desse modelo é a solução para o assento feito de tecido que dobra ao redor do tubo de suporte e é preso por meio de botões de pressão (Figura 21). Os sistemas com tubos telescópicos apresentados nas patentes possuem a desvantagem de ter um peso maior que o necessário na estrutura, dificultando a propulsão dos usuários.

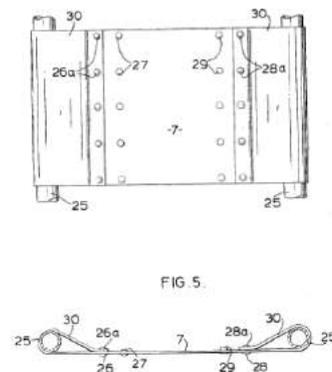
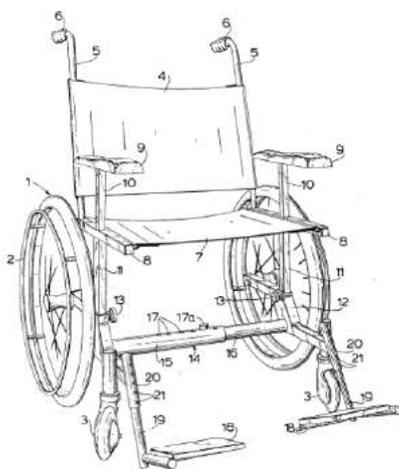


FIG. 5.

Figura 21 – Patente US 3937490A (NASR, 1973)

A cadeira Flexx (KARMAN, 2017), mostrada na Figura 22 também possui ajustabilidade nas seguintes configurações: profundidade do assento, altura do assento, encosto, e apoio dos braços, ângulo do encosto e posição das rodas traseiras. Esses ajustes funcionam em um sistema de furos nos tubos de suporte onde as partes são posicionadas nos furos apropriados para maior conforto do usuário. Novamente, trata-se de um produto inacessível para boa parte da população.



Figura 22 – Cadeira de Rodas Flexx (KARMAN, 2017)

Um produto bastante similar à cadeira de rodas Flexx é a Ottobock Start M3 Hemi (Figura 23), que também possui ajuste da posição das rodas traseiras e profundidade do assento regulável da mesma forma que a anterior e, também, é extremamente cara.



Figura 23 – Cadeira de Rodas Ottobock Start M3 Hemi (OTTOBOCK, 2017b)

2.3 Perspectivas Futuras

Alguns protótipos e ideias sendo desenvolvidos são tão inovadores que parecem ser inviáveis. No entanto, eles buscam resolver dificuldades diárias dos usuários de cadeiras de rodas da melhor maneira possível. Um protótipo, chamado de *Carrier Wheelchair* desenvolvido no Instituto de Design da Universidade de Artes de Viena por Julia Kaisinger, Mathias Mayrhofer e Benesch Xiulian proporciona independência para os cadeirantes mesmo em terrenos irregulares como escadas. Além disso, permite a elevação do usuário para uma posição quase ereta para alcançar objetos. Essas funcionalidades podem ser vistas na Figura 24.



Figura 24 – *Carrier Wheelchair* (YANKO DESIGN, 2009)

A cadeira *Mountain Trike* possibilita a utilização em terrenos totalmente irregulares como praias, grama, cascalhos, lama e neve. A roda traseira adicional, vista na Figura 25, proporciona a estabilidade necessária para estas superfícies.



Figura 25 – *Mountain Trike* (MOUNTAINTRIKE, 2018)

A cadeira CTC 41 projetada pelo designer Douglas Papuga e apresentada na Figura 26, busca resolver problemas como o peso excessivo e custo elevado das cadeiras de rodas tradicionais, a dificuldade de propulsão com o aro tradicional, pneus que furam frequentemente. Dessa forma propõe um padrão de favo de mel por gerar uma estrutura extremamente leve, além de ser feita de material reciclado.



Figura 26 – CTC 41 (PAPUGA, 2012)

3 Ergonomia

A ergonomia surge como campo de estudo em 12 de junho de 1949 quando um grupo de cientistas e pesquisadores se reúnem pela primeira vez, na Inglaterra, para discutir e formalizar a existência desse novo ramo. Foi na segunda reunião desse mesmo grupo, em 16 de fevereiro de 1950, que o termo ergonomia foi criado como uma junção dos termos gregos *ergo*, que significa trabalho, e *nomos*, que significa regras ou leis naturais (SILVA, 2009).

Essa área possui como característica a sua interdisciplinariedade, sendo uma junção das áreas de saúde, projeto de máquinas e equipamentos e a organização do trabalho. Dessa forma, engenheiros, médicos, fisioterapeutas, designers, educadores físicos, arquitetos, e psicólogos entre outros atuam conjuntamente nesse campo.

Ergonomia é definida atualmente como: "uma disciplina científica relacionada ao entendimento das interações entre os seres humanos e outros elementos ou sistemas, e à aplicação de teorias, princípios, dados e métodos a projetos a fim de otimizar o bem estar humano e o desempenho global do sistema"(ABERGO, 2017, online). Ou seja, essencialmente, se preocupa com a interação homem - máquina a fim de otimizar os postos de trabalhos, máquinas, equipamentos e horários às exigências do homem para aumentar a produtividade e diminuir problemas de saúde.

Nesse sentido, percebe-se a necessidade do estudo da ergonomia na interação ser humano - cadeira de rodas para evitar lesões e proporcionar maior conforto e eficiência no movimento.

3.1 Antropometria

Antropometria é o "subconjunto da ergonomia que trata da quantificação das dimensões do corpo humano e do projeto de sistemas que se adaptem à enorme variação presente na população"(BLOSWICK, 2015b, p. II-1). Geralmente, os objetos são projetados para atender o intervalo de 5% a 95% da população devido à essa amplitude muito elevada de dimensões. Ou seja, os 5% mais baixos da população e os 5% mais altos não estariam inclusos no projeto da altura adequada de uma prateleira, por exemplo.

Existem diversos métodos para caracterizar dimensões específicas do corpo hu-

mano para adultos; o primeiro método, de Drills e Contini, consiste no comprimento dos segmentos corporais baseado na altura do indivíduo como é visto na Figura 27. Assim, é suficiente conhecer a altura do indivíduo e todas as outras dimensões podem ser encontradas multiplicando os valores decimais apresentados pela altura.

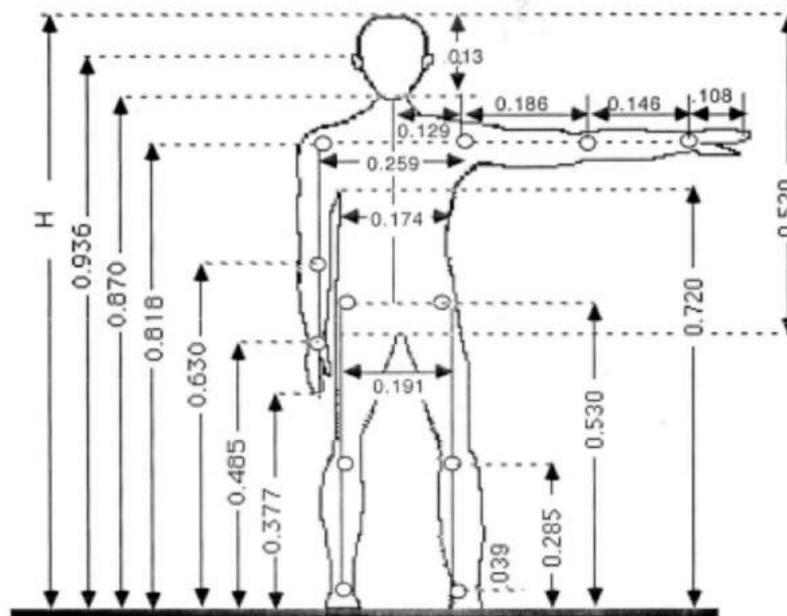


Figura 27 – Segmentos Corporais Baseado em Dados de Drillis e Contini (BLOSWICK, 2015b)

Outro método de determinação das dimensões é baseado na Tabela Pheasant (BLOSWICK, 2015a apud PHEASANT, 1996), onde Stephen Pheasant já relaciona as dimensões para os 5%, 50% e 95% da população de homens e mulheres. É importante destacar que esses valores podem ser extrapolados para aqueles indivíduos que não se encaixam nessas faixas utilizando regra de três. A Tabela Pheasant encontra-se no Anexo A.

Outro método, mais versátil mas menos preciso, se baseia na utilização de um modelo plástico articulado. O modelo de plástico representa um homem médio da população americana (50%) e deve ser usado juntamente com uma régua como é visto na Figura 28. Uma dimensão nele representa um décimo do tamanho real e também pode ser extrapolado para pessoas que não estão nessa faixa com uma regra de três.

É importante destacar que todos esses métodos foram desenvolvidos nos EUA e se referem a população adulta americana. Os dados para a população brasileira são mais difíceis de serem obtidos, especialmente para crianças por possuir uma variação muito grande dependendo da idade. Um estudo (VAQUEIRO et al., 2015) realizado em uma escola municipal em Itapeva - SP com crianças entre 10 e 15 anos, encontrou de forma aproximada, dimensões corporais próximas dos valores encontrados se utilizado o método de Drills e Contini (largura do quadril média de um aluno do gênero masculino no estudo é de 29 cm e pelo método de Drills e Contini é de 27 cm). Os valores encontrados no



Figura 28 – Modelo Plástico Articulado (BLOSWICK, 2015b)

estudo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados Antropométricos de Crianças Brasileiras entre 10 e 15 anos Obtidos em uma Escola Municipal em Itapeva - SP. (a) Gênero Feminino (b) Gênero Masculino (VAQUEIRO et al., 2015)

Segmentos corporais (cm)	\bar{X}	σ	P_5	P_{95}	Segmentos corporais (cm)	\bar{X}	σ	P_5	P_{95}
Estatura	141	14	118	165	Estatura	142	16	115	168
Altura poplítea	35	4	29	41	Altura poplítea	35	4	29	42
Comprimento nádega-poplíteia	40	4	33	46	Comprimento nádega-poplíteia	39	6	28	49
Largura do quadril	29	3	24	33	Largura do quadril	29	3	24	34
Altura do cotovelo a partir do assento	19	2	16	22	Altura do cotovelo a partir do assento	19	2	16	23
Largura entre os cotovelos	32	3	27	38	Largura entre os cotovelos	32	4	26	38
Altura da parte superior das coxas	12	1	10	14	Altura da parte superior das coxas	12	1	10	14
Altura lombar	19	2	16	22	Altura lombar	19	2	16	23
Comprimento nádega-jelho	48	5	40	56	Comprimento nádega-jelho	48	5	40	57

(a)

(b)

Além disso, os dados antropométricos para crianças deficientes são ainda mais difíceis de serem obtidos uma vez que essa parcela da população é muito pouco estudada. As crianças com deficiência tendem a serem menores que àquelas sem deficiência. De acordo com (UNICEF, 2013, p. 7) "a criança com deficiência corre risco mais alto de desnutrição". Além disso, é comum a atrofia muscular em usuários de cadeiras de rodas.

No entanto, como se trata de um projeto modular e, portanto, os dados antropométricos serão exclusivos para cada usuário, será necessário apenas um caso crítico para o cálculo dos esforços sobre a cadeira de rodas. Dessa forma, utilizar valores baseados no método de Drillis e Contini será suficiente para este trabalho.

3.2 Dimensionamento da Cadeira

A adequação postural do usuário na cadeira de rodas é de extrema importância, não só para garantir o conforto e evitar lesões, mas para permitir maior mobilidade e independência. Para tal, é necessário considerar as dimensões de cada componente da cadeira de rodas, para que estes se adaptem da melhor forma possível ao usuário. Cada componente e suas nomenclaturas são indicados na Figura 29.

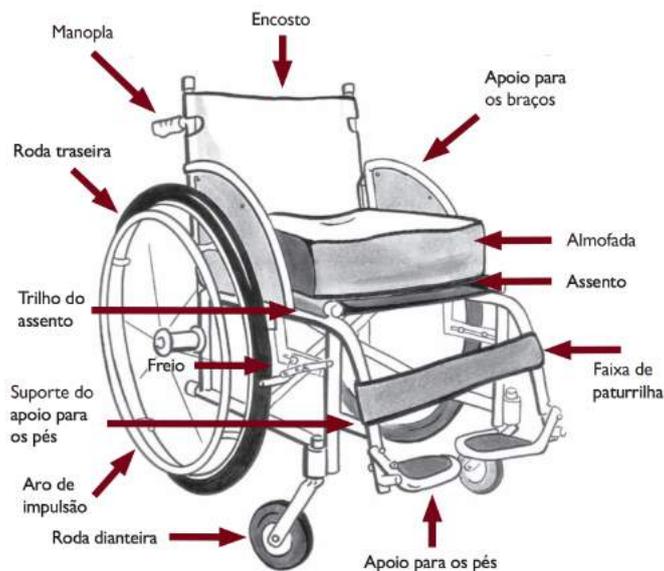


Figura 29 – Componentes da Cadeira de Rodas (OMS, 2012)

As dimensões da cadeira de rodas podem ser medidas de acordo com a Norma NBR ISO 7176-7 (ABNT, 2009a) e devem ser projetadas considerando a adequação postural e permitindo a mobilidade e acessibilidade da cadeira em ambientes acessíveis para a cadeira de rodas como previsto na norma ABNT NBR 9050 (ABNT, 2004).

3.2.1 Profundidade do Assento

Cadeiras de rodas ultraleves de estrutura rígida presentes no mercado apresentam variabilidade na profundidade do assento entre 12" a 22". A definição da profundidade do assento deve ser realizada de forma que o limite anterior do assento fique localizado a 40mm da fossa poplíteia (pequena depressão nas costas do joelho). Esse limite deve ser respeitado uma vez que exerce influência na distribuição de pressão na região posterior das coxas e nos glúteos e no posicionamento pélvico. Um assento curto demais coloca o usuário em um risco maior de úlceras de pressão uma vez que a área de contato para o apoio dos glúteos e coxas é menor. No entanto, uma profundidade muito elevada do assento faz com que os joelhos do usuário fiquem mais estendidos, causando uma retroversão pélvica (pelve é tracionada posteriormente). Dessa forma, impede uma postura ereta do tronco favorecendo deformações na coluna.

3.2.2 Largura do Assento

Cadeiras de rodas ultraleves de estrutura rígida apresentam variabilidade na largura do assento entre 12" a 22". Caso a cadeira seja projetada de forma que sua largura seja muito estreita para o indivíduo podem ocorrer lesões de pele devido à compressão (especialmente em usuários com lesão medular e redução de sensibilidade), além do desconforto. Assentos largos demais não proporcionam suporte postural suficiente, o que permite desvios de coluna chegando até a uma escoliose. Além disso, torna-se mais difícil o manuseio da cadeira de propulsão manual (aros propulsores) favorecendo lesões nos membros superiores. Quanto menor for a largura do assento, mais facilidade o usuário terá de manusear a cadeira, especialmente nas mudanças de direção pois o raio do equipamento é reduzido e, conseqüentemente, o momento de inércia.

A definição da largura do assento deve ser realizada de forma que haja folga de 10mm de cada lado entre o trocanter maior do fêmur e o limite lateral do assento. Ou seja, a largura do quadril mais 20mm deve ser equivalente à largura do assento. As duas dimensões são mostradas na Figura 30.

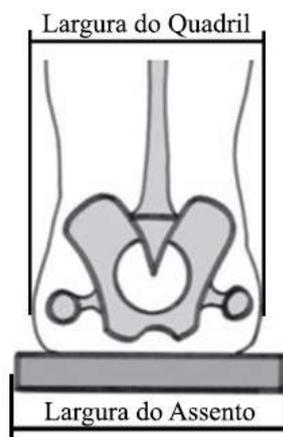


Figura 30 – Largura do Assento e do Quadril. Modificado de (OMS, 2012)

3.2.3 Inclinação do Assento

É comum que haja inclinação posterior (parte frontal do assento é posicionada acima da parte posterior) de até $13,7^\circ$ nas cadeiras de rodas (MEDOLA, 2013). Isso é feito pois permite um alcance funcional maior e proporciona maior equilíbrio ao usuário durante a propulsão manual, especialmente no deslocamento em acíves.

Apesar de haver preocupações que um ângulo de inclinação muito elevado possa aumentar a pressão de contato nos glúteos e coxas, ampliando assim o risco do usuário desenvolver úlceras de pressão, o estudo de (MAURER; SPRIGLE, 2004) mostra que não há relação entre o aumento do ângulo de inclinação com o maior risco de desenvolver lesões. Dessa forma, escolhe-se o ângulo de $13,7^\circ$ para o desenvolvimento do projeto uma

vez que assume-se que os usuários dessa cadeira terão que enfrentar terrenos irregulares com frequência e, portanto, precisarão de maior equilíbrio.

3.2.4 Altura do Assento em Relação ao Eixo da Roda Traseira

A altura do assento em relação ao eixo da roda traseira define o ângulo θ que o braço do usuário irá formar na hora do contato com o aro de propulsão. Ângulos apropriados permitem movimentos longos e suaves que requerem menos esforço para serem realizados. É recomendado que o usuário realize movimentos que vão da posição "10 horas" até a posição "2 horas" (OMS, 2012) formando o ângulo β , como visto na Figura 31.

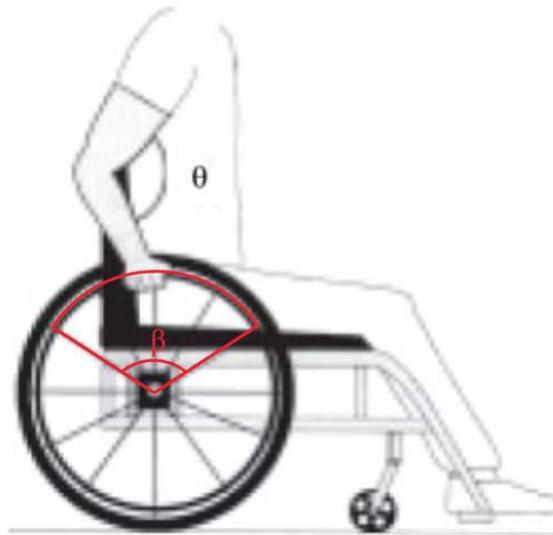


Figura 31 – Ângulo do Cotovelo (θ) e Ângulo de Contato com o Aro de Propulsão (β). Modificado de (MEDOLA, 2013)

Ângulos de cotovelo muito elevados (perto de 180°) significam que o braço está quase completamente esticado, ou seja, a frequência de toque no aro de propulsão será muito elevada já que o arco realizado pelo usuário em contato com o aro será mínimo. Essa configuração eleva o risco de lesões nos membros superiores e a frequência cardíaca e consumo de oxigênio, limitando a mobilidade do usuário. No entanto, ângulos de cotovelo pequenos demais expõe os ombros à posições que podem causar lesões. Dessa forma, recomenda-se manter um ângulo de cotovelo entre 100° e 120° (MEDOLA, 2013).

3.2.5 Altura do Encosto

A altura do encosto é altamente influenciada pelas necessidades do usuário, assim como suas preferências. Aqueles com maior controle de tronco podem preferir cadeiras com encostos mais baixos pois permitem maior liberdade de movimentação dos braços facilitando a propulsão da cadeira (tanto em superfícies planas quanto em aclives). No entanto, encostos mais baixos reduzem o suporte das costas. Portanto, aqueles com menor

controle de tronco ou os que optem por mais suporte necessitam de um encosto mais alto. A (OMS, 2008) recomenda que a altura do topo da almofada até o topo do encosto deve medir as dimensões D ou E (de acordo com a escolha do usuário) como vistas na Figura 32, sendo que D representa a altura do assento até a última costela e E representa a altura do assento até o ângulo inferior da escápula.

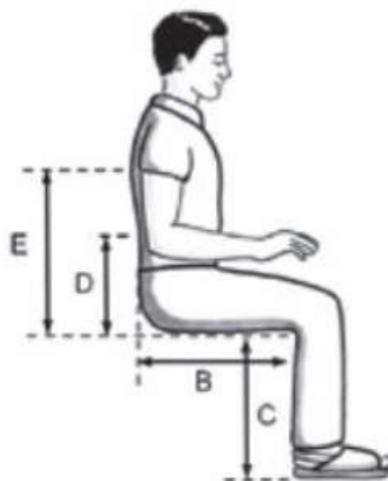


Figura 32 – Dimensões para Definição da Altura do Encosto (OMS, 2012)

3.2.6 Inclinação do Encosto

Tradicionalmente, as cadeiras de rodas possuem ângulo de inclinação do encosto de 90° em relação ao solo. No entanto, alguns usuários se sentem mais confortáveis com ângulos maiores (até 105°), o que pode ser realizado sem que haja influência significativa na mobilidade ou no risco de desenvolver úlceras de pressão. Dessa forma, adota-se o ângulo de 105° para ser utilizado no projeto.

3.2.7 Posição da Roda Traseira

O posicionamento antero-posterior do eixo das rodas traseiras influencia a estabilidade e a propulsão manual da cadeira. Quanto mais posterior for o posicionamento das rodas, maior a estabilidade da cadeira, especialmente em aclives, para evitar o tombamento da mesma. No entanto, para que seja possível a propulsão manual sem o risco de lesões, sabe-se que é necessário que os braços do usuário consigam acompanhar o movimento das rodas da posição "10 horas" até "2 horas" como foi visto na Figura 31. Portanto, precisa-se que as rodas estejam em posições na extrema anterior.

De acordo com (MEDOLA, 2013) o posicionamento ideal das rodas traseiras deve ser baseado no conforto e mobilidade de cada usuário. Devem ser posicionadas mais pra frente possível sem comprometer a estabilidade da cadeira. Usuários com maior controle de tronco não precisam de cadeiras tão estáveis pois possuem a capacidade de compensar a

estabilidade inclinando o tronco para a frente. Para usuários com maiores limitações físicas a cadeira precisa prover um equilíbrio maior. No entanto, (OMS, 2012) e (CARRIEL, 2014) recomendam que o eixo das rodas traseiras se alinhe com os membros superiores do usuário quando estes estiverem pendentes ao lado do corpo, o que será adotado como parâmetro de projeto apesar dessa posição poder ser alterada por cada usuário.

3.2.8 Inclinação das Rodas Traseiras

A inclinação das rodas traseiras (cambagem) é muito utilizada em esportes como visto na Figura 11b e tem se tornado mais comum em cadeiras de rodas "diárias" uma vez que proporcionam maior estabilidade lateral devido ao aumento da base de suporte e maior conforto no alcance e na rotação do aro propulsor. No entanto, ângulos de inclinação muito elevados dificultam a movimentação da cadeira, especialmente em locais mais apertados, já que a base de apoio da cadeira se torna mais larga. Além disso, foi mostrado (FAUPIN et al., 2004) que cambagens maiores que 9° aumentam a resistência ao rolamento (devido à mudança de contato da roda com o solo), o que faz com que haja uma diminuição da velocidade média. Ou seja, para manter uma velocidade constante, é necessário aumentar a aceleração média, aumentando também o torque necessário. Dessa forma, percebe-se que ângulos muito elevados de cambagem podem trazer danos aos usuários, especialmente quando utilizada diariamente. Porém, (VEEGER et al., 1989) mostraram que em uma comparação de ângulos de inclinação entre 0° e 9° , o ângulo de 6° possui ângulo de contato com o aro propulsor maior, o que indica que um torque menor deve ser aplicado reduzindo assim o cansaço e, por consequência, as lesões nos membros superiores. Recomenda-se então, um ângulo de 6° de inclinação das rodas traseiras.

3.2.9 Rodas Dianteiras

As pequenas rodas dianteiras ("*casters*") são fabricadas em dimensões de 76,2mm à 203,2mm de diâmetro sendo que a mais utilizada possui diâmetro de 152,4mm. Geralmente são maciças de material polimérico pois requerem menor manutenção mas também são encontradas com pressurização de ar (apenas para as rodas maiores, a partir de 152,4mm). As rodas pressurizadas diminuem a resistência ao rolamento e a percepção de vibração e choque transmitido.

Na definição do diâmetro dos "*casters*", é importante considerar que rodas menores, apesar da economia na manutenção, aumentam consideravelmente a resistência ao rolamento e portanto, a maior parte do peso do usuário deve ser suportado pelas rodas traseiras. Dessa forma, a posição das rodas dianteiras em relação a vista lateral da cadeira é significativa, afetando, também, a estabilidade e a dirigibilidade (principalmente em mudanças de direção). Recomenda-se que as rodas sejam colocadas o mais próximo possível das rodas traseiras sem que comprometa a estabilidade (MEDOLA, 2013). A dis-

tância mínima entre o limite posterior da roda traseira e o limite anterior dos apoios para pés (comprimento da estrutura visto na Figura 33) é de 900mm para cadeiras de rodas de adultos. Esse ajuste deverá ser feito pelo usuário da cadeira de rodas dependendo das suas necessidades de estabilidade.



Figura 33 – Comprimento da Estrutura (OMS, 2012)

3.2.10 Apoio para os Pés

No projeto dos apoios para os pés duas características devem ser observadas: sua rigidez e a altura em relação ao assento. Apesar de não ser diretamente relacionada com a propulsão manual a altura apropriada dos apoios influencia o conforto e a saúde do usuário evitando o risco de desenvolver outras lesões. Um apoio muito baixo aumenta a pressão na região distal da coxa (próxima ao limite anterior do assento) aumentando o risco de úlceras de pressão e, além disso, os tornozelos tendem à postura de flexão plantar (flexionar os dedos do pé para baixo), o que favorece o encurtamento dos músculos da panturrilha. Sem apoio suficiente para os pés, o usuário fica com seu alcance anterior limitado devido à instabilidade provocando risco de queda frontal. Um apoio muito alto faz com que a região distal da coxa perca o contato com o assento aumentando a pressão na região dos glúteos e posterior da coxa levando a um risco maior de formação de úlceras de pressão nesta região. Os joelhos muito elevados causam, também, uma rotação posterior da pelve comprometendo a postura. Os apoios devem ser paralelos ao solo e a rigidez da estrutura dos apoios deve ser suficiente para suportar os membros inferiores e mantê-los estáveis e seguros.

A localização dos apoios, por serem os componentes da cadeira de rodas mais a frente, definem o comprimento total da cadeira de rodas e, portanto, a distribuição de massa (o que influencia no centro de gravidade, momento de inércia, resistência ao

rolamento e estabilidade). Dessa forma, definir o ângulo de flexão do joelho resulta na estabilidade e facilidade de propulsão da cadeira. Os valores comuns para o ângulo de flexão são entre 60° e 90° sendo que 0° significa que as pernas estão totalmente estendidas, como é visto na Figura 34. A norma ABNT NBR ISO 7176:7 (ABNT, 2009a) recomenda ângulos mais próximos de 90° sem ser inferior a esse valor. Dessa forma, este projeto irá trabalhar com o ângulo recomendado pela norma de 90° .

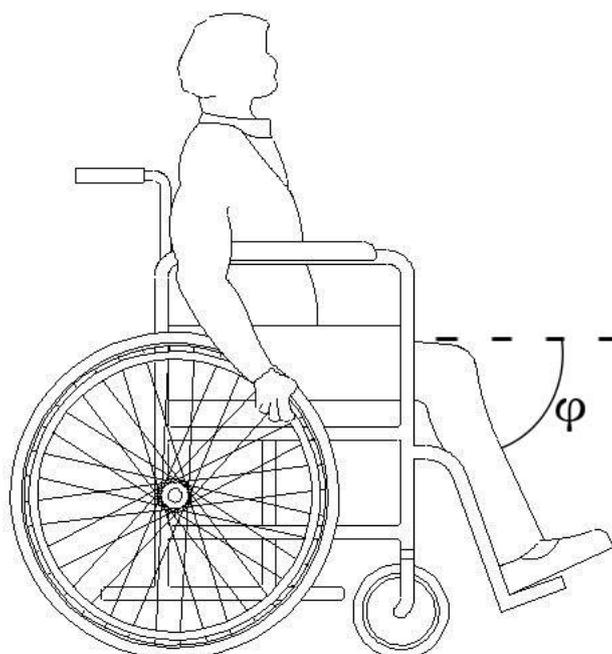


Figura 34 – Ângulo de Flexão do Joelho (BLOCO AUTOCAD, 2015)

3.2.11 Apoio para os Braços

Recomenda-se (CARRIEL, 2014) ao cadeirante apoiar periodicamente os braços sobre apoios afim de evitar fadiga dos membros superiores e possíveis lesões. Quando os braços estão apoiados há uma redução na pressão sobre a coluna vertebral e nas forças que levam à úlceras de pressão. No entanto, os apoios não devem atrapalhar a movimentação dos braços na hora da propulsão manual ou no posicionamento em mesas. Assim, recomenda-se que eles sejam o mais baixo possível mas ainda em uma altura que dê suporte aos braços.

Os apoios de braço fixo possuem a vantagem de serem mais confortáveis, além de servirem como suporte na hora da transferência da cadeira (especialmente para superfícies mais altas) e para mudanças de posição. No entanto, podem servir como obstáculo para alguns usuários na hora da transferência. Nestes casos, seria vantajoso os apoios removíveis, apesar de estes não proporcionarem tanto suporte e serem mais fáceis de aca-

bar danificados (OMS, 2008). Para seguir com o conceito da modularidade e ajuste de dimensões o projeto irá envolver um apoio de braço removível com ajuste de altura.

3.2.12 Síntese das Dimensões

Os itens discutidos anteriormente são apresentados de forma sucinta na Tabela 2.

Tabela 2 – Síntese das Dimensões Principais da Cadeira de Rodas

Dimensão	Resultado
Profundidade do Assento	Limite anterior do assento localizado a 40mm da fossa poplítea
Largura do Assento	Folga de 10mm de cada lado do quadril
Inclinação do Assento	Ângulo de 13,7°
Altura do Assento	Manter ângulos de cotovelo entre 100° e 120°
Altura do Encosto	Altura da última costela ou do ângulo inferior da escápula
Inclinação do Encosto	Ângulo de 105°
Posição da Roda Traseira	Centro da roda alinhado com os membros superiores pendentes
Apoio para os Pés	Ângulo de 90°

3.3 Componentes

3.3.1 Almofada

A almofada posicionada sobre o assento se trata de um componente importante na manutenção da postura do usuário, mesmo quando este relaxar os músculos posturais para evitar fadiga. Dessa forma, recomenda-se que a parte posterior do assento tenha uma área de depressão para evitar que a pelve deslize para frente no assento. Além disso, a almofada deve ser capaz de apoiar as coxas corretamente mantendo-as em posição neutra (alinhadas aos respectivos quadris). Ou seja, devem ter áreas de depressão para o apoio das coxas e ter uma elevação central para manter as coxas afastadas entre si. Dessa forma, esse componente contribui para a diminuição no risco de úlceras de pressão, tanto na parte inferior das coxas e glúteos quanto nas laterais das pernas. Esse formato é evidenciado na Figura 35.

Geralmente são feitas de espuma por serem mais baratas e de fácil acesso, além de serem facilmente modificadas para atender as necessidades de cada usuário. Devem possuir uma base mais firme para proporcionar suporte adequado. Em seguida, deve possuir uma camada de espuma mais macia para proporcionar o conforto. Deve ser macia o suficiente para que o osso do ísquio (parte inferior e posterior da bacia) possa afundar nela mas rígida o suficiente para evitar que os ossos alcancem a base sólida.

Alguns assentos são feitos de lonas ou materiais flexíveis. Esses materiais não são recomendados por não proporcionarem suporte postural suficiente e estabilidade do tronco

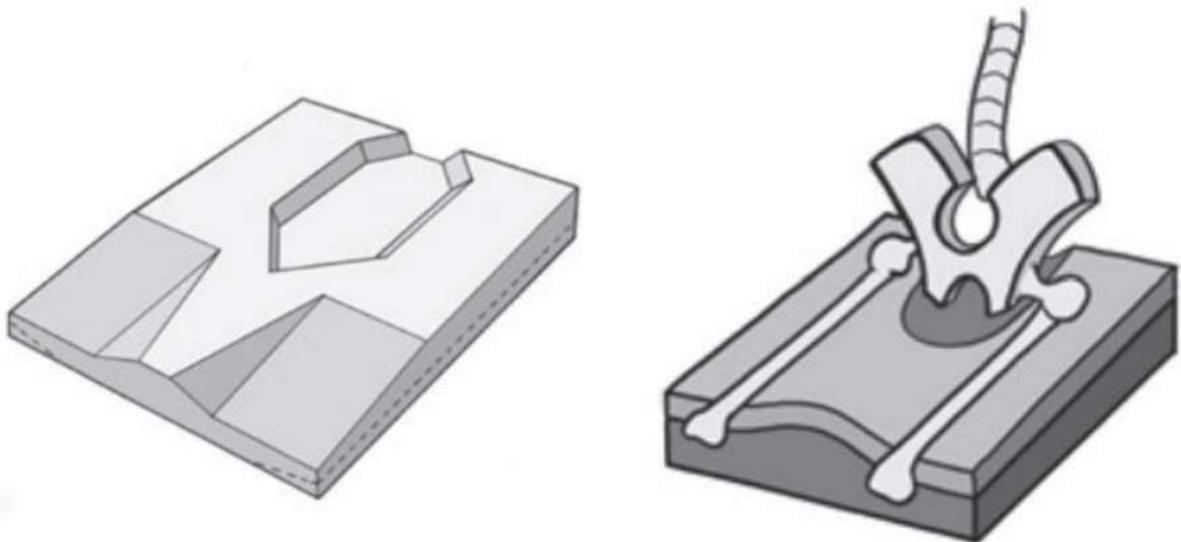


Figura 35 – Formato Recomendado da Almofada (OMS, 2012)

causando piora do desempenho na execução de tarefas e, até mesmo, úlceras de pressão (CARRIEL, 2014).

3.3.2 Aros de Propulsão

O aro de propulsão deve possuir formato que proporcione conforto e segurança para as mãos. No entanto, o aro mais frequentemente utilizados é muito fino e causa muitas lesões na mão (como a síndrome do Túnel do Carpo). Além disso, por ser muito fino, muitos usuários acabam segurando também no pneu para ter maior firmeza na propulsão. Muitas soluções para melhorar a ergonomia do aro já foram pesquisadas apesar de apresentarem soluções com custos maiores que o aro tradicional, o que pode justificar sua popularidade.

Uma solução é o *Natural-Fit Handrim*, comercializados nos EUA, que é um conjunto de dois componentes revestidos separadamente, uma superfície oval lisa para a palma da mão e uma depressão com coeficiente de fricção mais alto para o polegar como é visto na Figura 36. Esse componente apresentou uma satisfação significativa dos usuários que relataram maior conforto e eficiência de propulsão em relação ao aro comum além de uma redução no cansaço e na dificuldade de propulsão.

A solução mais simples se trata de um revestimento de silicone que proporciona maior conforto para as mãos, evitando calos e ferimentos nas mãos, como é visto na Figura 37.

Por fim, foi desenvolvido um aro propulsor ergonômico (MEDOLA, 2013), chamado de aro dactilo-anatômico, com sulcos na metade inferior proporcionando, assim, maior firmeza, especialmente em situações que necessitam maior esforço de propulsão.



Figura 36 – Aro Propulsor *Natural-Fit Handrim* (DIERUF et al., 2008)



Figura 37 – Revestimento de Silicone para o Aro Propulsor (ORTHO PAUHER, 2017)



Figura 38 – Aro Dactilo-Anatômico (MEDOLA, 2013)

3.4 Materiais

3.4.1 Estrutura da Cadeira

O material utilizado na estrutura da cadeira de rodas tem uma grande influência no custo total da cadeira de rodas. Outra consideração essencial na definição do material

da estrutura é o seu peso. Já foi visto anteriormente que a cadeira deve ser o mais leve possível para facilitar a sua propulsão e transporte. Os materiais mais utilizados são o aço e o alumínio. Além disso, algumas cadeiras mais recentes foram fabricadas em titânio ou fibra de carbono, que são materiais que possuem melhor relação resistência - peso. Eles, no entanto, são consideravelmente mais caros que o alumínio e apresentam maior dificuldade para sua formação e usinagem.

No entanto, o projeto inovador na Universidade de Brigham Young nos EUA, desenvolveu uma cadeira de rodas feita de tubos de PVC para crianças, vista na Figura 39. Além de ser um material leve e permitir fáceis modificações, se torna uma estrutura muito barata. No entanto, essa cadeira suporta apenas crianças de até 50kg.



Figura 39 – Cadeira de Rodas Feita em Tubos de PVC (OPEN WHEELCHAIR FOUNDATION, 2017)

Outro material utilizado em cadeiras de rodas é o plástico e elas são fabricadas por meio da injeção plástica. Um exemplo dessa tecnologia é a “*The Lindde Wheel Chair - Conceptual*” da designer Linda Petchnick que é visto na Figura 40.



Figura 40 – “*The Lindde Wheel Chair*” (CARRIEL, 2007)

Além disso, o bambu laminado também já foi utilizado na construção de uma cadeira de rodas (Figura 41) e ele possui característica tão leve quanto o alumínio, 17% mais resistente que o aço quando forçado no sentido longitudinal, resiste bem a trepidações e tem excelente durabilidade (CARRIEL, 2014).



Figura 41 – Cadeira de Rodas em Bambu Laminado (CARRIEL, 2014)

3.4.2 Rodas

Assim como os outros componentes da cadeira de rodas, as rodas devem possuir o menor peso possível uma vez que reduz o momento de inércia da cadeira possibilitando

mais facilidade e conforto na propulsão (em especial nas mudanças de direção) e na aceleração. Para tal, as rodas costumam ser fabricadas em aço, plástico e, recentemente, de fibra de carbono (característica originada nas bicicletas).

O material utilizado deve, também, procurar reduzir a transmissão de vibração para o corpo do usuário para proporcionar maior conforto. As rodas em fibra de carbono possuem essa propriedade.

3.4.3 Pneu

A principal influência que o tipo de pneu terá sobre a movimentação da cadeira é a magnitude da resistência ao rolamento ("força em oposição ao movimento de um pneu enquanto este rola sobre uma superfície"(MEDOLA, 2013)).

3.4.3.1 Pneus com Enchimento a Ar

São comuns em bicicletas pois são mais leves e absorvem mais os impactos e as vibrações proporcionando maior conforto ao usuário. São recomendados especialmente em terrenos irregulares pois permitem uma leve compressão e possuem uma boa tração na maioria dos terrenos (Figura 42). No entanto, são os pneus com maior necessidade de manutenção (verificação da pressão interna, maior possibilidade de furos e desgaste).



Figura 42 – Pneu com Enchimento a Ar (WHEELIN MOBILITY, 2017)

3.4.3.2 Pneus de Uretano

Esses pneus são feitos com borracha de uretano maciços (Figura 43). São mais resistentes à perfuração e possuem menor necessidade de manutenção, apesar do desgaste ainda ter que ser considerado. São menos maleáveis que os pneus com enchimento a ar e, portanto, são menos recomendados para terrenos irregulares. São mais difíceis de serem instalados e são mais pesados tornando-os menos recomendados para o uso diário. Por isso, utiliza-se muito em esportes *indoor* sobre cadeira de rodas como o basquete.



Figura 43 – Pneu de Borracha de Uretano (WHEELIN MOBILITY, 2017)

3.4.3.3 Pneus com Enchimento de Espuma

Esses pneus são preenchidos com borracha de poliuretano (Figura 44) e possuem característica resistente mas flexível se aproximando dos pneus com enchimento a ar. Não precisam de manutenção e tem mais aderência que os pneus de uretano. Além disso, são leves e também possuem capacidade de absorção de impacto e vibrações.

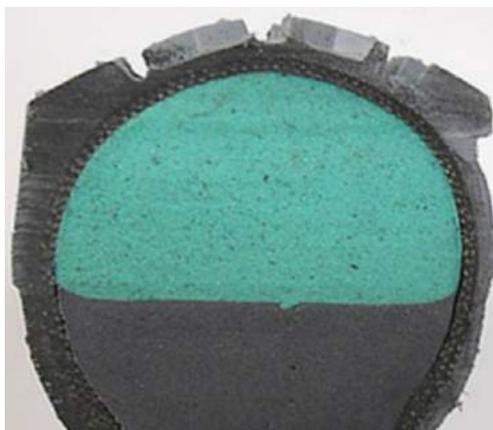


Figura 44 – Pneu com Enchimento de Espuma (WHEELIN MOBILITY, 2017)

3.5 Estrutura do Quadro

"O quadro de uma cadeira de rodas é o componente que sustenta e une todos os demais componentes, determinando, desta forma, o tipo de estrutura da cadeira de rodas que resultará desta montagem"(MEDOLA, 2013, p. 74). O quadro das cadeiras de rodas podem ser subdivididos em duas categorias:

3.5.1 Estrutura Dobrável

Fornecem o benefício de redução de tamanho para facilitar o transporte e o armazenamento e, portanto, são os quadros mais utilizados atualmente. Possuem uma estrutura em X entre as barras laterais como é visto na Figura 45.

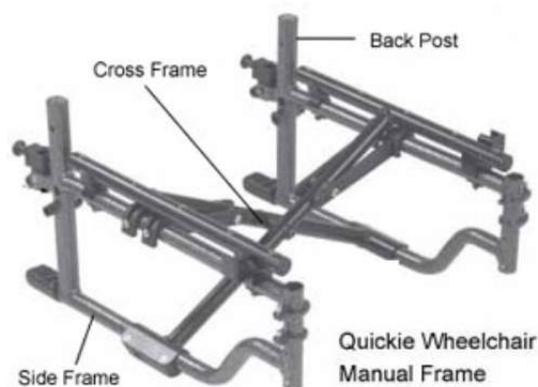


Figura 45 – Estrutura de Quadro Dobrável (MOBILITY BASICS, 2017)

3.5.2 Estrutura Rígida

Estruturas rígidas, ou monoblocos, são formados por barras soldadas em uma única peça e não permitem, portanto, serem dobradas (Figura 46). Por possuírem menos componentes são mais leves e resistentes. São muito utilizadas em cadeiras para o esporte adaptado, cadeiras elétricas ou para banho. Além disso, são recomendadas para crianças e adolescentes que precisam de cadeiras mais robustas para as atividades diárias (MOBILITY BASICS, 2017).



Figura 46 – Estrutura de Quadro Rígida (MOBILITY BASICS, 2017)

É importante destacar que as cadeiras de rodas com quadros de estrutura rígida podem possuir, também, elementos que permitem sua compactação. Atualmente, muitas delas possuem a capacidade de dobrar o encosto e retirar as rodas traseiras fazendo com que, muitas vezes, fiquem até mais compactas que as cadeiras de quadro dobrável (WATANABE, 2011).

Por possuírem uma rigidez maior, a ocorrência de flexões nas estruturas é menor e, portanto, possibilita uma propulsão mais confortável com menos dissipação de energia (MEDOLA, 2013), algo sentido pelos usuários (WATANABE, 2011).

4 Análise Estrutural

4.1 Forças na Cadeira de Rodas

A análise das forças presentes no funcionamento da cadeira de rodas é essencial para a fase de projeto da estrutura e dos componentes. As forças atuantes na cadeira são consequência do peso do usuário sobre a estrutura e o impacto sofrido pelas rodas. As forças externas aplicadas na cadeira no caso estático podem ser resumidas pelo DCL apresentado na Figura 47.

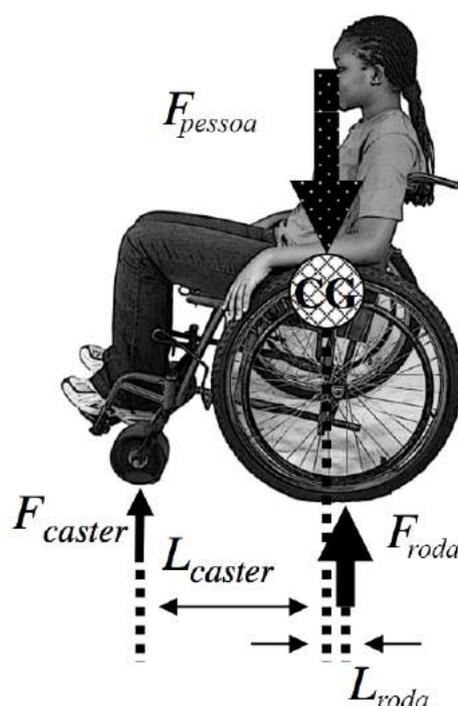


Figura 47 – DCL da Cadeira de Rodas. Modificado de (WINTER; HOTCHKISS, 2017)

Onde F_{pessoa} é a força peso gerada pelo usuário, F_{caster} é a força aplicada sobre as rodas dianteiras (*casters*) e F_{roda} é a força aplicada sobre as rodas traseiras. Dessa forma, tem-se uma equação do equilíbrio estático apresentada na Equação 4.1.

$$2F_{caster} + 2F_{roda} = F_{pessoa} \quad (4.1)$$

Por sua vez, a força exercida sobre as rodas é encontrada utilizando a soma dos momentos sobre a cadeira de rodas. Fazendo o momento em relação ao ponto de contato das rodas frontais com o chão encontra-se a Equação 4.2 que representa a força exercida sobre as rodas traseiras, onde L_{caster} é a distância do ponto de contato da roda dianteira até o centro de gravidade (CG) e L_{roda} é a distância da roda traseira até o CG.

$$F_{roda} = \frac{F_{pessoa}L_{caster}}{2(L_{caster} + L_{roda})} \quad (4.2)$$

De maneira equivalente, encontra-se a força aplicada sobre as rodas dianteiras mostrada na Equação 4.3.

$$F_{caster} = \frac{F_{pessoa}L_{roda}}{2(L_{caster} + L_{roda})} \quad (4.3)$$

Percebe-se, então, que as forças são dependentes do peso do usuário e das dimensões da cadeira (distância das rodas em relação ao CG).

Em seguida, considera-se a cadeira subindo um plano inclinado e seu DCL é mostrado na Figura 48. Neste caso, as forças aplicadas sobre as rodas são dadas pelas Equações 4.4 e 4.5 para cada roda dianteira (*caster*) e traseira respectivamente.

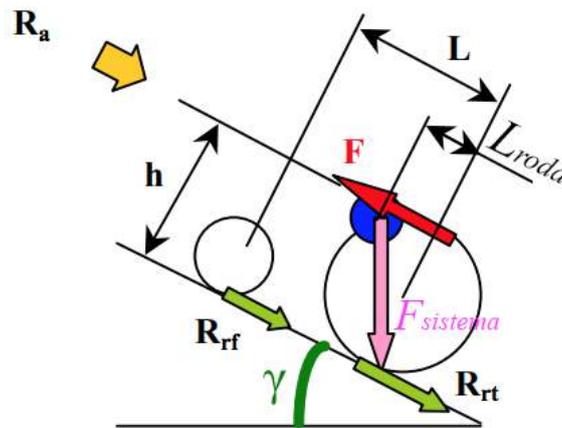


Figura 48 – Diagrama de Corpo Livre da Cadeira de Rodas sobre um Plano Inclinado. Modificado de (BECKER, 2002)

$$F_{caster} = \frac{F_{sistema}L_{roda}}{2L} \cos(\gamma) \quad (4.4)$$

$$F_{roda} = \frac{F_{sistema}(L - L_{roda})}{2L} \cos(\gamma) \quad (4.5)$$

As outras forças consideradas mostradas na Figura 48 são a resistência do ar (R_a) dada pela Equação 4.6, as forças de resistência ao rolamento no eixo dianteiro (R_{rf}

mostrado na Equação 4.7) e traseiro (R_{rt} , Equação 4.8) e F que representa a força efetiva no eixo traseiro e é mostrada na Equação 4.9.

$$R_a = \frac{\rho_{ar}}{2}(v_x - v_{vento})^2 C_x A \quad (4.6)$$

Onde $\rho_{ar} = 1,225[kg/m^3]$ é a densidade do ar, $v_x[m/s]$ é a velocidade longitudinal da cadeira de rodas, $v_{vento}[m/s]$ é a velocidade do vento, $C_x = 0,85[-]$ é o coeficiente de penetração aerodinâmica da cadeira de rodas e $A[m^2]$ é a área frontal da cadeira de rodas (BECKER, 2002).

$$R_{rf} = \mu_{rf} F_{caster} \quad (4.7)$$

$$R_{rt} = \mu_{rt} F_{roda} \quad (4.8)$$

Onde μ_{rf} e μ_{rt} são os coeficientes de rolagem das rodas frontais e traseiras respectivamente. Esse coeficiente considera o atrito entre as partes móveis da cadeira (rolamentos), a deformação dos pneus (dependente da sua pressão interna e da cambagem das rodas) e as oscilações do terreno (dependente do piso).

$$F = F_{usuário} \frac{D}{d_{aro}} - R_{rt} \quad (4.9)$$

Onde $F_{usuário}$ é a força de propulsão fornecida à cadeira pelo usuário, $\frac{D}{d_{aro}}$ é a relação entre os diâmetros da roda principal e do aro da roda e R_{rt} é a resistência ao rolamento no eixo traseiro dada na 4.8. Considera-se que $F_{usuário}$ é dada pela Equação 4.10 onde $P_{usuário}$ é a potência média fornecida à cadeira de rodas pelo usuário. Em casos de movimentação em longos ciclos de acionamento em terrenos planos considera-se que $P_{usuário}$ varia entre 35 e 50W. No caso de rampas, considera-se que $P_{usuário}$ é de 100W no plano logo antes da rampa e 150W na subida (BECKER, 2002).

$$F_{usuário} = \frac{P_{usuário}}{v_x} \quad (4.10)$$

Para inclinações laterais, a frente da cadeira tende a virar para baixo e essa tendência é influenciada pela inclinação da rampa (γ) e da distância do CG ao eixo das rodas traseiras (L_{roda}), como mostrado na Figura 49. Dessa forma, tem-se a Equação 4.11 que representa o momento de giro (M_{giro}) que precisa ser compensado pelo usuário no

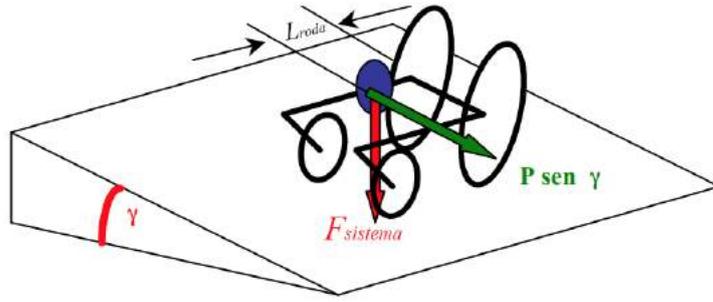


Figura 49 – Diagrama de Corpo Livre da Cadeira de Rodas sobre Plano Inclinado Lateral. Modificado de (BECKER, 2002)

acionamento para evitar a queda e continuar em movimento. Destaca-se que $F_{sistema}$ é o peso total do sistema (usuário e o peso da cadeira).

$$M_{giro} = L_{caster} F_{sistema} \sin \gamma \quad (4.11)$$

A inclinação máxima que a cadeira pode suportar sem tombar é dada pela sua geometria e representada pelo ângulo de tombamento θ_{tomb} dado pela Equação 4.12. Como mostrado na Figura 50, o ângulo de tombamento limite é dado quando o CG é alinhado verticalmente com o ponto de contato da roda com o chão; qualquer ângulo maior que isso causará o tombamento da cadeira. Alguns ângulo máximos de tombamento são dados em função de geometrias da cadeira (relação da largura pela altura do seu CG) na Tabela 3. Percebe-se que uma largura maior e um centro de gravidade mais baixo gera um ângulo de tombamento máximo maior, tornando a cadeira mais estável. No entanto, esses valores também possuem limitações, não podendo ser nem muito larga nem ter um CG muito baixo, como visto anteriormente nas seções 3.2.2 e 3.2.4, respectivamente.

$$\begin{aligned} \theta_{tomb} &= \arctan\left(\frac{A}{B}\right) \\ \theta_{tomb} &= \arcsin\left(\frac{h_{tomb}}{2A}\right) \end{aligned} \quad (4.12)$$

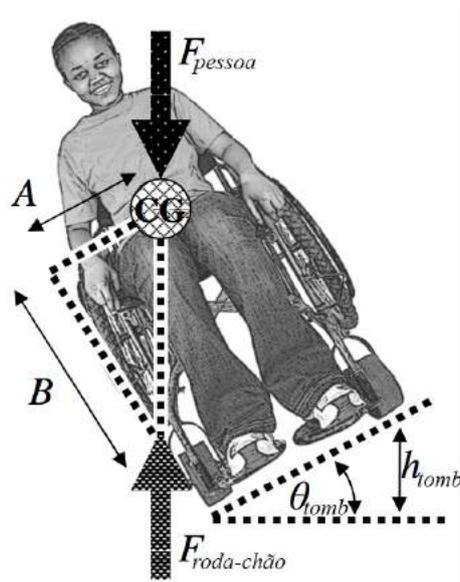


Figura 50 – Ângulo de Tombamento. Modificado de (WINTER; HOTCHKISS, 2017)

Tabela 3 – Ângulo de Tombamento em Função da Geometria da Cadeira de Rodas (WINTER; HOTCHKISS, 2017)

A/B	θ_{iip}	h_{iip}
0.3	17°	11cm
0.4	21°	18cm
0.5	27°	28cm

4.2 Tensões Estáticas na Cadeira de Rodas

As tensões nos componentes da estrutura são determinantes para o dimensionamento desta. Para que a análise das tensões internas seja possível, é necessário que a estrutura esteja definida. Para a análise considera-se dois casos: o primeiro caso considera que os esforços são distribuídos sobre a estrutura dependendo da proporção de peso de cada parte do corpo, como apresentado na Tabela 4 e exemplificado na Figura 51. Assim, considera-se que as estruturas que suportam a região do tronco e cabeça são as que sofrem maior força e, portanto, limitarão o dimensionamento da estrutura. O segundo caso considera que o peso total do usuário é distribuído igualmente em todos os apoios do assento.

Tabela 4 – Tabela da Distribuição de Peso para as Partes do Corpo (ARAUJO, 2006)

Segmento	Definição	Massa do Segmento/Massa Total do Corpo	D _F	
			Proximal	Distal
Pé	Maléolo Lateral-Cabeça 2º Metatarso	0,0145	0,50	0,50
Perna	Côndilo Femoral-Maléolo Lateral	0,0465	0,433	0,567
Coxa	Trocânter Maior-Côndilo Femoral	0,100	0,433	0,0567
CBT (Cabeça, Braços e Tronco)	Trocânter Maior-Articulação Glenoumeral	0,678	0,626	0,374

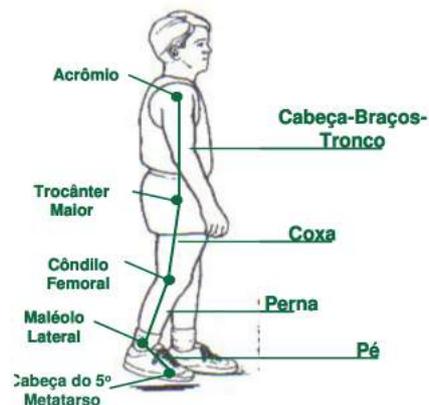


Figura 51 – Esquema das Partes do Corpo (ARAUJO, 2006)

Considerando uma estrutura genérica de cadeira de rodas, existem barras verticais sobre o local do assento para suportar o peso do usuário, como visto na Figura 52.

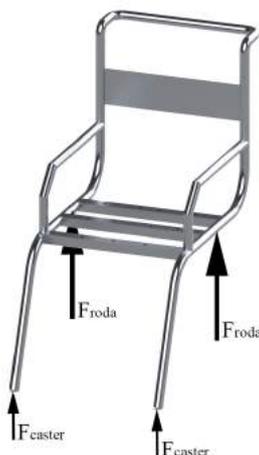


Figura 52 – Exemplo de Estrutura de uma Cadeira de Rodas

Analisando cada uma dessas barras individualmente e tratando o peso do usuário sentado sobre a cadeira de rodas como uma força distribuída faz-se a análise mecânica tratando-a como viga e o esforço sobre ela será dado nos planos xy e xz conforme as Figuras 53 e 54.



Figura 53 – Simplificação de um Pedaço da Estrutura

Dessa forma, obtém-se os diagramas de esforço cortante e momento fletor sobre a viga apresentados nas Figuras 55 e 56, respectivamente. As equações que geram os gráficos de esforço cortante e momento fletor são apresentadas nas Equações 4.13 e 4.14 respectivamente.

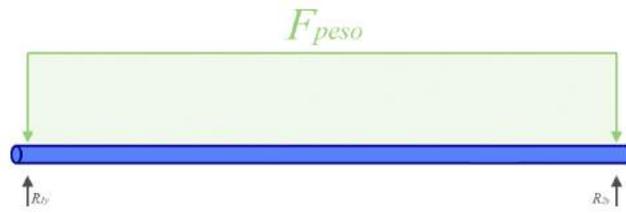


Figura 54 – Diagrama de Corpo Livre da Barra



Figura 55 – Diagrama de Esforço Cortante na Viga

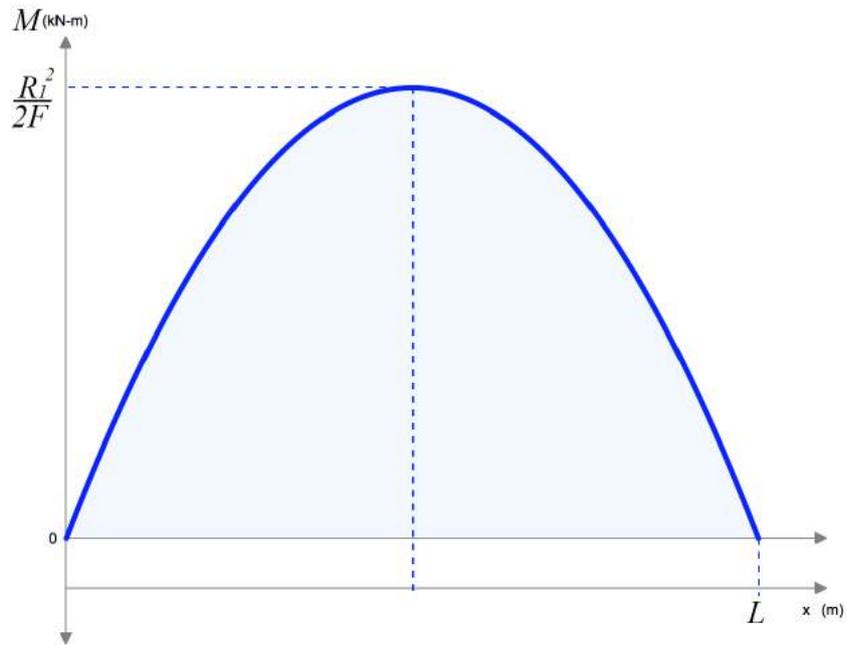


Figura 56 – Diagrama de Momento Fletor na Viga

$$V = R_{1y} - xF_{\text{peso}} \quad (4.13)$$

$$M = R_{1y}x - \frac{F_{peso}x^2}{2} \quad (4.14)$$

De posse desses valores (utiliza-se sempre o máximo), é possível encontrar as tensões normais e de cisalhamento atuantes na viga por meio das equações 4.15 e 4.16, respectivamente, definindo assim o elemento de tensão da barra. Destaca-se que na parte superior da barra haverá uma tensão de compressão enquanto que na parte inferior da barra ocorrerá uma tensão de tração.

$$\sigma_x = \frac{MD}{2I} \quad (4.15)$$

Onde M é o momento fletor máximo encontrado, D é o diâmetro externo da barra e I é o momento de inércia dado pela Equação 4.17.

$$\tau_{xy} = \frac{VQ}{ID} \quad (4.16)$$

Onde V é o esforço cortante máximo, Q é o momento estático da área A' em relação à linha neutra dado pela Equação 4.18, I é o momento de inércia e D é o diâmetro externo.

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) \quad (4.17)$$

Onde D é o diâmetro externo e d é o diâmetro interno do tubo vazado.

$$Q = \bar{y}'A' = 0 \quad (4.18)$$

Onde A' é a área da seção transversal do segmento acoplado à viga na junção onde o fluxo de cisalhamento deve ser calculado e y' é a coordenada y do centroide da área A'. Como se trata de uma única área, seu centroide coincide com o da barra e, dessa forma, y' = 0.

Com o elemento de tensão representado na Figura 57, onde destaca-se que $\sigma_y = 0$, é encontrada as tensões principais por meio das Equações 4.19 e 4.20. Utiliza-se o maior valor absoluto entre os dois valores encontrados como a tensão admissível. Sabe-se, ainda, que a tensão admissível também é dada pela Equação 4.21.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.19)$$

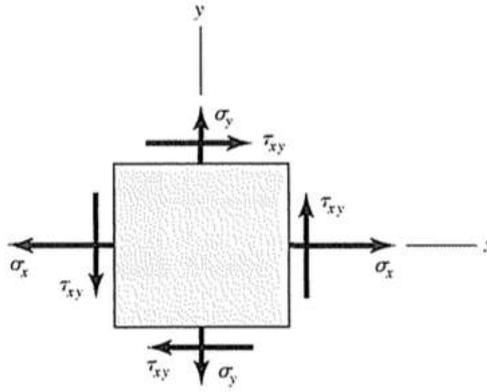


Figura 57 – Elemento de Tensão Genérico (SHIGLEY et al., 2005)

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.20)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{escoamento}}{FS} \quad (4.21)$$

Onde FS é o fator de segurança de projeto e $\sigma_{escoamento}$ é a tensão de escoamento do material e é obtido por meio de tabelas e/ou ensaios experimentais.

Dessa forma, iguala-se as Equações 4.19 e 4.21 para encontrar um diâmetro. Obviamente, tem-se duas incógnitas D e d para a barra vazada. Dessa forma, é necessário fazer uma ligação entre os dois valores como definir uma espessura (e) tal que $D - d = 2e$.

Procedimento similar deve ser realizado para todas as partes da estrutura da cadeira de rodas. No Anexo B, uma tabela resume as considerações importantes de resistência dos componentes estruturais da cadeira.

4.3 Fator de Segurança

Para determinação do fator de segurança (FS) utilizou-se o método de penalização onde números de penalização variando de -4 a +4 são atribuídos à oito fatores diferentes listados a seguir, onde valores positivos indicam uma necessidade de elevar o fator de segurança e valores negativos de reduzir o fator de segurança.

- 1 A precisão com que podem ser determinadas as cargas, forças, deflexões ou outros agentes indutores de falha;
- 2 A precisão com que as tensões ou outros fatores de severidade de carregamento podem ser determinados a partir das forças ou de outros fatores indutores de falha;

- 3 A precisão com que as resistências à falha ou outras medidas de falha podem ser determinadas para o material selecionado segundo o modo de falha adequado;
- 4 A necessidade de se restringir material, peso, espaço ou custo;
- 5 A gravidade das consequências da falha em termos de vida humana e/ou danos à propriedade;
- 6 A qualidade da mão-de-obra na fabricação;
- 7 As condições de operação;
- 8 A qualidade da inspeção e da manutenção disponível ou possível durante a operação.

Para as decisões dos números de penalização para cada fator foram considerados os valores apresentados na Tabela 5, com as devidas justificativas.

Tabela 5 – Números de Penalização para Cada um dos Fatores

Fator de Penalização	Número de Penalização (Np) Selecionado	Justificativa
1	+2	Impactos e sobrecargas não previstos podem ocorrer
2	0	Simulações ou análises mais detalhadas proporcionam certa confiança
3	+2	Materiais que serão testados possuem valores de resistência impreciso
4	-3	Necessidade de projeto de reduzir custos e peso
5	-2	Não há consequências em termos de vidas humanas ou danos à propriedade
6	+2	Mão de obra barata e menos capacitada e/ou montagem em casa pelo próprio usuário
7	0	Condições normais de operação sem cargas excessivas
8	+4	Provavelmente nunca será levada para manutenção pela característica do público alvo.

Dessa forma, computa-se, o valor de t pela Equação 4.22 e, neste caso, equivale a 5. Com isso, esse valor é utilizado na Equação 4.23 (que vale para valores de t maiores que -6) para encontrar o valor recomendado para o FS. Caso o valor de t fosse inferior a -6 seria utilizada a Equação 4.24 para garantir fatores de segurança sempre maiores que 1,15. Dessa forma, o fator de segurança de projeto que será utilizado para o dimensionamento é de 3,25.

$$t = \sum Np \quad (4.22)$$

$$FS = 1 + \frac{(10 + t)^2}{100} \quad (4.23)$$

$$FS = 1,15 \quad (4.24)$$

5 Projeto Conceitual

Seguindo o estudo das opções disponíveis no mercado e as considerações relevantes para o projeto da cadeira de rodas, faz-se necessário definir as escolhas de projeto que serão utilizadas. Portanto, a seguir, exemplifica-se as decisões que precisam ser tomadas, discutindo as vantagens e desvantagens das opções. Para a decisão das escolhas, foi considerado a opinião de potenciais usuários por meio de questionário *on-line* (apresentados no Apêndice A), além dos requisitos de projeto apresentados na Seção 1.3, como custo e peso.

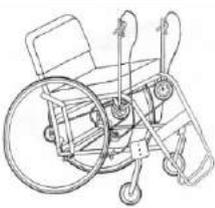
A pesquisa de opinião foi realizada por meio de um questionário em *Google Forms* enviado eletronicamente a usuários de cadeiras de rodas para que estes respondessem com as suas preferências de configuração da cadeira de rodas. No entanto, a pesquisa teve apenas 8 respostas com idades variando entre os 20 e 50 anos, o que mostra que o foco de idade das respostas não atinge o público-alvo da cadeira de rodas devido à dificuldade de acesso ao público-alvo. No entanto, esses dados são de grande valor na análise de opções pois são usuários de cadeiras de rodas que compreendem as dificuldades apresentadas na utilização deste objeto no dia-a-dia e, portanto, são capazes de sugerir aquelas opções que facilitam a sua utilização.

5.1 Tipo de Propulsão

A propulsão manual, que consiste na transmissão de força do usuário para gerar o deslocamento da cadeira através de elementos mecânicos, possui atualmente três formas de ser realizada. A primeira, e mais conhecida, se trata dos aros fixados nas rodas (geralmente nas rodas traseiras) que já foram discutidos na seção 3.3.2.

O segundo sistema de propulsão manual é por meio de alavancas, que minimiza os esforços de propulsão minimizando o risco de lesões ósseas e musculares pela repetição de movimentos danosos. Em (CARRIEL, 2014) é apresentado uma revisão de patentes americanas do sistema de propulsão por alavancas, apresentado na Tabela 6. Esse sistema se utiliza de um número maior de peças como engrenagens, correntes, cabos, etc. Portanto, acabam aumentando o peso total, diminuindo a praticidade da cadeira e dificultando seu transporte e manutenção.

Tabela 6 – Patentes Americanas de Sistemas de Propulsão por Alavancas (CARRIEL, 2014)

US 4.460.190 ¹⁹	US 5.865.455 ²⁰	US 5.941.547 ²¹	US 20060170182 ²²
 <p>Inventor: Erick M. Spiess (1984)</p> <p>Descrição: Mecanismo de propulsão por alavancas de cadeira de três rodas, sendo duas rodas frontais guias e uma traseira propulsora. Produto para uso externo, passeios de longas distâncias.</p>	 <p>Inventor: Willian G. Taylor (1999)</p> <p>Descrição: Mecanismo de propulsão por alavancas conectadas às rodas de direção, com correntes com proporção variável do grupo de câmbio da parte traseira. Produto que proporciona menos tensões nas articulações do ombro.</p>	 <p>Inventor: Carl F. Drake (1999)</p> <p>Descrição: Mecanismo com cabos de guias que conectam cada alavanca a uma roldana que, por sua vez, age por meio de uma embreagem de direção única, os cabos são enrolados por uma mola na roldana. As embreagens permitem um movimento livre da cadeira, durante a aplicação da força propulsora.</p>	 <p>Inventor: Markin K. Mittelstaedt (2006)</p> <p>Descrição: Mecanismo de alavancas de sentido único, montado sobre eixo coaxial de direção com as rodas de direção. O sistema de frenagem é acionado pela alavanca contra as rodas, também utilizado para fazer manobras de giros.</p>
(a)	(b)	(c)	(d)

Por fim, existe o sistema de propulsão por manivelas, similar ao visto na Figura 11c. Muito utilizado no esporte adaptado, não é comum ser visto nas atividades da vida diária por gerarem uma área de ocupação da cadeira maior, o que dificulta a manobra em espaços apertados.

Pelas respostas dos usuários, 100% dos consultados preferem os aros como método de propulsão manual, confirma-se que é a forma mais conhecida e utilizada. Além disso, possui simplicidade maior de projeto, custo inferior e peso menor. Dessa forma, será a opção utilizada neste projeto

5.2 Número de Rodas

O número de rodas da cadeira pode ser de 3 ou 4, sendo que no caso de 3 rodas elas podem estar dispostas com as duas rodas laterais e uma frontal ou com uma roda traseira. As vantagens e desvantagens de cada configuração é apresentada na Tabela 7.

Para a decisão do número de rodas a ser adotado neste projeto, considera-se o custo (definido como fator mais importante do projeto) e a opinião dos potenciais usuários do sistema, cujo resultado é mostrado na matriz de decisão apresentada na Tabela 8.

Na matriz de decisão, as possíveis soluções são colocadas na primeira coluna e os parâmetros de consideração são apresentados na primeira linha. Os parâmetros considerados no projeto são custo, peso, simplicidade de projeto e a opinião dos usuários. Para cada um desses fatores é atribuído um peso que considera a importância dele no conjunto

Tabela 7 – Vantagens e Desvantagens no Número de Rodas da Cadeira

	4 Rodas	3 Rodas Frontal	3 Rodas Traseira
Vantagens	- Mais compacta (mais fácil de manobrar em espaços pequenos) - Mais utilizada na sociedade - Facilidade de propulsão por terceiros	- Mais adequada para terrenos irregulares - Facilidade de propulsão da cadeira por terceiros	- Mais adequada para terrenos irregulares - Maior facilidade de transferência para a cadeira
Desvantagens	- Instabilidade em terrenos irregulares	- Maior dificuldade de transferência para a cadeira	- Dificuldade de propulsão da cadeira por terceiros

do projeto. Neste caso, o custo é um dos fatores principais no projeto e, portanto, possui peso maior que os outros. São, então, atribuídas notas no corpo da matriz (na parte esquerda/superior de cada espaço) numa escala de 0 a 10 e essa nota é multiplicada pelo peso do fator se obtendo os valores apresentados na parte direita/inferior de cada espaço. Assim, todas as notas já alteradas pelo peso do fator são somadas na coluna *Rank* que apresenta os valores finais de cada solução. O objetivo desse processo é proporcionar uma comparação entre as soluções e auxiliar o processo de tomada de decisão.

Dessa forma, selecionou-se a configuração padrão com 4 rodas. Tenta-se compensar a instabilidade gerada pelas 4 rodas em terrenos irregulares utilizando pneus maiores e mais flexíveis nas rodas frontais.

Tabela 8 – Matriz de Decisão do Número de Rodas a Serem Utilizadas na Cadeira de Rodas

	Custo	Peso	Simplicidade de Projeto	Opinião dos Usuários	RANK
Peso	0.4	0.1	0.2	0.3	1.0
4 Rodas	7.0 2.8	8.0 0.8	6.0 1.2	7.5 2.25	7.05
3 Rodas Frontal	8.0 3.2	8.0 0.8	8.0 1.6	2.5 0.75	6.35
3 Rodas Traseira	8.0 3.2	8.0 0.8	8.0 1.6	0.0 0.0	5.6

5.3 Estrutura

Como visto na seção 3.5, o quadro da cadeira de rodas pode ser dobrável (em x) ou rígido. A estrutura em X é compactada mais facilmente sem necessidade de retirar peças enquanto que a cadeira de rodas com estrutura rígida necessita de, pelo menos, um sistema "quick-release" nas rodas traseiras, ou seja, fácil retirada das rodas apenas apertando um botão para a remoção das rodas para a sua compactação. No entanto, a

estrutura dobrável possui um mecanismo bem mais complexo para o funcionamento que seria agravado com as mudanças de dimensão da cadeira. Apesar disso, a maioria dos usuários (75%) preferem a cadeira com esta configuração. Para a escolha da estrutura, foi realizada uma matriz de decisão apresentada na Tabela 9. Apesar dos resultados das duas opções serem muito próximos, foi escolhida a cadeira com estrutura rígida pois uma estrutura em X com ajuste de dimensão seria de extrema dificuldade de projeto.

Tabela 9 – Matriz de Decisão da Estrutura a Ser Utilizada na Cadeira de Rodas

	Custo	Peso	Simplicidade de Projeto	Opinião dos Usuários	RANK
Peso	0.3	0.2	0.2	0.3	1.0
Estrutura Rígida	8.0 / 2.4	8.0 / 1.6	9.0 / 1.8	2.5 / 0.75	6.55
Estrutura Dobrável (em x)	6.0 / 1.8	6.0 / 1.2	5.0 / 1.0	7.5 / 2.25	6.25

5.4 Tipo de Roda e Pneu

5.4.1 Rodas Traseiras

Como visto anteriormente, a roda deve ser o mais leve possível evitando vibrações demasiadas. No entanto, pode representar um custo expressivo para a cadeira de rodas. As opções mais utilizadas são: aço, plástico ou fibra de carbono. Um projeto experimental propõe a criação de uma roda em madeira e partes em impressão 3D. No entanto, ainda não há nenhum teste realizado com essa configuração. A madeira poderia, ainda, ser substituída por tubos de PVC. Dessa forma, seria obtida uma roda de custo bem inferior às alternativas no mercado. Caso esse sistema não fosse capaz de suportar o peso, rodas de bicicletas podem ser utilizadas com adaptações (inclusão do aro propulsor).

Os pneus da cadeira, já exemplificados na seção 3.4.3, também possuem diferentes características e vantagens, que são resumidas na Tabela 10.

A escolha do pneu depende da seleção da roda; caso seja utilizando uma roda adaptada de bicicleta, utiliza-se um pneu de enchimento a ar que possui o menor custo.

5.4.2 Rodas Dianteiras

Tamanhos reduzidos de rodas dianteiras favorecem o atolamento da cadeira em terrenos irregulares, podendo causar acidentes. Dessa forma, serão utilizadas rodas de diâmetro maior. A opção mais resistente é a utilização de rodas de bicicleta infantil com pneu inflável na substituição das rodas dianteiras tradicionais. No entanto, pode-se, ainda, utilizar rodas de plástico (como as utilizadas em brinquedos infantis como

Tabela 10 – Vantagens e Desvantagens dos Tipos de Pneu

Pneu	Vantagens	Desvantagens
Enchimento a Ar	- Mais leves - Absorvem mais vibração - Bom para terrenos irregulares	- Maior necessidade de manutenção - Maior chance de furar
Uretano	- Baixo custo - Mais resistente à perfuração - Menor manutenção	- Não recomendados para terrenos irregulares - Mais pesados - Mais difícil de instalar
Espuma	- Absorvem vibração - Bom para terrenos irregulares - Menor manutenção - Mais resistente à perfuração	- Custo elevado - Substituição complexa

tríciclos, que não possuem pneu) que permitem maior versatilidade (maior disponibilidade de diâmetros) além de serem mais baratas. Como a diferença de preço entre as duas opções não é significativa (cerca de R\$ 20,00 para a roda de plástico e R\$ 30,00 para a roda de bicicleta), será utilizada a roda de bicicleta infantil pela sua resistência.

5.5 Dispositivo Anti-tombo

Algumas cadeiras de rodas possuem um acessório para evitar o tombamento traseiro que consiste em uma ou duas rodinhas fixadas por meio de uma haste ao quadro da cadeira, como mostra a Figura 58. É útil para cadeirantes com menos estabilidade ou que estejam aprendendo a executar manobras para transpor obstáculos. No entanto, pode restringir o uso da cadeira de rodas em superfícies irregulares.

Como o dispositivo anti-tombo é prejudicial em terrenos irregulares (representam um dos requisitos de projeto) e geraria um custo e um peso maior na cadeira de rodas, optou-se por não utilizar esse sistema, como visto na matriz de decisão, apresentada na Tabela 11, apesar dos 75% dos usuários que são a favor.

Tabela 11 – Matriz de Decisão para Utilização da Roda Anti-Tombo

	Custo	Peso	Simplicidade de Projeto	Opinião dos Usuários	RANK
Peso	0.5	0.1	0.1	0.3	1.0
1 Roda Anti-tombo	7.0 / 3.5	7.0 / 0.7	7.0 / 0.7	7.5 / 2.25	7.15
2 Rodas Anti-tombo	5.0 / 2.5	5.0 / 0.5	6.0 / 0.6	7.5 / 2.25	5.85
Sem Roda Anti-tombo	10.0 / 5.0	10.0 / 1.0	10.0 / 1.0	2.5 / 0.75	7.75



Figura 58 – Rodas Anti-tombo (ORTOPONTO, 2018)

5.6 Material

Uma vasta seleção de materiais já foi utilizada na estrutura de cadeiras de rodas como visto na seção 3.4.1. Este projeto considera, ainda, algumas formas alternativas e mais modernas como a impressão 3D. Todos os materiais a serem analisados são apresentados na Tabela 12, assim como as respectivas densidades e os módulos de elasticidade. São apresentados ainda uma estimativa de custo relacionado a cada material.

Tabela 12 – Materiais Analisados para a Estrutura da Cadeira de Rodas

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Densidade [g/cm^3]	Custo
Aço	207	7,86	Baixo
Alumínio	70	2,70	Médio
Titânio	107	4,55	Alto
Fibra de Carbono	230	1,80	Alto
PVC	2,92	1,30 – 1,60	Baixo
Polímero Rígido (polipropileno)	1,3	0,95	Baixo
Bambu Laminado	2,6 - 20	0,80 – 1,15	Baixo
ABS (Impressão 3D)	2,0 - 2,6	1,03	Baixo
PETG (Impressão 3D)	1,5 - 1,9	1,25	Baixo

Dessa forma, percebe-se que, com a proposta de construir uma cadeira de rodas com custo mínimo, a fibra de carbono e o titânio são materiais que já podem ser eliminados. Da mesma forma, procurando manter a cadeira de rodas apropriada pra o manuseio sem criar dificuldades excessivas para a propulsão, considera-se que o aço possui densidade elevada demais e, portanto, tornaria o produto muito pesado. Além disso, o bambu lami-

nado, por ser um material ortotrópico, possui uma dificuldade de projeto muito elevada, o que inviabiliza sua utilização neste trabalho. Dessa forma, alumínio, PVC, polipropileno, e os dois materiais de impressão 3D considerados (ABS e PETG) serão testados na fase de projeto para definição da melhor solução.

É importante destacar que o PLA (outro material muito comum para na impressão 3D) não foi sequer considerado uma vez que sua temperatura de transição vítrea é muito baixa, ou seja, caso a cadeira fosse deixada exposta a um calor excessivo (como no porta-malas de um carro no sol) correria o risco de derreter e perder sua capacidade de sustentação.

Além disso, destaca-se a possibilidade de limitação da cadeira de acordo com o peso do usuário. Assim, pode ser desenvolvido uma cadeira menor (e, portanto, com material mais barato) para crianças e uma cadeira maior com um material mais resistente para adolescentes e adultos.

5.7 Travamento

O sistema de travamento é realizado para impedir a movimentação da cadeira quando esta é estacionada e se deseja estabilidade. O travamento pode atuar apenas em duas rodas ou em todas as rodas. O travamento em todas as rodas fornece um pouco mais de segurança especialmente quando a cadeira é estacionada em aclives. No entanto, considera-se desnecessário o travamento em todas as rodas uma vez que a vantagem é muito pequena em relação aos custos. Além disso, 75% dos usuários consultados concordam que é suficiente o travamento apenas das duas principais.

Existem três sistemas de trava mais comuns: sistema puxa/empurra (Figura 59), tesoura (Figura 60) e com pistão (Figura 61); suas vantagens e desvantagens são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Vantagens e Desvantagens dos Sistemas de Travamento

	Vantagens	Desvantagens
Puxa/Empurra	<ul style="list-style-type: none"> - Menor Custo - Maior simplicidade Mecânica 	<ul style="list-style-type: none"> - Pode machucar o dedo dos usuários mais velozes - Mais instável
Tesoura	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo Custo - Simplicidade Mecânica 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior dificuldade de alcance (especialmente quando se estaciona a cadeira sobre mesas ou superfícies) - Mais instável
Pistão	<ul style="list-style-type: none"> - Mais estável - Fácil alcance - Mais seguro (não prender o dedo de usuários) 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo elevado - Complexidade de projeto



Figura 59 – Puxa/Empurra (SPORTAID, 2018)



Figura 60 – Trava Tesoura (SPORTAID, 2018)



Figura 61 – Sistema de Trava com Pistão (INDEMEDICAL, 2018)

Com base nisso, foi realizada a matriz de decisão, mostrada na Tabela 14 para definição do sistema de travamento a ser utilizado no sistema. Apesar das vantagens de segurança e estabilidade da trava de pistão, seu custo e complexidade de projeto elevados não justificam seu uso. Assim, será utilizado a trava com sistema puxa/empurra.

Tabela 14 – Matriz de Decisão do Tipo de Trava a Ser Utilizado na Cadeira de Rodas

	Custo		Peso		Simplicidade de Projeto		Manipulação do Usuário		RANK
Peso	0.4		0.1		0.2		0.3		1.0
Puxa/Empurra	10.0	4.0	9.0	0.9	9.0	1.8	7.0	2.1	8.8
Tesoura	8.0	3.2	9.0	0.9	8.0	1.6	8.0	2.4	8.1
Pistão	4.0	1.6	7.0	0.7	4.0	0.8	10.0	3.0	6.1

5.8 Sistema de Ajuste de Dimensões

Como foi visto na seção 2.2.1, existem algumas opções já utilizadas no mercado para fazer o ajuste de dimensões da cadeira de rodas. O sistema que ajusta a largura pela movimentação das almofadas laterais, como visto na Figura 18, não realiza todos os ajustes necessários para o suporte correto do corpo além de não mudar o posicionamento das rodas em relação ao corpo. Isso significa que em uma configuração com um usuário menor, as rodas ficariam muito distantes do corpo e podem causar lesões nos ombros. Dessa forma, a manipulação do usuário se torna um limitante significativo para a configuração.

Ambos os sistemas de tubos concêntricos, vistos nas Figuras 19 e 20, possuem a vantagem de permitir que toda a estrutura da cadeira seja adaptável porém o peso total é maior, principalmente nas configurações com usuários menores, já que uma parte significativa do tubo existe sem funcionalidade estrutural, ou seja, está guardada para quando a cadeira for aumentada. No entanto, consiste em um sistema simples e que pode ser manuseado pelos usuários sem dificuldades.

O sistema do tecido dobrado ao redor dos tubos de suporte, apesar de simples e de baixo custo, não atende as necessidades de suporte apresentadas no Capítulo 3 e só pode ser usada para a largura do assento e do encosto. Não permite a adaptação da profundidade do assento, da altura das rodas, etc.

Além disso, esse trabalho sugere um sistema novo, com funcionalidade de encaixe de peças novas, permitindo uma variabilidade das dimensões. Esse sistema funciona com pequenos pedaços de tubos que encaixam em outros por meio de um tubo com diâmetro maior quando necessário. Assim, tubos são adicionados a medida que a dimensão da cadeira deve ser aumentada. Alguns tubos desse sistema podem ser vistos na Figura 62. Dessa forma, não haveria o peso extra das peças não utilizadas mas dificultaria a manipulação do usuário na montagem e possível perda de peças soltas. Esse sistema possui, ainda, a vantagem de poder ser manipulado futuramente para produzir não apenas dimensões variadas mas também configurações de cadeira variadas, como permitir a substituição das duas rodas frontais por uma única, entre outras.

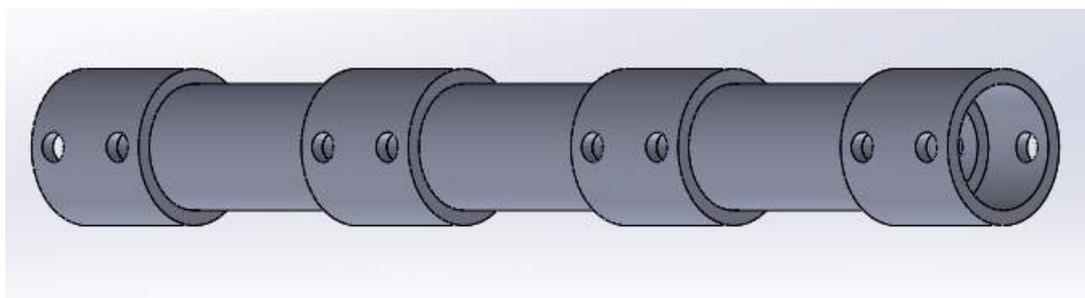


Figura 62 – Esquema de Funcionamento das Peças Extras para Ajuste de Dimensão

Para a definição do sistema, já que todos os sistemas possuem vantagens e desvantagens significativas, foi realizada uma matriz de decisão, apresentada na Tabela 15

abaixo. Como os resultados do sistema de peças extras e de tubos concêntricos são muito próximos, se dará prioridade para os tubos concêntricos (maior pontuado) mas se utilizará também as peças extras quando conveniente. Uma combinação das duas soluções irá gerar o melhor sistema possível.

Tabela 15 – Matriz de Decisão do Sistema de Ajuste de Dimensões

	Custo	Peso	Simplicidade de Projeto	Manipulação do Usuário	RANK
Peso	0.5	0.2	0.1	0.2	1.0
Movimentação Lateral	5.0 / 2.5	8.0 / 1.6	3.0 / 0.3	2.0 / 0.4	4.8
Tubos Concêntricos	7.0 / 3.5	5.0 / 1.0	8.0 / 0.8	9.0 / 1.8	7.1
Ajuste do Tecido	8.0 / 4.0	7.0 / 1.4	9.0 / 0.9	1.0 / 0.1	6.4
Peças Extras	6.0 / 3.0	10.0 / 2.0	8.0 / 0.8	6.0 / 1.2	7.0

5.9 Configuração

As definições realizadas nas seções anteriores deste capítulo são resumidas na Tabela 16 para simplificação das próximas etapas de projeto.

Tabela 16 – Resumo das Definições de Cada Sistema da Cadeira de Rodas

Escolha	Definição
Tipo de Propulsão	Aro Propulsor
Número de Rodas	4 Rodas
Estrutura	Rígida
Rodas Traseiras	Roda de Cadeira de Rodas com Pneu Inflável
Roda Dianteira	Roda de Bicicleta Infantil
Roda Anti-Tombo	Não Será Usada
Material	A Ser Estudado
Travamento	Sistema Puxa/Empurra em 2 Rodas
Ajuste de Dimensão	Combinação de Tubos Concêntricos e peças extras

6 Determinação Inicial da Geometria

6.1 Dimensões

Após a definição do projeto conceitual, foi necessário estabelecer as dimensões e pesos com os quais se trabalharia durante o restante do projeto. Considerando a vida útil requerida nas expectativas do trabalho de 8 anos, dividiu-se a infância em duas etapas para o dimensionamento de duas cadeiras separadas.

Assim, estimando-se que o uso da cadeira de rodas começa por volta dos 3 ou 4 anos de idade, tem-se a primeira cadeira que pode ser utilizada até que a criança atinga cerca de 11 ou 12 anos. Utilizando os dados do IBGE (IBGE, 2010) tem-se uma média de altura de 1,53 m entre as meninas (média mais alta que entre os meninos). Dessa forma, para se trabalhar com valores maiores que a média utilizou-se um valor de 1,6 m de altura para determinar as dimensões máximas que a cadeira deve atingir ao ser utilizada por crianças de até 12 anos. Assim, com o método de Drillis e Contini se obtém os valores de 42 cm para a largura do assento (considerando os 2 cm de folga), 39 cm para a profundidade do assento e 36 cm para a altura do encosto. Esses valores serão utilizados na determinação da geometria para a análise estrutural por serem os valores críticos em que a estrutura sofrerá maior deformação.

O (IBGE, 2010) apresenta também os pesos médios das crianças de 12 anos cujos valores são de 42 kg e 44,2 kg para os meninos e meninas, respectivamente. Assim, para trabalhar com valores seguros utiliza-se 55 kg. No entanto, a NBR ISO 7176-8 (ABNT, 2009b) apresenta valores de força para as cadeiras que suportam até 25 kg, 50 kg, 75 kg ou 100 kg. Dessa forma serão utilizados os valores de força para cadeiras que suportam pesos entre 50 e 75 kg.

Dessa forma, uma segunda cadeira pode ser dimensionada para os jovens de 12 a 19 anos que pode precisar de um material mais resistente que a cadeira para crianças mais novas. Também de acordo com (IBGE, 2010) a média de altura para 19 anos é de 1,72 m e 1,61 m entre os homens e mulheres respectivamente. Dessa forma, para valores seguros, utiliza-se 1,8 m para a definição das dimensões da cadeira. Da mesma forma, a

média de peso é de 65,9 kg e 56,2 kg. Assim, utiliza-se o valor de 75 kg que coincide com um dos valores limites de peso da NBR ISO 7176-8 (ABNT, 2009b).

Optou-se por projetar inicialmente a cadeira para crianças de até 12 anos e, futuramente, projetar a segunda cadeira.

6.2 Dimensionamento dos Tubos

6.2.1 Diâmetro

O diâmetro inicial com que foi escolhido trabalhar foi com tubos de PVC de 25 mm para PVC residencial soldável ou o equivalente (1") para o PVC Industrial.

6.2.2 Comprimento

Para definição do comprimento dos tubos que podem ser adicionados a cadeira foi necessário levar em consideração o intervalo de tamanho que a cadeira pode atingir. Dessa forma, foi necessário verificar o tamanho mínimo da cadeira. Pelos mesmos dados do IBGE (IBGE, 2010), a média de altura de uma criança de 3 anos é de 98,9 cm e 98,3 cm para meninos e meninas, respectivamente. Decidiu-se trabalhar com uma média de 0,8 m como altura mínima dos usuários da cadeira de rodas. Da mesma forma que realizado anteriormente, definiu-se as dimensões principais da cadeira por meio do método de Drillis e Contini. Assim, encontra-se uma largura de assento de 19 cm, profundidade do assento de 20 cm e altura do encosto de 15 cm.

Assim, percebe-se que para atingir todas as variações de dimensões necessárias tem-se duas opções: tubos de comprimento pequeno ou tubos com tamanhos diferentes. Como ter vários tubos curtos prejudicaria a rigidez do sistema, definiu-se os comprimentos de 8cm e 15cm para os tubos externos com furos em intervalos de 10mm. Logo, todas as dimensões entre 15cm e 50cm podem ser atingidas.

Para conectar os tubos externos entre-si, é necessário um tubo interno que se une a um tubo externo de cada lado por meio de um conjunto parafuso/porca. O tamanho dos parafusos foram estimados inicialmente como M4 apenas para a que fossem incluídos nos desenhos os furos nos tubos. No entanto, após as simulações, foi realizado o dimensionamento dos parafusos, apresentado na Seção 8.1.

6.3 Estrutura

A definição da geometria da cadeira de rodas, ou seja, como montar uma solução que suportasse o peso do usuário sem falhar foi realizada de forma arbitrária buscando

resolver problemas esperados na utilização. Assim, obteve-se a solução apresentada na Figura 63 que foi obtida após um estudo da geometria, que é apresentado a seguir, e com as simulações.



Figura 63 – Versão Final da Estrutura

A estrutura foi simulada por meio do programa Ansys® em etapas seguintes para verificação das soluções adotadas.

6.3.1 Primeira Versão

A primeira versão da geometria foi realizada em programa SolidWorks® apenas como uma referência para versões futuras e como estudo de estrutura. Ou seja, era necessário estabelecer como as rodas seriam conectadas à estrutura principal e quais eram os pontos importantes para reforço estrutural. Assim, ela é apresentada na Figura 64 e mostra apenas o formato simples necessário para desenvolvimentos futuros. Foi percebido a necessidade de uma barra vertical para acoplamento da roda traseira, assim como uma forma de prender as rodas frontais também. A ideia inicial para tal era que estas fossem colocadas diretamente na barra vertical frontal.

Percebeu-se, também, que uma falha nessa geometria é a barra horizontal posicionada na frente da estrutura pois esta iria interferir com o posicionamento das pernas do usuário causando incômodo. Logo, foi necessário encontrar uma forma de manter as duas laterais da cadeira de rodas unidas sem causar desconforto.

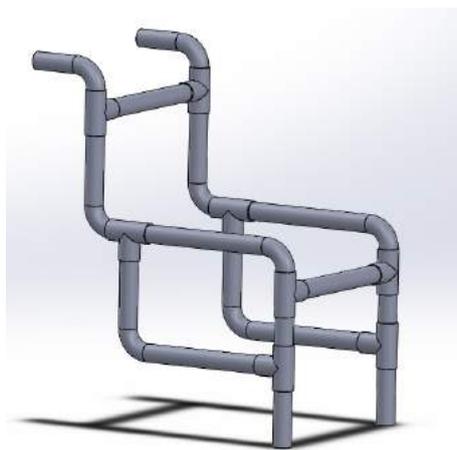


Figura 64 – 1ª Versão da Geometria da Estrutura

6.3.2 Segunda Versão

Dessa forma, procurando resolver o problema da barra horizontal frontal, na segunda versão, apresentada na Figura 65, essa barra foi posicionada na parte inferior da cadeira. Além disso, começou-se a estudar o sistema de ajuste de dimensões, mas ainda sem uma rigidez dimensional. Além disso, verificou-se a possibilidade de instalar as rodas frontais dos lados externos da estrutura por meio da abraçadeira destacada na Figura 66. Assim, seria possível ajustar sua altura em relação ao resto da estrutura.

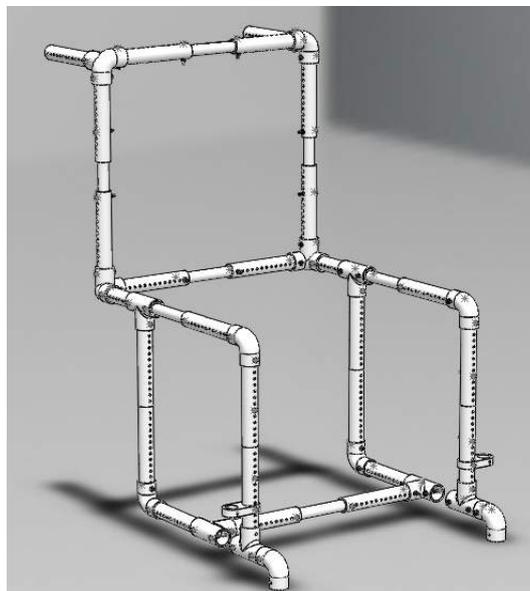


Figura 65 – 2ª Versão da Geometria da Estrutura

No entanto, vários defeitos foram destacados nessa geometria. Inicialmente percebe-se que uma única barra horizontal na parte inferior da cadeira provavelmente não seria suficiente para suportar a separação entre as laterais que ocorre uma vez que o peso do usuário é colocado sobre a cadeira. Além disso, a roda frontal colocada na lateral da estrutura iria impedir o seu giro na hora das curvas, uma vez que as barras laterais seriam obstáculos. Assim, a cadeira estaria prejudicada para a movimentação em curvas.

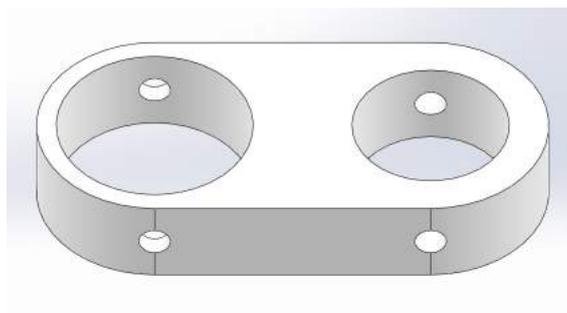


Figura 66 – Abraçadeira para Instalação das Rodas Frontais

6.3.3 Terceira Versão

Na terceira versão, vista na Figura 67, portanto, as rodas frontais foram fixadas diretamente na estrutura, permitindo que elas tenham espaço para girar. Foram adicionadas, ainda, as barras horizontais no assento, decidindo-se, assim, por um assento com uma almofada de espuma firme e grossa que será colocada sobre essas barras de forma que suas geometrias não sejam sentidas pelo usuário. Julgou-se necessário o posicionamento de 3 barras horizontais na base do assento para suportar o peso da criança e evitar que gere uma deformação excessiva entre as barras do assento causando incômodo ao usuário. Além disso, destaca-se a utilização de PVC soldável onde todos os encaixes seriam aparafusados, não apenas entre os tubos externos e internos, mas também entre os tubos externos e os joelhos e têes.



Figura 67 – 3ª Versão da Geometria da Estrutura

Porém, esse tipo de PVC, mais usado para conexões de água fria, tem espessura menor e, portanto, possui maior probabilidade de falhar sobre tensão.

6.3.4 Quarta Versão

Assim, na quarta versão, decidiu-se substituir esse PVC soldável pelo PVC Industrial que possui espessura maior, com as dimensões apresentadas na Tabela 17. Além disso, as conexões entre os joelhos e têes e os tubos externos podem ser feitas por meio de rosca, diminuindo, assim, a quantidade de parafusos utilizada. Além disso, foi inserida mais uma barra horizontal na parte de baixo da cadeira de rodas aumentando, assim, a estabilidade do sistema, como é visto na Figura 68.

Tabela 17 – Dimensões do Tubo de PVC Industrial Utilizado

Diâmetros PVC Industrial	Valor
Diâmetro Nominal	1"
Diâmetro Externo	33,3mm
Diâmetro Interno	24,1mm



Figura 68 – 4ª Versão da Geometria da Estrutura

6.3.5 Quinta Versão

Além disso, foi criada uma versão com a utilização do PVC Roscável Residencial, vista na Figura 69, que possui espessura menor que o PVC Industrial porém é mais acessível. Os componentes são equivalentes à versão anterior.



Figura 69 – 5ª Versão da Geometria da Estrutura

A versão 4 e 5 foram simuladas para verificação da estrutura, caso a última versão resista aos esforços necessários para suportar o peso do usuário e para cumprir os requisitos da ABNT NBR ISO 7176-8 (ABNT, 2009b) será a versão escolhida.

Para a simulação, as roscas e os aros propulsores das rodas traseiras foram suprimidos, diminuindo o número de detalhes nas superfícies. As roscas são substituídas pelo contato no programa Ansys que garante que não haja movimentação entre as peças. Os aros propulsores foram suprimidos por erros na simulação e, como a roda traseira escolhida é comercial, tem-se a segurança do seu funcionamento.

6.4 Rodas Traseiras

O projeto de roda traseira experimental citado na seção 5.4.1 apresentou dificuldades de desenho CAD precisando ser reformulado. Portanto, a princípio, foi selecionada uma roda traseira tradicional de cadeira de rodas para que o projeto pudesse ser continuado. No entanto, sabe-se que o custo dessa decisão será um grande impacto no preço total do produto. Logo, caso seja possível, ao final do projeto ou em situações futuras, a roda será reprojeta, acertando erros para que seja possível a sua fabricação e diminuindo, assim, o custo total.

Dessa forma, se optou pela roda traseira da empresa Baxmann feita em Nylon com aro 24 e 6 raios por ser uma das opções mais baratas do mercado sem comprometer a qualidade. A roda, vista na Figura 70, possui 1,63 kg. Além disso, optou-se pela versão da roda já acoplada com o pneu inflável por possuir o menor custo e ser apropriado para terrenos irregulares.



Figura 70 – Roda Traseira Baxmann (MAGAZINE MEDICA, 2018)

Destaca-se como é feito o encaixe da roda traseira na estrutura principal da cadeira de rodas por meio da Figura 71.



Figura 71 – Detalhe do Encaixe da Roda Traseira na Estrutura

6.5 Rodas Frontais

Como citado no Projeto Conceitual na Seção 5.4.2, a decisão para a roda frontal foi a utilização de rodas de bicicleta infantil. Portanto, a solução adotada é uma roda de aro 12" com pneus em EVA, como visto na Figura 72.



Figura 72 – Roda Frontal (GIRIMOI RECREACOES, 2018)

As rodas serão montadas com um garfo para permitir o seu encaixe na estrutura, como visto na Figura 73.

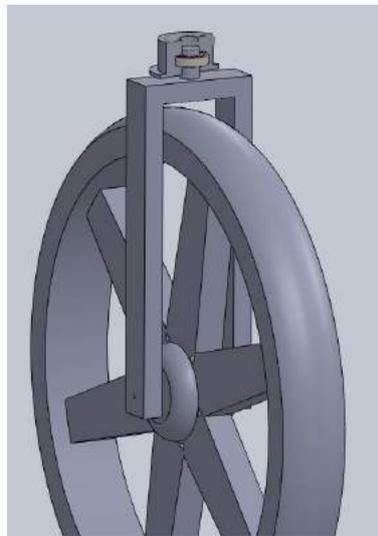


Figura 73 – Montagem da Roda Frontal

Percebe-se na Figura 73 a necessidade de um rolamento posicionado na horizontal para permitir o giro da roda frontal para que a cadeira de rodas possa girar. Além disso, a roda frontal também é acoplada a rolamentos que permitem a sua rotação ao redor do seu eixo central. Um detalhe do encaixe de rodas frontais a estrutura em modelos comerciais é apresentado na Figura 74.



Figura 74 – Roda Frontal de uma Cadeira de Rodas Comercial

6.6 Eixo da Roda Frontal

O eixo de suporte da roda frontal, que é preso em cada lateral do garfo e sustenta dois rolamentos, é mostrado na Figura 75 e está destacado em vermelho.

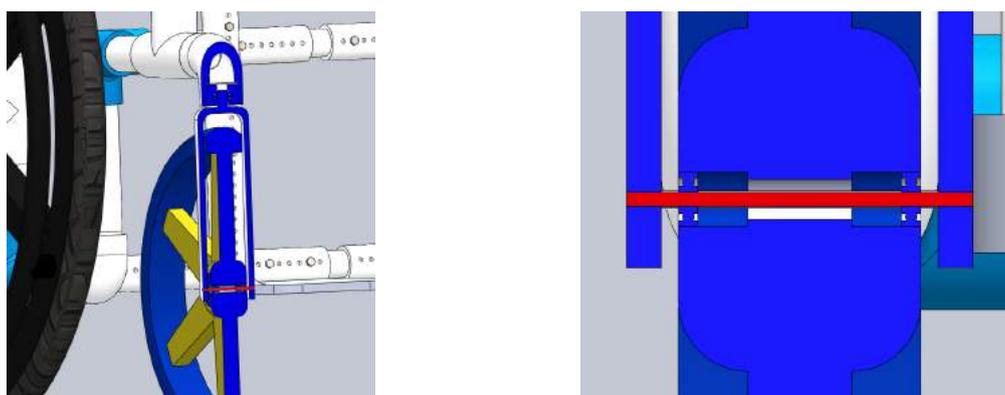


Figura 75 – Montagem do Eixo da Roda Frontal

O eixo foi dimensionado de acordo com as forças que irá sofrer seguindo a configuração escolhida que está mais claramente mostrada na Figura 76. Realizou-se o DCL do eixo (também na Figura 76) percebendo-se a necessidade de encontrar o valor da força aplicada na roda dianteira F_{caster} .

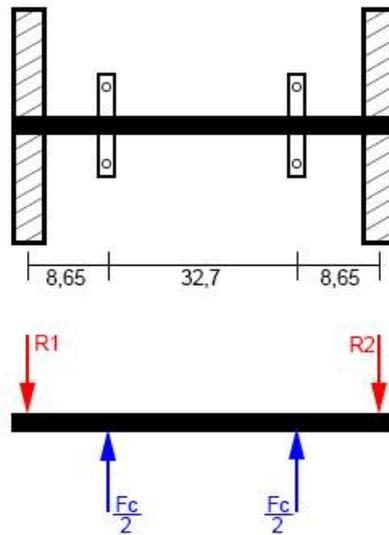


Figura 76 – Configuração e DCL do Eixo da Roda Frontal

Para calcular F_{caster} por meio da equação 4.3 é necessário um conhecimento da geometria da cadeira de rodas para encontrar L_{roda} e L_{caster} . Assim, como esses valores são dependentes do CG e este depende do usuário sobre a cadeira (e também da postura adotada por ele) estimou-se a localização do CG com um boneco em Solid sentado sobre a estrutura. Assim, foi possível medir, no próprio software, as distâncias do ponto de contato das rodas com o solo e o CG. Encontrou-se valores de 58,06mm para L_{roda} e 365,32mm para L_{caster} .

Assim, com $F_{pessoa} = 550N$ (valor máximo) tem-se que a força na roda dianteira F_{caster} é igual a 37,7N. Portanto, com este valor e as dimensões propostas na Figura 76 encontra-se por meio do equilíbrio estático os valores de R_1 e R_2 iguais a 18,85N. Dessa forma, encontrou-se os diagramas de esforço cortante e momento fletor apresentados nas Figuras 77 e 78, respectivamente.

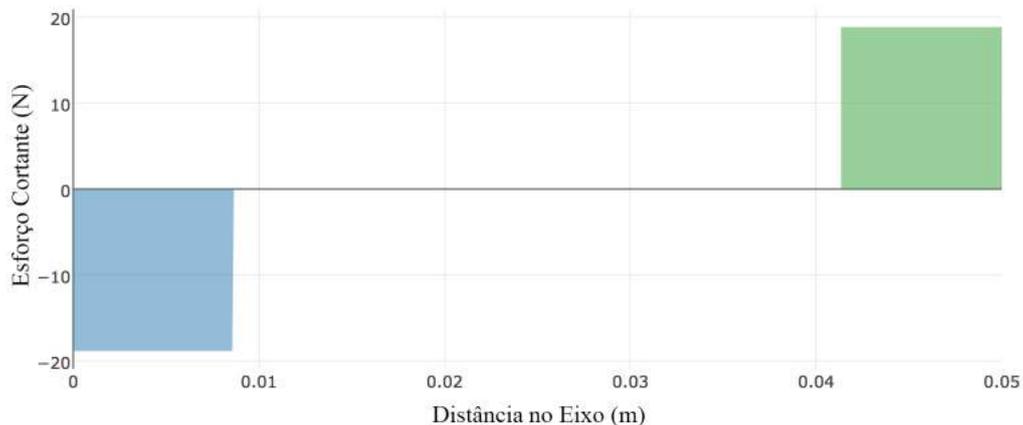


Figura 77 – Diagrama de Esforço Cortante do Eixo da Roda Frontal

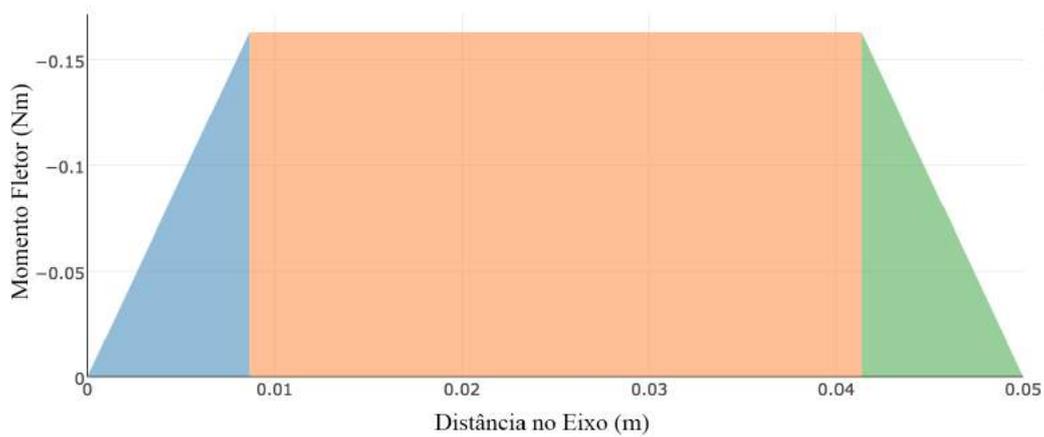


Figura 78 – Diagrama de Momento Fletor do Eixo da Roda Frontal

Dessa forma, o valor de esforço cortante máximo é de $| 18,85N |$ e o momento fletor máximo é $| 163Nmm |$ o que será utilizado para o cálculo do diâmetro por meio da Equação 4.15. Para tal, é necessário estabelecer um valor de tensão normal admissível com base no fator de segurança (estabelecido como 3,25) e na tensão de escoamento do material. Foi estabelecido o Aço SAE 1020, por seu preço reduzido e alta resistência mecânica, com valor de tensão de escoamento de 350MPa. Assim, substituí-se na Equação 4.15 $\sigma_x = \sigma_{adm} = 107,7MPa$. Assim, encontra-se um valor de diâmetro mínimo para o eixo de 2,5mm.

6.7 Rolamentos

Para ser realizada a seleção dos rolamentos, é necessário o conhecimento das forças aplicadas sobre eles, além das dimensões as quais eles deverão se adaptar. Os rolamentos utilizados serão: dois para cada roda (traseira e dianteira) para permitir a estabilidade e o giro das rodas livremente além de um rolamento montado horizontalmente sobre as rodas dianteiras para permitir que elas girem ao redor do eixo Y e possam realizar curvas com a cadeira de rodas.

Todos os rolamentos selecionados são do tipo fixo com uma carreira de esferas por suportarem cargas radiais e axiais e por possuir custo reduzido (MELCONIAN, 2012).

6.7.1 Rolamentos Roda Frontal

Para o cálculo dos rolamentos da roda frontal foi desprezado qualquer força axial que possa ocorrer eventualmente e utilizou-se $P = F_r$ onde P é a carga dinâmica equivalente e F_r é a força radial. Assim, utilizando-se da expressão $C = 7,83P$, onde C é a capacidade de carga dinâmica, encontra-se um valor de C igual à 0,15kN.

Com este valor, e com as limitações geométricas que o rolamento deve apresen-

tar (diâmetro interno de 2,5mm devido ao eixo e diâmetro externo de 8mm devido às dimensões da roda frontal), foi selecionado o rolamento SKF W60/2.5R que, além das dimensões já mencionadas possui espessura (B) de 2,8mm.

Com o rolamento selecionado, determinou-se a nova vida em milhões de rotações como mostrado na Equação 6.1, com $C = 312$ e $P = 18,85$, encontrando um valor de 4534,5Mr.

$$L_{MR} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (6.1)$$

$$(6.2)$$

No entanto, conhecer a vida do rolamento em horas fornece informações mais palpáveis de duração e necessidade de manutenção/substituição. Portanto, a vida em horas foi calculada na Equação 6.3.

$$L_h = \frac{L_{MR} \times 10^6}{60 \times n} \quad (6.3)$$

No entanto, verifica-se a necessidade de conhecer a rotação, n , que o rolamento sofrerá. Assim, estimou-se uma velocidade média da cadeira de rodas de 2m/s e converteu-se, com o diâmetro da roda frontal de 28cm, para encontrar 133,7rpm. Substituindo esses valores na Equação 6.3, tem-se um valor de 565'258 horas. Assumindo que a cadeira de rodas estará em movimento 12h por dia, todos os dias do ano, a vida do rolamento é de 129 anos, o que é bem superior à vida da cadeira de rodas estabelecida em pré-projeto de 8 anos.

6.7.2 Rolamentos Roda Traseira

Assim como nos rolamentos da roda traseira foi desprezado qualquer força axial que a estrutura possa sofrer eventualmente e utilizou-se $P = F_r$. Para tal, foi necessário o cálculo da força radial que equivale a força da roda traseira dividido por dois, uma vez que dois rolamentos estão atuando na sustentação da roda. Utilizando a Equação 4.2 e as dimensões discutidas na seção 6.6 encontra-se um valor de 237,29N para F_{roda} . Dessa forma, $F_r = 118,65N$ para o cálculo do rolamento.

Em seguida, a partir da expressão $C = 7,83P$ obtém-se um valor de C igual à 0,93kN que, juntamente com o diâmetro externo de 30mm limitado pela roda traseira escolhida, é utilizado para a seleção do rolamento em catálogo da SKF (SKF, 2018). Dessa forma, foi escolhido o rolamento SKF 61903 R-2Z que possui diâmetro interno de 17mm, espessura de 7mm e capacidade de carga dinâmica de 3,97kN.

Com o rolamento selecionado, determinou-se a nova vida em milhões de rotações como anteriormente por meio da Equação 6.1 e encontrando um valor de 37'465,8 Mr.

Em seguida, foi calculada a vida em horas do rolamento por meio da Equação 6.3. Para tal, se determinou n da mesma forma que anteriormente, velocidade média da cadeira de rodas de 2m/s e diâmetro da roda de 60cm obtendo $n = 63,66$ rpm. Com esses valores encontra-se um valor de 9'808'828 horas. Assumindo que a cadeira de rodas estará em movimento 12h por dia, todos os dias do ano, a vida do rolamento é de 2239 anos, o que é muito superior à vida necessária.

6.7.3 Rolamentos de Direção da Roda Frontal

As rodas frontais da cadeira de rodas também devem ser equipadas com um rolamento posicionado na direção horizontal para permitir que elas girem a medida que o usuário realizar curvas. Nesse caso, os rolamentos estão expostos principalmente à forças axiais de valor equivalente à força da roda dianteira F_{caster} . Dessa forma, a escolha pelo rolamento fixo de esfera se dá por ter boa resistência à forças axiais e ser de baixo custo. Dessa forma, tem-se que a carga dinâmica equivalente P é dada pela Equação 6.4.

$$P = X_o F_r + Y_o F_a \quad (6.4)$$

Apesar do valor de F_r ser desprezado, é necessário saber o valor de Y_o , que é uma característica do rolamento. Assim, estima-se um rolamento inicial para posterior verificação e, se necessário, mudança. Logo, o rolamento SKF W6000-2Z foi selecionado, com $C_o = 1,96kN$. Com isso realiza-se a divisão da força axial pela capacidade de carga, obtendo um valor de 0,02. Por meio da Tabela 18, obtém-se que, com esse valor encontrado o valor de e é de 0,19. Como $\frac{F_a}{F_r}$ é superior a esse valor, tem-se que $Y = 2,3$.

Tabela 18 – Fatores de Cálculo X e Y para Rolamentos Rígidos de Esferas (SKF, 2015)

$f_0 F_a/C_0$	Rolamentos de uma e de duas carreiras Folga normal			Rolamentos de uma carreira Folga C3			Folga C4		
	e	X	Y	e	X	Y	e	X	Y
0,172	0,19	0,56	2,3	0,29	0,46	1,88	0,38	0,44	1,47
0,345	0,22	0,56	1,99	0,32	0,46	1,71	0,4	0,44	1,4
0,689	0,26	0,56	1,71	0,36	0,46	1,52	0,43	0,44	1,3
1,03	0,28	0,56	1,55	0,38	0,46	1,41	0,46	0,44	1,23
1,38	0,3	0,56	1,45	0,4	0,46	1,34	0,47	0,44	1,19
2,07	0,34	0,56	1,31	0,44	0,46	1,23	0,5	0,44	1,12
3,45	0,38	0,56	1,15	0,49	0,46	1,1	0,55	0,44	1,02
5,17	0,42	0,56	1,04	0,54	0,46	1,01	0,56	0,44	1
6,89	0,44	0,56	1	0,54	0,46	1	0,56	0,44	1

Portanto, utilizando a Equação 6.4, sabe-se que $P = 86,71N$. Com isso, calcula-se a vida em milhões de rotação por meio da Equação 6.1, encontrando o valor de 95'976,29Mr. Em seguida, utilizando a Equação 6.3, encontra-se um valor de 1'999'506 de horas arbitrando $n = 800$ rpm, o que equivale a 456 anos de vida do rolamento. Esse valor é extremamente superior à vida necessária para o rolamento o que significa que o rolamento selecionado é mais que suficiente para suportar as cargas sobre ele. No entanto, por ser o

rolamento mais simples considerando as restrições geométricas, não é possível obter um rolamento que não esteja tão superdimensionado.

6.8 Apoios de Pé

Os apoios para pé precisam permitir a regulagem da altura. Portanto, eles foram desenvolvidos com o mesmo sistema de tubos de PVC que o resto dos componentes da cadeira de rodas. Uma abraçadeira acopla os tubos verticais que são ligados ao apoio de pé à estrutura principal da cadeira de rodas, como visto na Figura 79. Esse método é muito utilizado em cadeira de rodas comerciais para conexão dos apoios de pé ou das travas como é visto na Figura 80. Assim, o comprimento do tubo pode ser ajustado, assim como seu posicionamento em relação a essa peça de acoplamento, permitindo um ajuste fino da posição final do apoio de pé. O apoio de pé em si, foi gerado considerando modelos similares no mercado, como o visto na Figura 81 e que desse o apoio necessário ao pé (dimensões apropriadas) sem elevar demasiadamente o custo do produto. Portanto foi desenvolvida uma peça que pode ser rosqueada ao tubo de PVC. Ela possui espessura maior próximo ao tubo para aumentar a sua estabilidade uma vez que, assim, a área de contato com o tubo é maior.



Figura 79 – Detalhes de Encaixe do Apoio de Pé da Cadeira de Rodas Projetada



Figura 80 – Detalhe do Encaixe do Apoio de Pé por Meio de Abraçadeiras em Cadeira de Rodas Comercial



Figura 81 – Apoio de Pé de uma Cadeira de Rodas Comercial (OESTE MED, 2018)

Além disso, o apoio de pé foi criado com o intuito de ser facilmente removível: ou desenroscando o apoio de pé dos tubos ou tirando o tubo da peça de acoplamento. Essa remoção é necessária para facilitar a entrada e saída do usuário da cadeira de rodas.

6.9 Apoios de Braço

O apoio de braço foi montado em SolidWorks procurando encontrar tamanhos "comuns". No entanto, sabe-se que as dimensões dos apoios de braço (altura e comprimento) são inteiramente dependentes da opinião de cada usuário. A altura, portanto, é dependente do tamanho de tubo posicionado na vertical, que pode ser cortado em qualquer tamanho. O comprimento do apoio também pode ser modificada com a mudança do

posicionamento dos tubos.

No caso da montagem, o apoio de braço foi colocado com comprimento para chegar no mesmo local que a barra frontal de suporte do assento. Dessa forma, é possível economizar uma peça na montagem. Caso o usuário prefira um apoio de braço mais curto é possível a montagem com dois tês, um para suportar a barra frontal e outro para o apoio de braço.

Para maior conforto do usuário um tecido almofadado pode ser utilizado para cobrir os tubos de PVC, como visto na Figura 82, para que os parafusos/porcas não causem incômodo e a superfície de contato do apoio de braço seja mais macia.



Figura 82 – Detalhe de Almofada para Apoio de Braço (OPEN WHEELCHAIR FOUNDATION, 2017)

6.10 Trava

O sistema de trava, necessário para manter a cadeira imóvel em situações de entrada e saída do usuário da cadeira de rodas e em terrenos inclinados, foi selecionado se optando por uma trava com sistema puxa/empurra para simplificar as etapas de projeto e diminuir o custo. Assim, foi escolhido o Freio de Alumínio Ortomix, apresentado na Figura 83 por possuir uma abraçadeira que pode ser presa à um dos tubos de PVC da estrutura da cadeira de rodas.



Figura 83 – Sistema de Trava Ortomix (ORTOMIX, 2018)

6.11 Assento

O assento é a parte mais difícil de permitir o ajuste de dimensão uma vez que ele deve ser composto por uma espuma firme mas também não pode permitir que as barras da estrutura sejam sentidas no assento. Portanto a solução adotada conta com a inclusão de blocos de espumas de poliuretano para ir aumentando a largura e profundidade do assento a medida que necessário. Além disso, o tecido externo que segura esses blocos de espuma pode ser ajustado com botões de pressão para manter os blocos de espuma bem próximos para evitar seu deslocamento.

6.12 Encosto

O encosto não precisa ter uma base tão firme quanto o assento por não ser um elemento de suporte tão importante. Portanto, o sistema adotado é similar ao apresentado na Figura 21 com um tecido, com um pouco de espuma para proporcionar o conforto do usuário, passando ao redor dos tubos e prendendo atrás com botões de pressão.

6.13 Material

Para a próxima etapa de simulações foi necessário estabelecer os materiais de cada peça. Dessa forma, a Tabela 19 resume o material de cada peça para facilitar a visualização.

Tabela 19 – Lista de Materiais por Componente da Cadeira de Rodas

Peça	Material
Tubo Externo	PVC
Tubo Interno	ABS
Joelho	PVC
Joelho Duplo	ABS
Tê	PVC
Tê sem Rosca	ABS
Tê Duplo	ABS
Tê Curto	ABS
Prendedor Apoio de Pé	ABS
Apoio Pé	ABS
Garfo	Aço SAE 1020
Eixo Roda Frontal	Aço SAE 1020
Mancal	ABS
Suporte Roda Frontal	Aço SAE 1020
Encaixe da Roda Traseira	ABS
Roda Traseira	Nylon
Roda Frontal	Nylon

Além disso, para as simulações é necessário estabelecer as propriedades mecânicas dos materiais, que são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Propriedades Mecânicas dos Materiais Utilizados na Montagem da Cadeira de Rodas

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Referência
PVC	2,758	0,4	48,3	63	(TIGRE, 2018)
ABS	2,2	0,35	42,5	73,77	(ENGINEERS, 2018)
Aço 1020	186	0,29	350	420	(MATWEB, 2018a)
Nylon	1,8	0,39	63	68.5	(MATWEB, 2018d)
Alumínio	69	0,334	95	110	(MATWEB, 2018b)

7 Análises Estruturais Estáticas

Uma vez realizado o desenho preliminar da estrutura, deve-se verificar a sua resistência mecânica para validação da geometria. Assim, as análises estáticas foram realizadas em duas etapas. Inicialmente, realizou-se a verificação da resistência à força peso do usuário. Em seguida, foram utilizados os métodos apresentados na ABNT NBR ISO 7176-8:2009 (ABNT, 2009b) que propõe formas de ensaios para verificação estrutural das cadeiras de rodas já presentes no mercado no quesito de forças estáticas. Nesses ensaios, deve-se garantir a não movimentação da cadeira de rodas pra frente e pra trás e evitar que a cadeira se incline. Utilizou-se, então, as forças apresentadas na NBR para verificação computacional da estrutura por meio do programa ANSYS®.

7.1 Ansys

7.1.1 Princípios Básicos

Antes de resolver o problema por meio da Análise de Elementos Finitos, é necessário compreender o processo realizado pelo software para obter os resultados desejados. Dessa forma, utiliza-se da Figura 84 para compreender o que acontece no programa antes dos resultados serem obtidos.



Figura 84 – Modelo de Funcionamento do Método de Elementos Finitos (BHASKARAN, 2018)

Dessa forma, percebe-se que inicialmente é necessário o *input* do usuário do pro-

grama de elementos finitos, neste caso o ANSYS®, que geralmente são a geometria, a malha e as condições de contorno baseados no problema físico apresentado. Dentro dessa "caixa preta" dos programas de simulação aceita esses *inputs* para determinar qual o problema matemático que deve ser resolvido e se utiliza de ferramentas de cálculo numérico para obter variáveis selecionadas em pontos específicos. No caso da mecânica dos sólidos a variável encontrada é o deslocamento dos pontos, com os quais pode-se encontrar as outras variáveis desejadas como a tensão. Dessa forma, qualquer valor entre os pontos pode ser encontrado por interpolação e gerar os resultados com as ferramentas de pós-processamento do programa. Com isso, deve-se analisar se os resultados encontrados são coerentes por meio de cálculos a mão (ou estimativas do que o resultado deve ser) ou comparando com dados experimentais.

7.1.2 Modelo Matemático

O modelo matemático resolvido na mecânica dos sólidos, em especial na parte estática, é o de elasticidade 3D sobre cada peça da geometria. Dessa forma, aplica-se um problema de contorno em cada peça e deve-se considerar o contato entre as partes.

Assim, o programa de elementos finitos resolve as equações governantes da Elasticidade 3D. Inicialmente, considera-se o equilíbrio de um elemento infinitesimal obtendo-se as Equações 7.1 para as três direções baseado no elemento infinitesimal apresentado na Figura 85. Destaca-se que f_x , f_y e f_z são igualados a zero desprezando forças externas influenciando no modelo.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z &= 0 \end{aligned} \quad (7.1)$$

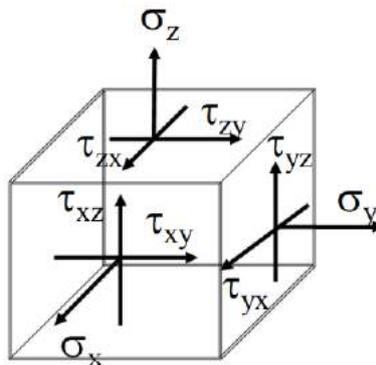


Figura 85 – Elemento Infinitesimal (BHASKARAN, 2018)

No entanto, essas três equações fornecem 6 incógnitas (três tensões normais e três tensões cisalhantes) necessitando serem complementadas por outras equações. Logo, utiliza-se, também, as propriedades dos materiais dadas pela Lei de Hooke em 3D dada na Equação 7.2 que relaciona as tensões com as deformações utilizando valores de módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν) constantes.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

No entanto, ainda existem incógnitas demais para o número de equações: 12 incógnitas ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}$) e 9 equações. Dessa forma, inclui-se ainda, as relações de tensão-deflexão apresentadas abaixo.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \quad (7.3)$$

Dessa forma, encontra-se 15 incógnitas e 15 equações sendo possível resolver o sistema.

7.1.3 Malha

A malha foi realizada com elementos tetraédricos com maior refinamento na estrutura principal do que nas rodas traseiras e pode ser vista na Figura 86. Como estas foram selecionadas de um modelo comercial, parte-se do princípio que estas sustentam as cargas aplicadas sobre elas e, portanto, não são o foco das simulações. Logo, a estrutura principal possui elementos com tamanho de 10mm e as rodas traseiras possuem elementos de 20mm. Assim, obteve-se um total de 221'810 elementos e 450'592 nós com interpolação linear entre eles.



Figura 86 – Malha Utilizada

7.1.4 Condições de Contorno

Para as simulações foram usadas condições de contorno recomendadas na Norma ABNT NBR ISO 7176:8 (ABNT, 2009b) que sugere a restrição de movimento das rodas traseiras, tanto na direção x quanto na direção y (que podem ser vistas na Figura 86) que foi colocada no Ansys®. Além disso, colocou-se um apoio simples nas rodas frontais. O contato entre as peças foi realizado como se as peças estivessem coladas.

7.2 Sustentação do Peso do Usuário

7.2.1 Análise da Versão 4

A primeira etapa foi verificar se a estrutura sugerida com o PVC Industrial é suficiente para aguentar o peso do usuário sobre ela. Dessa forma, considerou-se o caso mais crítico possível e foi colocada uma força concentrada de 550N (equivalente aos 55kg de peso máximo estabelecido) em cada uma das barras transversais sobre o assento de cada vez.

7.2.1.1 Força Peso na Barra Central

Inicialmente foi colocada a força na barra do meio, como apresentado na Figura 87.

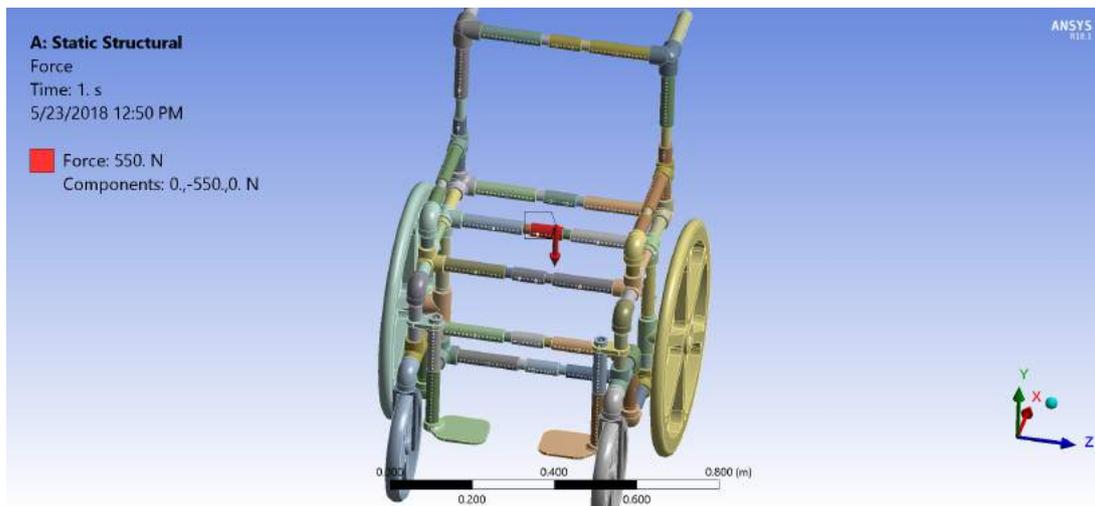


Figura 87 – Força de 550N Aplicada na Barra Central da Estrutura

Assim, gerou-se uma deflexão apresentada na Figura 88, onde percebe-se uma consistência onde a maior deflexão é no ponto de aplicação da força e não ultrapassa o valor de 3mm, ou seja, é um valor aceitável considerando a concentração da força neste ponto. Além disso, percebe-se que as barras de suporte onde são fixadas as rodas traseiras sofrem uma flambagem, o que também é esperado.

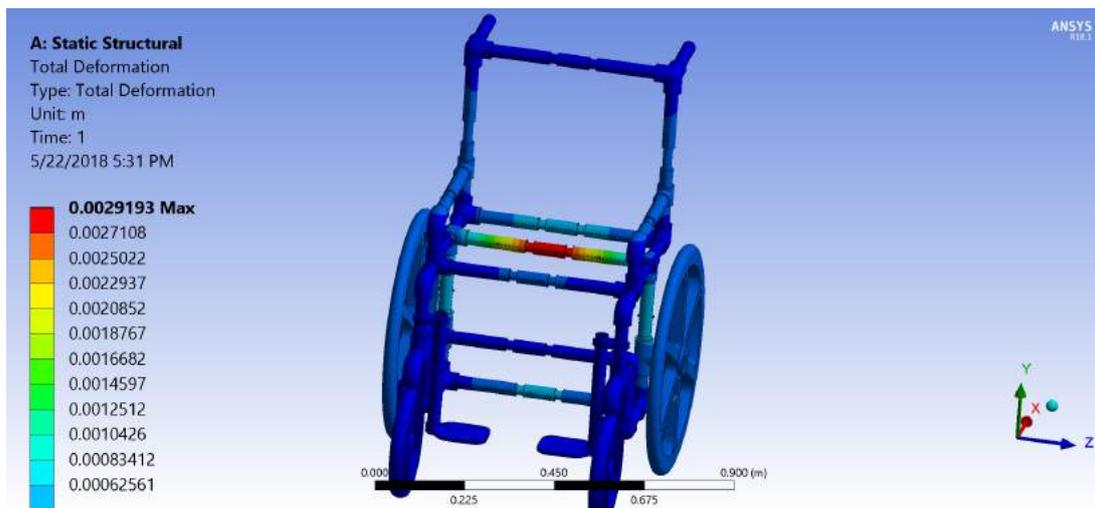


Figura 88 – Deflexão Sofrida pela Barra Central da Estrutura

As tensões normais nos eixos X (Figura 89), Y (Figura 90) e Z (Figura 91) e a tensão de cisalhamento (Figura 92) mostram tensões relativamente baixas por quase toda a estrutura (na ordem de megapascais absolutos em tração e compressão). No entanto, os parafusos e porcas são os locais de maior tensão (especialmente as porcas), chegando até valores da ordem de 100 MPa.

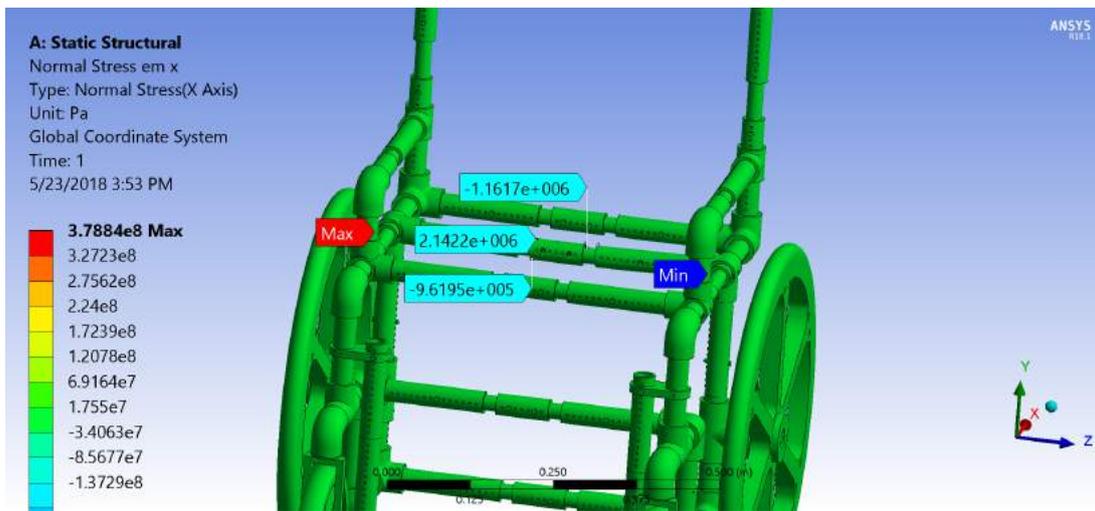


Figura 89 – Tensão Normal no Eixo X Sofrida pela Barra Central da Estrutura

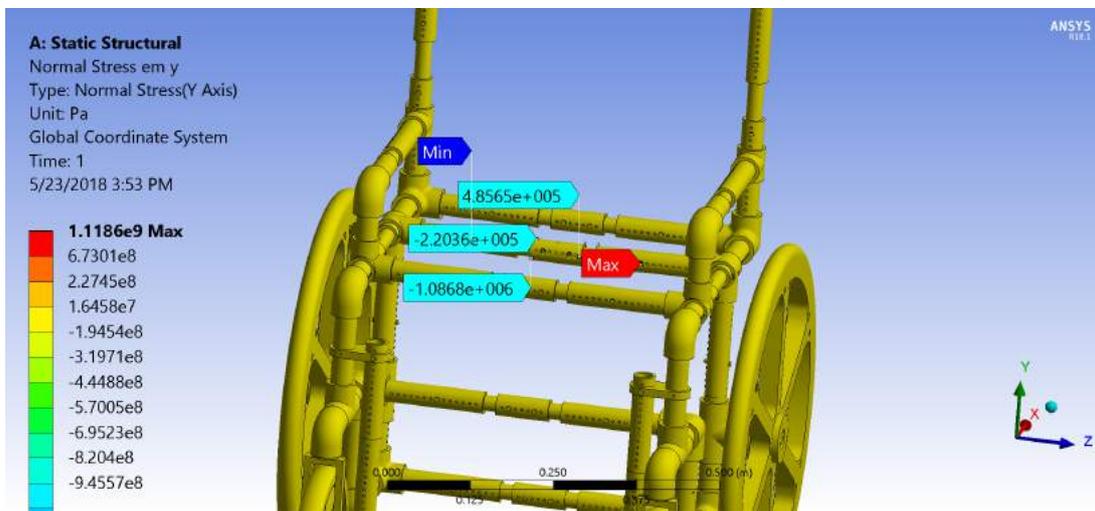


Figura 90 – Tensão Normal no Eixo Y Sofrida pela Barra Central da Estrutura

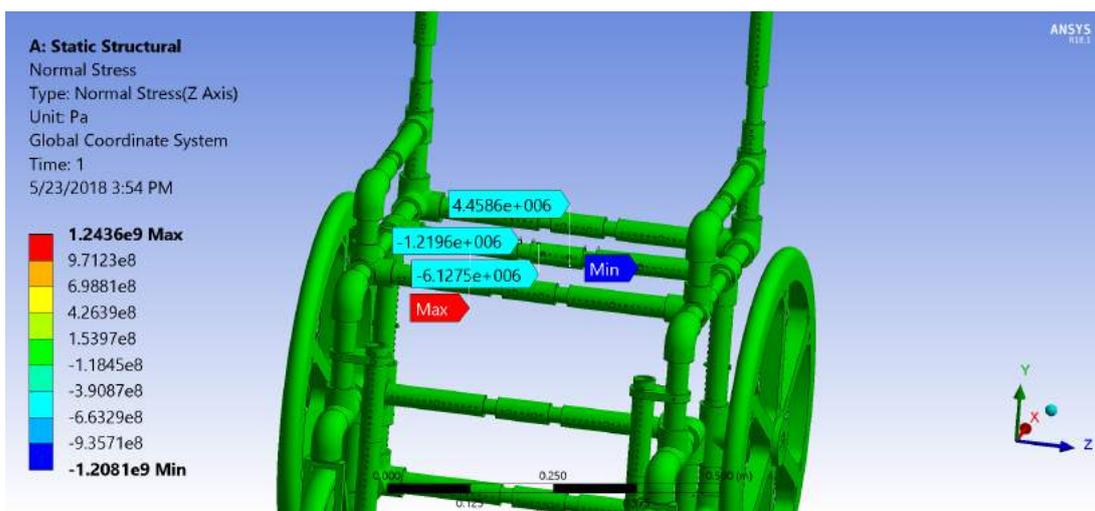


Figura 91 – Tensão Normal no Eixo Z Sofrida pela Barra Central da Estrutura

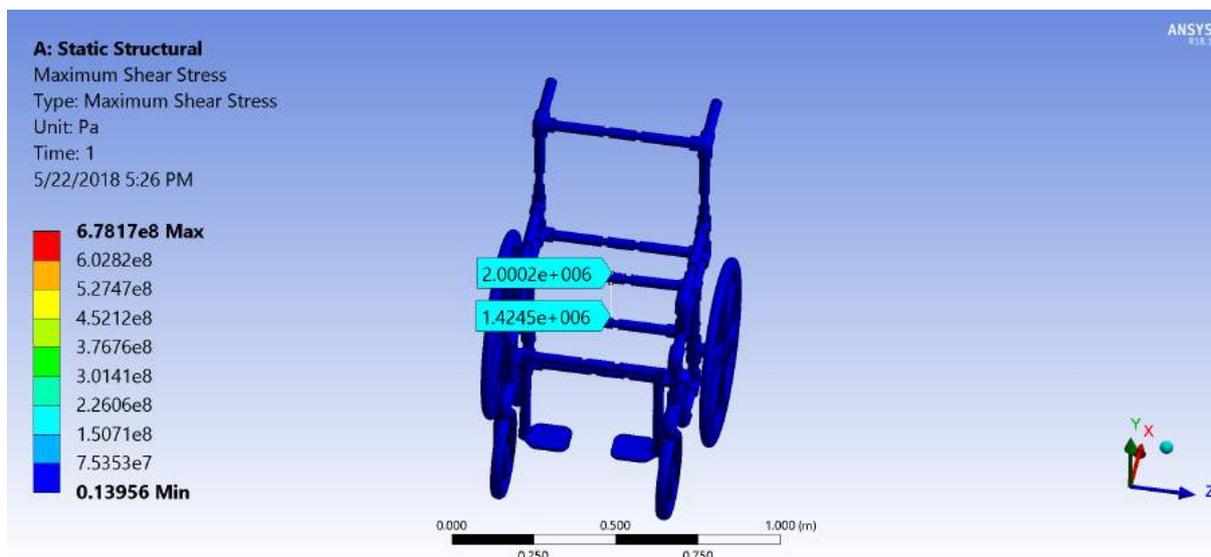


Figura 92 – Tensão de Cisalhamento Sofrida pela Barra Central da Estrutura

Dessa forma, utilizando o critério de falha de Von Mises, tem-se que o fator de segurança sobre a estrutura é superior a 3 em quase toda as superfícies, como visto na Figura 93. No entanto, prevê-se falha nas porcas e os parafusos possuem superfícies de contato com FS menor que o valor de 3,25 estabelecido no pré-projeto.

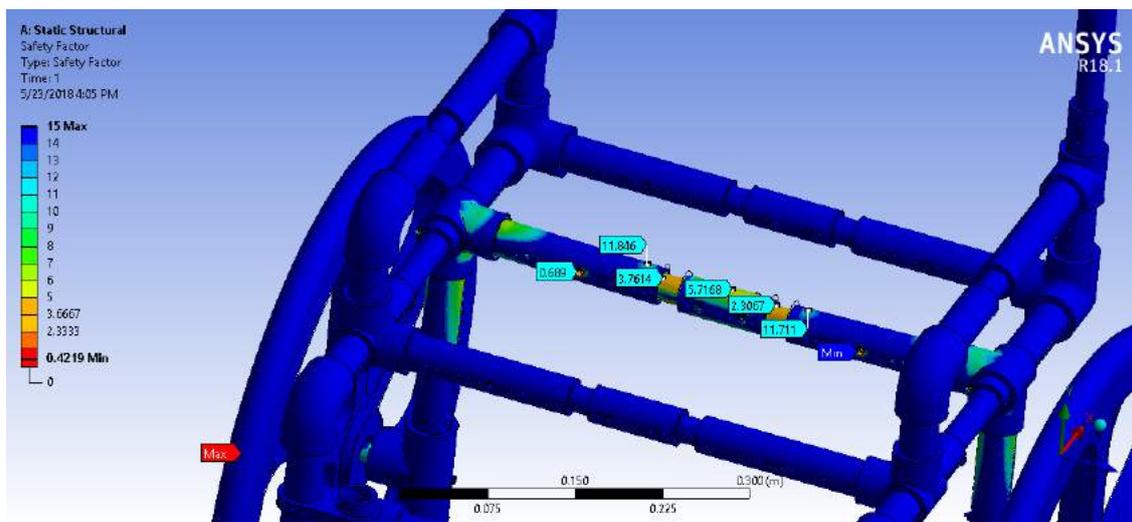


Figura 93 – Fator de Segurança com Força Aplicada na Barra Central da Estrutura

7.2.1.2 Força Peso na Barra Frontal

Em seguida, foi colocada a força concentrada de 550N na barra frontal como destacado na Figura 94. Encontrou-se uma deflexão máxima de 6,6mm como visto na Figura 95.

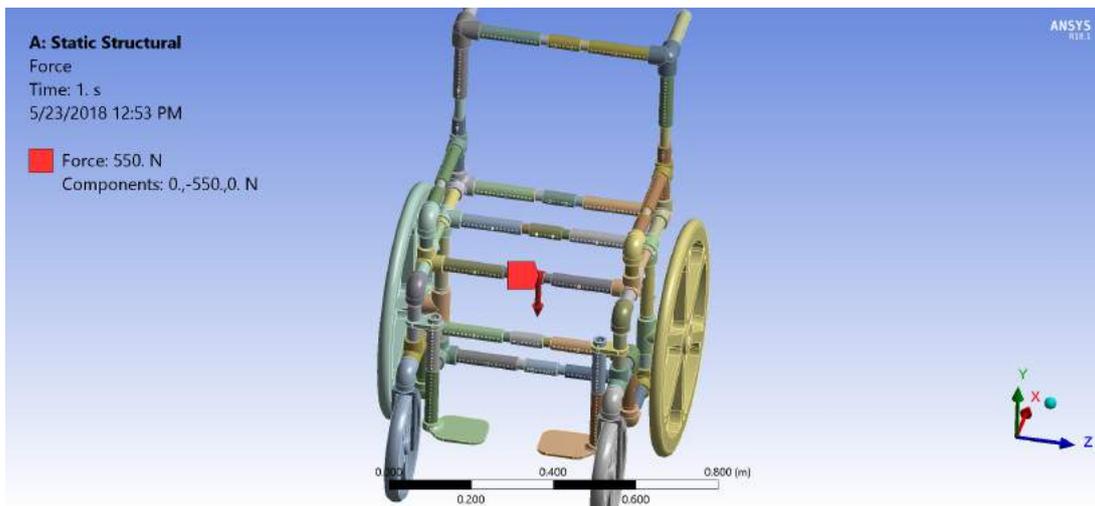


Figura 94 – Força Aplicada na Barra Frontal da Estrutura

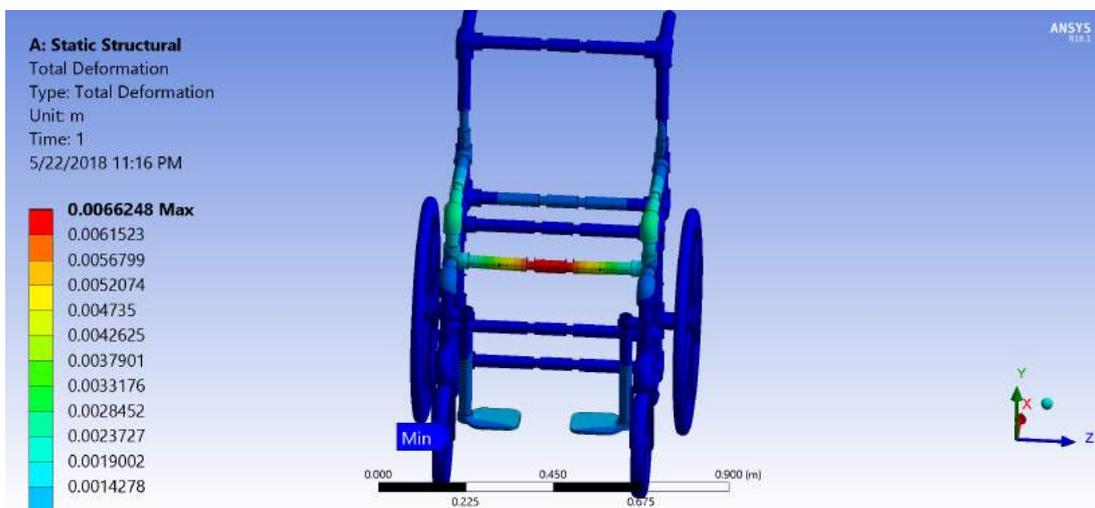


Figura 95 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura

A deflexão se comporta de forma esperada por ter seu ponto máximo no local de aplicação da força e, em seguida, no apoios de braço já que a barra frontal e o apoio de braço são conectados pela mesma peça. Em seguida, percebe-se pela Figura 96 que o fator de segurança também é relativamente aceitável na estrutura apresentando valor mínimo nos tubos de aproximadamente 2.

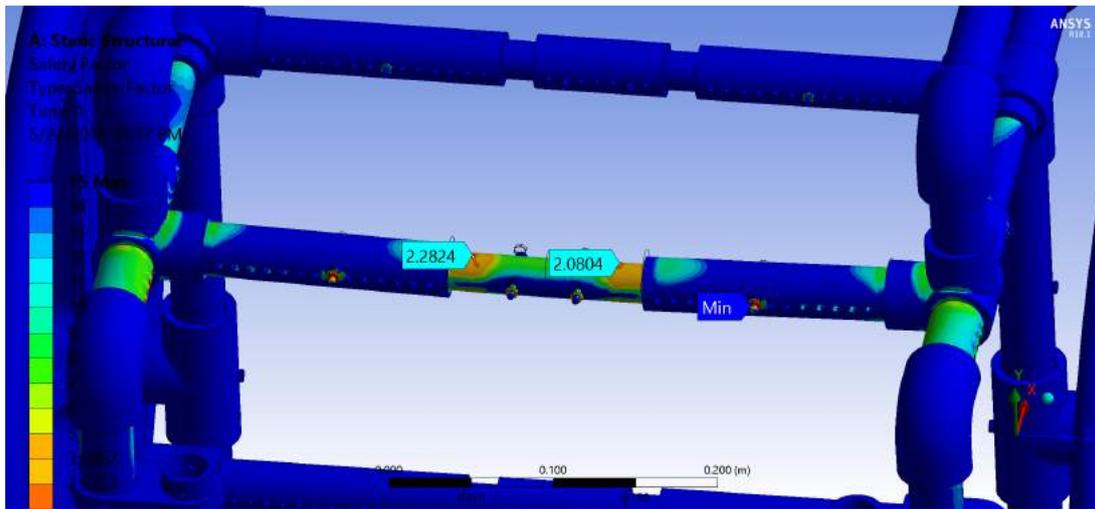


Figura 96 – Fator de Segurança com Força Aplicada na Barra Frontal da Estrutura

No entanto, como foi estabelecido um fator de segurança de projeto de 3,25 é necessário avaliar mais cuidadosamente essa etapa. Dessa forma, sabendo que a força nunca será aplicada de forma concentrada, aplica-se a força distribuída pela barra frontal, como visto na Figura 97.

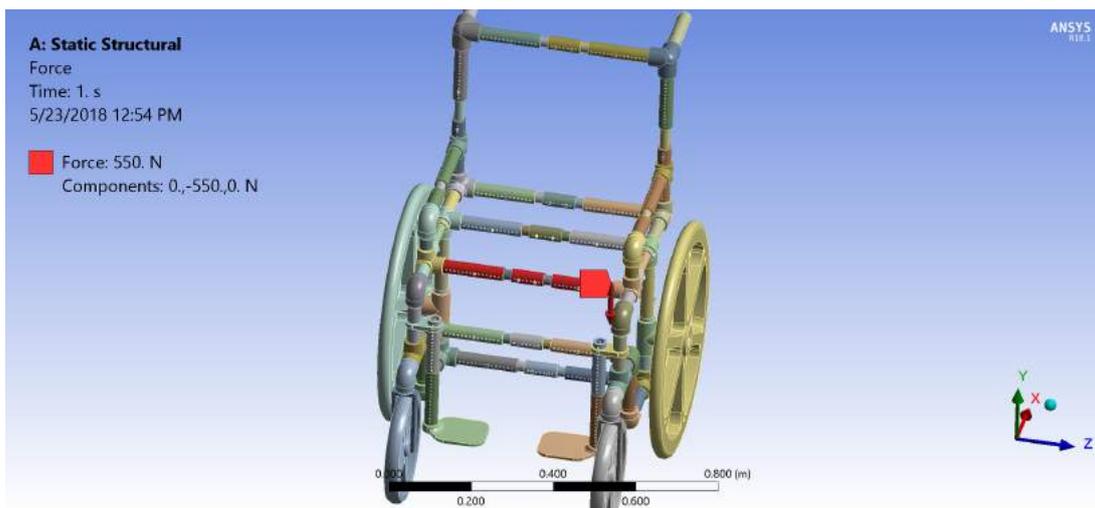


Figura 97 – Força Distribuída Aplicada na Barra Frontal da Estrutura

Assim, percebe-se uma deflexão máxima menor, já que a força está sendo aplicada sobre uma área maior, como é visto na Figura 98. Encontrou-se, também, um fator de segurança mais elevado, próximo de 4 como visto na Figura 99.

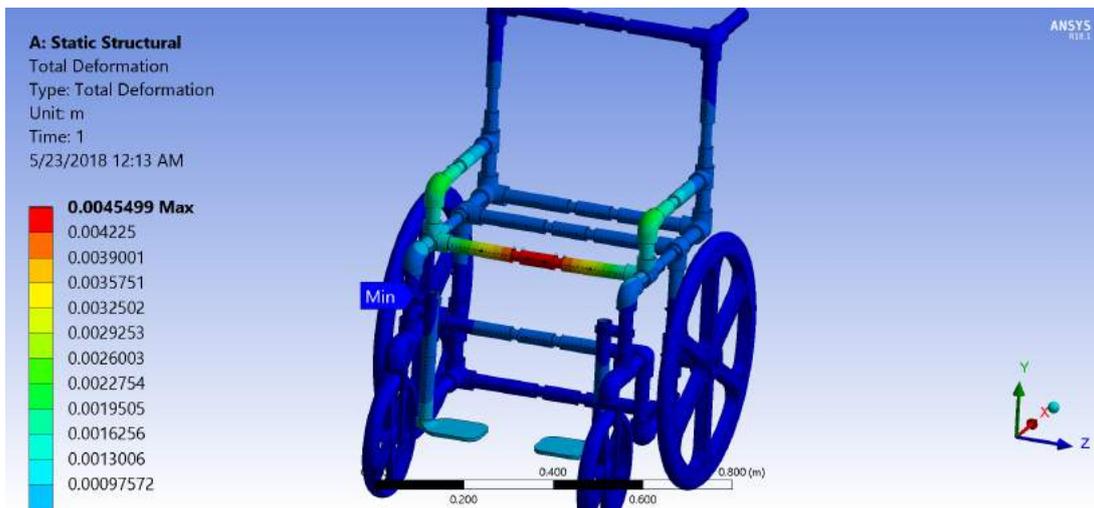


Figura 98 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura com Força Distribuída

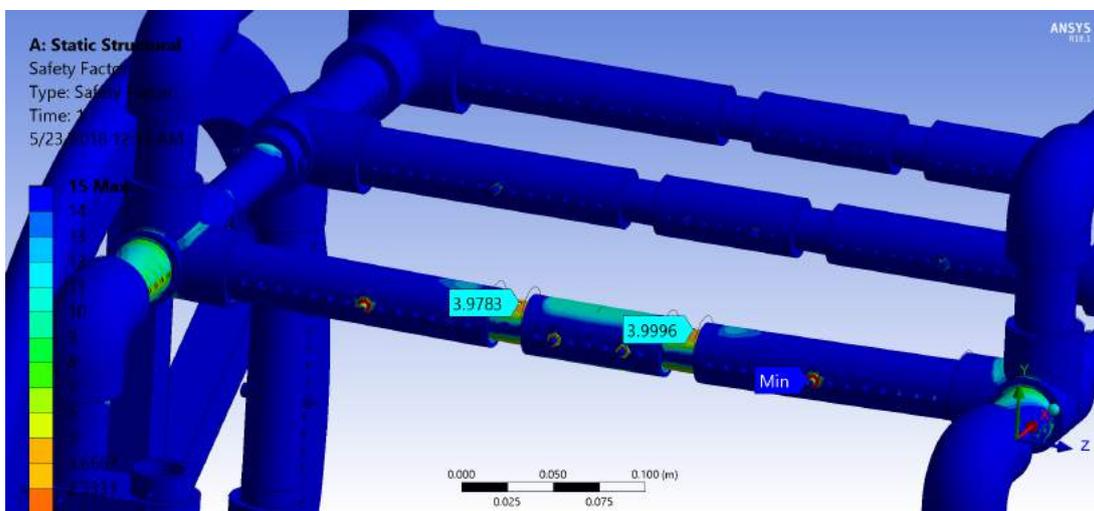


Figura 99 – Fator de Segurança com Força Distribuída Aplicada na Barra Frontal da Estrutura

7.2.1.3 Força Peso na Barra Traseira

Em seguida, a força de 550N foi aplicada na barra traseira da cadeira. Apesar que, na realidade, uma força não será aplicada diretamente sobre essa barra, ela é essencial para a estabilidade e resistência do conjunto e, por isso, será igualmente testada. A força concentrada de 550N é aplicada como demonstrado na Figura 100.

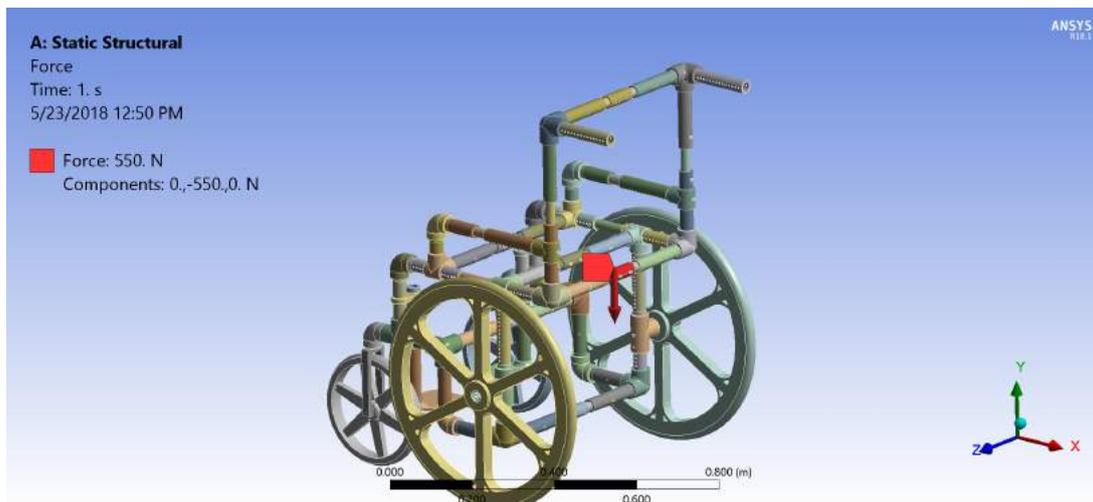


Figura 100 – Força de 550N Aplicada na Barra Traseira da Estrutura

Percebe-se, assim, pela Figura 101 uma deflexão máxima de aproximadamente 7mm no ponto de aplicação da força. Além disso, a parte de cima da estrutura, ou seja, os apoios para o encosto, são os itens com maior deflexão (exceto a própria barra) já que possuem conexão direta com a barra traseira.

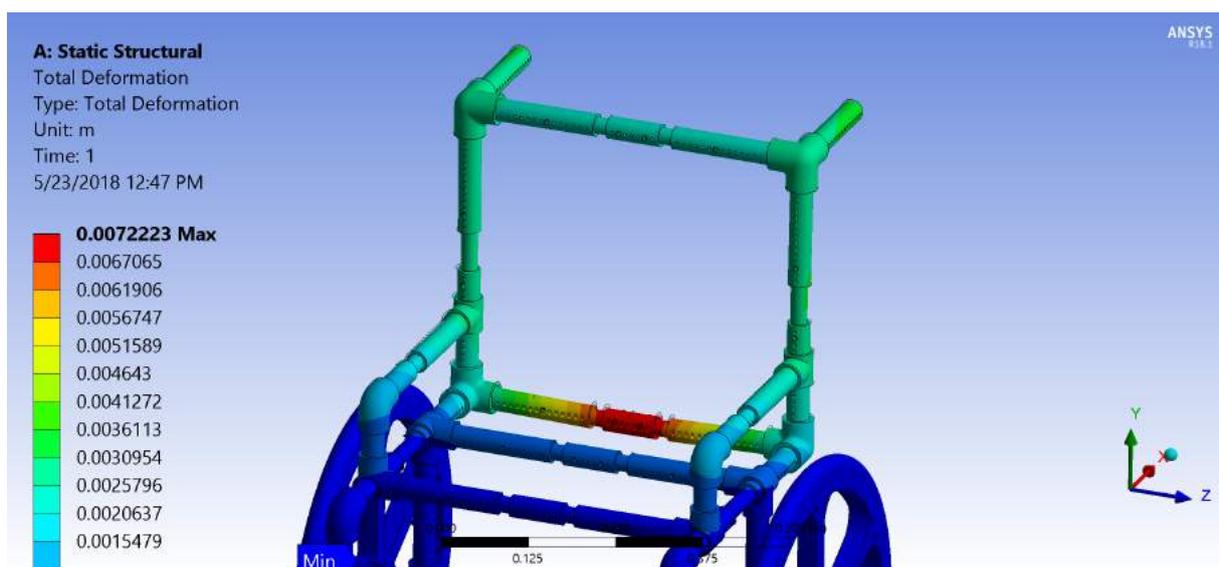


Figura 101 – Deflexão Sofrida pela Barra Traseira da Estrutura

Em seguida, analisa-se o fator de segurança apresentado na Figura 102. Verifica-se que, assim como as outras barras, o valor mínimo de FS é no conjunto parafuso/porca e, em seguida nas tubos internos das barras. Os valores são suficientes para garantir a segurança do sistema.

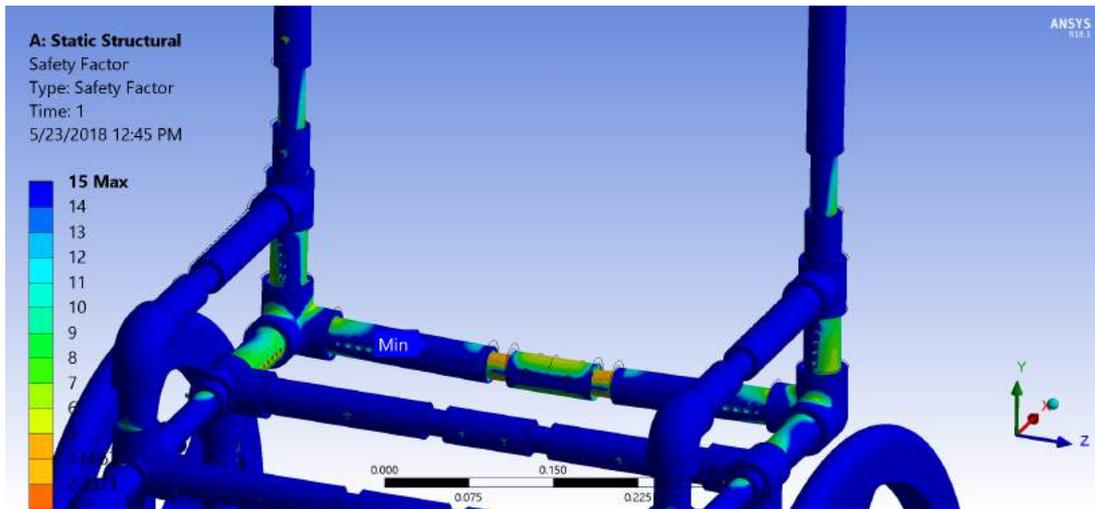


Figura 102 – Fator de Segurança com Força Aplicada na Barra Traseira da Estrutura

7.2.1.4 Força Peso Distribuída

Por fim, como sabe-se que a força quase nunca será aplicada sobre uma única barra, fez-se a distribuição de massa do usuário de acordo com a Tabela 4 obtendo valores de: 37,29kg para o conjunto Cabeça, Ombro e Tronco que foi aplicado distribuído sobre a barra central; 5,5kg para cada coxa que foi aplicada sobre os dois tubo externos da barra frontal (5,5 kg em cada lateral) e 3,36kg para cada conjunto pé e perna que foi aplicada sobre o respectivo apoio de pé. A distribuição de forças, vista na Figura 103, busca aproximar a estrutura ao esforço sofrido em casos normais de utilização. A única situação regular em que a força pode ser aplicada sobre uma única barra é no caso em que o usuário está sendo transferido para a cadeira de rodas e seu peso é colocado todo sobre a barra frontal.

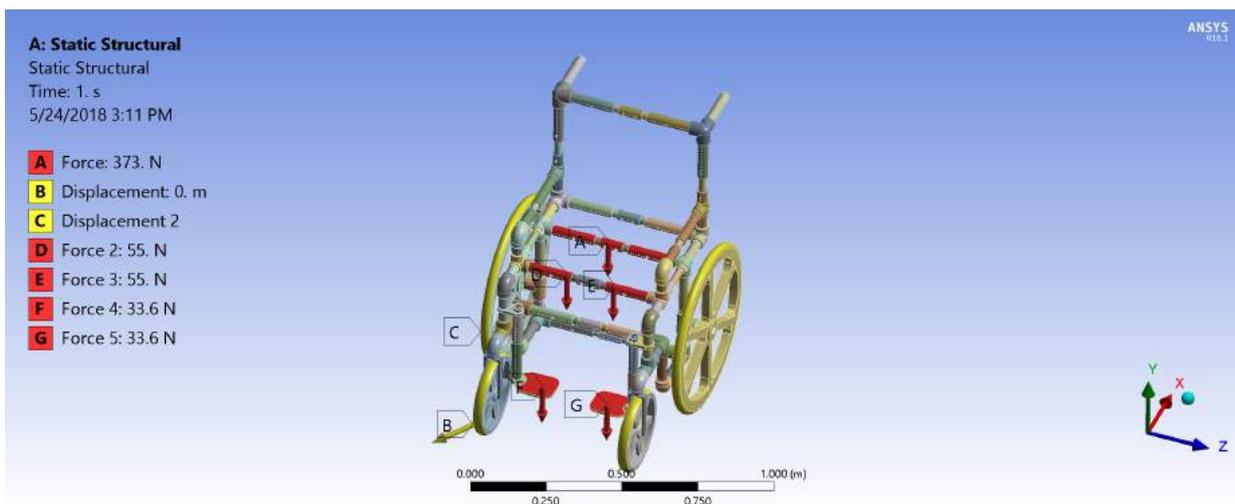


Figura 103 – Força Peso Distribuída pela Estrutura

Com a força distribuída, encontra-se as deflexões apresentadas na Figura 104 e o fator de segurança na Figura 105. Percebe-se que a deflexão é bem menor e os fatores

de segurança também são mais elevados, mostrando maior confiabilidade da cadeira de rodas como um todo.

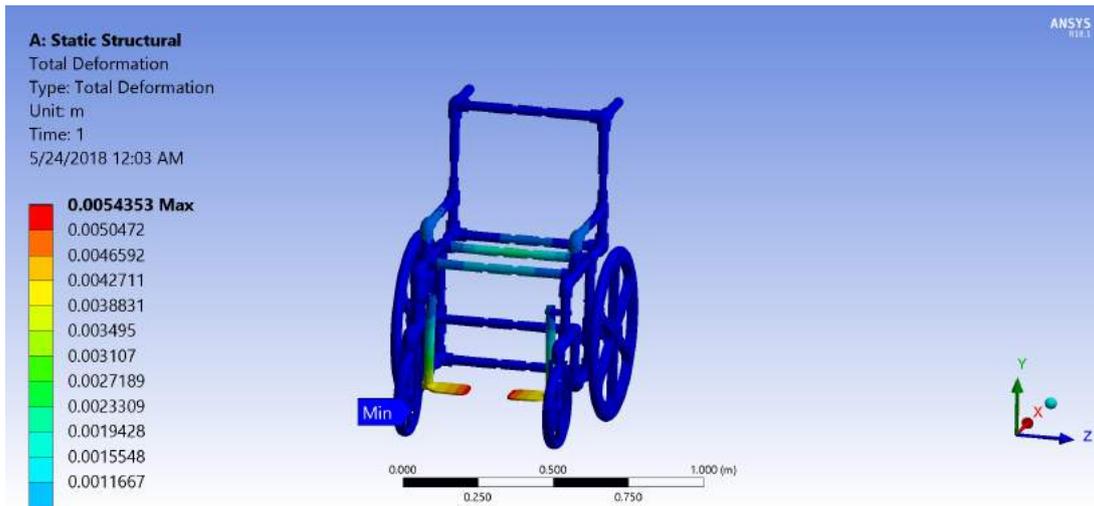


Figura 104 – Deflexão Sofrida pela Estrutura com a Força Peso Distribuída

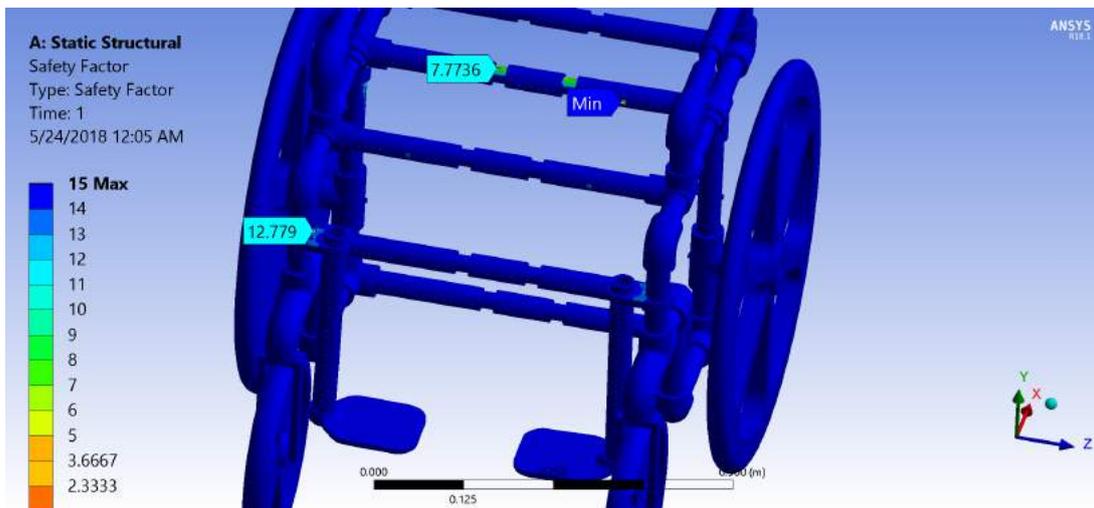


Figura 105 – Fator de Segurança na Estrutura com a Força Peso Distribuída

7.2.2 Análise da Versão 5

No entanto, percebeu-se que havia a disponibilidade do PVC residencial roscável que é mais acessível e portanto, teria um impacto direto no custo total da cadeira de rodas. Como faz parte dos requisitos de projeto o menor custo possível, mudou-se a geometria para o PVC Residencial, como visto na Seção 6.3.5 e recomeçou-se as simulações. As dimensões dos tubos de PVC utilizados são apresentadas na Tabela 21 e as propriedades deste PVC são mostradas na Tabela 22. Além disso, optou-se pela simulação do sistema sem os parafusos para, depois, calcular o diâmetro necessário.

Tabela 21 – Dimensões do Tubo de PVC Residencial Roscado Utilizado

Diâmetros PVC Residencial Roscável	Valor
Diâmetro Nominal	1"
Diâmetro Externo	33,2 mm
Diâmetro Interno	26,2 mm

Tabela 22 – Propriedades Mecânicas do PVC Residencial (MATWEB, 2018e)

	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)
PVC Residencial	2,7	0,4	57,4	59,5

7.2.2.1 Força Peso na Barra Central

Dessa forma, foi simulado novamente todas as etapas acima com o PVC Residencial Roscável inicialmente com os materiais estabelecidos na Tabela 19. Como anteriormente, a primeira etapa foi a simulação da estrutura com a força peso concentrada na barra central. Dessa forma, encontrou-se a deflexão apresentada na Figura 106, a tensão equivalente de Von Mises na Figura 107 e o fator de segurança da Figura 108.

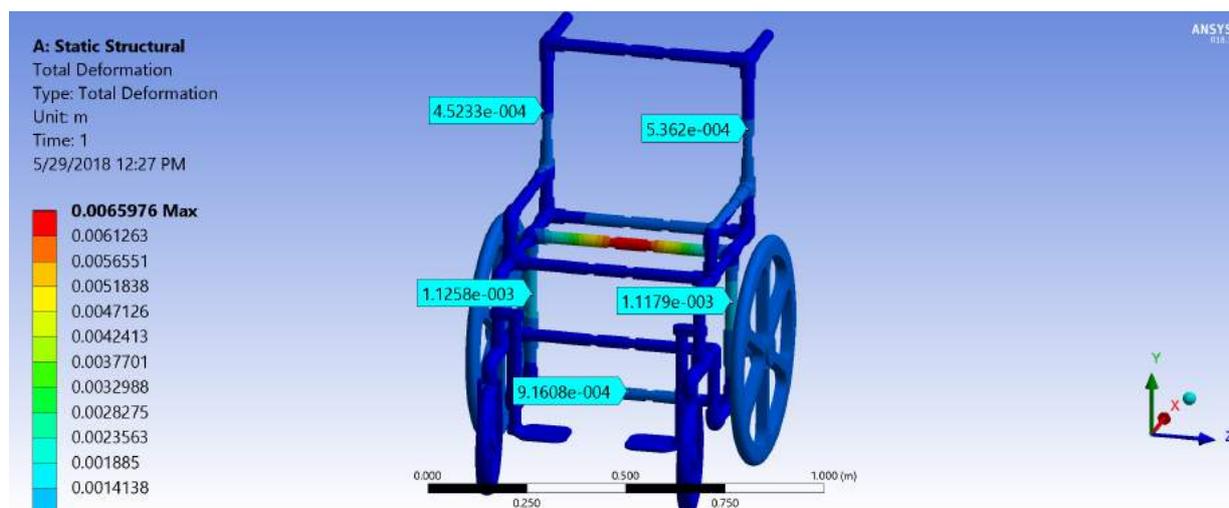


Figura 106 – Deflexão Sofrida pela Barra Central da Estrutura de PVC Residencial

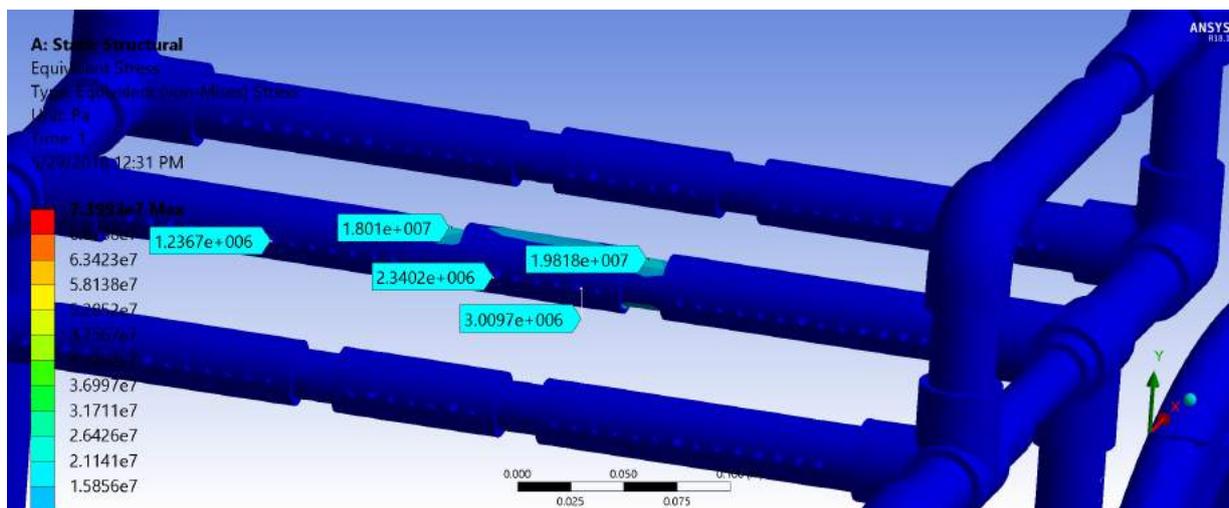


Figura 107 – Tensão Equivalente com Força Concentrada Aplicada na Barra Central da Estrutura de PVC Residencial

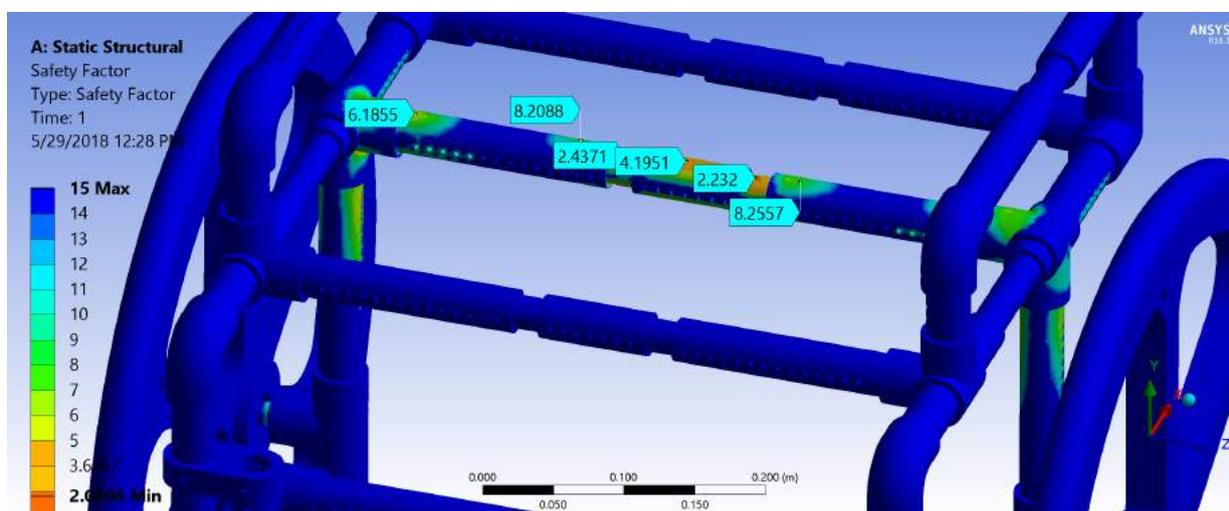


Figura 108 – Força Concentrada Aplicada na Barra Central da Estrutura de PVC Residencial

Percebe-se, com essas figuras, que a deflexão máxima sofrida pela estrutura é de 6,6mm e que o fator de segurança mínimo na estrutura é de 2,08 que, apesar de inferior ao valor estabelecido no pré-projeto ainda é um valor aceitável para a aplicação da força concentrada em único ponto (o que não ocorre em situações reais).

7.2.2.2 Força Peso na Barra Frontal

Em seguida, foi simulada a barra frontal da cadeira de rodas com força concentrada no meio da barra, o que gerou as deformações e fator de segurança apresentados nas Figuras 109 e 110 , respectivamente.

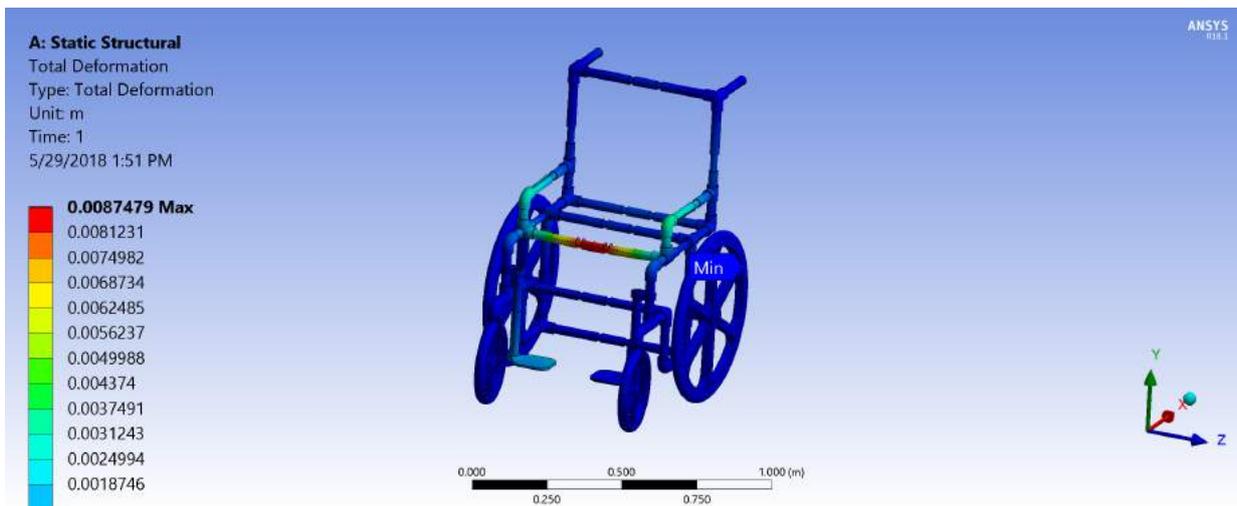


Figura 109 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial

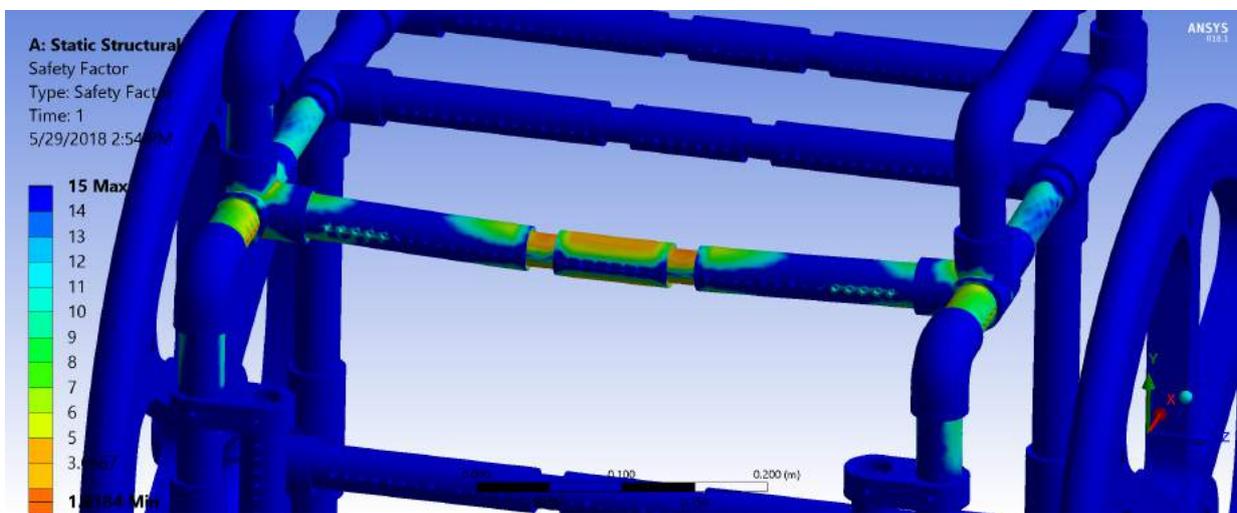


Figura 110 – Fator de Segurança com Força Concentrada Aplicada na Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial

Obtém-se, assim, uma deflexão máxima de 8,7mm e fator de segurança mínimo de 1,6. Como esses resultados apresentam valores excessivos de deflexão e mínimos de fator de segurança testou-se a substituição do material dos tubos de PVC da barra frontal por tubos de aço galvanizado que possuem resistência muito superior à do PVC. Os dados dos tubos de aço galvanizado são apresentados na Tabela 23. Encontrou-se, então, valores de deflexão apresentados na Figura 111 e de fator de segurança pela estrutura na Figura 112.

Tabela 23 – Dados dos Tubos de Aço Galvanizado

Dado	Valor	Fonte
Diâmetro Nominal	1"	(TUPY, 2018)
Diâmetro Externo	33,7mm	(TUPY, 2018)
Espessura	2,65mm	(TUPY, 2018)
Módulo de Elasticidade	200GPa	(MATWEB, 2018c)
Coefficiente de Poisson	0,29	(MATWEB, 2018c)
Tensão de Escoamento	205MPa	(TUPER, 2014)
Tensão de Ruptura	330MPa	(TUPER, 2014)

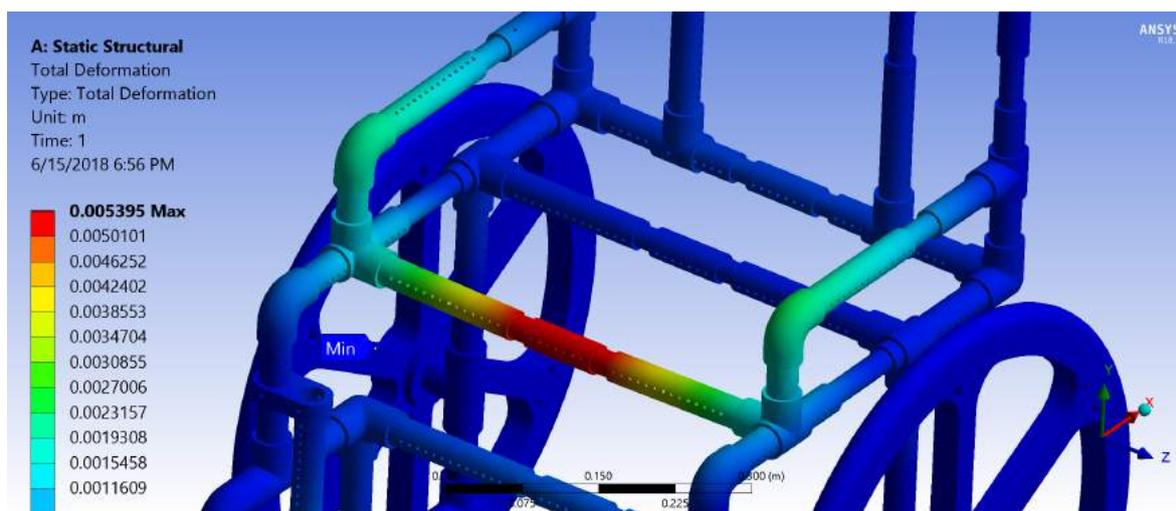


Figura 111 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura com Tubos de Aço Galvanizado

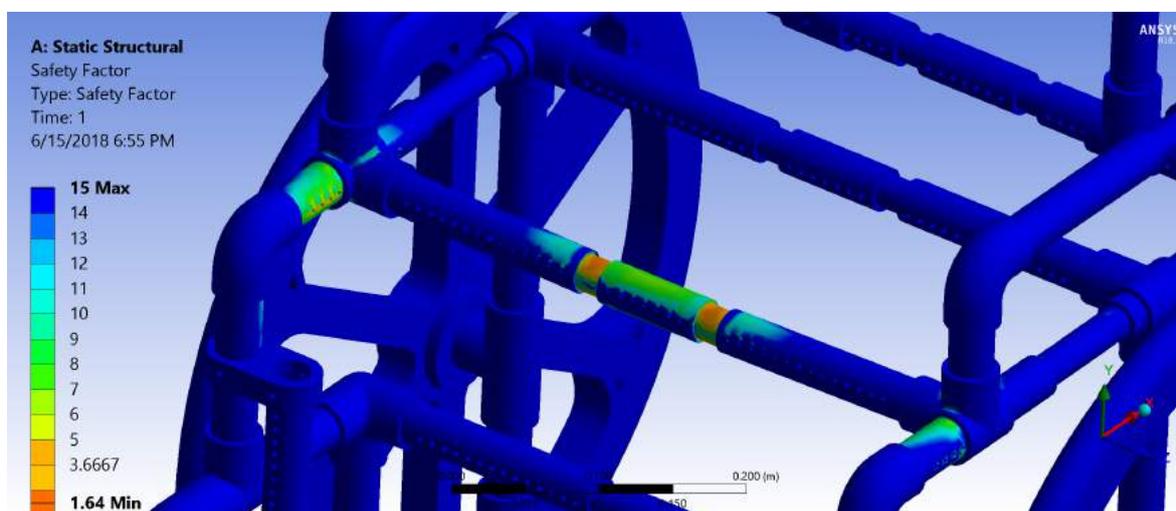


Figura 112 – Fator de Segurança com Força Concentrada Aplicada na Barra Central da Estrutura com Tubos de Aço Galvanizado

No entanto, percebe-se que essa substituição não é suficiente uma vez que a falha ocorre nas barras internas e não nos tubos externos. É a baixa resistência do ABS que causa os valores insuficientes de fator de segurança (1,64). Portanto, optou-se pela substituição dos materiais das barras internas pelo aço ou pelo alumínio, dependendo dos resultados de cada material. Dessa forma, ambos foram testados e as deflexões e fatores

de segurança são apresentados nas Figuras 113 e 114 para a deflexão e FS do aço e nas Figuras 115 e 116 para a deflexão e FS do alumínio.

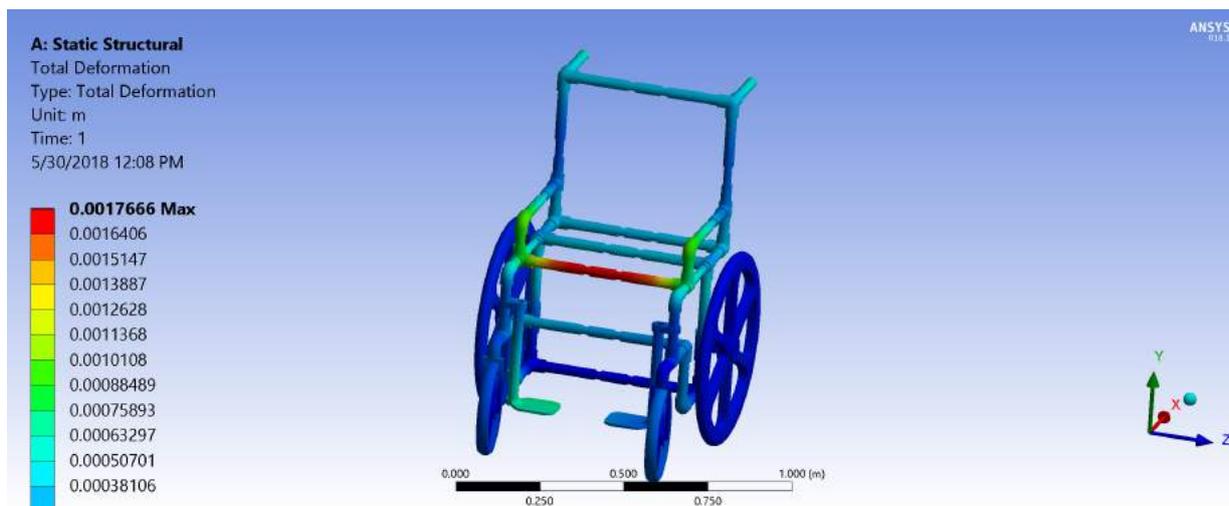


Figura 113 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial com Barra Interna de Aço

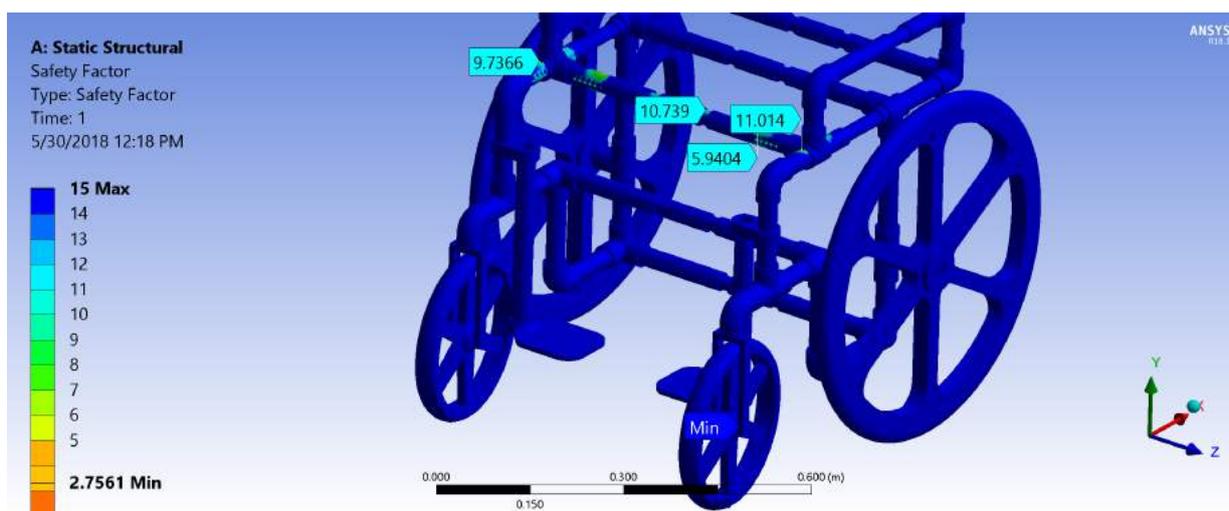


Figura 114 – Fator de Segurança com Força Concentrada Aplicada na Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial com Barra Interna de Aço

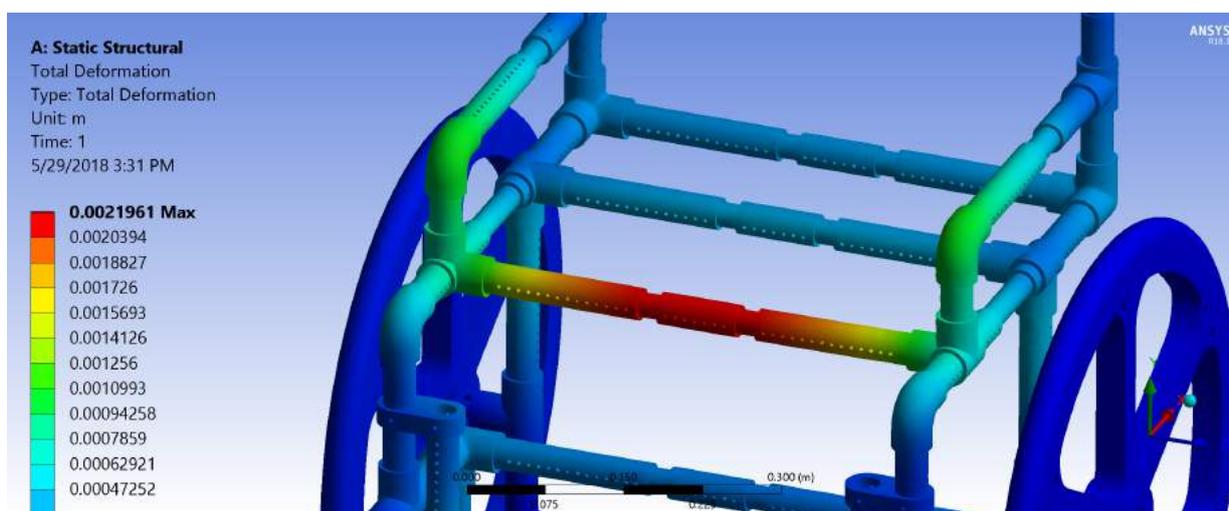


Figura 115 – Deflexão Sofrida pela Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial com Barra Interna de Alumínio

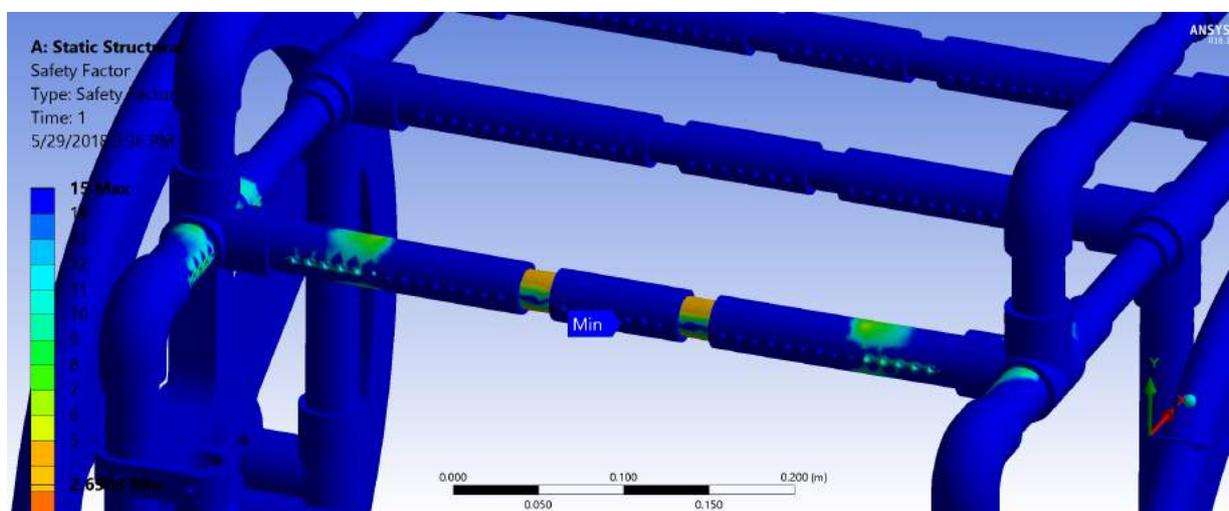


Figura 116 – Fator de Segurança com Força Concentrada Aplicada na Barra Frontal da Estrutura de PVC Residencial com Barra Interna de Alumínio

Dessa forma, como o aço gerou um fator de segurança extremamente elevado (cerca de 10 na barra horizontal analisada), as diferenças nas deformações não foram significativas e a densidade do aço é significativamente maior que a do alumínio, optou-se pela utilização do alumínio nos tubos internos para não tornar a estrutura muito pesada e de difícil manipulação do usuário. Além disso, destaca-se que o alumínio possui fator de segurança mínimo de 2,69 no contato entre os dois tubos internos. Esse fator de segurança seria ainda aumentado caso tivesse sido deixado um espaço entre os dois tubos internos que, nesta configuração estão em contato.

7.2.2.3 Força Peso na Barra Traseira

Em seguida, foi analisada a barra traseira da cadeira de rodas, já com a mudança de material estipulada anteriormente. Assim, foram encontradas as Figuras 117 (para a deflexão máxima) e 118 (para o fator de segurança).

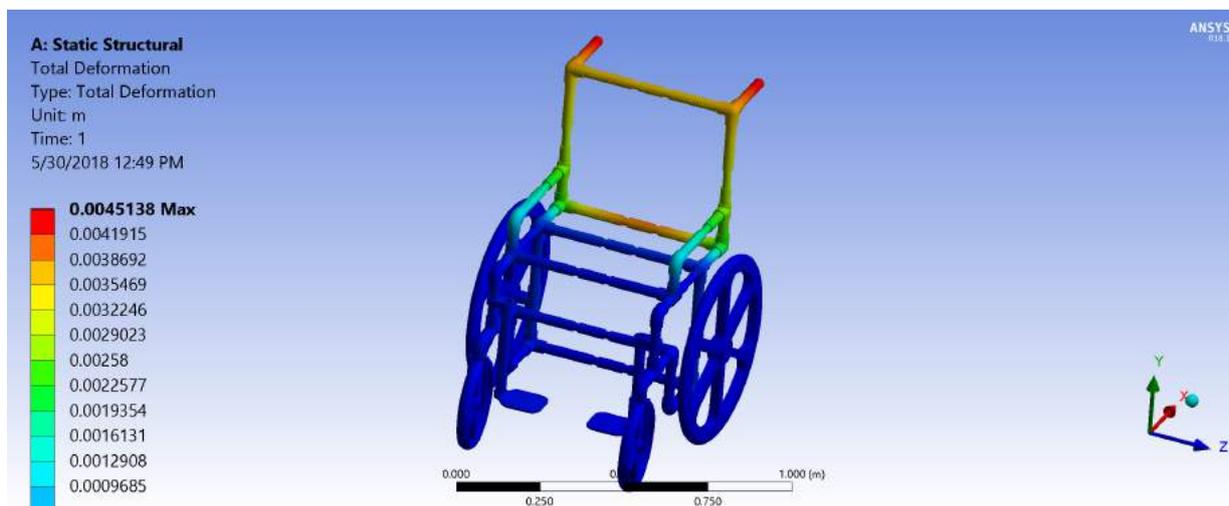


Figura 117 – Deflexão Sofrida pela Barra Traseira da Estrutura de PVC Residencial

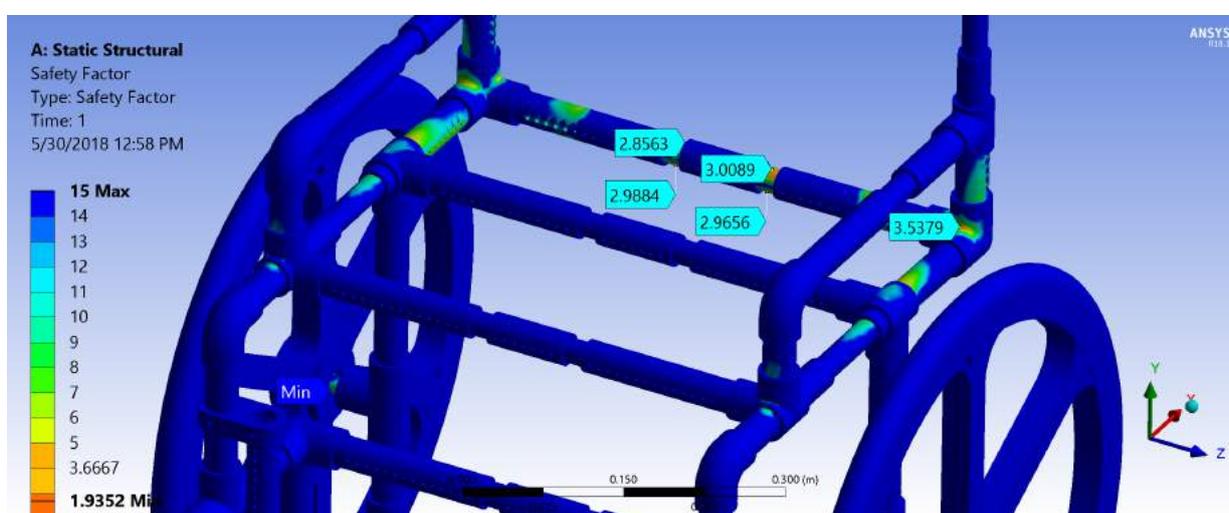


Figura 118 – Fator de Segurança com Força Concentrada Aplicada na Barra Traseira da Estrutura de PVC Residencial

Com isso, percebe-se que a substituição pro alumínio das barras internas foi eficiente uma vez que o fator de segurança apresentado (próximo de 3 na maior parte da estrutura) é um valor aceitável para o caso de uma força concentrada. Destaca-se o valor do FS mínimo de 1,9 no contato entre o encaixe das rodas traseiras e o rolamento, que será estudado com mais detalhe mais adiante.

7.2.2.4 Força Peso Distribuída

No entanto, para uma compreensão melhor das reais tensões na estrutura, é necessário a simulação de uma situação mais próxima da realidade. Como foi discutido na Seção 4.3, as cargas e impactos ocorrentes são de difícil previsão, porém, utilizando-se da Tabela 4 como feito anteriormente, distribuí-se o peso do usuário como mostrado na Figura 97 devido a proporção de peso de cada membro do corpo e o local provável onde ele estará majoritariamente apoiado.

Com isso, encontra-se uma deflexão da estrutura apresentada na Figura 119 e fatores de segurança apresentados na Figura 120.

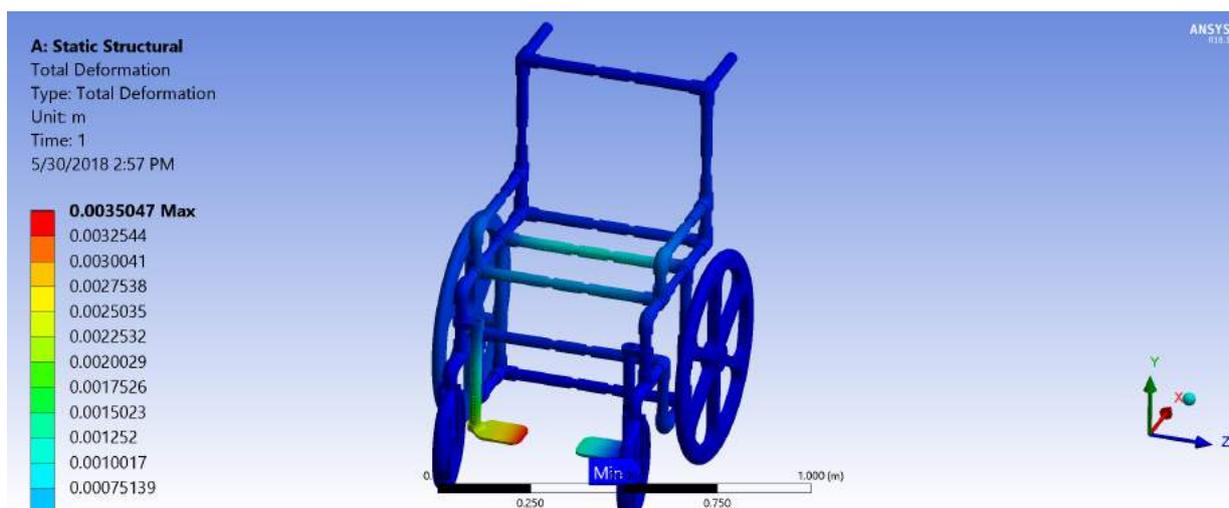


Figura 119 – Deflexão da Estrutura de PVC Residencial com Força Distribuída

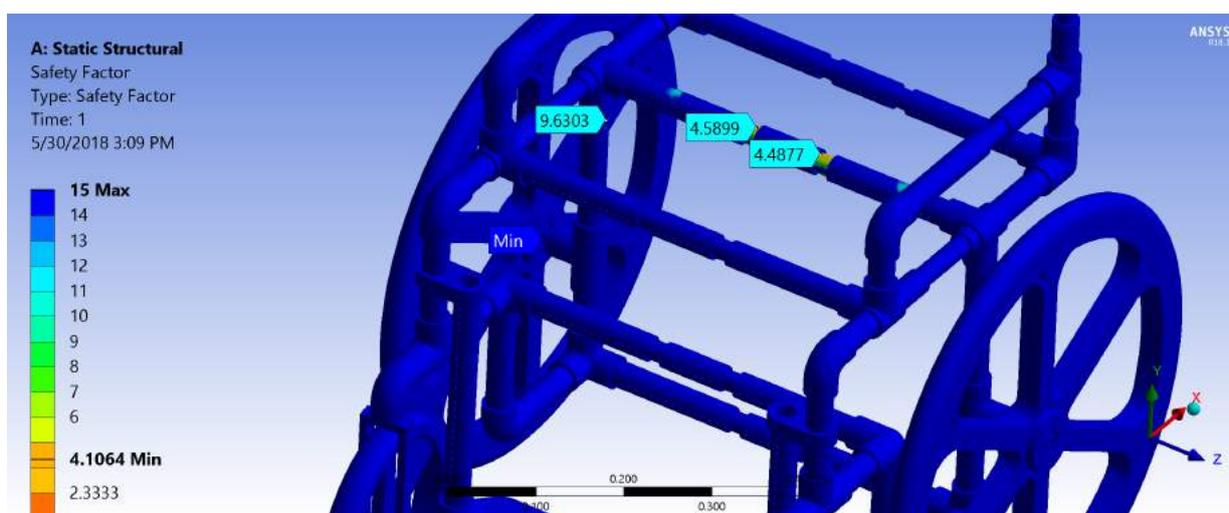


Figura 120 – Fator de Segurança com Força Distribuída Aplicada na Estrutura de PVC Residencial

Logo, percebe-se que no caso mais próximo da realidade gera-se mais confiança na estrutura devido a um deslocamento menor com valor máximo de 3,5mm no apoio de pé e um fator de segurança mais elevado, com valor mínimo de 4,1. Dessa forma, considerou-se que a estrutura, com as modificações de material realizadas, é segura o suficiente para se analisar o restante dos fatores. A seguir, é utilizada a norma ABNT NBR ISO 7176-8:2009 (ABNT, 2009b) que propões ensaios estáticos para verificação da estrutura. Esses ensaios requeridos pela norma foram transformados em simulações para a avaliação dos mesmos fatores necessários na norma.

7.3 Ensaios da Norma ABNT NBR ISO 7176:8

7.3.1 Apoio para Braços: Resistência às Forças Descendentes

A Norma ABNT NBR ISO 7176-8 (ABNT, 2009b) exige um ensaio sobre os apoios para braços com uma força equivalente a cerca de 76% da força peso máxima suportada pela cadeira de rodas. Os intervalos de massa apresentados na Norma são de: até 25kg, maior que 25kg até 50kg, maior que 50kg até 75kg e maior que 75kg. Dessa forma, a cadeira deve ser simulada utilizando os valores de força (F_1) apresentados no intervalo de 50 a 75kg, que equivale a 587N para o caso extremo como é visto na Tabela 24.

Tabela 24 – Forças Descendentes a Serem Aplicadas nos Apoios para Braços. (ABNT, 2009b)

Massa máxima do usuário kg	Força a ser aplicada em cada apoio para braços F_1 N
Até 25	190 ± 6
> 25 a 50	380 ± 11
>50 a 75	570 ± 17
>75 a 100	760 ± 23

Essa força deve, ainda, ser aplicada com um ângulo de 15° com relação ao eixo y da cadeira de rodas e à uma distância de 50mm do final do apoio de braço como é visto na Figura 121.

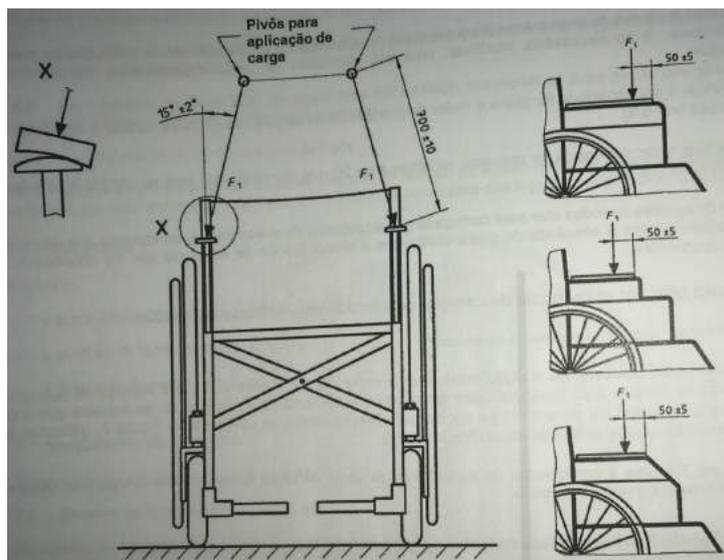


Figura 121 – Ângulo e Posicionamento das Forças Descendentes a Serem Aplicadas nos Apoios para Braços. (ABNT, 2009b)

Assim, foi aplicada uma força de 587N, como mostrado na Figura 122.

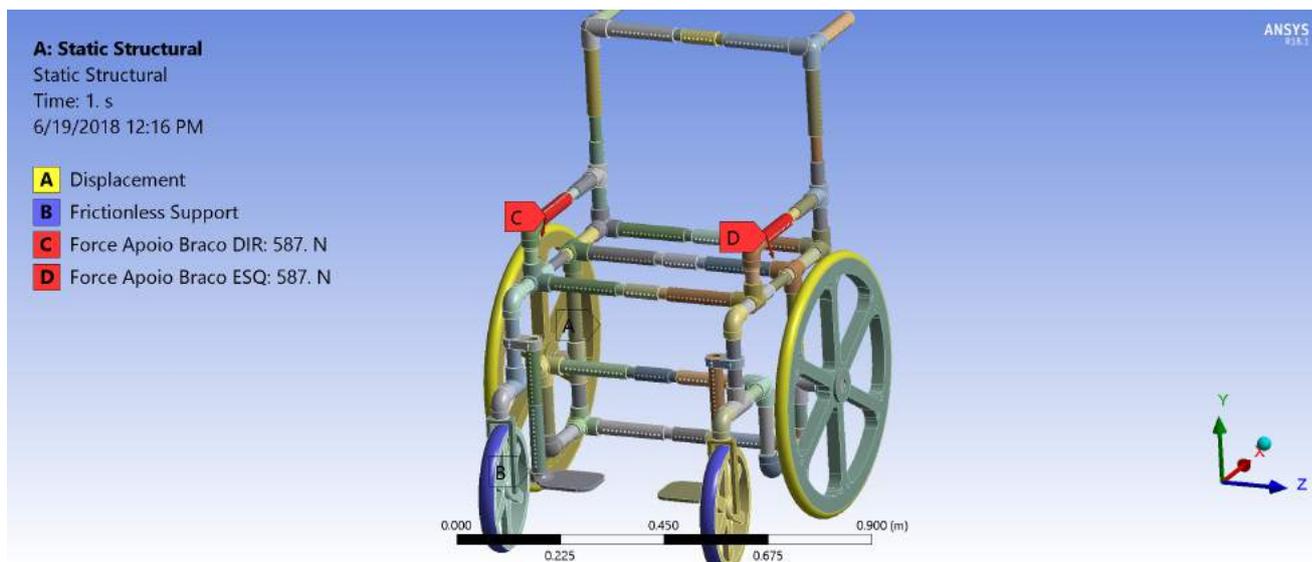


Figura 122 – Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Braço

Encontrou-se, assim, a deflexão aparente na Figura 123 onde se verifica que a deflexão máxima é de 3mm. Dessa forma, tem-se que a deflexão é aceitável considerando a força aplicada e não deve ser motivo de preocupação.

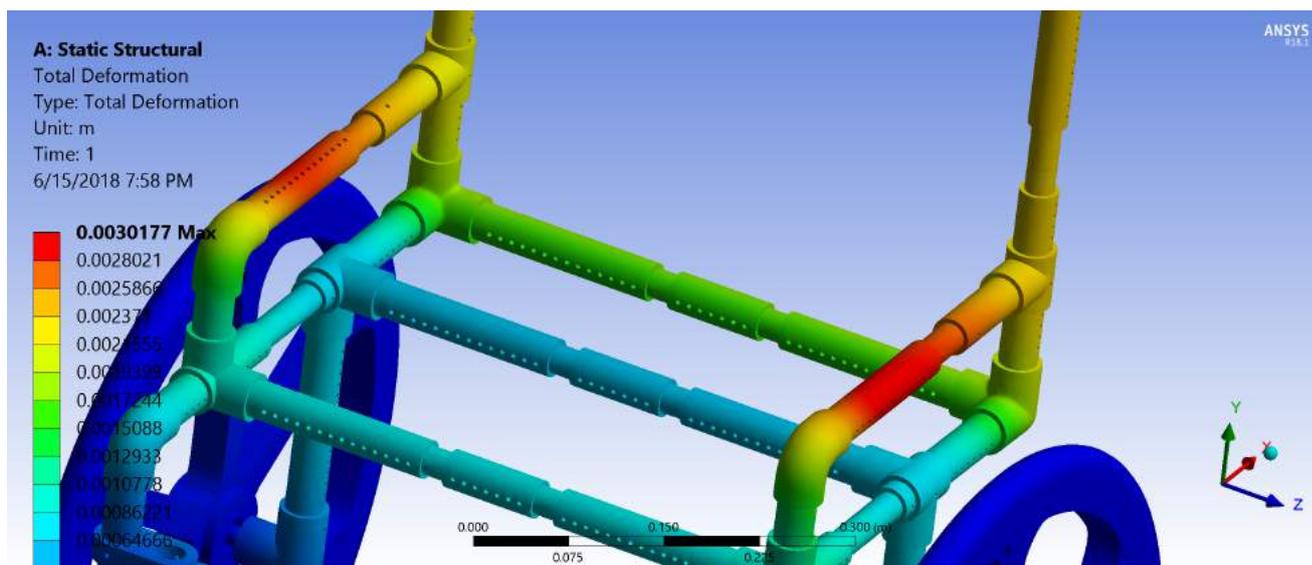


Figura 123 – Deflexão da Estrutura com a Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Braço

Da mesma forma, o fator de segurança é visto na Figura 124 e possui valores próximos de 3 na estrutura principal da cadeira de rodas, garantindo a segurança do sistema. Destaca-se, novamente, o valor mínimo (de 1,7) no contato entre os rolamentos e a peça de apoio das rodas traseiras. Esse valor é, provavelmente, devido ao contato entre as peças uma vez que substituindo o material da peça de apoio por aço ou alumínio se encontrou fatores de segurança ainda menores. Portanto, essa peça será analisada adiante individualmente para a sua verificação estrutural. Destaca-se, ainda, que o apoio de braço com os furos dos parafusos em posição perpendicular a força aplicada apresenta fatores de segurança muito maiores, o que deve ser uma recomendação de montagem.

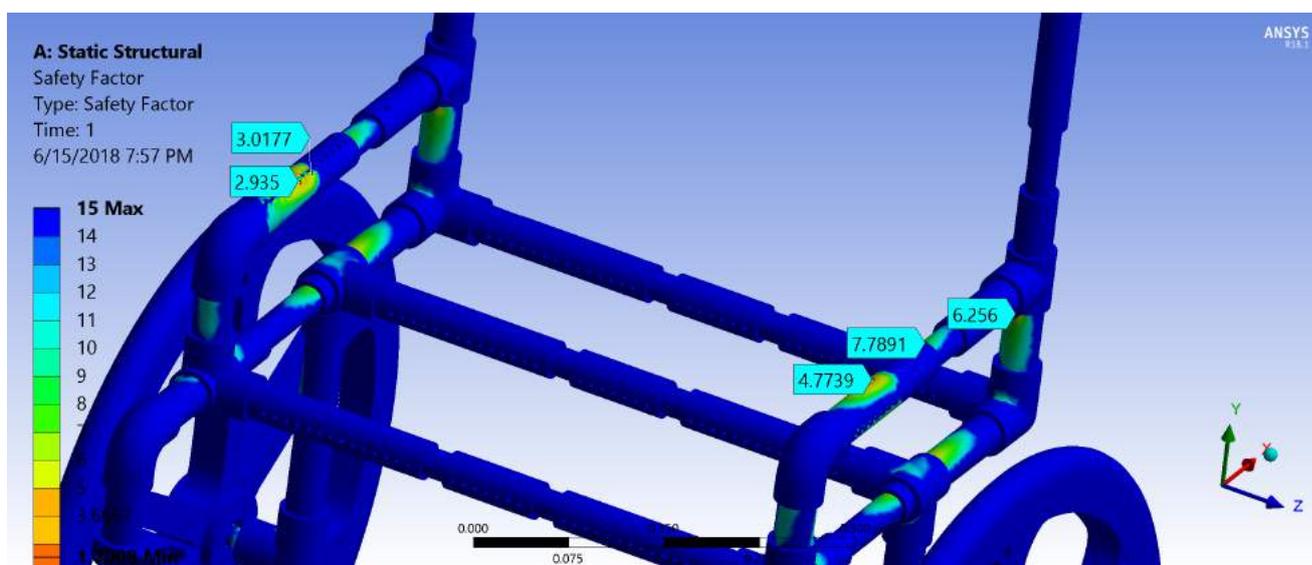


Figura 124 – Fator de Segurança na Estrutura com a Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Braço

7.3.2 Apoio para os Pés: Resistência às Forças Descendentes

Em seguida, simulou-se o ensaio de resistência dos apoios de pé às forças descendentes proposto na ABNT NBR ISO 7176-8:2009 (ABNT, 2009b) por meio da carga recomendada na Tabela 25.

Tabela 25 – Forças Descendentes a Serem Aplicadas nos Apoios para Pés. (ABNT, 2009b)

Massa máxima do usuário kg	Força, F_2 N
Até 25	250 ± 6
> 25 a 50	500 ± 11
>50 a 75	750 ± 17
>75 a 100	1000 ± 23

A recomendação da Norma é que essa força (F_2) seja aplicada no centro de cada apoio de pé, para o tipo de apoio criado neste projeto, como é visto na Figura 125.

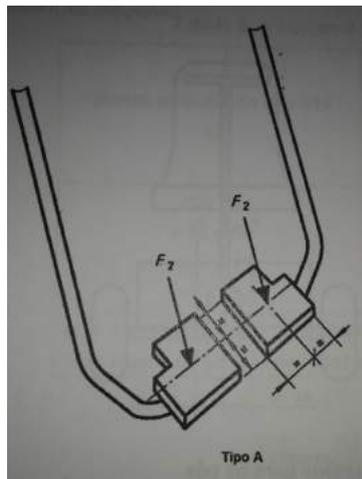


Figura 125 – Localização das Cargas Descendentes a Serem Aplicadas nos Apoios para os Pés. (ABNT, 2009b)

Dessa forma, foi aplicada uma força no centro da superfície superior de cada apoio de pé no valor de 767N como é visto na Figura 126.

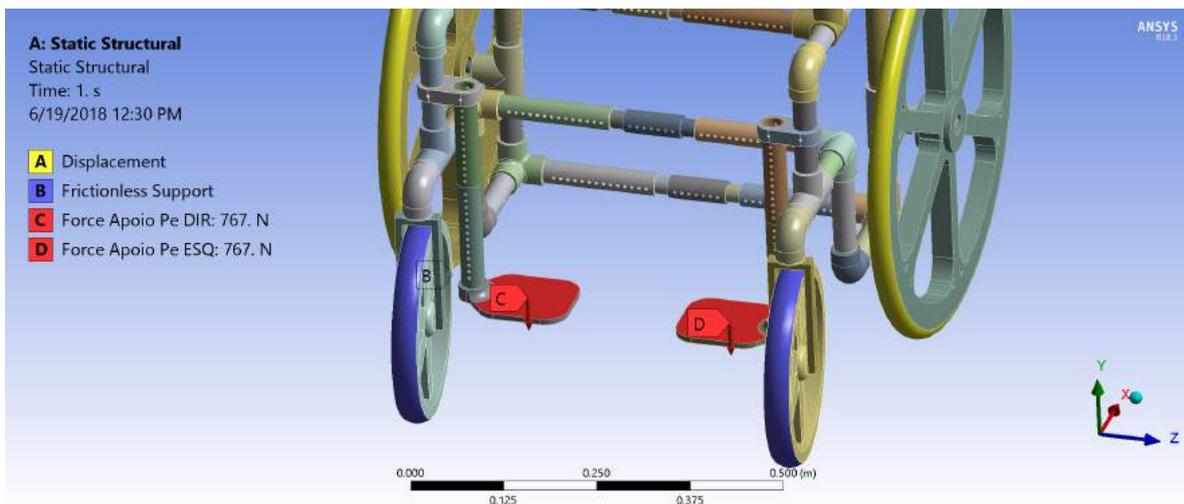


Figura 126 – Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Pé

No entanto, essa força gerou deflexões apresentadas na Figura 127 superiores a 7cm chegando a gerar contato com a roda frontal. Além disso, valores de fator de segurança apresentados na Figura 128 extremamente baixos, chegando a ser inferior a 1 indicando a falha na estrutura.

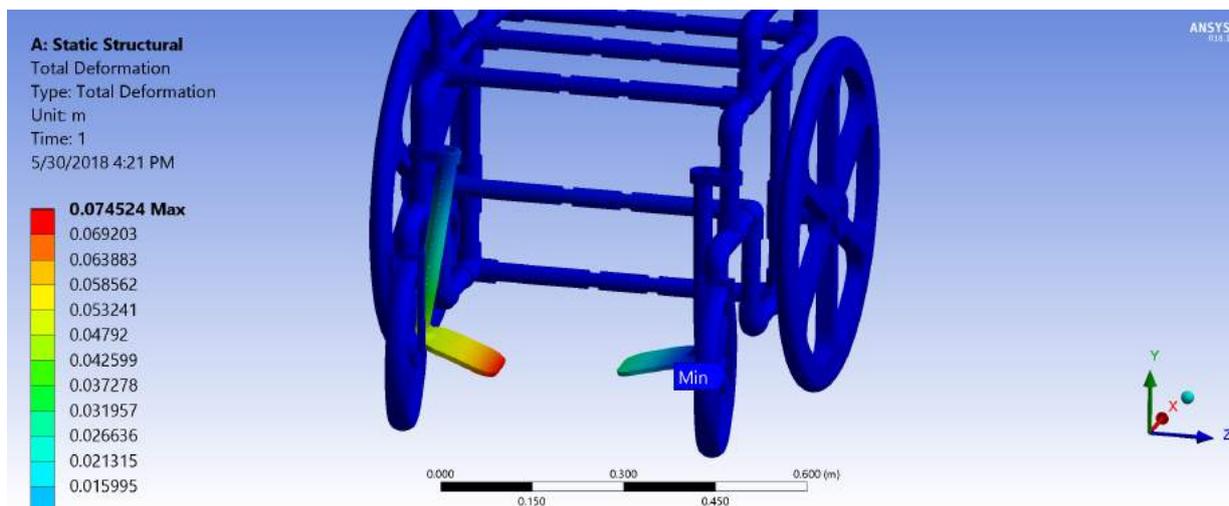


Figura 127 – Deformações Causadas Pela Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Pé

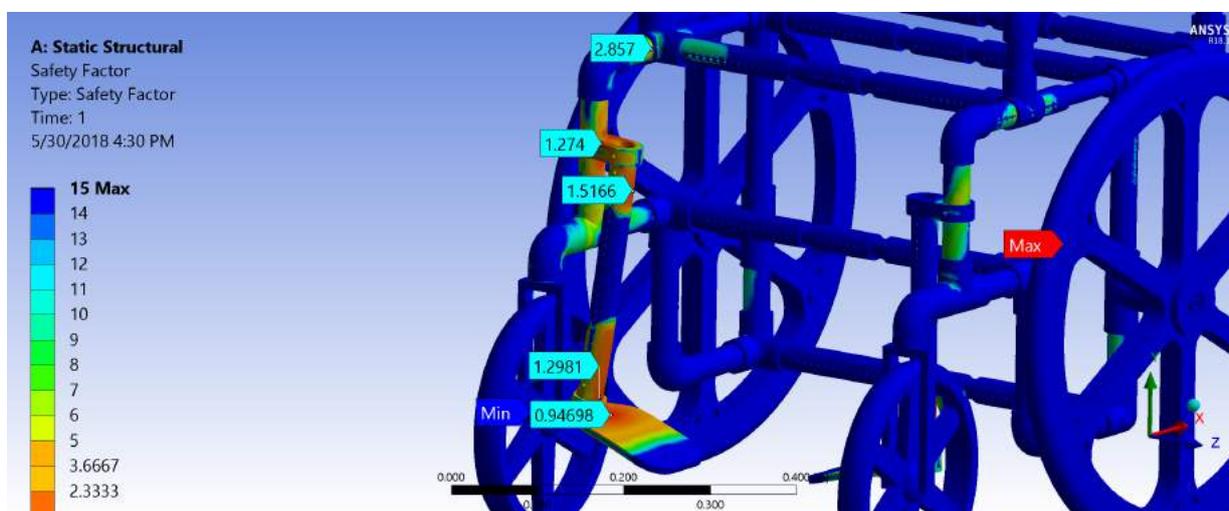


Figura 128 – Fator de Segurança Devido à Aplicação das Forças Descendentes nos Apoios de Pé

Portanto, decidiu-se pela substituição do material do prendedor do apoio de pé de ABS para Aço SAE 1020 mantendo assim, um custo baixo para a produção mas aumentando consideravelmente a resistência à tensão da peça. Apesar do aço ser um material muito mais pesado, para uma peça destas dimensões, o efeito não será significativo no peso total da cadeira de rodas.

Porém, pelas Figuras 129 e 130, que representam respectivamente a deflexão nos apoios de pé e o fator de segurança, percebe-se que essa alteração não foi suficiente uma vez que ainda existem locais próximos ao fillet no apoio de pé com fator de segurança inferior a 1 e a deflexão ainda é demasiada podendo comprometer o funcionamento da cadeira.

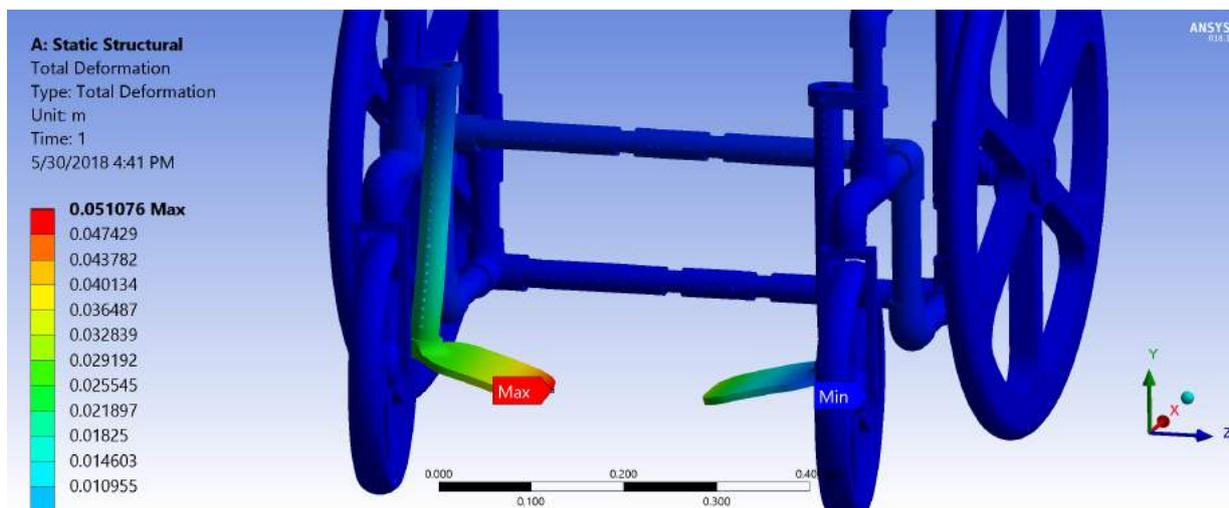


Figura 129 – Deflexão nos Apoios para os Pés com Prendedor de Apoio de Pé em Aço SAE 1020

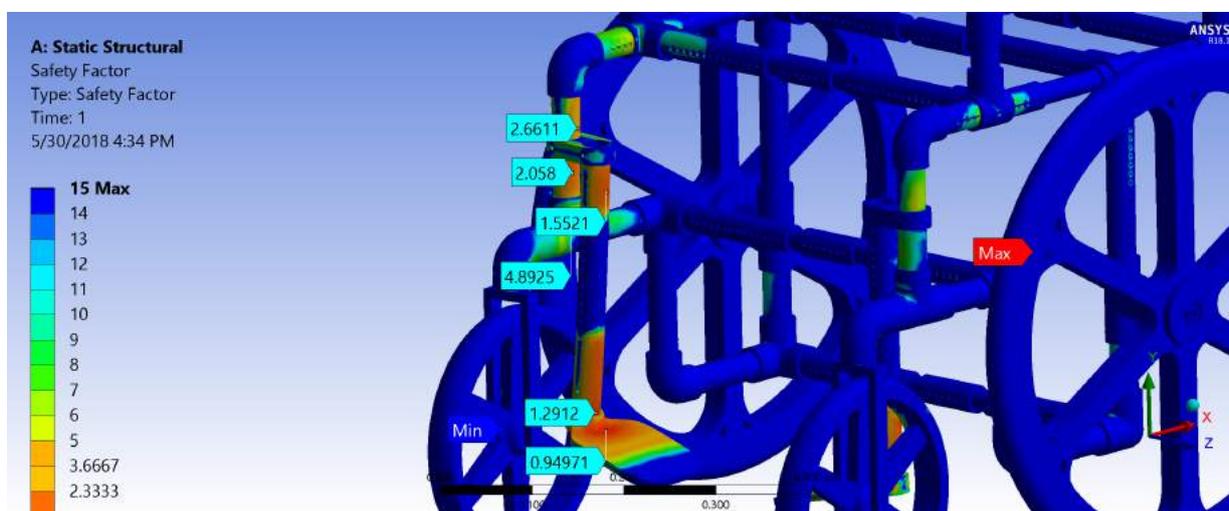


Figura 130 – Fator de Segurança nos Apoios para os Pés com Prendedor de Apoio de Pé em Aço SAE 1020

Assim, optou-se pela substituição do material do apoios de pé de ABS para o alumínio que aumenta a resistência da montagem sem afetar significativamente o peso da cadeira de rodas. Encontrou-se, então as Figuras 131 e 132 para a deflexão e fator de segurança nessa configuração. No entanto, continuou-se com uma deflexão excessiva e fatores de segurança insuficientes para garantir a confiança do sistema.

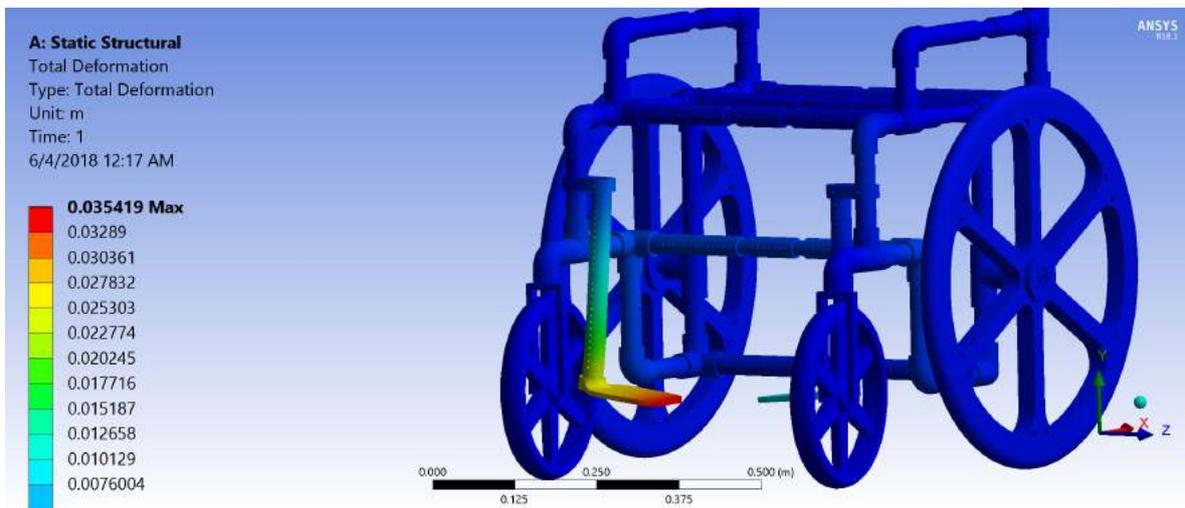


Figura 131 – Deflexão nos Apoios para os Pés com Apoio de Pé em Alumínio

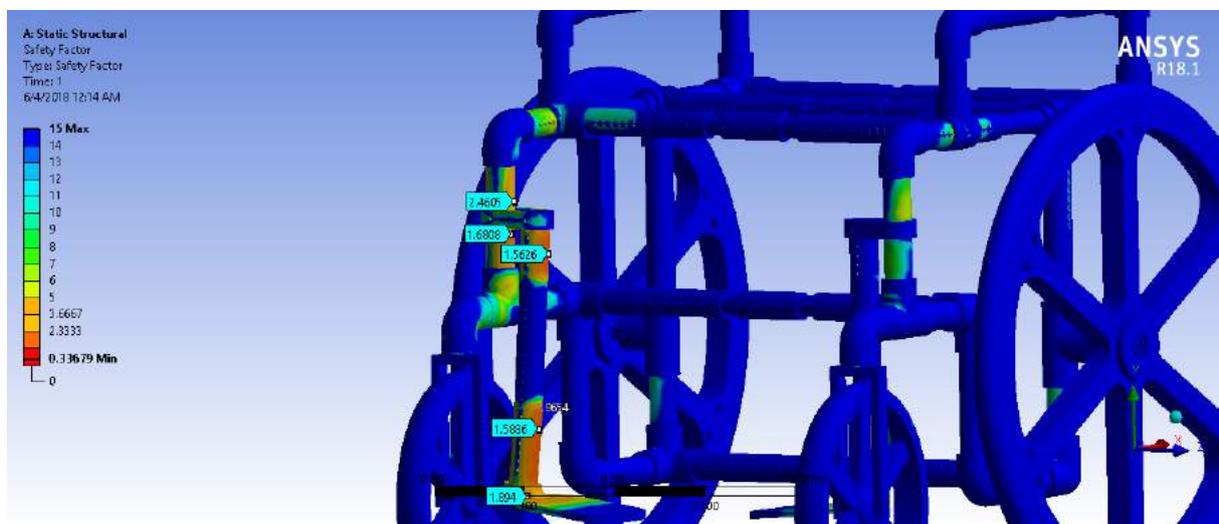


Figura 132 – Fator de Segurança nos Apoios para os Pés com Apoio de Pé em Alumínio

Além disso, verificando que essa solução ainda não era suficiente, trocou-se o material dos tubos externos na montagem do apoio de pé também para alumínio. Dessa forma, obteve-se resultados aceitáveis de deflexão (Figura 133) e fator de segurança (Figura 134)

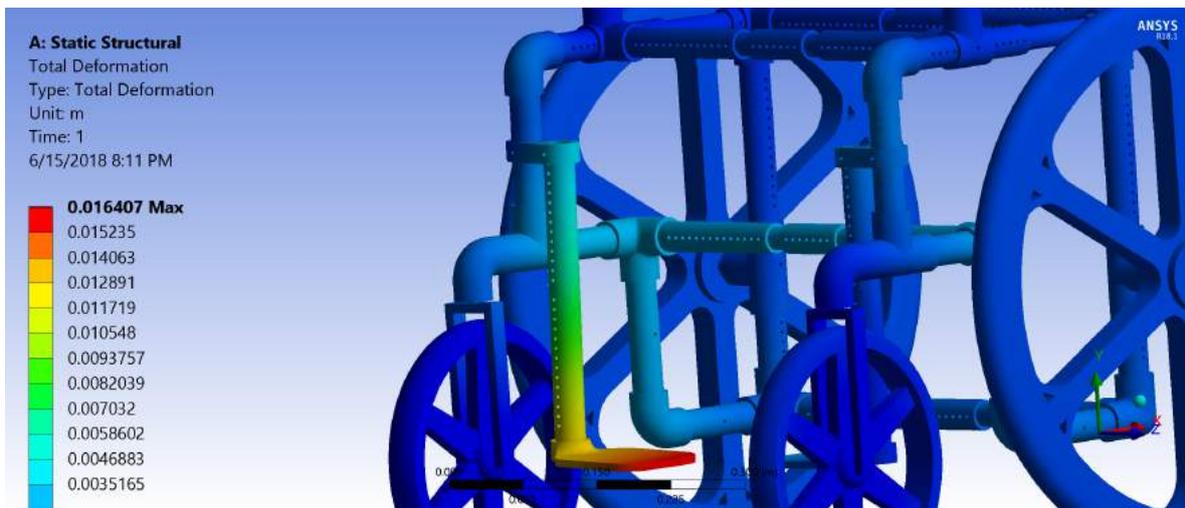


Figura 133 – Deflexão nos Apoios para os Pés com Tubos Externos em Alumínio

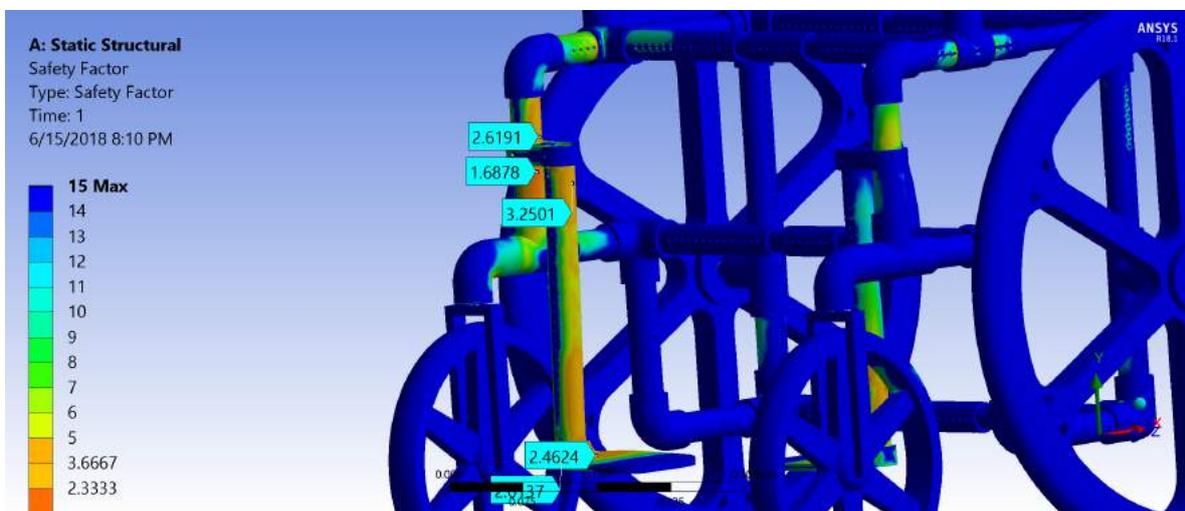


Figura 134 – Fator de Segurança nos Apoios para os Pés com Tubos Externos em Alumínio

Com os valores encontrados nas Figuras 133 e 134 de deflexão máxima de 16mm e fator de segurança de 1,7, julgou-se que a configuração era suficiente para prosseguir para as próximas análises uma vez que a força sendo aplicada em cada apoio de pé devido a norma já é significativamente superior ao peso máximo suportado pela cadeira de rodas. Ou seja, mesmo que o usuário aplicasse todo o seu peso em um único apoio de pé, não seria atingido o valor proposto pela norma.

7.3.3 Aros de Impulsão

O aro de impulsão, ou empunhadura, é o "componente projetado para ser agarrado pela mão de um assistente para impulsionar ou inclinar a cadeira de rodas"(ABNT, 2016). O valor da força a ser aplicada (752N) é obtido por meio da Tabela 26 e a forma de aplicação dessa força na estrutura é apresentada na Figura 135.

Tabela 26 – Dimensão das Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala. (ABNT, 2009b)

Massa máxima do usuário kg	Força a ser aplicada em cada aro de impulsão	
	F_4 N	
	Cadeiras de rodas manuais	Cadeiras de rodas elétricas
Até 25	345 ± 10	750 ± 23
> 25 a 50	5 350 ± 16	750 ± 23
>50 a 75	730 ± 22	750 ± 23
>75 a 100	7 300 ± 23	750 ± 23

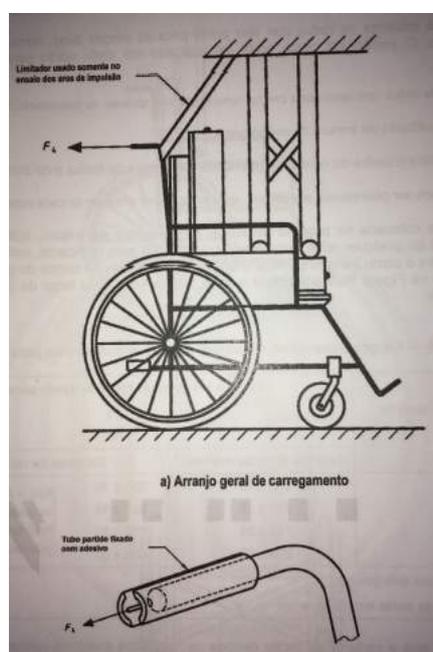


Figura 135 – Localização da Força Ascendente na Bengala. (ABNT, 2009b)

A recomendação de ensaio desse componente exige que seja colocado um limitador na estrutura da cadeira o mais próximo possível da empunhadura sem encostar diretamente nela para evitar o seu flexionamento sobre a força aplicada. Dessa forma, foi criada uma limitação de deslocamento no programa Ansys para simular a situação descrita na norma e as forças foram posicionadas como visto na Figura 136.

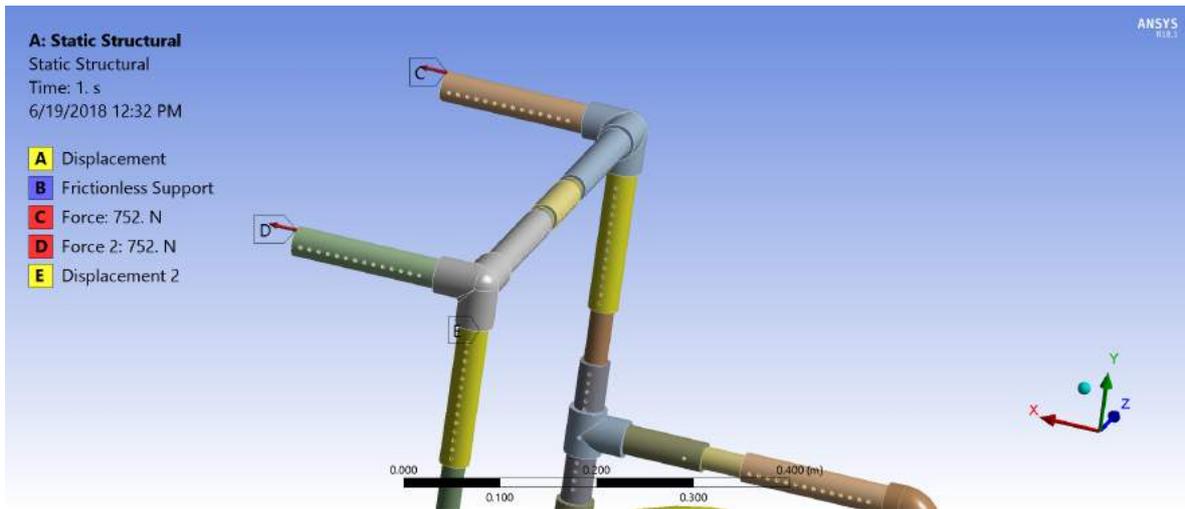


Figura 136 – Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala

Foram encontrados os valores de deflexão e fator de segurança na estrutura, visto nas Figuras 137 e 138, respectivamente.

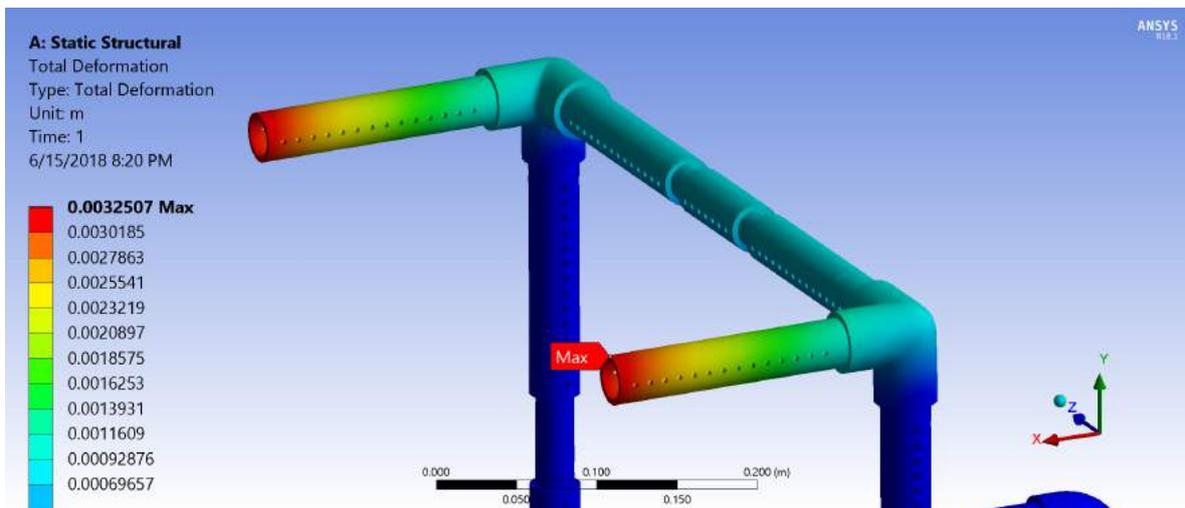


Figura 137 – Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala

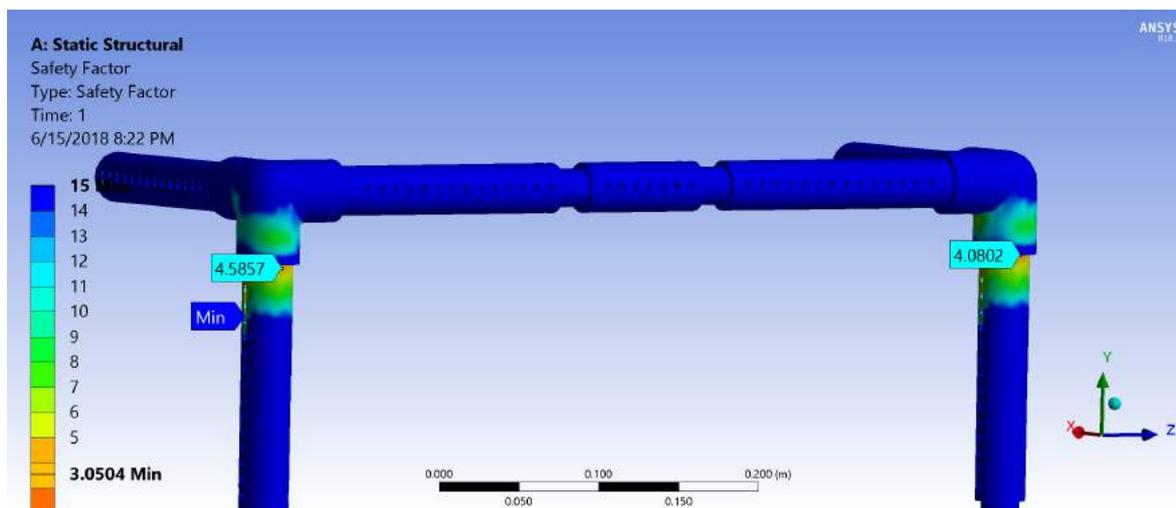


Figura 138 – Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala

Percebe-se, assim, uma deflexão máxima pequena, em função do limitador de movimento, de 3,3mm. Além disso, os fatores de segurança encontrados representam uma grande confiabilidade apresentando o valor mínimo de 3,05. Dessa forma, assegura-se que os materiais e a geometria escolhidos são suficientes para suportar as forças apresentadas nesta seção da norma.

7.3.4 Apoio para Braços: Resistência às Forças Ascendentes

A próxima etapa é a simulação da resistência dos apoios de braço às forças ascendentes aplicadas sobre eles. A força aplicada sobre os apoios de braço é definida por meio da Tabela 27 e seu posicionamento e direção são apresentados na Figura 139.

Tabela 27 – Dimensão das Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Braço. (ABNT, 2009b)

Massa máxima do usuário kg	Força a ser aplicada em cada apoio para braços		
	F_5 N		
	Cadeiras de rodas manuais	Cadeiras de rodas elétricas	
Até 25	335 ± 10	335 ± 10	$5(M_d + M_w)$ ou qualquer que seja 710 mais larga até um máximo de 1000 N
> 25 a 50	520 ± 16	520 ± 16	
>50 a 75	710 ± 21	710 ± 21	
>75 a 100	895 ± 27	895 ± 27	

M_d = massa do boneco em quilogramas
 M_w = massa da cadeira de rodas em quilogramas

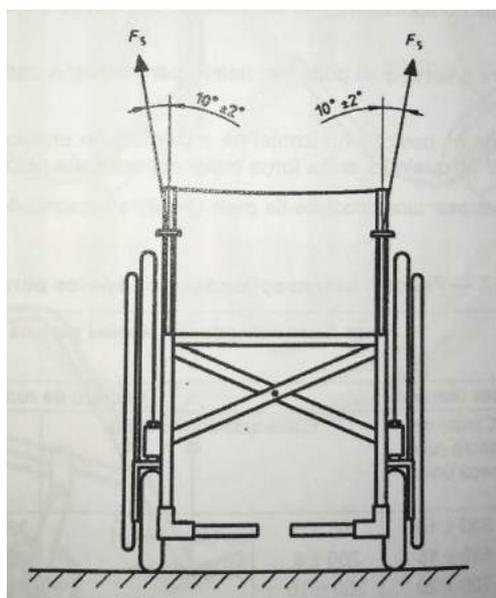


Figura 139 – Localização e Direção da Força Ascendente no Apoio de Braço. (ABNT, 2009b)

Aplica-se, então, as forças de 731N condizentes com a normas como visto na Figura 140 e encontra-se os valores de deflexão (Figura 141) e fator de segurança (Figura 142).

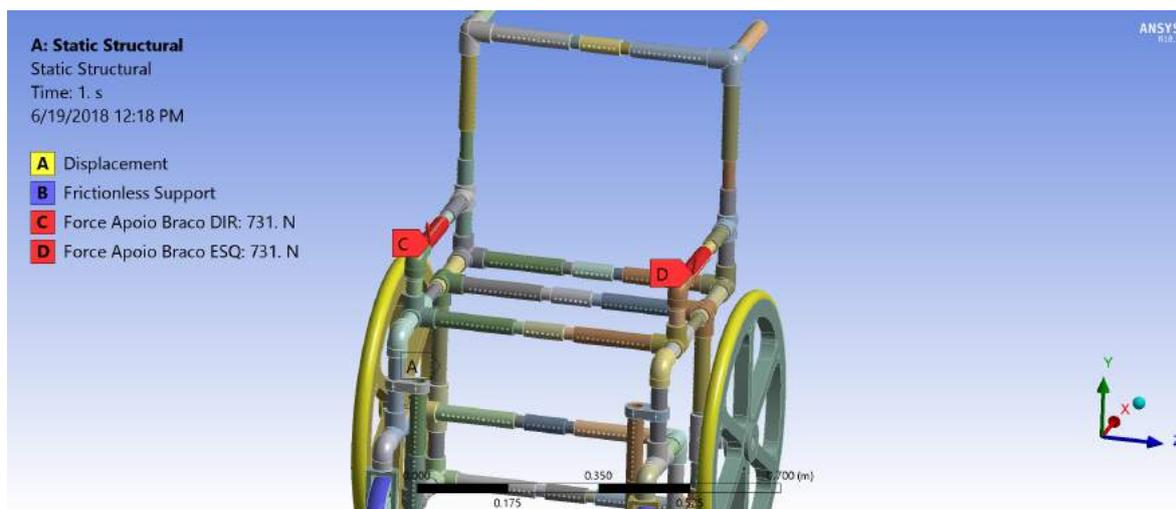


Figura 140 – Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Braço

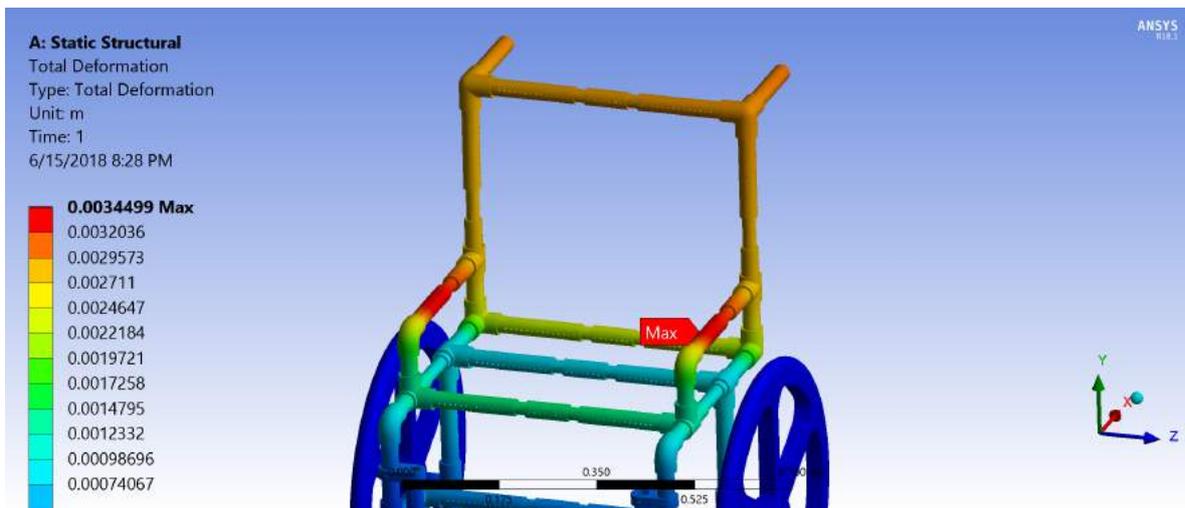


Figura 141 – Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala

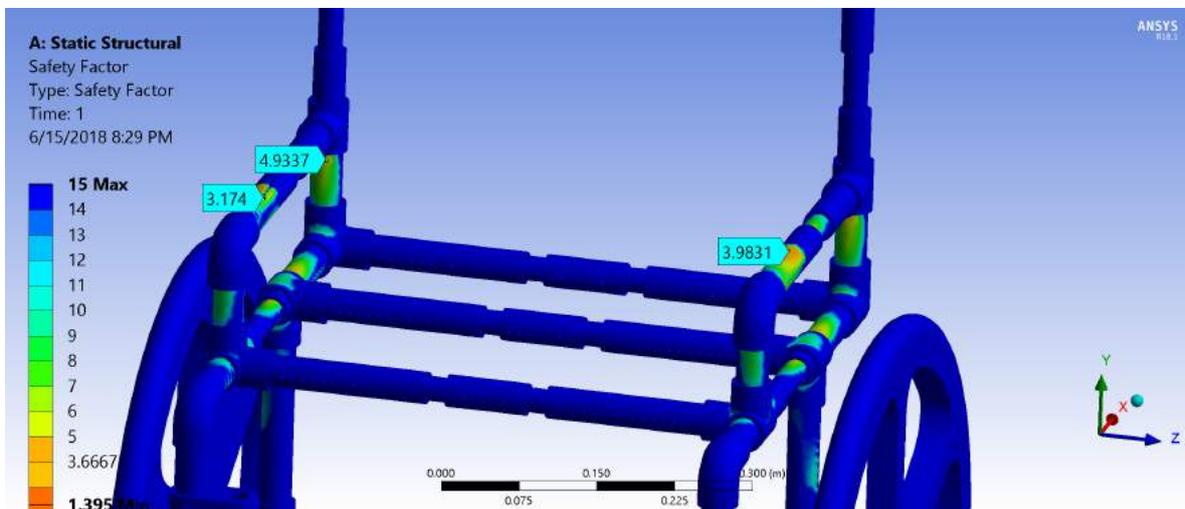


Figura 142 – Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala

Apesar de encontrarmos um valor de 3,17 como fator de segurança no apoio de braço direito, percebe-se que este valor não é equivalente no apoio de braço esquerdo, apesar da igualdade nas forças aplicadas em cada um. Isso se deve à direção em que os furos foram posicionados em cada braço. Dessa forma, é importante destacar no manual de montagem que os furos devem ser posicionados na horizontal, da mesma forma como está colocado o apoio de braço esquerdo. Esse fator complementa fatores de conforto pois o posicionamento vertical pode causar incômodo pois a cabeça do parafuso ou a porca estaria posicionada diretamente em baixo dos braços.

Além disso, novamente o valor mínimo do fator de segurança ocorre no contato do rolamento com a peça de suporte da roda traseira, que é analisado individualmente adiante. A deflexão máxima encontrada (3,4mm) também não é algo preocupante, em especial tendo em vista o valor da força aplicada sobre cada apoio de braço superior ao peso máximo do usuário suportada pela cadeira de rodas.

7.3.5 Apoio para os Pés: Resistência às Forças Ascendentes

Há, ainda, a necessidade de verificar a resistência dos apoios para os pés às forças ascendentes aplicadas sobre eles. O valor da força aplicada é apresentada na Tabela 28 e o posicionamento das forças segundo a norma ABNT NBR ISO 7176-8:2009 (ABNT, 2009b) é mostrado na Figura 143.

Tabela 28 – Dimensão das Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Pé. (ABNT, 2009b)

Massa máxima do usuário kg	Força a ser aplicada nos apoios para os pés, F_6 N			
	Cadeiras de rodas manual		Cadeira de rodas elétrica	
	Estrutura lateral (apoios com duas peças)	Centro de apoio com peça única	Cada lado da estrutura	Centro de apoio com peça única
Até 25	165 ± 5	330 ± 10	165 ± 5	330 ± 10
> 25 a 50	260 ± 8	520 ± 16	260 ± 8	520 ± 16
> 50 a 75	350 ± 10	700 ± 20	350 ± 10	700 ± 20
>75 a 100	440 ± 13	880 ± 26	440 ± 13	880 ± 26
			$\left\{ \begin{array}{l} 3,7(M_d + M_w) \\ \text{ou qualquer} \\ \text{largura maior até} \\ \text{o máximo de 1000} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 7,4(M_d + M_w) \\ \text{ou qualquer} \\ \text{largura maior até} \\ \text{o máximo de 2000} \end{array} \right.$

M_d = massa do boneco em quilogramas
 M_w = massa da cadeira de rodas em quilogramas

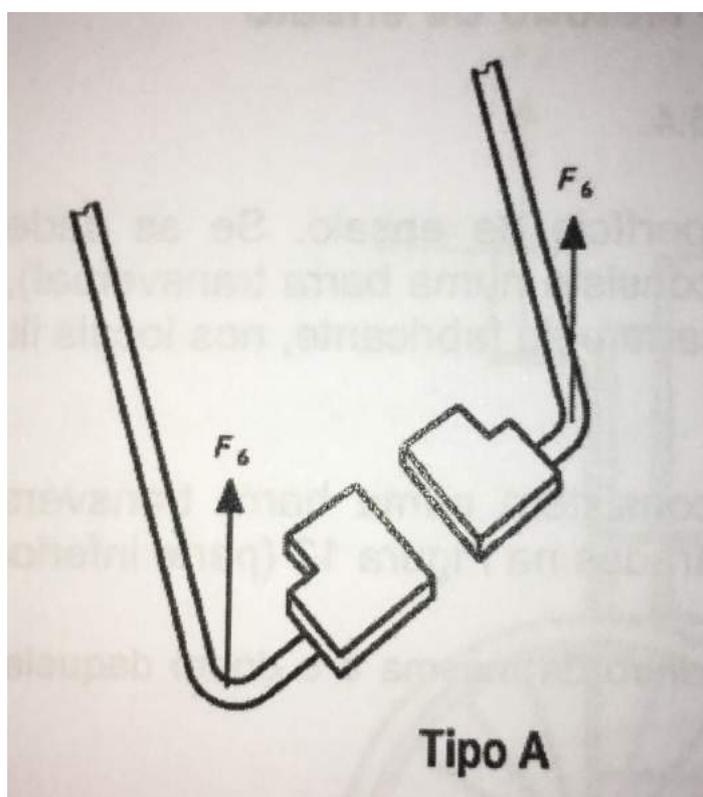


Figura 143 – Localização e Direção da Força Ascendente no Apoio de Pé. (ABNT, 2009b)

Dessa forma, aplica-se as forças condizentes com a normas como visto na Figura 144 e os valores de deflexão e fator de segurança são encontrados nas Figuras 145 e 146, respectivamente.

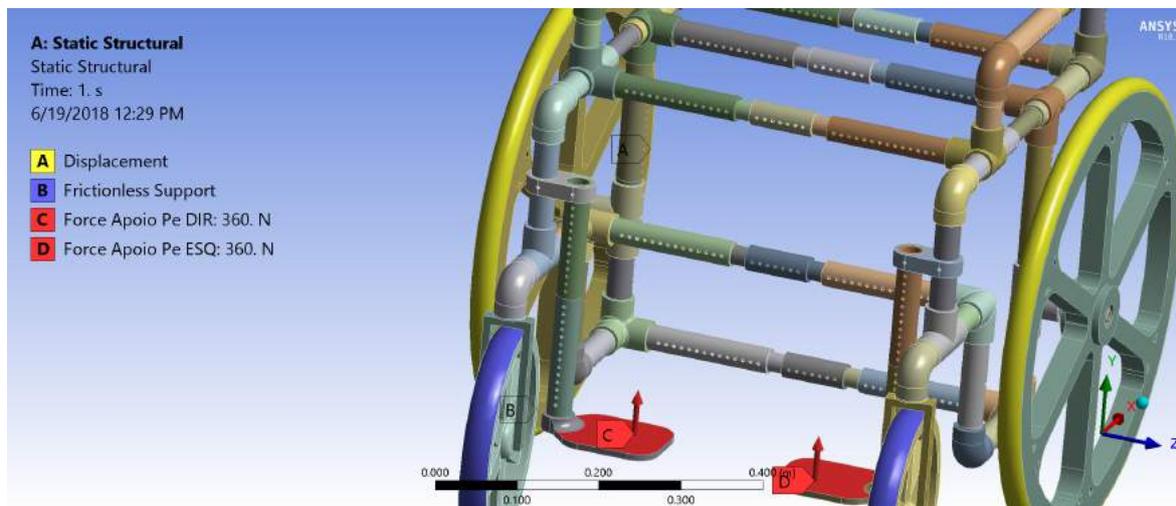


Figura 144 – Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Pé

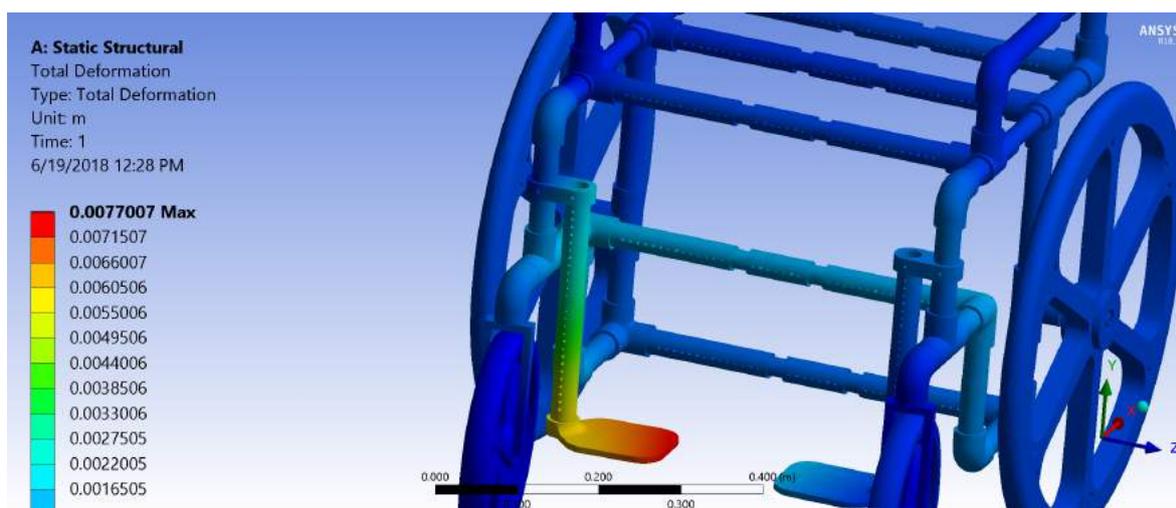


Figura 145 – Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Pé

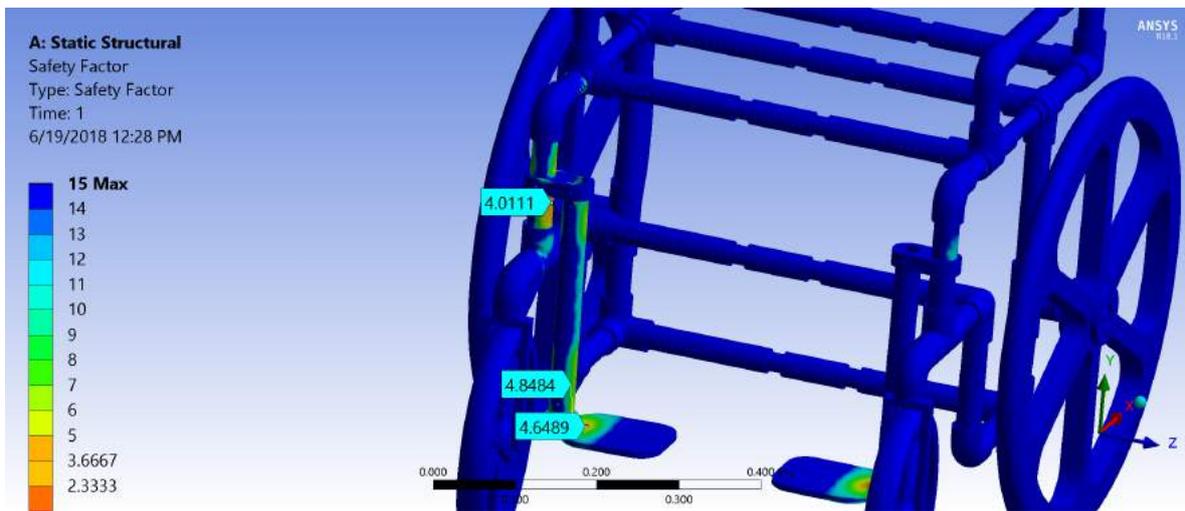


Figura 146 – Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas no Apoio de Pé

Os resultados encontrados mostram deformações baixas e um fator de segurança mínimo de cerca de 4 o que garante a confiabilidade da estrutura para esta etapa das simulações.

7.3.6 Empunhadura: Resistência às Forças Ascendentes

Por fim, o último ensaio estático da norma ABNT NBR ISO 7176-8:2009 (ABNT, 2009b) recomenda a avaliação das bengalas em relação à forças ascendentes. Nesta seção são verificadas as consequências sofridas pela estrutura devido a essas forças, que foram aplicadas conforme a Figura 147 e com dimensões apresentadas na Tabela 29 como recomendado em Norma, com destaque para a necessidade de simular as forças ascendentes na bengala com o peso máximo do usuário sobre a estrutura.

Tabela 29 – Dimensão das Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala. (ABNT, 2009b)

Massa máxima do usuário kg	Força a ser aplicada nos apoios para os pés, F_7					
	N					
	Cadeiras de rodas manual		Cadeira de rodas elétrica			
	Bengala individual	Centro da bengala tipo barra	Bengala individual		Centro da bengala tipo barra	
Até 25	330 ± 10	660 ± 20	330 ± 10	$5(M_d + M_w)$ ou qualquer largura maior até o máximo de 1000	660 ± 20	$7,4(M_d + M_w)$ ou qualquer largura maior até o máximo de 2 000
> 25 a 50	520 ± 16	1040 ± 32	520 ± 16		1040 ± 32	
> 50 a 75	700 ± 20	1400 ± 42	700 ± 20		1400 ± 42	
>75 a 100	880 ± 26	1760 ± 52	880 ± 26		1760 ± 52	

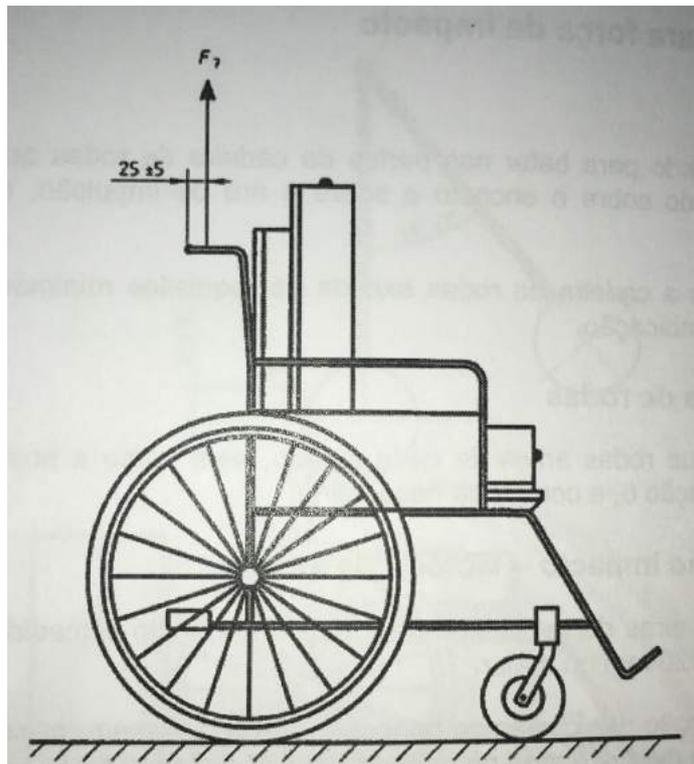


Figura 147 – Localização da Força Ascendente na Bengala. (ABNT, 2009b)

Dessa forma, as forças foram aplicadas no modelo em Ansys de acordo com a Figura 148 e simuladas para a verificação estrutural. Dessa forma, gerou-se os resultados de deflexão visto na Figura 149 e de fator de segurança na Figura 150.

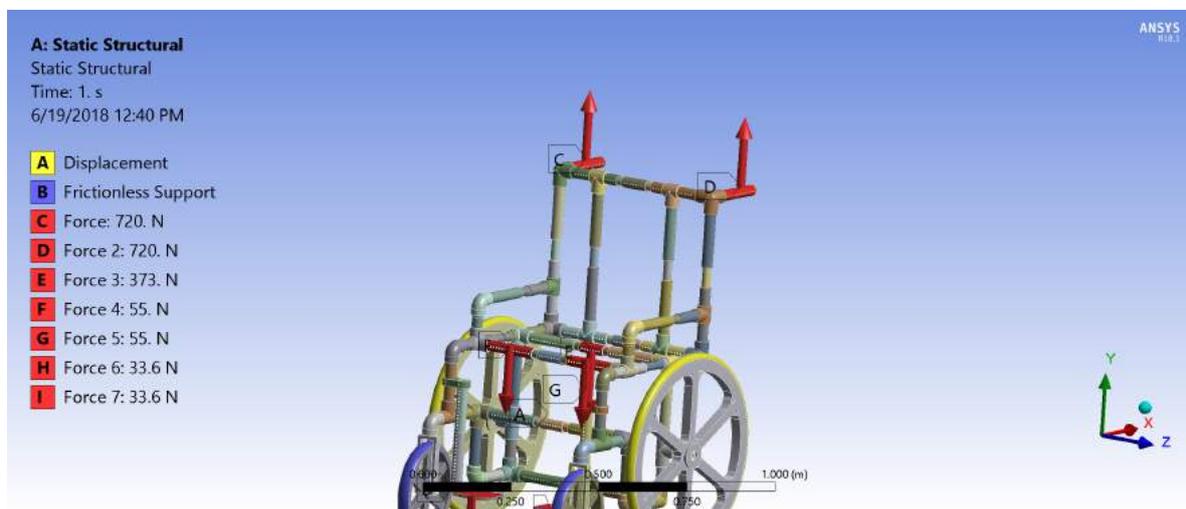


Figura 148 – Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala

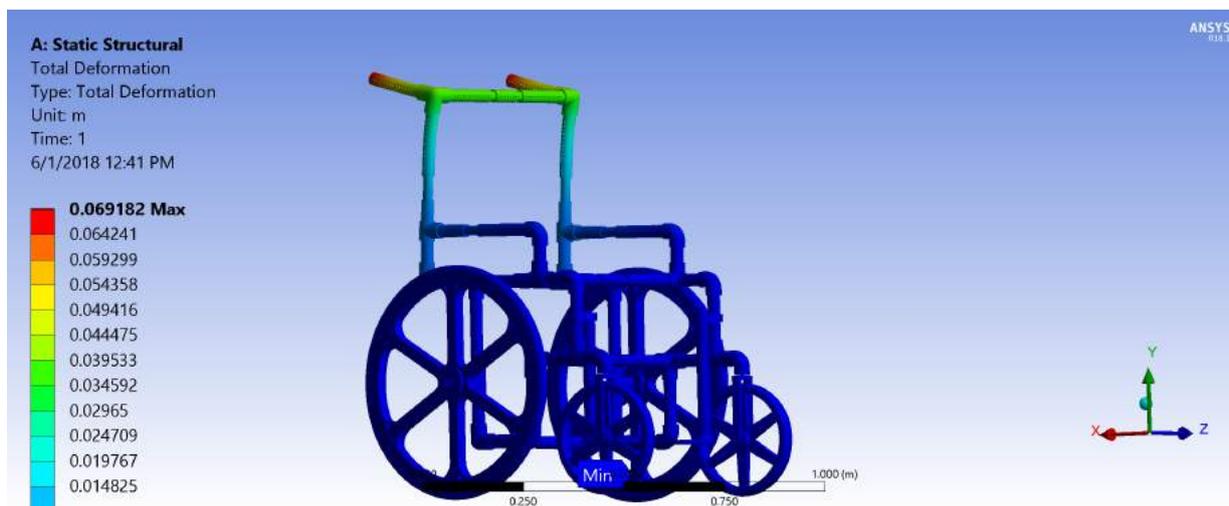


Figura 149 – Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala

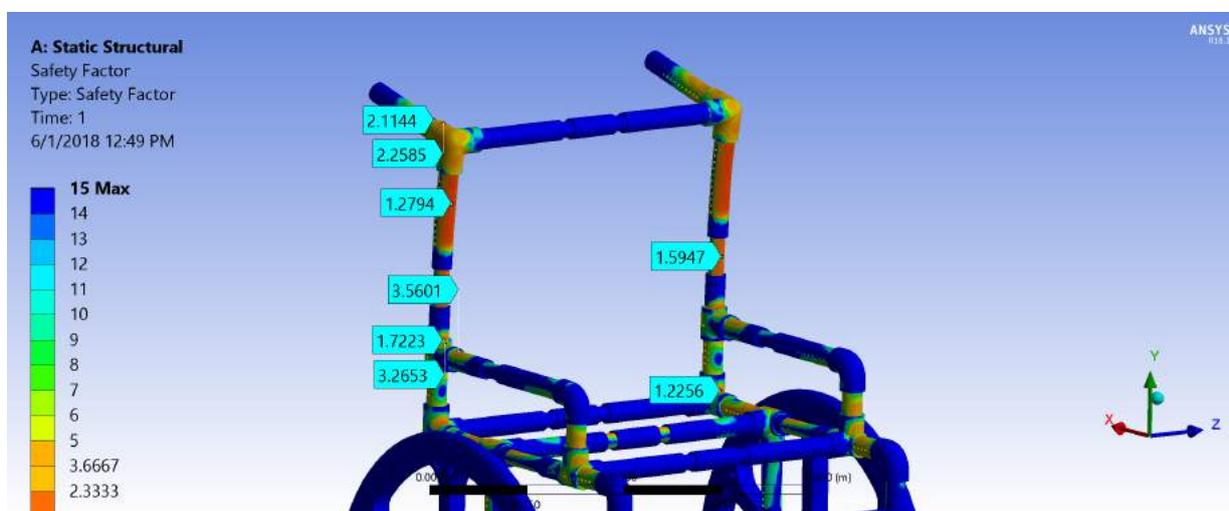


Figura 150 – Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala

Percebe-se, pelas figuras, que a deflexão da estrutura é excessiva (próximo de 70mm) e o fator de segurança é extremamente baixo, próximo de 1. Portanto, optou-se pela inclusão de mais duas barras como apoio do encosto para dividir as tensões e aumentar a resistência da estrutura. A configuração final da geometria, com essas modificações é vista na Figura 151. A deflexão encontrada neste caso e o fator de segurança na estrutura são apresentados nas Figuras 152 e 153, respectivamente.



Figura 151 – Estrutura da Cadeira de Rodas com 4 Barras Verticais no Encosto

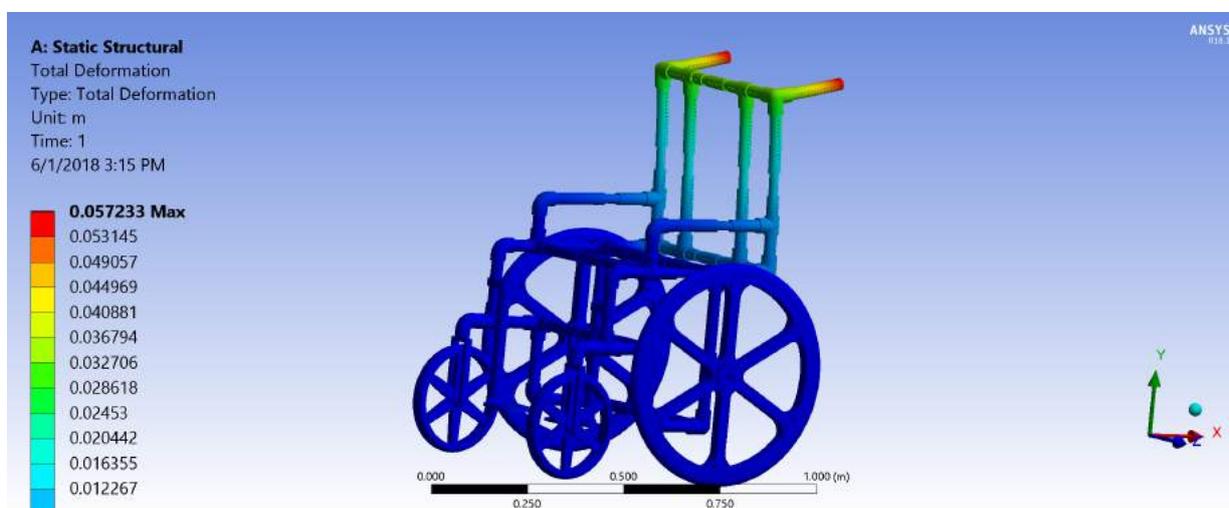


Figura 152 – Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala com Quatro Barras no Encosto

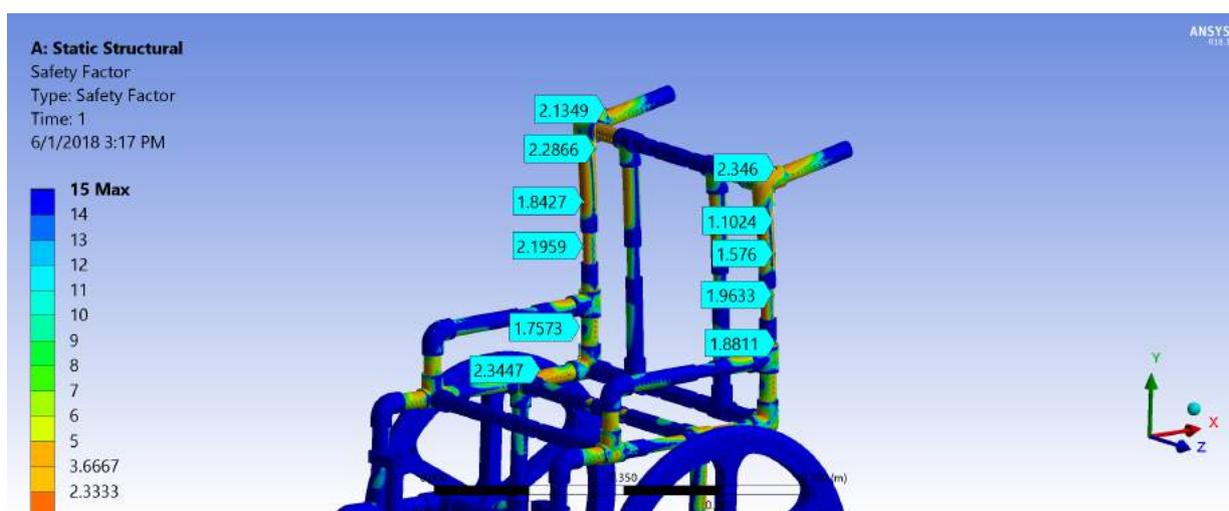


Figura 153 – Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala com Quatro Barras no Encosto

Apesar da deflexão ter diminuído de fato, não foi suficiente para apresentar valores razoáveis. Além disso, o fator de segurança permanece muito baixo com valores próximos de 1. Assim, optou-se pela substituição do material dos dois Joelhos duplos posicionados na parte traseira do assento (que fornecem a base para o encosto) para Aço SAE 1020. As deformações encontradas com essa modificação e o fator de segurança na estrutura ficam evidenciados nas Figuras 154 e 155, respectivamente, que foram considerados suficientes para encerrar essa etapa de projeto.

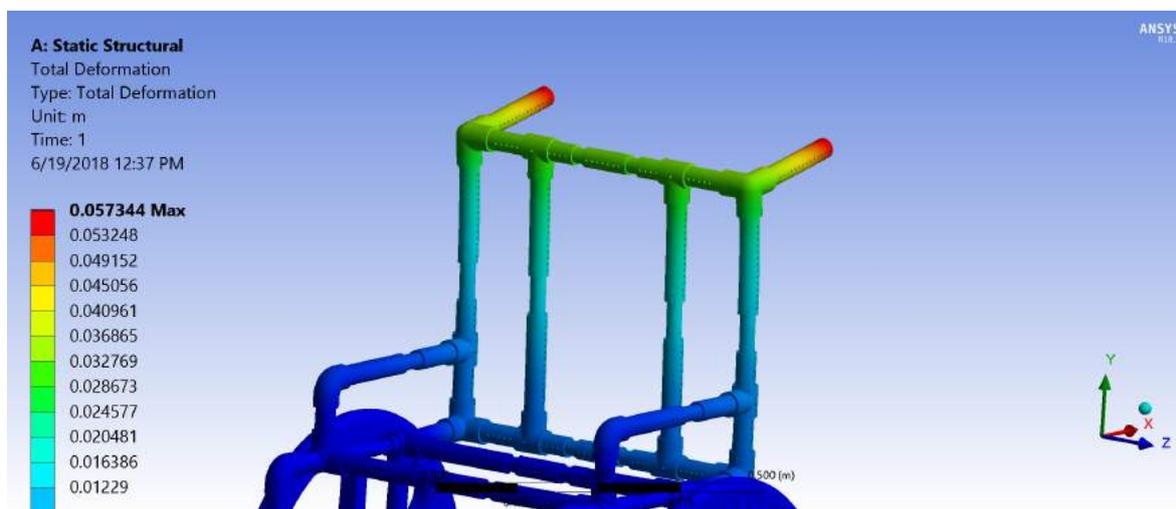


Figura 154 – Deflexão Causada na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala com Quatro Barras no Encosto e Joelho Duplo em Aço SAE 1020

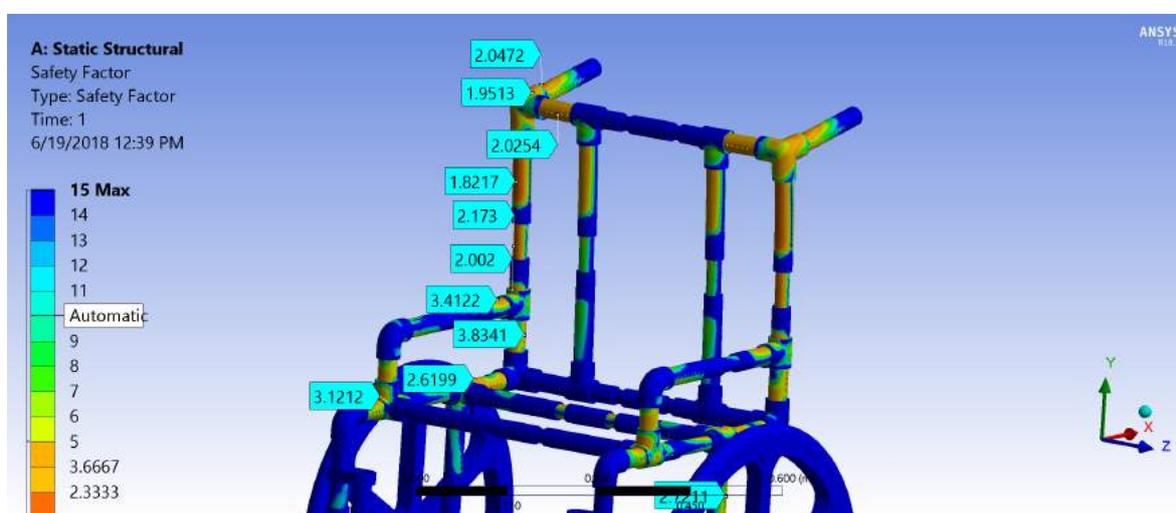


Figura 155 – Fator de Segurança na Estrutura Devido às Forças Ascendentes Aplicadas na Bengala com Quatro Barras no Encosto e Joelho Duplo em Aço SAE 1020

7.4 Síntese da Análise

Um resumo dos resultados obtidos nas análises realizadas neste capítulo é apresentado na Tabela 30.

Tabela 30 – Resultados das Simulações no Modelo Final

Modelo	Deflexão Máxima (mm)	Fator de Segurança Mínimo
Força Peso Concentrada na Barra Central	6,6	2,2
Força Peso Concentrada na Barra Frontal	2,2	2,7
Força Peso Concentrada na Barra Traseira	4,5	2,8
Força Peso Distribuída	3,5	4,1
Apoio de Braço: Forças Descendentes	3,0	2,9
Apoio para os Pés: Forças Descendentes	16	1,7
Aros de Impulsão	3,3	3,05
Apoio de Braço: Forças Ascendentes	3,4	3,17
Apoio para os Pés: Forças Ascendentes	7,7	4,0
Empunhadura: Forças Ascendentes	57	1,8

8 Definição dos Componentes Mecânicos

8.1 Parafusos

Para o dimensionamento dos parafusos foi considerada a situação crítica da maior força aplicada que, de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 7171:8 (ABNT, 2009b) é de 731N nos apoios de braços. Dessa forma, como se tem dois parafusos suportando a força, divide-se esse valor igualmente entre os dois. Dessa forma, dimensiona-se o parafuso com uma força de cisalhamento aplicada sobre ele de 365,5N. O esquema da força aplicada sobre o parafuso é apresentado na Figura 156.

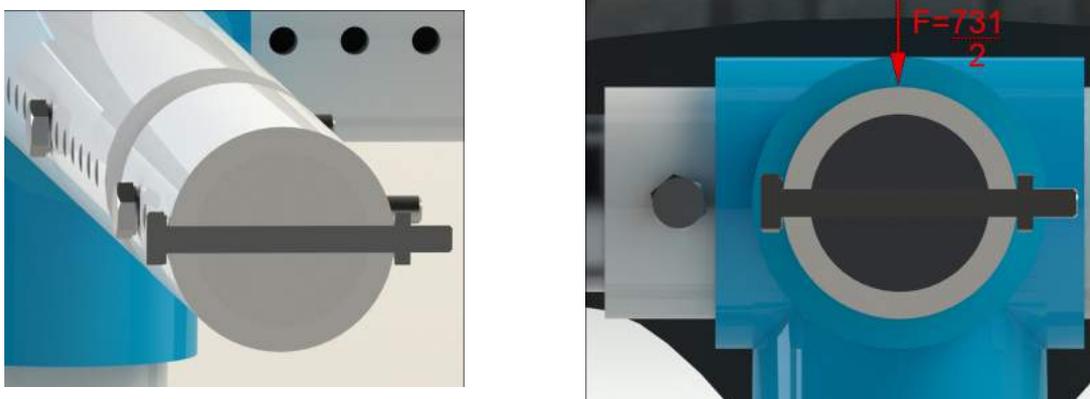


Figura 156 – Montagem do Eixo da Roda Frontal

Sabe-se que a tensão de cisalhamento (τ_s) é dada pela Equação 8.1 onde F é a força aplicada sobre o parafuso e A_s é a área sob cisalhamento de rasgamento dada pela Equação 8.2.

$$\tau_s = \frac{F}{A_s} \quad (8.1)$$

$$A_s = \pi \times d_r \times w_i \times p \quad (8.2)$$

Onde:

d_r Diâmetro mínimo do parafuso

w_i Fator que define a porcentagem do passo ocupado pelo metal no diâmetro menor

p Passo

O fator w_i é encontrado por meio da Tabela 31 e, no caso de rosca ISO adota-se o valor de 0,8.

Tabela 31 – Fatores para Área de Cisalhamento por Rasgamento de Roscas (NORTON, 2013)

Tipo de rosca	w_i (menor)	w_o (maior)
UNS/ISO	0,80	0,88
Quadrada	0,50	0,50
Acme	0,77	0,63
Botaréu	0,90	0,83

Em seguida, define-se a tensão de cisalhamento máxima permitida (τ_{adm}) baseada na tensão de cisalhamento do material do parafuso (τ_{cis}) e pelo fator de segurança de acordo com a Equação 8.3.

$$\tau_{adm} = \frac{\tau_{cis}}{FS} \quad (8.3)$$

No entanto, é necessário conhecer (τ_{cis}) que pode ser considerado como 60% da tensão de ruptura do parafuso (FASTENAL, 2005). A tensão de ruptura é dada pela classe do parafuso, neste caso selecionou-se um parafuso Inox 304. Logo, a tensão de ruptura é de 505MPa (ASM, 2018). Portanto, tem-se que a tensão de cisalhamento do parafuso é de 303MPa. Com isso, encontra-se a tensão admissível de 93,23MPa com o fator de segurança de projeto de 3,25.

Assim, encontra-se a área sob cisalhamento (A_s) por meio da Equação 8.1 de $3,92mm^2$. No entanto, para encontrar o diâmetro mínimo por meio da Equação 8.2 é necessário saber o passo, que é dependente do diâmetro. Portanto, estimou-se um diâmetro M4, por ser o menor diâmetro existente em catálogo para os comprimentos necessários no projeto, para o parafuso com o qual se encontra os valores de $d_r = 3,14mm$ e passo de 0,7mm de acordo com a Tabela 32. Assim, calculou-se A_s com valor de $5,52mm^2$, superior ao valor encontrado anteriormente. Dessa forma, garante-se que o parafuso M4 será suficiente para suportar as cargas sobre ele.

Tabela 32 – Dimensões Principais das Roscas de Parafusos Métricos Padrão ISO (NORTON, 2013)

Diâmetro maior d (in)	Roscas grossas			Roscas finas		
	Passo p mm	Diâmetro menor d_1 (mm)	Área sob tração A_1 (mm ²)	Passo p mm	Diâmetro menor d_1 (mm)	Área sob tração A_1 (mm ²)
3,0	0,50	2,39	5,03			
3,5	0,60	2,76	6,78			
4,0	0,70	3,14	8,78			
5,0	0,80	4,02	14,18			
6,0	1,00	4,77	20,12			
7,0	1,00	5,77	28,86			
8,0	1,25	6,47	36,61	1,00	6,77	39,17
10,0	1,50	8,16	57,99	1,25	8,47	61,20
12,0	1,75	9,85	84,27	1,25	10,47	92,07
14,0	2,00	11,55	115,44	1,50	12,16	124,55
16,0	2,00	13,55	156,67	1,50	14,16	167,25
18,0	2,50	14,93	192,47	1,50	16,16	216,23
20,0	2,50	16,93	244,79	1,50	18,16	271,50
22,0	2,50	18,93	303,40	1,50	20,16	333,06
24,0	3,00	20,32	352,50	2,00	21,55	384,42
27,0	3,00	23,32	459,41	2,00	24,55	495,74
30,0	3,50	25,71	560,59	2,00	27,55	621,20
33,0	3,50	28,71	693,55	2,00	30,55	760,80
36,0	4,00	31,09	816,72	3,00	32,32	864,94
39,0	4,00	34,09	975,75	3,00	35,32	1028,39

8.2 Suporte da Roda Traseira

Como visto que na simulação da estrutura o encaixe da roda estava falhando em algumas situações, foi realizado um estudo individual da peça para verificar a sua integridade.

Inicialmente realizou-se um cálculo a mão considerando o encaixe uma viga engastada com aplicações de forças nos pontos de contato dos rolamentos, como visto na Figura 157. Dessa forma, obteve-se os gráficos de força cortante e momento fletor mostrado nas Figuras 158 e 159 respectivamente.



Figura 157 – DCL do Encaixe da Roda Traseira

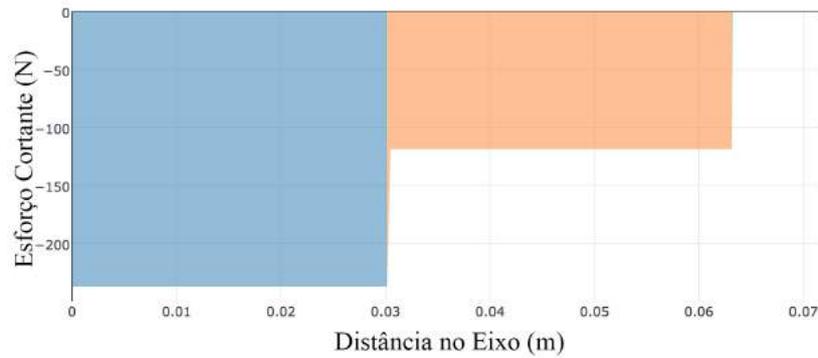


Figura 158 – Diagrama de Esforço Cortante no Encaixe da Roda Traseira

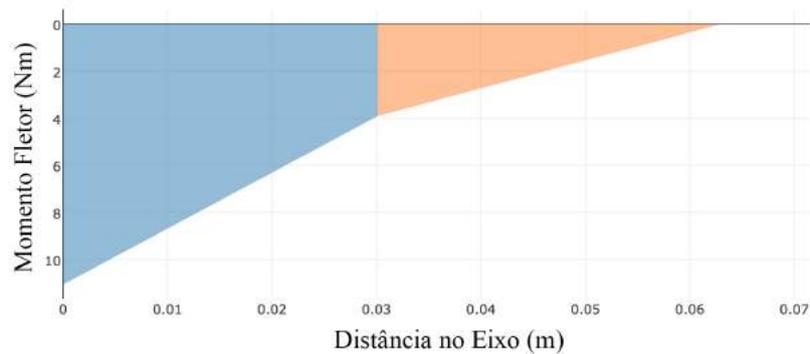


Figura 159 – Diagrama de Momento Fletor do Encaixe da Roda Traseira

Com isso, obteve-se os valores de esforço cortante máximo de 237,29N e de momento fletor máximo de 11,07Nm para a seção com diâmetro maior e de 237,29N e 7,1Nm para a seção com diâmetro menor. Dessa forma, por meio das Equações 4.15 e 4.17 obtêm-se os valores da tensão de 3,52MPa e 14,76MPa para as seções de diâmetro maior e menor, respectivamente. Assim, com uma tensão de escoamento de 42,5MPa para o ABS (material sugerido para a peça), obtêm-se um fator de segurança mínimo de 2,63 na seção mais fina.

Em seguida, essa peça foi simulada em software Ansys para verificação estrutural mais precisa e percebeu-se que nesse formato havia um concentrador de tensão significativo no início do diâmetro menor (logo após a diminuição de tamanho) que afetava o fator de segurança da peça negativamente. Assim, com as forças aplicadas como na Figura 160, resultava em um fator de segurança como mostrado na Figura 161, com valor mínimo de 1,95.

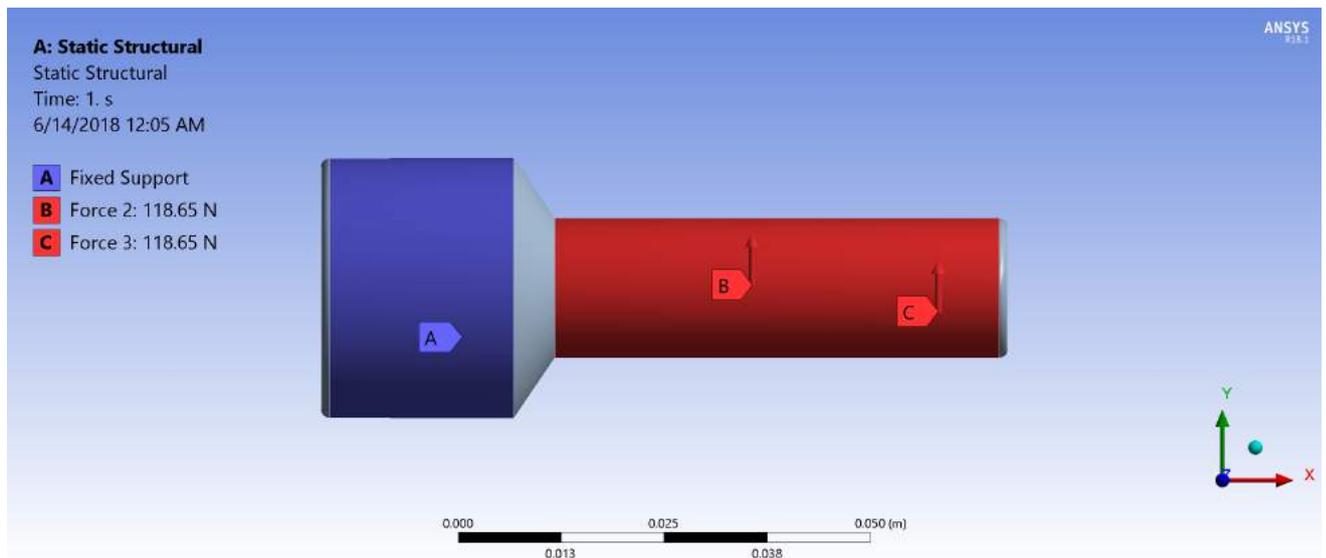


Figura 160 – Aplicação das Forças no Encaixe da Roda Traseira

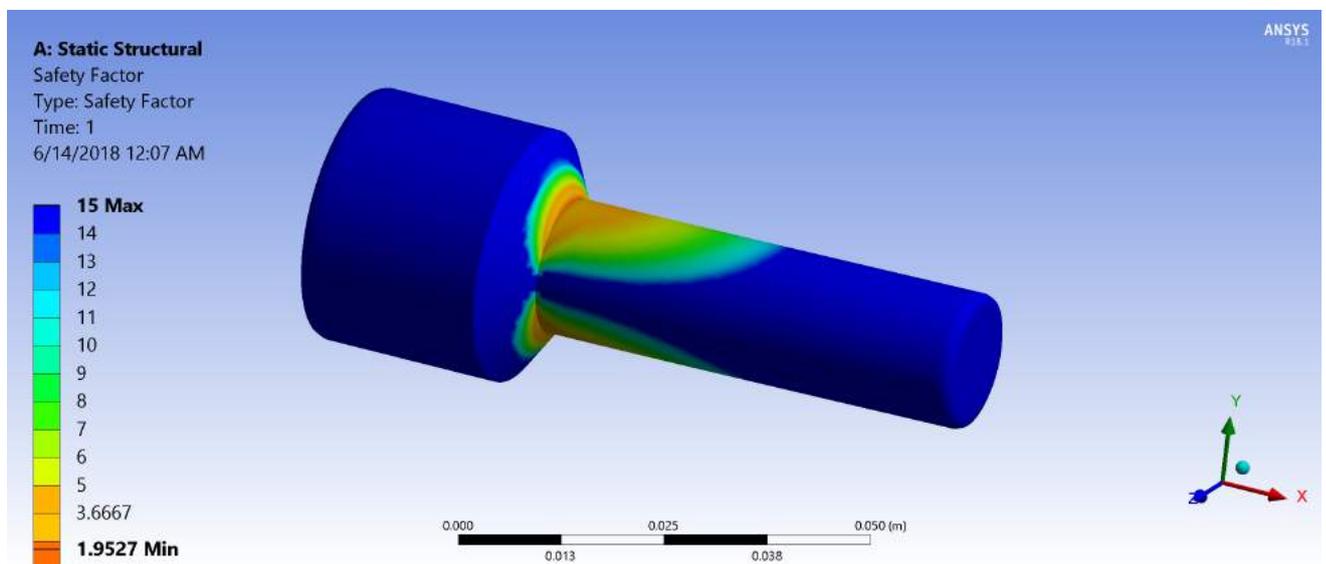


Figura 161 – Fator de Segurança Gerado no Encaixe da Roda Traseira

Portanto, foi ajustado um chanfro para diminuir o concentrador de tensão, como mostrado na Figura 162. Dessa forma, obteve-se fator de segurança mostrado na Figura 163 onde o valor mínimo é mais alto (3,25) mantendo o mesmo material. Logo, essa configuração se mostrou suficiente para suportar os esforços sobre a roda sem aumentar significativamente o custo de produção da peça ou o peso.

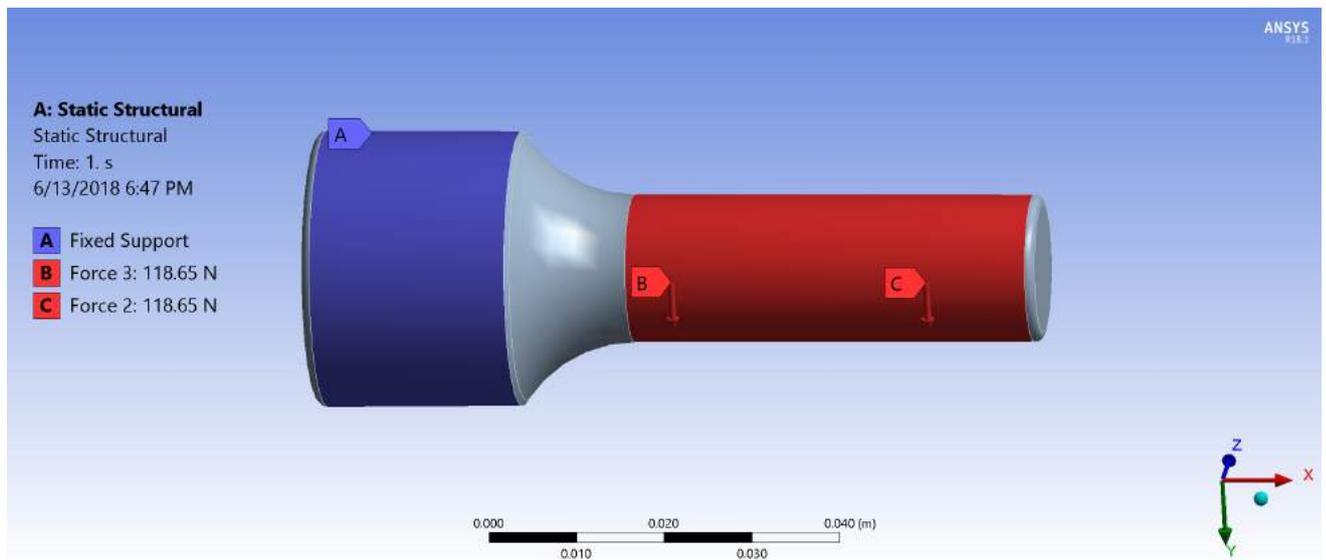


Figura 162 – Aplicação das Forças no Encaixe da Roda Traseira com Fillet

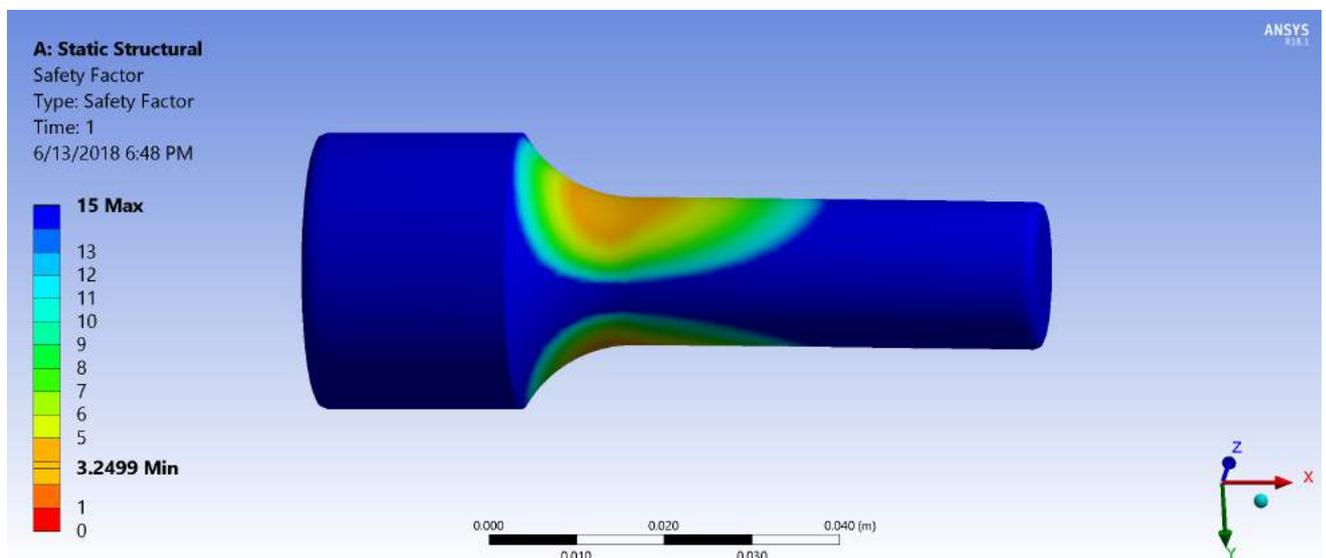


Figura 163 – Fator de Segurança Gerado no Encaixe da Roda Traseira com Fillet

8.3 Garfo da Roda Frontal

Buscando uma cadeira de rodas leve e eficiente, a estrutura do garfo da roda frontal foi analisada ao se perceber um possível super dimensionamento da mesma. Assim, a estrutura original (que foi utilizada em todas as simulações realizadas anteriormente) foi simulada em Ansys onde se encontrou valores de deflexão e fator de segurança apresentados nas Figuras 164 e 165.

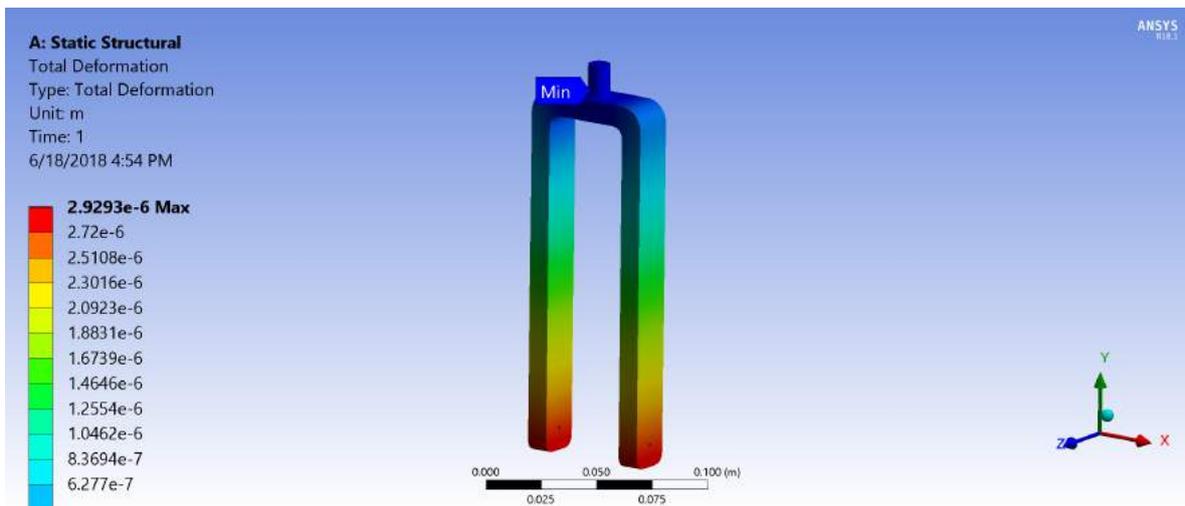


Figura 164 – Deflexão Sofrida pelo Garfo da Roda Frontal

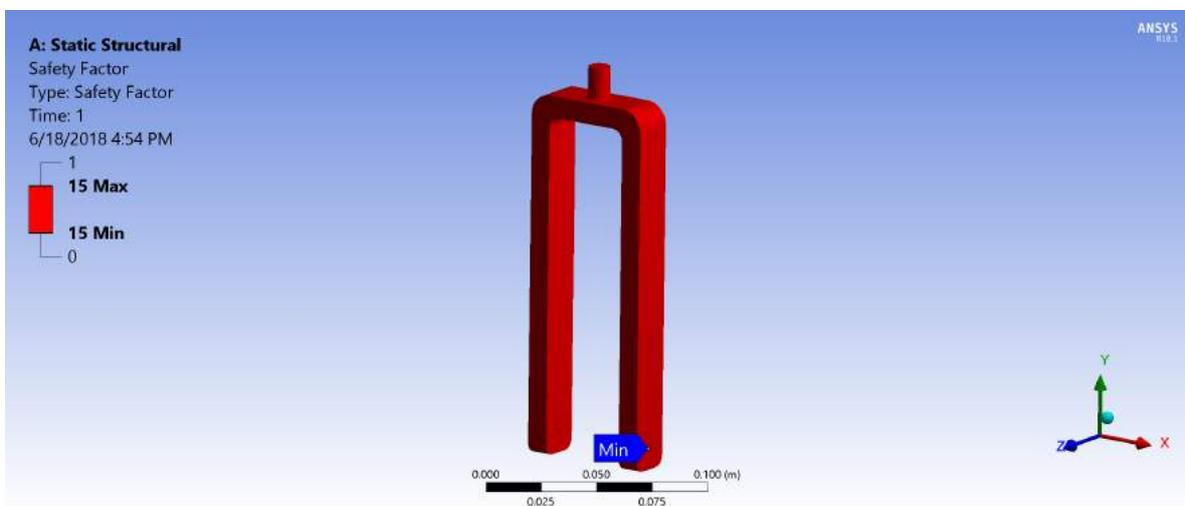


Figura 165 – Fator de Segurança na Estrutura do Garfo da Roda Frontal

Dessa forma, percebe-se uma estrutura de fato super dimensionada com deflexão máxima de praticamente zero e um fator de segurança muito elevado. Assim, desenhou-se uma estrutura mais fina para diminuir custos e peso na cadeira de rodas. Encontrou-se, então, as Figuras 166 e 167 para a deflexão e fator de segurança, respectivamente.

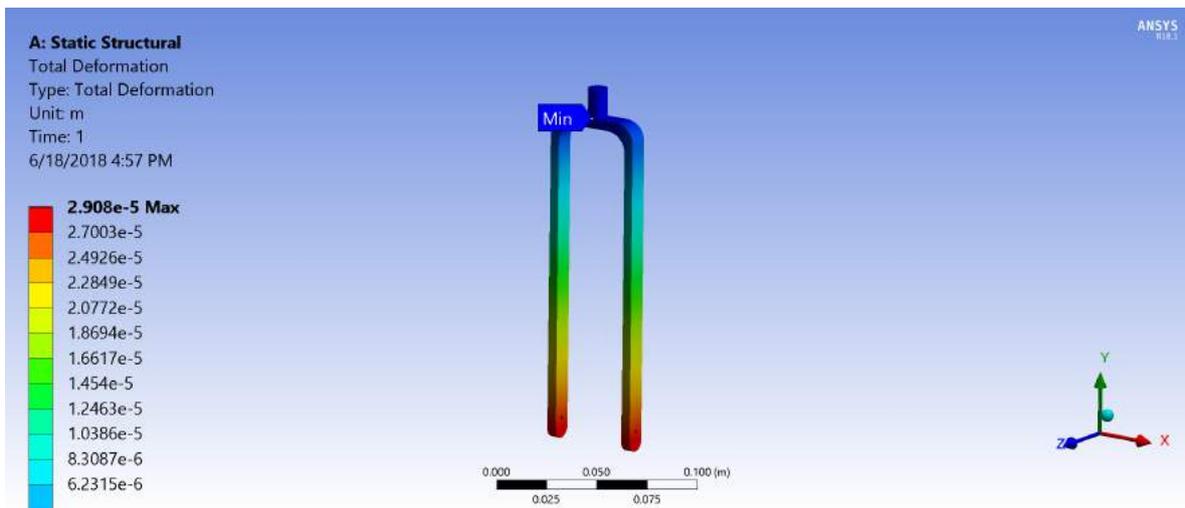


Figura 166 – Deflexão Sofrida pela Estrutura Modificada do Garfo da Roda Frontal

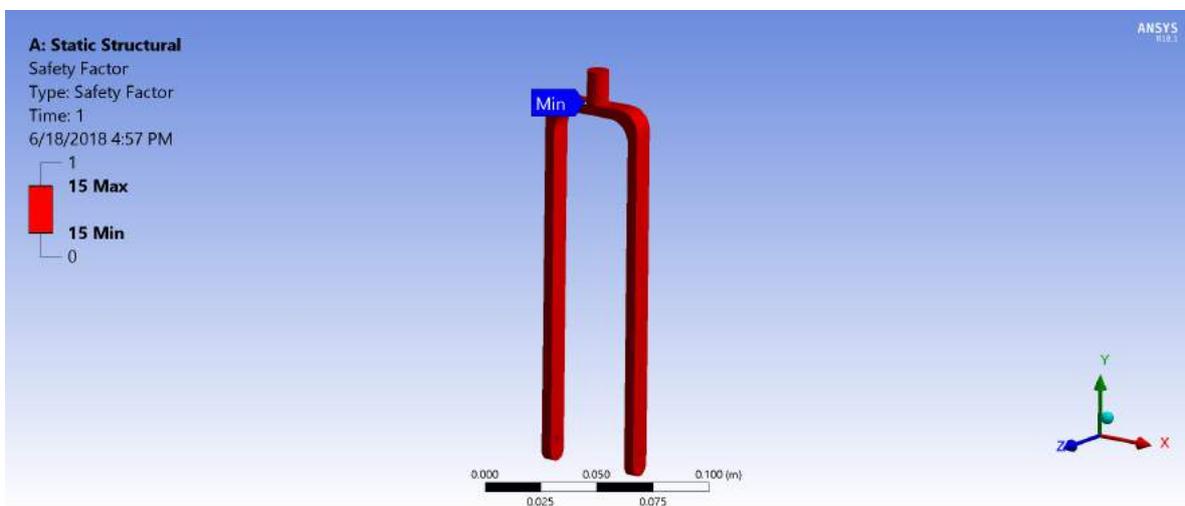


Figura 167 – Fator de Segurança na Estrutura Modificada do Garfo da Roda Frontal

No entanto, verifica-se que essa mudança continua gerando valores altos de fator de segurança e de deflexão. Portanto, substituiu-se o material do garfo para ABS, o que diminui muito o peso da peça e o custo. Obteve-se valores de deflexão na Figura 168 e fator de segurança na Figura 169.

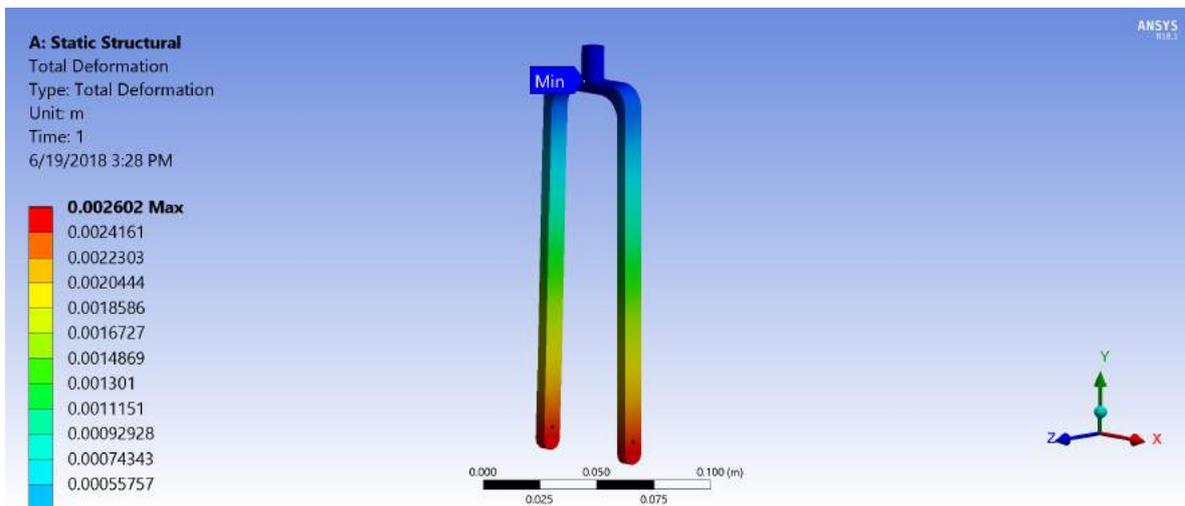


Figura 168 – Deflexão Sofrida pela Estrutura do Garfo da Roda Frontal em ABS

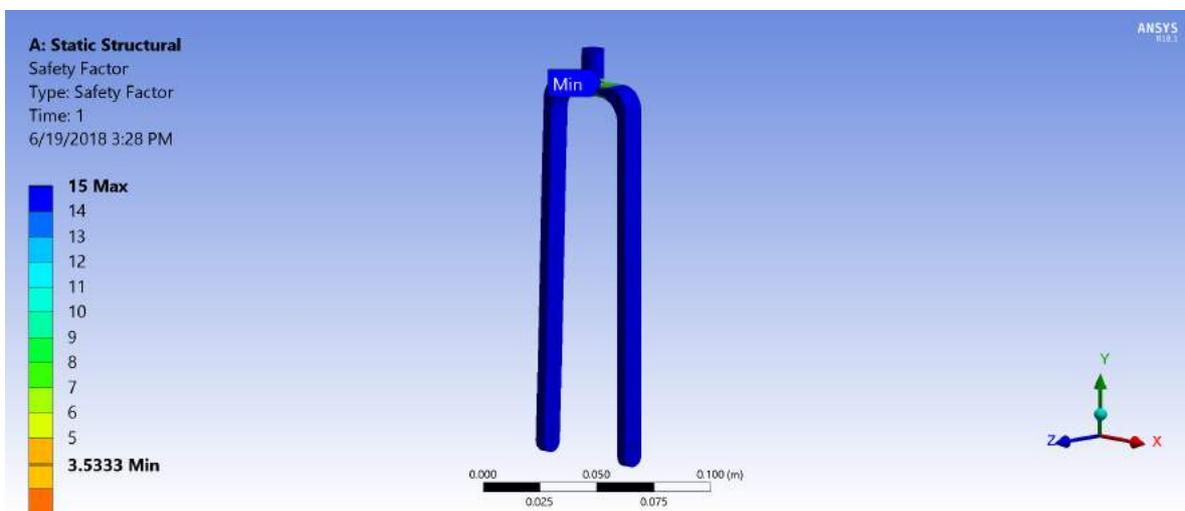


Figura 169 – Fator de Segurança no Garfo da Roda Frontal em ABS

Percebeu-se valores mais razoáveis de deformação e um valor de fator de segurança mínimo (3,53) aceitável e portanto, manteve-se essa versão.

9 Montagem e Manutenção

9.1 Definição das Medidas

Para a montagem dessa cadeira de rodas, é necessário definir as dimensões do usuário com cuidado. Para realizar as medidas, pedir à criança que se sente de maneira mais ereta possível e com os pés apoiados no chão ou em blocos de apoio. Utilizar então uma trena e usar uma prancheta ou livro em cada extremidade das medidas destacadas na Figura 170 para colaborar com a obtenção de um valor preciso (OMS, 2012). As recomendações da (OMS, 2012) para medidas mais precisas é apresentada na Tabela 33.

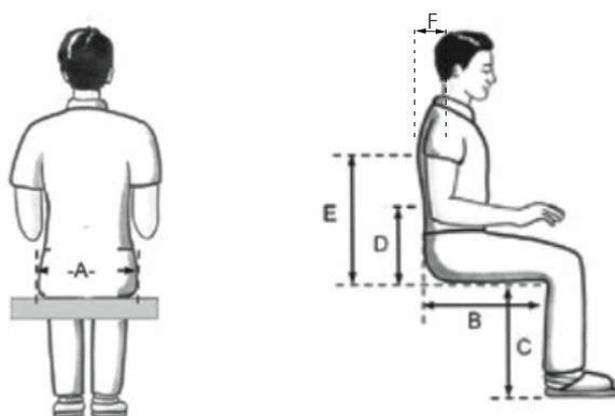


Figura 170 – Referência das Medidas do Corpo Humano para o Dimensionamento da Cadeira de Rodas. Modificado de: (OMS, 2012)

Além dessas dimensões, é necessário medir as dimensões G e H como na Figura 171 pedindo à criança que deixe os braços em posição confortável com ângulo θ entre 100° e 120° . Essa medida é mais facilmente realizada sobre uma cadeira normal sem braços para não interferir no posicionamento das mãos.

Tabela 33 – Recomendações para Medição do Corpo Humano. (OMS, 2012)

A	<ul style="list-style-type: none"> • Verifique se não há nada nos bolsos do usuário antes de medir. • Meça quadris ou a parte mais larga das coxas. • Segure duas pranchetas/livros nas laterais do usuário para ajudar a obter as medidas corretas.
B	<ul style="list-style-type: none"> • Coloque uma prancheta/livro nas costas do usuário para ajudar a obter uma medida correta. • Meça da parte traseira da pelve até atrás do joelho em uma linha reta. • Sempre meça as duas pernas. Se houver uma diferença entre as pernas, verifique se o usuário está sentado ereto com a pelve nivelada. Se ainda houver diferença, faça a prescrição da cadeira de rodas segundo o lado mais curto.
C	<ul style="list-style-type: none"> • Meça da parte de trás do joelho até a base do calcanhar. • Assegure-se de que os tornozelos do usuário estejam em um ângulo de 90 graus (se possível). • Sempre meça as duas pernas. • O usuário deve estar com os sapatos que usa com maior frequência (se houver).
D	<ul style="list-style-type: none"> • Meça do assento até a última costela. • Para ajudar a encontrar a última costela, coloque as mãos de ambos os lados da pelve. Aperte ligeiramente as mãos para dentro e deslize-as para cima. A última costela é logo acima da cintura.
E	<ul style="list-style-type: none"> • Meça do assento até o ângulo inferior da escápula em uma linha vertical. • Para ajudar a encontrar o ângulo inferior da escápula, peça que o usuário encolha os ombros.

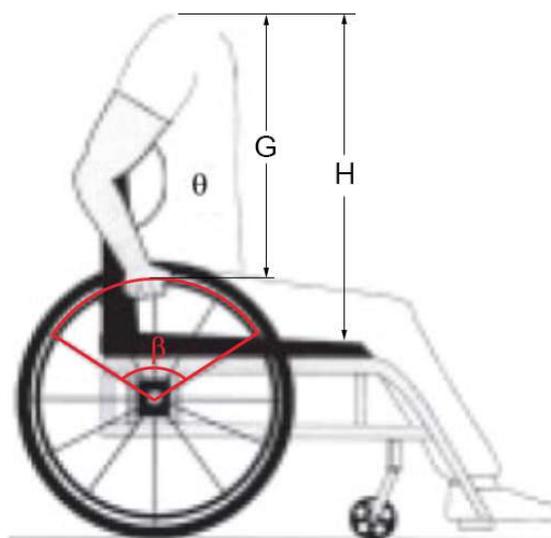


Figura 171 – Ângulo do Cotovelo (θ) e Ângulo de Contato com o Aro de Propulsão (β). Modificado de (MEDOLA, 2013)

Com isso, preencher a Tabela 34 para obter as dimensões necessárias da cadeira de rodas.

Tabela 34 – Transformar as Medidas do Corpo em Dimensões da Cadeira de Rodas

Parte da Cadeira	Medida do Corpo (mm)	Transforme a Medida do Corpo na Medida da Cadeira de Rodas
Profundidade do Assento	Final das costas até a fossa poplítea (B)	Profundidade do Assento = $B - 40\text{mm}$
Largura do Assento	Largura do quadril (A)	Largura do Assento = $A + 20\text{mm}$
Altura do Encosto	Altura da última costela (D) ou altura do ângulo inferior da escápula (E)	Altura do Encosto = D ou E + altura da almofada
Altura do Apoio de Pé	Comprimento da Perna (C)	Altura do Apoio de pé = C - altura da almofada
Posição Horizontal das Rodas Traseiras	Distância entre o ombro e as mãos com braço dobrado (G) e Altura do Ombro (H)	Distância entre o assento e o centro da roda traseira = raio da roda - altura do assento + G - H
Posição Vertical das Rodas Traseiras	Espessura do Ombro (F)	Distância do Eixo Vertical da Roda Traseira para o Encosto = Espessura do Ombro (F) + Espessura do Encosto

9.2 Contagem dos Componentes Necessários

A contagem dos componentes mecânicos é dependente das dimensões do corpo do usuário e a quantidade de componentes necessária é um valor mutável. Portanto, foi elaborado um código em MatLab para determinação precisa da lista de materiais necessários. O comprimento do tubo de PVC necessário é dado pelo código apresentado no Apêndice B.1, a quantidade de tubos internos de alumínio é dado pelo Apêndice B.2 e a quantidade de parafusos pelo Apêndice B.3.

Assim, para a configuração testada foram encontrados valores de 6,73m de tubo de PVC rosqueável (o que significa a necessidade de comprar dois tubos de 6m), 24 tubos internos de alumínio e 58 parafusos.

9.3 Montagem

A montagem da cadeira de rodas baseada nas dimensões encontradas por meio da Tabela 34 deve ser realizada da seguinte forma:

1. Montar as seis barras com a dimensão da largura do assento utilizando os tubos internos de alumínio e os tubos externos de PVC. As dimensões podem ser ajustadas pelo posicionamento do furo do parafuso.
2. Evitar colocar dois tubos internos encostados. Deixar pelo menos um espaço entre dois tubos internos subseqüente.
3. Montar os dois tubos com as dimensões da profundidade do assento.

4. Montar os quatro tubos com as dimensões da altura do encosto.
5. Colocar dois tês curtos em duas das barras de largura do assento (dois tês em cada barra).
6. Posicionar os dois joelhos duplos de aço e enroscar um dos tubos de largura de assento com os tês nos dois. Verificar o alinhamento dos dois joelhos.
7. Posicionar as duas barras laterais dos assentos enroscando no joelho duplo de aço.
8. Colocar os quatro tês duplos nos tubos laterais tomando cuidado com a direção que os dois devem ter: o primeiro a entrar deve permitir uma aba para baixo e uma na direção do assento e o segundo a entrar deve ter uma aba em direção ao assento e uma para cima, ambos alinhando os furos com os furos dos tubos externos.
9. Colocar as duas barras da largura do assento nos quatro tês duplos colocados.
10. Colocar as quatro barras de altura de assento nos dois tês curtos e dois joelhos duplos de aço.
11. Posicionar um tê curto em cada uma das duas barras de altura externa.
12. Rosquear um joelho duplo em cada uma das duas barras de altura do assento externas. Verificar o alinhamento deles deixando uma aba voltada para a outra barra externa e uma aba voltada para a parte de trás da cadeira de rodas.
13. Rosquear a última barra de largura de assento com os dois tês curtos nos joelhos e os tês nas barras de altura de encosto centrais.
14. Colocar dois tubos de 15cm com rosca em um dos lados nas abas restantes dos joelhos duplos superiores para servir de manopla.
15. Montar as duas barras de suporte das rodas traseiras com dois tubos de 15cm com rosca em um dos lados e um tubo interno fazendo a conexão entre os dois.
16. Colocar um tê com uma rosca em cada uma das barras de suporte da roda traseira.
17. Nos dois tês curtos nas laterais do assento mais próximos do encosto, rosquear as barras de suporte da roda traseira.
18. Na parte inferior das duas barras de suporte da roda traseira rosquear um joelho duplo deixando uma das abas voltada para a outra lateral da cadeira e a outra aba voltada para a parte frontal da cadeira.
19. Colocar uma barra de largura do assento entre os dois joelhos duplos recém instalados.
20. Rosquear um tubo de 13cm com rosca nos dois lados em cada joelho duplo.

21. Colocar um joelho simples nos tubos de 13cm com o outro lado voltado para cima.
22. Colocar um tubo de 15cm em cada joelho.
23. Rosquear um joelho duplo ao final de cada tubo de 15cm se preocupando em alinhar uma das abas voltadas para a outra lateral da cadeira e a aba restante voltada para a frente da cadeira de rodas.
24. Encaixar a última barra de largura do assento entre os dois joelhos duplos.
25. Colocar um tubo de 15cm para cada joelho duplo.
26. Posicionar um tê rosqueado ao final de cada tubo de 15cm com o lado individual para cima.
27. Colocar uma barra de 15cm na parte de cima de cada tê rosqueado com um prendedor de apoio de pé.
28. Colocar um joelho entre a lateral da cadeira de rodas e o tubo de 15cm.
29. Colocar um joelho no final do tê rosqueado com a ajuda de um tubo curto rosqueado.
30. Colocar a roda frontal no seu eixo com os dois rolamentos montados sobre o eixo (rolamentos posicionados entre a roda e o eixo).
31. Montar o garfo por cima da roda frontal encaixando no eixo.
32. Posicionar o suporte da roda frontal no garfo e montar o rolamento horizontal nele.
33. Colocar o mancal sobre o rolamento e rosqueá-lo no joelho roscado na cadeira de rodas.
34. Montar o apoio de pé com a quantidade de tubos necessária para se obter a dimensão estabelecida para o apoio de pé e com o apoio de pé rosqueado ao final.
35. Colocar os apoios de pé no prendedor de apoio de pé e prendê-los na posição correta.
36. Montar duas barras de apoio de braço com comprimento igual a distância do encosto até o tê duplo da lateral da cadeira de rodas.
37. Rosquear as duas barras de apoio de braço no tê curto colocado nas barras de altura do encosto e num joelho rosqueável.
38. Rosquear um tubo com rosca de um lado no joelho e posicioná-lo sobre o tê duplo do assento.
39. Passar um pino travante para prender o tubo no tê duplo.
40. Rosquear o apoio de roda traseira nos tês posicionados na barra de suporte da roda traseira.

41. Posicionar os dois rolamentos sobre cada apoio de roda traseira.
42. Prender a roda traseira sobre os dois rolamentos de cada lado.
43. Verificar que todas as dimensões estão corretas como esperado/necessário.
44. Verificar que todos os locais que precisam de parafuso estão com o devido parafuso.
45. Verificar o alinhamento das peças e a firmeza de todas as roscas.
46. Colocar as almofadas do assento e do encosto e cobrir os apoios de braço com as devidas almofadas.

9.4 Manutenção

Para estender a vida da cadeira de rodas é necessária a manutenção frequente dos componentes e do sistema de acordo com o quadro de manutenção apresentado na Tabela 35.

Tabela 35 – Quadro de Manutenção

Periodicidade	Atividades
Semanalmente	Verificar o nível de pressão dos pneus. Limpeza.
Mensalmente	Inspecionar peças da cadeira. Checar trava da cadeira.
A cada 3 meses	Verificar aperto dos parafusos. Verificar estabilidade dos apoios de braço e pé. Checar integridade do assento e encosto.
Anualmente	Verificar adequação das dimensões da cadeira. Verificar lubrificação dos rolamentos.

Nível de Pressão dos Pneus: Assegurar que a pressão interna dos pneus das rodas traseiras é de 750kPa (7,5 bar) ou 108 psi e que não há nenhum furo no pneu.

Inspecionar Peças: Verificar que não há nenhuma trinca ou falha nas peças da cadeira de rodas. Atenção redobrada aos furos com parafusos e apoios de pé.

Trava: Inspecionar os componentes da trava, certificando que todos os parafusos estejam apertados e que quando acionada a trava, ela esteja embutida pelo menos 3mm no pneu.

Apoios de Braço e Pé: Verificar os parafusos nos apoios e certificar que eles estejam estáveis e sem permitir movimentação não desejada.

Assento e Encosto: Observar o estofamento para garantir que não haja defeitos e/ou rasgos no tecido.

10 Custos

Foi feito uma estimativa do custo total da cadeira de rodas. Para tal, o orçamento foi separado em peças fabricadas e adquiridas.

10.1 Peças Adquiridas

Os custos das peças adquiridas foi obtido por meio de orçamento com empresas especializadas e são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 – Tabela de Custos de Peças Compradas

Peça	Quantidade	Custo Individual (R\$)	Preço (R\$)
Parafuso M3x40	42	25,00 (Pacote com 50)	25,00
Parafuso M3x45	18	13,00 (Pacote com 25)	13,00
Tubo PVC Roscável 1	6,73 m	104,00 (6m)	117,00
Rodas Traseiras Baxmann	2	78,00	156,00
Roda Frontal	2	29,85	59,70
Joelho Rosca PVC	6	3,52	21,12
Tê Rosca PVC	2	8,70	17,4
Trava	2	45,00	90,00
Rolamento SKF W61903 R-2Z	4	39,00 (Kit com 4)	39,00
Rolamento SKF W60/2.5R	4	2,50	10,00
Rolamento SKF W6000-2Z	2	4,60	9,20
Assento	1	82,00	82,00

10.2 Peças Fabricadas

Para as peças fabricadas levou-se em conta o custo por hora de utilização da máquina para um torno CNC = R\$ 121,20/hora (TOBIAS, 2009), o custo de um operador mecânico para as máquinas, também em horas (R\$ 140,00/hora) (SINDIREPA PR,).

O custo do material do apoio de pé, abraçadeira e garfo foi calculado de forma aproximada utilizando o preço de uma barra do material utilizado e comparando o volume da peça fabricada com o volume da barra. No caso dos eixos e tubos, no entanto, foi utilizado o preço da barra de metal com o diâmetro logo acima do que é necessário para

o projeto, considerando que este será usinado para reduzir a barra até o diâmetro de projeto. Os custos para as peças fabricadas são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 – Tabela de Custos de Peças Produzidas

Peça	Quantidade	Custo Individual (R\$)	Preço (R\$)
Tubo Interno de Alumínio	24*15cm	10,6	254,40
Tubo Externo Apoio Pé	4*15cm	5,40	21,60
Apoio Pé	2	50,00	100,00
Joelho Duplo ABS	6	7,35	44,10
Joelho Duplo Aço	2	30,00	60,00
Tê Curto	6	4,62	27,72
Tê Duplo	4	5,17	20,68
Tê com 1 rosca	2	7,14	14,28
Abraçadeira Apoio Pé	2	21,00	42,00
Encaixe Roda Traseira	2	4,20	8,40
Garfo	2	13,00	26,00
Eixo Roda Frontal	2	5,00	10,00

Dessa forma, o custo total da cadeira de rodas (na configuração crítica) é de R\$ 1268,60. Apesar de ainda ser um custo elevado é inferior a média de mercado para cadeira de rodas infantis (cerca de 1500 reais) mesmo tendo durabilidade maior e não sendo uma produção em massa. No entanto, em busca de reduzir esse preço ainda mais, se recomenda a simulação completa com tubos de PVC roscável de diâmetro menor, onde se verificou que o preço é muito inferior proporcionalmente, e a substituição das barras internas de alumínio por tubos.

Além disso, como foi mencionado no início do trabalho (Seção 5.4.1) é possível ainda a substituição das rodas traseiras por rodas experimentais feitas com tubos de cobre, peças em impressão 3D e tubos de PVC. No entanto, esse modelo deve ainda ser projetado em SolidWorks, simulado por elementos finitos e prototipado. Caso essa roda seja funcional, tem potencial para reduzir também os custos.

Além disso, destaca-se a necessidade de ainda realizar testes de fadiga e de impacto, propostos pela norma ABNT NBR ISO 7176:8 (ABNT, 2009b) que pode gerar modificações em alguns materiais e/ou componentes.

11 Conclusão

O objetivo proposto para o trabalho foi o de projetar uma cadeira de rodas modular, ou seja, com ajuste de dimensão para acompanhar o crescimento de crianças sem que haja a necessidade de substituição da cadeira com muita frequência com um custo acessível.

Em uma etapa preliminar foi desenvolvido o projeto conceitual de uma cadeira de rodas modular, ou seja, foram analisadas alternativas e os requisitos para uma boa aceitação do produto final. Foi feita uma pesquisa das soluções existentes no mercado, desde os primeiros registros de projetos de cadeira de rodas até as soluções mais recentes, com foco nos sistemas que apresentam ajustes de dimensão. Além disso, um estudo ergonômico das características necessárias que a cadeira de rodas deve fornecer foi realizado para que o usuário se sinta confortável e, portanto, utilize o produto de forma contínua.

Em seguida, foi proposta uma solução de geometria, onde se determinou diversos componentes necessários para a cadeira de rodas, como as rodas, a trava e o assento. Em seguida, a estrutura da cadeira de rodas foi projetada estaticamente utilizando-se o programa Ansys® de acordo com a norma ABNT NBR ISO 7176:8 (ABNT, 2009b).

Durante as simulações, diversas modificações na estrutura da cadeira de rodas foram realizadas para se adaptar as forças aplicadas e manter deflexões na estrutura que não causassem prejuízo na utilização e no conforto e fatores de segurança acima de 3,25. Além disso, elementos cruciais do sistema foram dimensionados como os parafusos, suportes das rodas e os rolamentos. Por fim, foi elaborado um manual para potenciais usuários com definições das medidas necessárias para que a cadeira de rodas seja apropriada a cada um, lista de materiais necessários além da montagem e manutenção.

Portanto, chegou-se ao modelo proposto na Figura 172 que atende aos requisitos de projeto, ou seja, possui baixo custo, dimensões adaptáveis, suporte postural, atende às necessidades do ambiente e do usuário, é segura e durável, possui dimensões máximas inferiores ao limite estabelecido (1050 mm de comprimento e 750 mm de largura) e é adequada para terrenos irregulares. No entanto, a cadeira de rodas realizada não é facilmente compactada como alguns usuários preferem (não é dobrável), mas pode ser compactada graças às roscas na estrutura, apesar de ser um processo um pouco mais difícil.

O preço total, fator principal do projeto, de construção de um protótipo é de R\$



Figura 172 – Modelo Final da Cadeira de Rodas Modular

1268,60 o que está um pouco abaixo da média de mercado que oscila próximo R\$ 1500,00 para uma cadeira de rodas infantil que proporcione suporte postural adequado. Apesar disso, o custo ainda é mais elevado do que se esperaria no projeto e, portanto, algumas melhorias podem ser realizadas para diminuir esse custo em trabalhos futuros. A massa total é de 13,9 kg, incluindo todos os componentes, o que está próximo à valores de mercado onde uma cadeira de rodas infantil adequada possui massa entre 10 kg e 15 kg.

11.1 Trabalhos Futuros

Durante a análise percebe-se que ainda existem diversos pontos para melhorar este projeto, uma vez que se trata de uma estrutura complexa com diversas possibilidades de funcionamento. Com a análise dos custos, percebe-se que ainda existem alguns fatores que podem ser modificados para diminuir o custo final do produto (especialmente considerando os requisitos do projeto e seu público alvo). Dessa forma, considerando os pontos de maior custo, pode-se sugerir as seguintes soluções para o aperfeiçoamento do projeto:

Utilização apenas de tubos de PVC roscável (sem barras internas de alumínio) e luvas para aumento da dimensão

Roda traseira apresentada na seção 5.4.1

Construção de um protótipo para mais testes e melhorias no sistema de montagem

Substituição das barras internas de alumínio por tubos internos com espessura suficiente para suportar os esforços

Dimensionamento de uma cadeira de rodas para adolescentes/adultos com o mesmo princípio

Referências

- ABERGO. *O que É a Ergonomia*. 2017. Acesso: 13 de novembro de 2017. Disponível em: <http://www.abergo.org.br/internas.php?pg=o_que_e_ergonomia>. Citado na página 18.
- ABNT. *NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos*. Rio de Janeiro, 2004. 97 p. Citado na página 21.
- ABNT. *NBR ISO 7176:7: Cadeiras de rodas. parte 7: Medição de dimensões de assentos e rodas*. Rio de Janeiro, 2009. 53 p. Citado 3 vezes nas páginas 3, 21 e 27.
- ABNT. *NBR ISO 7176:8: Cadeiras de rodas. parte 8: Requisitos e métodos de ensaio para a força estática, de impacto e fadiga*. Rio de Janeiro, 2009. 56 p. Citado 25 vezes nas páginas iii, iv, viii, ix, xii, 2, 4, 57, 58, 63, 76, 79, 96, 97, 99, 100, 105, 107, 108, 110, 112, 113, 118, 134 e 135.
- ABNT. *NBR ISO 7176:26: Cadeiras de rodas. parte 26: Vocabulário*. Rio de Janeiro, 2016. 56 p. Citado na página 104.
- ARAUJO, C. C. de. *Trajectoria do Centro de Massa na Marcha Humana Normal em Ambiente Aquático*. Curitiba: [s.n.], 2006. Citado 3 vezes nas páginas vi, xi e 41.
- ASM. *AISI Type 304 Stainless Steel*. [S.l.], 2018. Citado na página 119.
- BECKER, M. Modelagem biomecânica do acionamento de cadeiras de rodas manuais. In: *II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. [S.l.: s.n.], 2002. Citado 4 vezes nas páginas vi, 37, 38 e 39.
- BHASKARAN, R. *A Hands-on Introduction to Engineering Simulations*. 2018. Acesso: 15 de abril de 2018. Citado 3 vezes nas páginas vii, 76 e 77.
- BLOCO AUTOCAD. *Acessibilidade - Homem de Cadeira de Rodas*. 2015. Acesso: 14 de outubro de 2017. Disponível em: <<http://blocoautocad.com/acessibilidade-homem-de-cadeira-de-rodas/>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 27.
- BLOSWICK, D. *II Anthropometry*. 2015. Material do Curso Ergonomics 5100/6100. Citado na página 19.
- BLOSWICK, D. *Module 2 - Anthropometry*. 2015. Slides do Curso Ergonomics 5100/6100 - Slides. Citado 4 vezes nas páginas vi, 18, 19 e 20.
- BRITISH BROADCASTING CORPORATION. *A History of the World*. 2017. Acesso: 8 de setembro de 2017. Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/ahistoryoftheworld/objects/qcI7cMgiR0qmLnD{_}QPy>. Citado na página 8.

- CARRIEL, I. R. R. *Recomendacoes Ergonomicas para o Projeto de Cadeira de Rodas: Considerando os aspectos fisiologicos e cognitivos dos idosos*. Bauru, SP: [s.n.], 2007. Citado 7 vezes nas páginas v, vi, 1, 8, 9, 12 e 32.
- CARRIEL, I. R. R. *Recomendacoes Tecnologicas de Projeto para o Desenvolvimento de Cadeira de Rodas de Propulsao Manual: Uma proposta para ampliar o grau de mobilidade dos cadeirantes a partir do design*. Sao Paulo: [s.n.], 2014. Citado 10 vezes nas páginas vi, xi, xviii, 25, 27, 29, 32, 47, 48 e 162.
- CHATELAIN, C. *Louis XIV, roi de France, a 75 ans*. 1713. Acesso: 3 de setembro de 2017. Disponível em: <https://www.altesses.eu/princes_max.php?image=3aff8a1933>. Citado 2 vezes nas páginas v e 7.
- CRANACH, L. *The Fountain of Youth*. 1546. Acesso: 3 de setembro de 2017. Disponível em: <http://lucascranach.org/DE_smbGG_593>. Citado 2 vezes nas páginas v e 6.
- DIERUF, K.; EWER, L.; BONINGER, D. The natural-fit handrim: Factors related to improvement in symptoms and function in wheelchair users. *Journal of Spinal Cord Medicine*, v. 31, n. 5, p. 578–585, 2008. Citado 2 vezes nas páginas vi e 30.
- ENGINEERS EDGE. *Common Plastic Molding Design Material Specifications*. 2018. Acesso: 19 de junho de 2018. Disponível em: <https://www.engineersedge.com/plastic/materials_common_plastic.htm>. Citado na página 75.
- FASTENAL INDUSTRIAL AND CONSTRUCTION SUPPLIES. *Technical Reference Guide*. [S.l.], 2005. Citado na página 119.
- FAUPIN, A.; CAMPILLO, P.; WEISSLAND, T.; GORCE, P.; THEVENON, A. The effects of rear-wheel camber on the mechanical parameters produced during the wheelchair sprinting of handibasketball athletes. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Superintendent of Documents, v. 41, n. 3B, p. 421, 2004. Citado na página 25.
- FREE WHEELCHAIR MISSION. *GEN 1*. 2017. Acesso: 15 de outubro de 2017. Disponível em: <<https://www.freewheelchairmission.org>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 12.
- DA INTERNATIONAL LTD. Paul Friedrich. *Convertible Wheelchair*. 1999. US 6302429 B1, 16 de outubro de 2001. Citado 2 vezes nas páginas v e 14.
- GIRIMOI RECREACOES. *Roda de Bicicleta Infantil Aro 12*. 2018. Acesso: 30 de maio de 2018. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-822486704-roda-de-bicicleta-infantil-ar0-12-varias-cores-caiaque-_JM>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 65.
- INDEMEDICAL. *D's lock*. 2018. Acesso: 4 de junho de 2018. Disponível em: <https://www.indemedical.com/Ds-Locks_p_2767.html>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 54.
- INDIVIDUAL ABILITIES IN MOTION. *Wheelchairs Throughout the Years*. 2016. Acesso: 8 de setembro de 2017. Disponível em: <<http://individualabilities.org/blog-posts/wheelchairs-throughout-the-years/>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 9.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa de Orçamentos Familiares 2008-2009: Antropometria e estado nutricional de crianças, adolescentes e adultos no Brasil*. Rio de Janeiro, 2010. 130 p. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 58.

KAMENETZ, H. L. A brief history of the wheelchair. *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*, Oxford University Press, v. 24, n. 2, p. 205–208, 1969. Citado 4 vezes nas páginas v, 5, 6 e 7.

KARMAN HEALTH CARE. : Flexx. 2017. Acesso: 16 de outubro de 2017. Disponível em: <<https://www.karmanhealthcare.com/product/flexx-wheelchair-adjustable/>>. Citado 3 vezes nas páginas v, 14 e 15.

MAGAZINE MEDICA. *Roda Traseira Completa em Nylon Aro 24 Inflavel Pro Life*. 2018. Acesso: 30 de maio de 2018. Disponível em: <<https://magazinemedica.com.br/produtos/roda-traseira-completa-em-nylon-aro-24-inflavel-pro-life/>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 64.

MATWEB. *AISI 1020 Steel, Cold Rolled*. [S.l.], 2018. Acesso: 19 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cfffbb&ckck=1>>. Citado na página 75.

MATWEB. *Aluminum 1060-H16*. [S.l.], 2018. Acesso: 19 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=82fbbe326adc4fcc9f37a76965e99243>>. Citado na página 75.

MATWEB. *ASTM A525 Galvanized Steel*. [S.l.], 2018. Acesso: 19 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abbbf07b7f93a4c358a0ddd194f5c18be>>. Citado na página 92.

MATWEB. *Nylon 6, Unreinforced*. [S.l.], 2018. Acesso: 19 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fb48404b7e04433bb3ee3d2a0af922ff&ckck=1>>. Citado na página 75.

MATWEB. *PVC, Extruded*. [S.l.], 2018. Acesso: 19 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bb6e739c553d4a34b199f0185e92f6f7&ckck=1>>. Citado 2 vezes nas páginas xi e 89.

MAURER, C. L.; SPRIGLE, S. Effect of seat inclination on seated pressures of individuals with spinal cord injury. *Physical Therapy*, v. 84, n. 3, p. 255–261, 2004. Citado na página 22.

MEDOLA, F. O. *Projeto Conceitual e Protótipo de uma Cadeira de Rodas Servo-Assistida*. São Carlos: [s.n.], 2013. Citado 13 vezes nas páginas vi, x, 2, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 33, 34, 35 e 128.

MELCONIAN, S. *Elementos de Máquinas*. 10a edição revisada. ed. [S.l.]: Saraiva, 2012. Citado na página 68.

MOBILITY BASICS. *Manual Wheelchair Frames*. 2017. Acesso: 1 de outubro de 2017. Disponível em: <<https://mobilitybasics.ca/wheelchairs/frames>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 35.

MOTIVATION: FREEDOM THROUGH MOBILITY. *Mekong - Rough Terrain*. 2017. Acesso: 15 de outubro de 2017. Disponível em: <<https://www.motivation.org.uk/>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 13.

MOUNTAINTRIKE. 2018. Acesso: 1 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.mountaintrike.com/products/mountain-trike>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 16.

Ibrahim Abdelrahim Mohamed Nasr. *Wheelchair*. 1973. US 3937490 A, 10 de fevereiro de 1976. Citado 2 vezes nas páginas v e 14.

NORTON, R. L. *Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada*. 4a edição. ed. [S.l.]: Bookman, 2013. Citado 3 vezes nas páginas xii, 119 e 120.

OESTE MED. *Cadeira de Rodas em Alumínio (Evolution Activa Compact)*. 2018. Acesso: 31 de maio de 2018. Disponível em: <<http://oestemed.pt/loja/cadeira-de-rodas-em-aluminio-evolution-activa-compact/>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 72.

OMS. *Guidelines on the Provision of Manual Wheelchairs in Less Resourced Settings*. [S.l.], 2008. 131 p. Citado 4 vezes nas páginas 1, 3, 24 e 28.

OMS. *Pacote de Treinamento em Serviços para Cadeiras de Rodas*. [S.l.], 2012. 88 p. Citado 13 vezes nas páginas vi, x, xii, 2, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 127 e 128.

OPEN WHEELCHAIR FOUNDATION. *Open Wheelchair Gallery*. 2017. Acesso: 14 de outubro de 2017. Disponível em: <<http://www.openwheelchair.org/Gallery/>>. Citado 4 vezes nas páginas vi, vii, 31 e 73.

ORTHO PAUHER. *Anuário Ortho Pauher 2017*. [S.l.], 2017. Acesso: 14 de outubro de 2017. Disponível em: <http://www.orthopauher.com/2014/OrthoPauher_Catalogo_2017_Full.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 30.

ORTOMIX. *Freio de Alumínio Ortomix*. 2018. Acesso: 6 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.ortomix.com.br/produtos/catalogo-pecas/protetor-lateral-de-roupas/freio-de-aluminio-ortomix>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 74.

ORTOPONTO: Rodas anti tombo para cadeiras de rodas ortobras manuais. 2018. Acesso: 05 de novembro de 2017. Disponível em: <<https://www.ortoponto.com.br/produto/rodas-anti-tombo-para-cadeiras-de-rodas-ortobras-manuais-par-1604>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 52.

OTTOBOCK. *Ottobock Standard B400*. 2017. Acesso: 14 de outubro de 2017. Disponível em: <http://www.casaortopedica.com.br/loja/detalhes?produto=719&gclid=CjwKCAjw64bPBRApEiwAJhG-fDKKeZAM-0VycjKkFzkAYQjZiozoaL1rsgtwmtdhIx9ND_nKqygv9xoCRAkQAvD_BwE>. Citado 2 vezes nas páginas v e 11.

OTTOBOCK. *Start M3 Hemi*. 2017. Acesso: 16 de outubro de 2017. Disponível em: <<http://www.ottobock.co.th/neurorehabilitation/solutions/solutions-with-wheelchairs/start-m3-hemi/>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 15.

PAPUGA, D. *CTC 41 Wheelchair*. 2012. Acesso: 1 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.coroflot.com/douglaspapuga/wheelchair>>. Citado 2 vezes nas páginas vi e 17.

- LABAC SYSTEMS INC. Gregory A. Peek, William B. Lytle e John A. Dyer. *Modular Adjustable Seat Frame for Wheelchairs*. 1994. US 5564786 A, 15 de outubro de 1996. Citado 2 vezes nas páginas v e 14.
- PHEASANT, S. *Bodyspace: Anthropometry, ergonomics and the design of work*. [S.l.: s.n.], 1996. Citado na página 19.
- RAMOS, C. M. da C.; FONTES, R. da C. *Cadeira de Rodas Ortostatica*. 2017. Acesso: 14 de outubro de 2017. Disponível em: <<http://www.pessoaldesign.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 11.
- RONCHI, M. *Paradesporto*. 1a. ed. [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 9788568245026. Citado na página 10.
- SAWATZKY, B. *Wheeling in the New Millennium*. Vancouver, Canada: [s.n.], 2002. Acesso: 8 de setembro de 2017. Disponível em: <http://www.wheelchairnet.org/WCN_WCU/SlideLectures/Sawatzky/WC_history.html>. Citado na página 8.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. *Projeto de Engenharia Mecânica*. 7a edição. ed. [S.l.]: Bookman, 2005. Citado 2 vezes nas páginas vi e 44.
- SILVA, J. F. da. *Padrões de Propulsão para Cadeiras de Rodas e Seus Fatores de Desempenho*. 2009. Citado na página 18.
- SINDIREPA PR. *Tabela Referencial Preços de Serviço*. Acesso: maio de 2017. Disponível em: <<http://www.fiepr.org.br/sindicatos/sindirepa/tabela-referencial--precos-de-servicos-1-2420-150615.shtml>>. Citado na página 133.
- SKF. *Catálogo: Rolamentos de Esferas*. [S.l.], 2015. Acesso: 19 de junho de 2018. Disponível em: <http://www.skf.com/binary/82-121486/10000_2-PT-BR---Rolling-bearings.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas xi e 70.
- SKF. *Catálogo Interativo SKF*. 2018. Acesso: 2 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.skf.com/br/products/product-tables/index.html>>. Citado na página 69.
- SPORTAID. *Wheelchairs and Stuff: Wheelchair brakes*. 2018. Acesso: 25 de outubro de 2017. Disponível em: <<https://www.sportaid.com/brakes/>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 54.
- SUK, S. young; KOJIMA, H. Voice activated appliances for severely disabled persons. *Speech Recognition, Technologies and Applications*, p. 527–538, 2008. Citado 2 vezes nas páginas v e 11.
- SUNRISE MEDICAL. *EASyS Modular*. 2017. Acesso: 15 de outubro de 2017. Disponível em: <<http://www.sunrisemedical.pt/wheelchairs/zippie/strollers/easys-modular>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 13.
- THE TELEGRAPH. *Rio Paralympics 2016: Alex Zanardi pays golden homage to Ayrton Senna after winning hand-cycle time trial*. 2016. Acesso: 14 de setembro de 2017. Disponível em: <<http://www.telegraph.co.uk/paralympic-sport/2016/09/14/rio-paralympics-2016-alex-zanardi-pays-golden-homage-to-ayrton-s/>>. Citado na página 10.

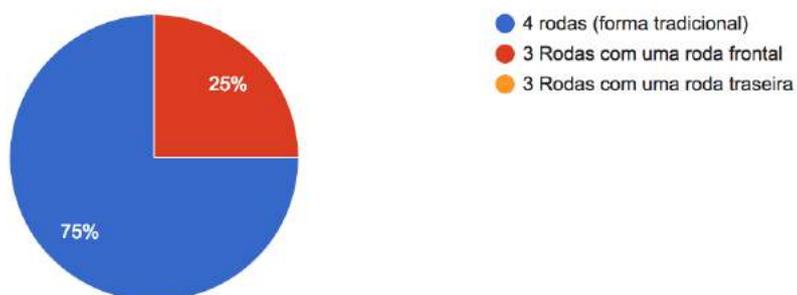
- TIGRE. *PVC-U Industrial Sch.80*. [S.l.], 2018. Acesso: 19 de junho de 2018. Disponível em: <https://www.tigre.com.br/sites/default/files/produtos/ficha-tecnica/Linha_PVC-U%20%283%29_11.pdf>. Citado na página 75.
- TOBIAS. *Tabela de Custos H/M Para Processos*. 2009. Acesso: 12 de junho de 2018. Disponível em: <<https://tobiasmugge.files.wordpress.com/2009/08/custos.pdf>>. Citado na página 133.
- TUPER. *Tabela Técnica de Produtos*. [S.l.], 2014. Acesso: 18 de junho de 2018. Disponível em: <https://www.tuper.com.br/wp-content/uploads/2014/05/tuper_tabela_tecnica.pdf>. Citado na página 92.
- TUPY. *Conexões: Catálogos técnicos*. [S.l.], 2018. Acesso: 18 de junho de 2018. Disponível em: <http://www.tupy.com.br/downloads/pdfs/conexoes/catalogo_pt.pdf>. Citado na página 92.
- UNITED NATIONS CHILDRENS FUND. *Crianças com Deficiência*. [S.l.], 2013. Citado na página 20.
- VAQUEIRO, A. J.; ERCOLINI, S. T.; ARANDA, L. S.; SIMÕES, D. Análise ergonômica da interface conjunto aluno individual de uma instituição pública municipal de ensino. In: *8º Congresso de Extensão Universitária da UNESP*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 3 vezes nas páginas xi, 19 e 20.
- VEEGER, D. H.; WOUDE, L. H. V. van der; ROZENDAL, R. H. The effect of rear wheel camber in manual wheelchair propulsion. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, v. 26, n. 2, p. 37–46, 1989. Citado na página 25.
- WATANABE, L. *Clash of the Titans 2011: Folding vs. Rigid*. 2011. Acesso: 1 de outubro de 2017. Disponível em: <<https://mobilitymgmt.com/Articles/2011/03/01/Folding-vs-Rigid>>. Citado na página 35.
- WHEELIN MOBILITY. *Tires Simplified*. 2017. Acesso: 2 de outubro de 2017. Disponível em: <http://wheelinmobility.com/wheelchair_tires_simplified_2/>. Citado 3 vezes nas páginas vi, 33 e 34.
- WINTER, A.; HOTCHKISS, R. *Mechanical Principles of Wheelchair Design*. [S.l.], 2017. Citado 4 vezes nas páginas vi, xi, 36 e 40.
- YANKO DESIGN. *ROBOTIC WHEELCHAIR WUNKERKIND!* 2009. Acesso: 1 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.yankodesign.com/2009/09/24/robotic-wheelchair-wunkerkind/>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 16.

Apêndices

A Resultado dos Questionários *on-line*

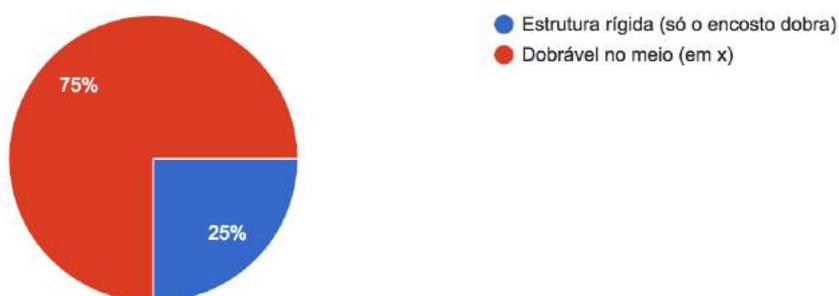
Quantas rodas você acha melhor na cadeira?

8 responses



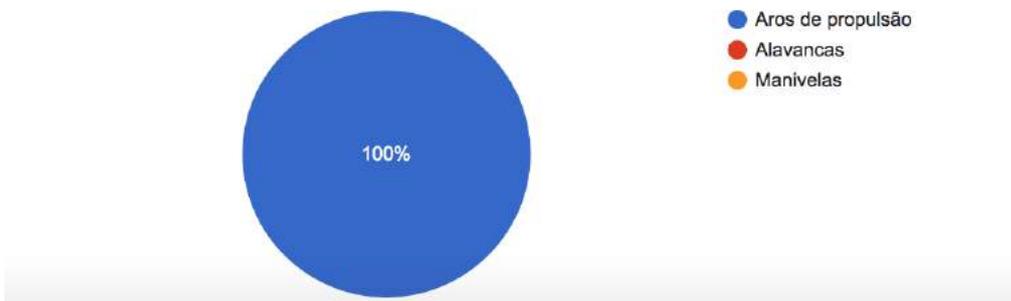
Qual estrutura você prefere na cadeira?

8 responses



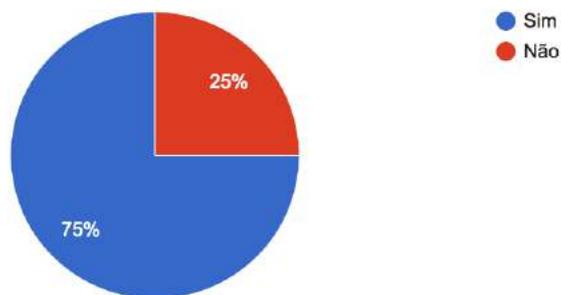
Qual a melhor forma de propulsão manual?

8 responses



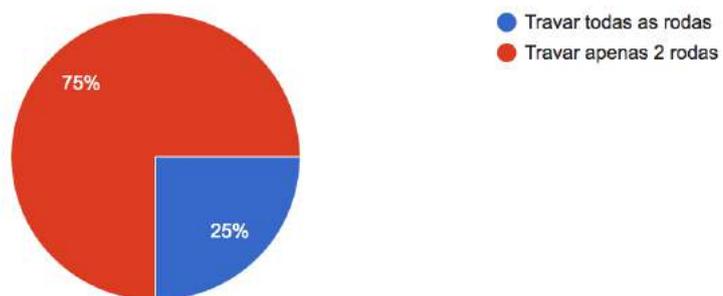
Você acha que uma roda traseira anti-tombo é necessária? Essa figura mostra uma cadeira com a roda anti-tombo.

8 responses



Você acha necessário travar todas as rodas da cadeira ou travar só duas é suficiente?

8 responses



B Código MatLab - Determinação da Quantidade de Material Necessária

B.1 Comprimento do Tubo de PVC

```
%Ana Helena Perez Costa
%Definicao do comprimento de tubo PVC necessario
clear all
clc

%% dados
larguraAssento = 42; %[cm]
ProfundidadeAssento = 39; %[cm]
encosto = 36; %[cm]
compApoioBraco = 28; %[cm]
compApoioPe = 30; %[cm]
%% largura assento
if larguraAssento == 15
Larg_TuboPVC = 15; %[cm]
elseif larguraAssento >= 16 & larguraAssento <=25
Larg_TuboPVC = 16; %[cm] dois tubos pequenos
elseif larguraAssento > 25 & larguraAssento <= 32
Larg_TuboPVC = 23; %[cm] um tubo grande e um tubo pequeno
elseif larguraAssento > 32 & larguraAssento <= 39
Larg_TuboPVC = 30; %[cm] dois tubos grandes
elseif larguraAssento > 39 & larguraAssento <= 50
Larg_TuboPVC = 38; %[cm] dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif larguraAssento > 50 & larguraAssento <= 63
```

```

Larg_TuboPVC = 45; %[cm] tres tubos grandes
else
fprintf('largura nao suportada\n')
end

%% Profundidade do assento

if ProfundidadeAssento == 15
Pro_TuboPVC = 15; %[cm]
elseif ProfundidadeAssento >= 16 & ProfundidadeAssento <=25
Pro_TuboPVC = 16; %[cm] dois tubos pequenos
elseif ProfundidadeAssento > 25 & ProfundidadeAssento <= 32
Pro_TuboPVC = 23; %[cm] um tubo grande e um tubo pequeno
elseif ProfundidadeAssento > 32 & ProfundidadeAssento <= 39
Pro_TuboPVC = 30; %[cm] dois tubos grandes
elseif ProfundidadeAssento > 39 & ProfundidadeAssento <= 50
Pro_TuboPVC = 38; %[cm] dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif ProfundidadeAssento > 50 & ProfundidadeAssento <= 63
Pro_TuboPVC = 45; %[cm] tres tubos grandes
else
fprintf('profundidade nao suportada\n')
end

%% Altura do encosto

if encosto == 15
Enc_TuboPVC = 15; %[cm]
elseif encosto == 8
Enc_TuboPVC = 8;
elseif encosto >= 16 & encosto <=25
Enc_TuboPVC = 16; %[cm] dois tubos pequenos
elseif encosto > 25 & encosto <= 32
Enc_TuboPVC = 23; %[cm] um tubo grande e um tubo pequeno
elseif encosto > 32 & encosto <= 39
Enc_TuboPVC = 30; %[cm] dois tubos grandes
elseif encosto > 39 & encosto <= 50
Enc_TuboPVC = 38; %[cm] dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif encosto > 50 & encosto <= 63

```

```

Enc_TuboPVC = 45; %[cm] tres tubos grandes
else
fprintf('altura do encosto nao suportada\n')
end

%% manopla

manopla = 15; %[cm]

%% pecas extras

pecasextras = 2*15 + 2* 9.5 + 2*4 + 2*15 + 2*13;

%% Barra roda traseira

rodatraseira = 2* 15;

%% apoio de braco

if compApoioBraco == 15
ApoioB_TuboPVC = 15; %[cm]
elseif compApoioBraco == 8
ApoioB_TuboPVC = 8; %[cm]
elseif compApoioBraco >= 16 & compApoioBraco <=25
ApoioB_TuboPVC = 16; %[cm] dois tubos pequenos
elseif compApoioBraco > 25 & compApoioBraco <= 32
ApoioB_TuboPVC = 23; %[cm] um tubo grande e um tubo pequeno
elseif compApoioBraco > 32 & compApoioBraco <= 39
ApoioB_TuboPVC = 30; %[cm] dois tubos grandes
elseif compApoioBraco > 39 & compApoioBraco <= 50
ApoioB_TuboPVC = 38; %[cm] dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif compApoioBraco > 50 & compApoioBraco <= 63
ApoioB_TuboPVC = 45; %[cm] tres tubos grandes
else
fprintf('comprimento do apoio de braco nao suportado\n')
end

ApoioB_TuboPVC = ApoioB_TuboPVC + 8;

%% apoio de pe

```

```

if compApoioPe == 15
ApoioP_TuboPVC = 15; %[cm]
elseif compApoioPe >= 16 & compApoioPe <=25
ApoioP_TuboPVC = 16; %[cm] dois tubos pequenos
elseif compApoioPe > 25 & compApoioPe <= 32
ApoioP_TuboPVC = 23; %[cm] um tubo grande e um tubo pequeno
elseif compApoioPe > 32 & compApoioPe <= 39
ApoioP_TuboPVC = 30; %[cm] dois tubos grandes
elseif compApoioPe > 39 & compApoioPe <= 50
ApoioP_TuboPVC = 38; %[cm] dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif compApoioPe > 50 & compApoioPe <= 63
ApoioP_TuboPVC = 45; %[cm] tres tubos grandes
else
fprintf('altura do apoio de pe nao suportada\n')
end

%% somatorio final PVC

tuboPVC = 6*Larg_TuboPVC + 2*Pro_TuboPVC + 4*Enc_TuboPVC +
2*manopla + pecasextras + 2*rodatraseira + 2*ApoioB_TuboPVC +
0*ApoioP_TuboPVC; %[cm]

tuboPVCm = tuboPVC/100; %[m]

fprintf('Comprimento total de tubo de PVC: %.2f m\n', tuboPVCm)

if tuboPVCm <=6
fprintf('Comprar 1 tubo de PVC rosqueavel \n')
elseif tuboPVCm >6 & tuboPVCm <= 12
fprintf('Comprar 2 tubos de PVC rosqueavel \n')
elseif tuboPVCm >12 & tuboPVCm <= 18
fprintf('Comprar 3 tubos de PVC rosqueavel \n')
elseif tuboPVCm >18 & tuboPVCm <= 24
fprintf('Comprar 4 tubos de PVC rosqueavel \n')
end

```

B.2 Quantidade de Tubos Internos

```
%Ana Helena Perez Costa
%Definicao do quantidade de tubos de alumino necessario
clear all
clc

%% dados
larguraAssento = 42; %[cm]
ProfundidadeAssento = 39; %[cm]
encosto = 36; %[cm]
compApoioBraco = 28; %[cm]
compApoioPe = 30; %[cm]
%% largura assento
if larguraAssento == 15
tuboInterno_Larg = 0;
elseif larguraAssento >= 16 & larguraAssento <=25
tuboInterno_Larg = 1; %dois tubos pequenos
elseif larguraAssento > 25 & larguraAssento <= 32
tuboInterno_Larg = 1; % um tubo grande e um tubo pequeno
elseif larguraAssento > 32 & larguraAssento <= 39
tuboInterno_Larg = 1; % dois tubos grandes
elseif larguraAssento > 39 & larguraAssento <= 50
tuboInterno_Larg = 2; %dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif larguraAssento > 50 & larguraAssento <= 63
tuboInterno_Larg = 2; %tres tubos grandes
else
fprintf('largura nao suportada\n')
end

%% Profundidade do assento

if ProfundidadeAssento == 15
tuboInterno_Pro = 0;
elseif ProfundidadeAssento >= 16 & ProfundidadeAssento <=25
tuboInterno_Pro = 1; %dois tubos pequenos
elseif ProfundidadeAssento > 25 & ProfundidadeAssento <= 32
tuboInterno_Pro = 1; % um tubo grande e um tubo pequeno
elseif ProfundidadeAssento > 32 & ProfundidadeAssento <= 39
```

```

tuboInterno_Pro = 1; %[cm] dois tubos grandes
elseif ProfundidadeAssento > 39 & ProfundidadeAssento <= 50
tuboInterno_Pro = 2; %dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif ProfundidadeAssento > 50 & ProfundidadeAssento <= 63
tuboInterno_Pro = 2; %tres tubos grandes
else
fprintf('profundidade nao suportada\n')
end

```

```

%% Altura do encosto

```

```

if encosto == 15
tuboInterno_Enc = 0;
elseif encosto == 8
tuboInterno_Enc = 0;
elseif encosto >= 16 & encosto <=25
tuboInterno_Enc = 1; %dois tubos pequenos
elseif encosto > 25 & encosto <= 32
tuboInterno_Enc = 1; %um tubo grande e um tubo pequeno
elseif encosto > 32 & encosto <= 39
tuboInterno_Enc = 1; % dois tubos grandes
elseif encosto > 39 & encosto <= 50
tuboInterno_Enc = 2; % dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif encosto > 50 & encosto <= 63
tuboInterno_Enc = 2; % tres tubos grandes
else
fprintf('altura do encosto nao suportada\n')
end

```

```

%% manopla

```

```

manopla = 0; %[cm]

```

```

%% pecas extras

```

```

pecasextras = 0;

```

```

%% Barra roda traseira

```

```

rodatraseira = 1;

%% apoio de braco

if compApoioBraco == 15
TuboInterno_ApoioB = 0;
elseif compApoioBraco == 8
TuboInterno_ApoioB = 0;
elseif compApoioBraco >= 16 & compApoioBraco <=25
TuboInterno_ApoioB = 1; % dois tubos pequenos
elseif compApoioBraco > 25 & compApoioBraco <= 32
TuboInterno_ApoioB = 1; % um tubo grande e um tubo pequeno
elseif compApoioBraco > 32 & compApoioBraco <= 39
TuboInterno_ApoioB = 1; % dois tubos grandes
elseif compApoioBraco > 39 & compApoioBraco <= 50
TuboInterno_ApoioB = 2; % dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif compApoioBraco > 50 & compApoioBraco <= 63
TuboInterno_ApoioB = 2; % tres tubos grandes
else
fprintf('comprimento do apoio de braco nao suportado\n')
end

%% apoio de pe

if compApoioPe == 15
TuboInterno_ApoioP = 0;
elseif compApoioPe >= 16 & compApoioPe <=25
TuboInterno_ApoioP = 1; %dois tubos pequenos
elseif compApoioPe > 25 & compApoioPe <= 32
TuboInterno_ApoioP = 1; % um tubo grande e um tubo pequeno
elseif compApoioPe > 32 & compApoioPe <= 39
TuboInterno_ApoioP = 1; % dois tubos grandes
elseif compApoioPe > 39 & compApoioPe <= 50
TuboInterno_ApoioP = 2; % dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif compApoioPe > 50 & compApoioPe <= 63
TuboInterno_ApoioP = 2; % %[cm] tres tubos grandes
else
fprintf('altura do apoio de pe nao suportada\n')

```

```
end
```

```
%% somatorio final tubos internos
```

```
BarrasInternas = 6*tuboInterno_Larg + 2* tuboInterno_Pro +  
4*tuboInterno_Enc + 2*manopla + pecasextras + 2*rodatraseira +  
2*TuboInterno_ApoioB +2*TuboInterno_ApoioP;
```

```
fprintf('Serao necessarias: %d barras internas de aluminio  
de 15cm de comprimento\n', BarrasInternas)
```

B.3 Quantidade de Parafusos

```
%Ana Helena Perez Costa
%Definicao do quantidade de parafusos necessario
clear all
clc

%% dados
larguraAssento = 42; %[cm]
ProfundidadeAssento = 39; %[cm]
encosto = 36; %[cm]
compApoioBraco = 28; %[cm]
compApoioPe = 30; %[cm]

%% largura assento
if larguraAssento == 15
Parafuso_Larg = 0;
elseif larguraAssento >= 16 & larguraAssento <=25
Parafuso_Larg = 2; %dois tubos pequenos
elseif larguraAssento > 25 & larguraAssento <= 32
Parafuso_Larg = 2; % um tubo grande e um tubo pequeno
elseif larguraAssento > 32 & larguraAssento <= 39
Parafuso_Larg = 2; % dois tubos grandes
elseif larguraAssento > 39 & larguraAssento <= 50
Parafuso_Larg = 4; %dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif larguraAssento > 50 & larguraAssento <= 63
Parafuso_Larg = 4; %tres tubos grandes
else
fprintf('largura nao suportada\n')
end

%% Profundidade do assento

if ProfundidadeAssento == 15
Parafuso_Pro = 0;
elseif ProfundidadeAssento >= 16 & ProfundidadeAssento <=25
Parafuso_Pro = 2; %dois tubos pequenos
elseif ProfundidadeAssento > 25 & ProfundidadeAssento <= 32
```

```

Parafuso_Pro = 2; % um tubo grande e um tubo pequeno
elseif ProfundidadeAssento > 32 & ProfundidadeAssento <= 39
Parafuso_Pro = 2; %[cm] dois tubos grandes
elseif ProfundidadeAssento > 39 & ProfundidadeAssento <= 50
Parafuso_Pro = 4; %dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif ProfundidadeAssento > 50 & ProfundidadeAssento <= 63
Parafuso_Pro = 4; %tres tubos grandes
else
fprintf('profundidade nao suportada\n')
end

```

```
%% Altura do encosto
```

```

if encosto == 15
Parafuso_Enc = 0;
elseif encosto == 8
Parafuso_Enc = 0;
elseif encosto >= 16 & encosto <=25
Parafuso_Enc = 2; %dois tubos pequenos
elseif encosto > 25 & encosto <= 32
Parafuso_Enc = 2; %um tubo grande e um tubo pequeno
elseif encosto > 32 & encosto <= 39
Parafuso_Enc = 2; % dois tubos grandes
elseif encosto > 39 & encosto <= 50
Parafuso_Enc = 4; % dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif encosto > 50 & encosto <= 63
Parafuso_Enc = 4; % tres tubos grandes
else
fprintf('altura do encosto nao suportada\n')
end

```

```
%% manopla
```

```
manopla = 0; %[cm]
```

```
%% pecas extras
```

```
pecasextras = 4 + 8;
```

```

%% Barra roda traseira

rodatraseira = 2;

%% apoio de braco

if compApoioBraco == 15
Parafuso_ApoioB = 0;
elseif compApoioBraco == 8
Parafuso_ApoioB = 0;
elseif compApoioBraco >= 16 & compApoioBraco <=25
Parafuso_ApoioB = 2; % dois tubos pequenos
elseif compApoioBraco > 25 & compApoioBraco <= 32
Parafuso_ApoioB = 2; % um tubo grande e um tubo pequeno
elseif compApoioBraco > 32 & compApoioBraco <= 39
Parafuso_ApoioB = 2; % dois tubos grandes
elseif compApoioBraco > 39 & compApoioBraco <= 50
Parafuso_ApoioB = 4; % dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif compApoioBraco > 50 & compApoioBraco <= 63
Parafuso_ApoioB = 4; % tres tubos grandes
else
fprintf('comprimento do apoio de braco nao suportado\n')
end

%% apoio de pe

if compApoioPe == 15
Parafuso_ApoioP = 0;
elseif compApoioPe >= 16 & compApoioPe <=25
Parafuso_ApoioP = 2; %dois tubos pequenos
elseif compApoioPe > 25 & compApoioPe <= 32
Parafuso_ApoioP = 2; % um tubo grande e um tubo pequeno
elseif compApoioPe > 32 & compApoioPe <= 39
Parafuso_ApoioP = 2; % dois tubos grandes
elseif compApoioPe > 39 & compApoioPe <= 50
Parafuso_ApoioP = 4; % dois tubos grandes e um tubo pequeno
elseif compApoioPe > 50 & compApoioPe <= 63
Parafuso_ApoioP = 4; % %[cm] tres tubos grandes

```

```
else
fprintf('altura do apoio de pe nao suportada\n')
end

%% somatorio final parafusos

ParafusosTotais = 6*Parafuso_Larg + 2* Parafuso_Pro +
4*Parafuso_Enc + 2*manopla + pecasextras +
2*rodatraseira + 2*Parafuso_ApoioB + 2*Parafuso_ApoioP;

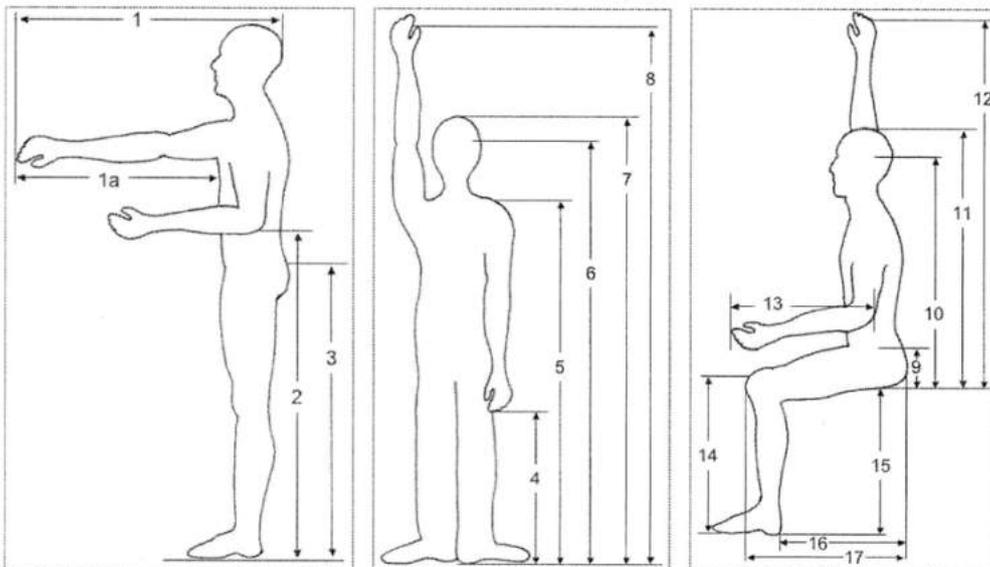
fprintf('Serao necessarios: %d parafusos \n',ParafusosTotais)
```

Anexos

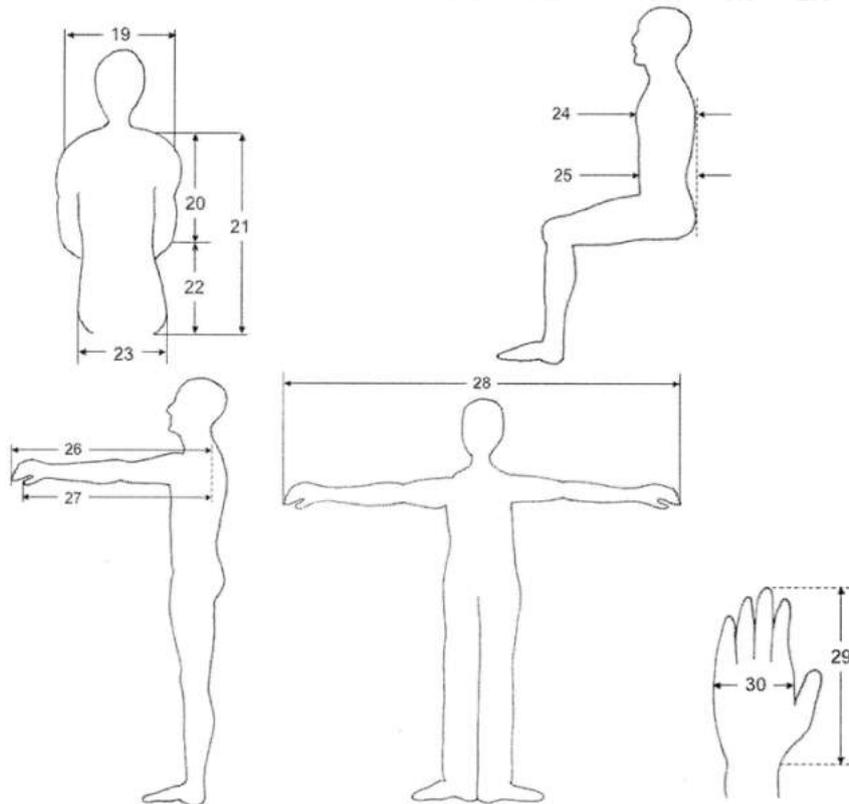
A Tabelas Pheasant

Anthropometry Tables

Measurement (inches)	Males			Females		
	95th	50th	5th	95th	50th	5th
1- Forward Grip Reach	33.3	30.9	28.5	30.1	28.0	25.8
1a- Bust to Grip Reach	21.9	20.9	193.8	18.3	18.0	17.5
2- Elbow Height	46.9	43.5	40.2	43.1	40.2	37.2
3- Hip Height	39.2	36.0	32.9	35.8	32.9	29.9
4- Fingertip Height	28.5	26.0	23.4	27.4	24.8	22.2
5- Shoulder Height	61.0	56.7	52.4	56.1	52.2	48.2
6- Eye Height	71.9	67.3	62.8	64.2	60.0	55.9
7- Stature	73.6	69.1	64.6	68.1	64.0	59.8
8- Vertical Grip Reach	87.0	81.9	76.8	80.5	75.8	71.1
9- Thigh Thickness	7.3	6.3	5.3	7.3	6.1	4.9
10- Sitting Eye Height	33.9	31.5	29.1	31.9	29.5	27.2
11- Sitting Height	38.4	36.0	33.7	36.2	33.9	31.5
12- Sitting Vertical Grip Reach	53.4	49.4	45.5	49.2	45.7	42.1
13- Elbow-Fingertip Length	20.3	18.9	17.5	18.5	17.1	15.8
14- Knee Height	23.8	21.7	19.5	21.7	19.9	18.1
15- Popliteal Height	19.5	17.5	15.6	17.7	15.9	14.2
16- Buttock-Popliteal Height	21.9	19.7	17.5	21.3	19.3	17.3
17- Buttock-Knee Height	25.6	23.6	21.7	24.6	22.6	20.7



Measurement (inches)	Males			Females		
	95th	50th	5th	95th	50th	5th
19- Shoulder Breadth (bideloid)	20.3	18.5	16.7	17.3	15.8	14.2
20- Shoulder-Elbow Length	15.8	14.4	13.0	14.4	13.2	12.0
21- Sitting Shoulder Height	25.8	23.6	21.5	24.4	22.2	20.1
22- Sitting Elbow Height	11.6	9.7	7.7	11.2	9.3	7.3
23- Hip Breadth	16.1	14.2	12.2	17.3	14.8	12.2
24- Chest (bust) depth	11.4	10.0	8.7	11.8	10.0	8.3
25- Abdominal depth	13.0	10.8	8.7	12.2	10.2	8.3
26- Upper Limb Length	33.5	31.1	28.7	30.5	28.1	25.8
27- Shoulder-Grip Length	28.5	26.4	24.2	26.0	24.0	22.1
28- Span	76.8	71.3	65.8	68.7	64.0	59.3
29- Hand Length	8.1	7.5	6.9	7.5	6.3	6.3
30- Hand Breadth	3.9	3.5	3.2	3.4	3.0	2.6



B Recomendações de Resistência, Durabilidade e Segurança (CARRIEL, 2014)

PEÇA	RECOMENDAÇÕES DE RESISTÊNCIA, DURABILIDADE E SEGURANÇA
Apoio para os pés	<p>Apoio para os pés deve dobrar com uma quantidade razoável de força.</p> <p>Apoio para os pés não deve quebrar ou dobrar quando usado para levantar usuário e cadeira de rodas.</p> <p>Apoio para os pés não deve quebrar ou dobrar quando os passageiros adicionais ou pacotes são carregados.</p> <p>Apoio para os pés não deve quebrar ou dobrar quando bater um objeto, como uma parede ou calçada.</p>
Freio	<p>Freios devem parar de uma cadeira de rodas deslize quando em um declive.</p> <p>Freios não deve libertar subitamente enquanto está em uso.</p>
Apoio para os braços	<p>Apoio de braço deve ser removível com uma quantidade razoável de força.</p> <p>Apoio de braço não deve quebrar ou dobrar sob o peso do corpo do utilizador.</p> <p>Apoio de braço não deve quebrar ou dobrar quando usado para levantar usuário e cadeira de rodas.</p> <p>Alças de pressão não deve quebrar ou dobrar quando usado para levantar usuário e cadeira de rodas.</p> <p>Punho não deve escorregar de empurrar lidar quando o usuário está sendo assistida subir escadas ou freio.</p>
Estrutura	<p>O quadro não deve quebrar ou dobrar quando usado em terrenos irregulares.</p>
Encosto e assento	<p>Assento, encosto e quadro não deve quebrar ou dobrar durante transferrals ou enquanto andava em terreno irregular.</p>
Roda traseira e eixo	<p>Quadro, rodas e eixos não deve quebrar ou dobrar quando o usuário passa por um freio normal.</p> <p>Rodas, eixos ou roda de montagem de hardware não deve falhar quando o usuário cai freio no ângulo.</p> <p>Eixos ou roda de montagem de hardware não deve quebrar ou dobrar quando sob forças típicas.</p>
Conjunto de rodízios	<p>não deve falhar quando a roda de mamona atinge um objeto (por exemplo, um meio-fio).</p>
Geral	<p>Superfícies não devem ter arestas, pontos cortantes ou pontos de esmagamento.</p> <p>Cadeira de rodas não deve ser inflamável, ou seja, materiais facilmente inflamáveis não devem ser usados.</p> <p>Cadeiras de rodas devem estar equipados com dianteiro e traseiro adesivos que refletem ou sinais de aumento segurança rodoviária.</p>
Miscelaneas	<p>Alavancas de tombamento não deve quebrar quando o assistente utiliza alavancas para trás usuário ponta.</p> <p>RIM mão não deve quebrar ou dobrar quando se atinge um objeto.</p> <p>Cadeira de rodas não deve quebrar quando cai ou é descartada pelo manipulador de carga e descarga-lo de ônibus ou de carro.</p>
Teste de Fadiga	<p>Cadeira de rodas não deve quebrar em uso normal.</p>