

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

RAFAEL ROCHA MATTAZIO

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA O CONCEITO DE UMA CADEIRA
DE RODAS ORTOSTÁTICA**

São Carlos

2012

RAFAEL ROCHA MATTAZIO

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA O CONCEITO DE UMA CADEIRA DE
RODAS ORTOSTÁTICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Escola de Engenharia de São Carlos,
Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Área de Concentração: Projeto Mecânico
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan.

São Carlos

2012

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

FICHA CATALOGRÁFICA

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Rafael Rocha Mattazio

Título: Estudo da viabilidade técnica para o conceito de uma cadeira de rodas ortostática.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. ZILDA DE CASTRO SILVEIRA
Instituição: SEM – EESC – USP

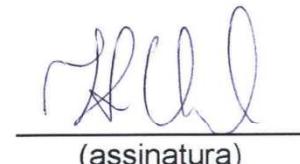
Nota atribuída: 7,5 (sete e meia)



(assinatura)

MSc. FAUSTO ORSI MEDOLA
Instituição: EESC/FMRP/IQSC – USP

Nota atribuída: 7,5 (sete e meia)



(assinatura)

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO FORTULAN (Orientador)
Instituição: SEM – EESC - USP

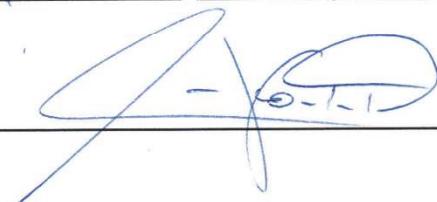
Nota atribuída: 7,5 (sete e meia)



(assinatura)

Média: 7,5 (sete e meia)

Resultado: 7,5



Data: 12/12/2012

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas graças concedidas.

A minha querida família.

A todos meus colegas das diversas gerações da Equipe EESC-USP Formula SAE.

A todos meus colegas da turma de Engenharia Mecânica de 2008 da Escola de Engenharia de São Carlos.

A todos os docentes cujas aulas assisti.

Ao meu orientador Professor Doutor Carlos Alberto Fortulan pela compreensão e paciência durante a orientação do trabalho.

Ao doutorando Fausto Orsi Medola pelo auxílio.

RESUMO

MATTAZIO, R.R. Estudo da viabilidade técnica para o conceito de uma cadeira de rodas ortostática. – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. 64p.

Para melhorar a qualidade de vida dos usuários de cadeiras de rodas contribuindo com sua integração na sociedade e na realização de atividades do cotidiano, foram desenvolvidos novos equipamentos, como as cadeiras de rodas ortostáticas, que proporcionam ao usuário benefícios fisiológicos e psicológicos provenientes da alternância entre a posição sentada e de pé. Entretanto o alto custo dos novos produtos faz com que a maioria dos usuários opte pela cadeira convencional, não usufruindo dos benefícios da troca de posição. No âmbito do desenvolvimento de produto, a engenharia simultânea e a engenharia de sistemas são poderosas ferramentas para o desenvolvimento de um produto adequado à capacidade de uma empresa e com um bom balanço entre vantagens e desvantagens. O objetivo do trabalho consistiu em investigar a viabilidade técnica de um conceito de uma cadeira de rodas ortostática utilizando os princípios e as ferramentas da engenharia simultânea e de sistemas, de modo que o projeto fosse coerente com o desenvolvimento do produto no contexto do trabalho de conclusão de curso. Os componentes do ciclo de vida do produto foram identificados e realizou-se o mapeamento dos elementos, atributos e ambientes referentes ao equipamento e ao universo interno e externo ao trabalho. Da literatura foram utilizadas medidas antropométricas da média da população masculina com idade entre 20 e 65 anos para a construção de um manequim virtual, utilizado como referência para o posicionamento do usuário segundo as dimensões confortáveis de alcance para uma pessoa, conforme norma NBR 9050:2004. Por fim, foram realizados equacionamentos da dinâmica da cadeira para compreender a influência de suas dimensões e do posicionamento do manequim na sua estabilidade e dirigibilidade. Desse modo, realizou-se o estudo da viabilidade técnica do conceito de uma cadeira de rodas ortostática, resultando num conceito de baixo custo coerente com o contexto do trabalho.

Palavras-chave: cadeira de rodas, ortostatismo, engenharia de sistemas, engenharia simultânea, viabilidade técnica.

ABSTRACT

MATTAZIO, R. R. **Technical feasibility study of a stand-up wheelchair concept.** – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2012. 64p.

To improve life quality of wheelchair users contributing with their integration into society and with carrying daily activities, new equipment were developed, such as stand-up wheelchairs that provide physiological and psychological benefits to the user just from switching between sitting and standing positions. However, the high cost of these new products makes most users to choose for the conventional wheelchair, not taking advantage of the switch positions benefits. In the context of product development, concurrent engineering and systems engineering are powerful tools for the development of a product that is suitable to the industrial capacity and with a good balance of advantages and disadvantages. The objective of this study was to investigate the technical feasibility of a stand-up wheelchair concept using the principles and tools of concurrent and systems engineering so that the design was consistent with the product development in the context of the course conclusion work. The product life cycle components were identified and elements, attributes and environment of the equipment and the internal and external universe of the work were mapped. Anthropometric measures of the average male population aged between 20 and 65 years old taken from literature were used to build a virtual dummy, used as a reference for positioning the user according to people comfortable reach dimensions from NBR 9050:2004 standard. Finally, equations of the wheelchair dynamic response were carried out to understand the influence of its dimensions and the positioning of the dummy on the wheelchair stability and maneuverability. Thus, the technical feasibility study of the stand-up wheelchair concept was done, resulting in a low-cost concept consistent with the work context.

Keywords: stand-up wheelchair, orthostatism, systems engineering, concurrent engineering, technical feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Cadeira de rodas com capacidade para ortostatismo.	15
Figura 2.1 – Etapas de projeto na engenharia tradicional e na simultânea.	20
Figura 2.2 – Atributos agrupados e algumas relações entre eles.	25
Figura 2.3 – Interação entre diferentes fatores para aceitação de tecnologias assistivas.	30
Figura 2.4 – Ilustração da permeabilidade da pessoa e da sociedade nas TA's e na engenharia de reabilitação	30
Figura 2.5 – Modelo PHAATE.	32
Figura 2.6 – Dimensões de referência para cadeiras de rodas.	33
Figura 2.7 – Módulo de referência com suas dimensões.	33
Figura 2.8 – Alcance manual frontal de uma pessoa em pé.	34
Figura 2.9 – Alcance manual frontal com superfície de trabalho para uma pessoa em cadeira de rodas.	34
Figura 2.10 – Medidas de antropometria estática resumidas da norma alemã DIN 33402 de 1981.....	36
Figura 2.11 – Principais variáveis usadas em medidas de antropometria estática do corpo....	37
Figura 2.12 – Medidas antropométricas com referência as articulações.....	38
Figura 3.1 – Cadeira disponível para o estudo.	43
Figura 3.2 – Medidas antropométricas do corpo.....	49
Figura 3.3 – Manequim virtual. (a) Vista isométrica. (b) Vista lateral com dimensões de antropometria.	50
Figura 3.4 – Manequim posicionado na posição sentada.....	50
Figura 3.5 – Manequim posicionado na posição de pé.	51
Figura 3.6 – Diagrama de corpo livre da cadeira de rodas em vista lateral.	52
Figura 3.7 – Gráfico da equação 4.	54
Figura 3.8 – Diagrama de corpo livre da cadeira de rodas em vista frontal.....	54
Figura 3.9 – Diagrama de corpo livre da cadeira de rodas em vista superior.	55
Figura 4.1 – Princípios do sistema de elevação. (a) Princípio 1. (b) Princípio 2.....	58
Figura 4.2 – Ganho de estabilidade com roda de menor diâmetro.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Atributos de projeto de Shigley	21
Tabela 2.2 – Atributos do produto segundo Forum FSAE.....	21
Tabela 2.3 – Atributos relacionados à gestão do produto segundo Forum FSAE	22
Tabela 3.1 – Elementos e atributos do nível 4 do projeto	40
Tabela 3.2 – Elementos e atributos do nível 3 do projeto	44
Tabela 3.3 – Elementos do nível 2. Subsistemas da cadeira.	47
Tabela 3.4 – Atributos do nível 2 do projeto.....	47
Tabela 4.1 – Atributos de projeto.....	57

LISTA DE SIGLAS

CAD	<i>Computer-aided design</i>
CAE	<i>Computer-aided engineering</i>
CAM	<i>Computer-aided manufacturing</i>
CG	Centro de gravidade
CNC	Controle numérico computadorizado
DARPA	<i>Defense advanced research project agency</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FSAE	Formula SAE
MIG	<i>Metal inert gas</i>
PAD	<i>Participatory action design</i>
QFD	<i>Quality function deployment</i>
SAE	<i>Society of automotive engineers</i>
TA	Tecnologia assistiva
TIG	<i>Tungsten inert gas</i>

NOMENCLATURA

α	Aceleração angular longitudinal em torno do ponto O	rad/s ²
α_d	Aceleração angular vertical	rad/s ²
α_r	Aceleração angular do subsistema de propulsão	rad/s ²
γ	Aceleração angular lateral em torno do ponto O	rad/s ²
a	Aceleração	m/s ²
a_{lat}	Aceleração lateral	m/s ²
$a_{lat,max}$	Máxima aceleração lateral na posição ortostática de modo que não ocorra capotamento	m/s ²
a_{long}	Aceleração longitudinal	m/s ²
$a_{long,max}$	Máxima aceleração longitudinal na posição ortostática de modo que não ocorra capotamento	m/s ²
A_3	Altura do centro da mão com relação ao chão com antebraço a 90° do tronco na posição sentada na cadeira de rodas	mm
b	Distância do eixo dianteiro ao centro de gravidade	m
C_1	Altura do centro da mão com relação ao chão com antebraço a 90° do tronco na posição em pé	mm
CG	Centro de gravidade	
CL	Distância da parte mais inferior da cadeira ao chão	mm
f	Fator de inércia rotativa	
F_{max}	Valor máximo de força que o usuário poderá imprimir a roda na posição ortostática sem que ocorra o capotamento	N
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
h	Altura do centro de gravidade	m
h_p	Altura do centro de gravidade na posição ortostática	m
h_s	Altura do centro de gravidade na posição sentada	m
I_1	Momento de inércia no centro de gravidade na direção transversal	kg.m ²
I_2	Momento de inércia no centro de gravidade na direção longitudinal	kg.m ²
I_3	Momento de inércia no centro de gravidade na direção vertical	kg.m ²
I_r	Momento de inércia resultante do subsistema de propulsão no eixo traseiro	kg.m ²
l_f	Distância do centro de gravidade ao ponto O em vista frontal	m

l_l	Distância do centro de gravidade ao ponto O em vista lateral	m
m	Massa da cadeira com condutor	kg
t	Bitola da cadeira	m
w	Entre-eixos da cadeira	m

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivo	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Desenvolvimento de produto.....	17
2.1.1	Morfologia do projeto	17
2.1.2	Engenharia simultânea	19
2.1.3	Projeto informacional	20
2.1.4	Atributos do projeto	21
2.1.5	Priorização dos atributos	22
2.1.6	Metodologia para priorização ou escolha dos atributos de projeto	23
2.1.7	Engenharia de sistemas	23
2.1.8	Caminho do projeto	24
2.1.9	Considerações a serem feitas no momento da escolha dos atributos	26
2.1.10	Desdobramento dos atributos em metas.....	27
2.2	Cadeira de rodas	27
2.2.1	Introdução.....	27
2.2.2	Breve histórico da cadeira de rodas.....	28
2.2.3	Futuro da tecnologia assistiva e de seu desenvolvimento	28
2.2.4	Conceitos e metodologias da Engenharia de Reabilitação.....	29
2.3	Normas.....	32
2.4	Ergonomia	35
2.4.1	Antropometria	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1	Morfologia de projeto	39
3.2	Conceito da Engenharia Simultânea.....	39
3.3	Identificação dos níveis e ambientes	40
3.3.1	Elementos e atributos do nível 4	40
3.3.2	Seleção dos atributos do nível 4.....	42
3.3.3	Ambiente dos atributos do nível 4.....	42

3.3.4	Elementos e atributos do nível 3	43
3.3.5	Seleção dos atributos do nível 3.....	44
3.3.6	Ambiente dos atributos do nível 3.....	45
3.3.7	Elementos e atributos do nível 2	47
3.4	Manequim virtual e principais dimensões	48
3.5	Previsão do comportamento dinâmico da cadeira	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	Princípios do mecanismo de elevação para ortostatismo	57
4.2	Mecanismo acionador para elevação	58
4.3	Princípios do mecanismo de propulsão	59
4.4	Princípios do mecanismo de direção, de interface com o usuário e da estrutura	60
5	CONCLUSÕES	61
6	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

No contexto das tecnologias assistivas, em particular das cadeiras de rodas, é possível observar um grande potencial para aperfeiçoamento de seu projeto e, com isso, melhorar a qualidade de vida os usuários. O conceito das cadeiras mais utilizadas atualmente pouco mudou do conceito desenvolvido na década de 30, estando sujeito às limitações tecnológicas e de conhecimento da época. Desde aquela época surgiram outros conceitos de cadeira de rodas, inclusive cadeiras com propulsão elétrica, porém poucos deles chegam ao consumidor com um preço tão atrativo quanto o do conceito tradicional e seus benefícios não foram difundidos suficientemente.

Há uma necessidade de melhoria constante na qualidade de vida das pessoas portadoras de deficiência física no sentido de reduzir suas dificuldades nas atividades da vida diária e facilitar sua integração e convívio em sociedade. Tão logo, elas necessitam de equipamentos e produtos que atendam essas necessidades. (BARBOSA *et al.*, 2010) Os usuários das cadeiras de rodas convencionais que permanecem por tempos prolongados na posição sentada podem sofrer um encurtamento dos músculos da coxa e da panturrilha, além de desenvolver úlceras de pressão. Esses problemas podem ser evitados variando a posição de sentado para de pé esporadicamente. Isso pode ser facilmente conseguido com o uso de uma cadeira de rodas ortostática, mostrada na Figura 1.1. A posição ortostática também amplia o alcance das mãos dos usuários a locais elevados e permite que usuários se comuniquem com não usuários numa mesma altura, que é mais confortável psicologicamente. (ARVA *et al.*, 2009)

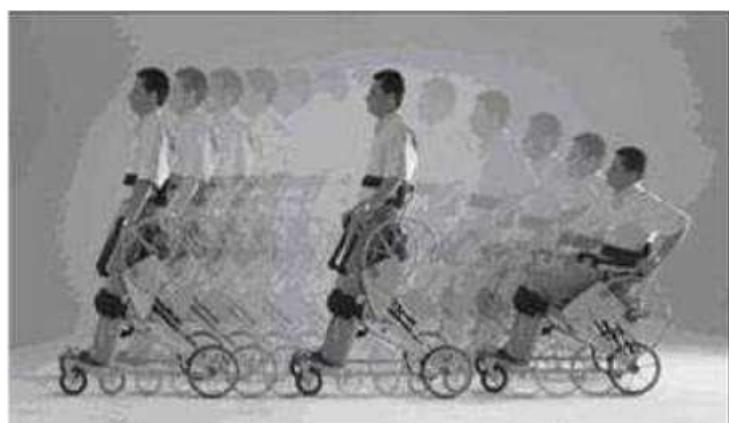


Figura 1.1 – Cadeira de rodas com capacidade para ortostatismo. (Fonte: CARRIEL, 2007 *apud* MEDOLA, 2010)

O desenvolvimento de produtos é uma atividade multidisciplinar e, por consequência, complexa. Vários fatores podem influenciar o desenvolvimento de um produto, de aspectos técnicos, como a resistência mecânica de um tipo de material, a aspectos gerenciais, como a quantidade de pessoas no time de projeto. Considerar toda gama de fatores de influência durante o projeto é algo muito difícil, entretanto é a chave para o sucesso do produto no mercado.

O desenvolvimento que ocorre de forma sequencial e isolada, ou seja, quando não há sobreposição entre as diferentes atividades necessárias para a elaboração do produto, gera longos ciclos de desenvolvimento, que retardam o lançamento do produto e elevam os gastos da empresa. Além disso, certo número de modificações no projeto ocorre tardiamente, quando o custo de realizar alterações no produto é maior.

Como alternativa à abordagem sequencial e com o objetivo de superar suas limitações, é possível adotar os princípios da engenharia simultânea. A engenharia simultânea consiste numa metodologia de desenvolvimento de produtos que surgiu da necessidade das empresas em reduzir o tempo de lançamento de novos produtos, como consequência do aumento da concorrência entre empresas dos mais diversos segmentos de mercado. Possui o princípio de considerar todos os fatores do desenvolvimento do produto logo na fase de projeto. Segundo esse princípio, o produto pode ser projetado, por exemplo, de modo a reduzir o tamanho de sua embalagem e, com isso, minimizar os custos de transporte.

Para incorporar os fatores de influência não técnicos no desenvolvimento do projeto do produto, extrapolando o princípio da engenharia simultânea, pode-se usar a metodologia oferecida pela engenharia de sistemas, utilizada geralmente no setor aeroespacial, em que os custos envolvidos são altos e há vários sistemas envolvidos dentro de um mesmo produto.

1.1 Objetivo

O objetivo do trabalho consistiu em investigar a viabilidade técnica de um conceito de uma cadeira de rodas ortostática utilizando os princípios e as ferramentas da engenharia simultânea e da engenharia de sistemas de modo que o projeto fosse coerente com o desenvolvimento do produto no contexto do trabalho de conclusão de curso e pudesse agregar, à cadeira convencional, funcionalidades que melhorem a qualidade de vida do cadeirante.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desenvolvimento de produto

Um produto é algo que busca atender uma função. O desenvolvimento de produto é a cadeia de atividades responsável pela criação do produto. Sua principal atividade é o projeto. Desenvolver produtos para vencer uma concorrência está sempre presente no cenário da engenharia. Tão logo, como a empresa fará o projeto do produto determinará sua qualidade e seu sucesso no mercado.

2.1.1 Morfologia do projeto

Carvalho (2007), em sua dissertação, na qual é realizado o desenvolvimento de um mini-moinho de cerâmica, apresenta uma revisão de algumas morfologias de projeto. Inicialmente é mostrada a morfologia de projeto proposta por Asimow (1962). Nessa concepção, o projeto está dividido em dois grupos e cada etapa só é iniciada quando a anterior estiver completa:

- Grupo 1: Consiste na concepção do projeto e no projeto tradicional. Refere-se ao dimensionamento das peças e seus projetos detalhados. O grupo 1 ainda é dividido em três fases:
 - Fase 1: análise das necessidades do mercado, identificação do sistema, concepções para o projeto, análise física e financeira;
 - Fase 2: avaliação das concepções obtidas e seleção. Depois: modelos matemáticos, análise de sensibilidade, análise de compatibilidade, otimização, projeção no futuro, previsão do comportamento, testes e simplificações.
 - Fase 3: descrições e desenhos, construção experimental, análise e previsão de reprojeto.
- Grupo 2: Consiste nas atividade do ciclo produção-consumo.

Também são apresentadas as morfologias segundo as concepções de Pahl e Beitz (1996), embasado em pesquisas de centros acadêmicos da Alemanha, de Pugh (1995), com influência forte da experiência prática e de Back (1983), com etapas detalhadas.

Dentre as morfologias apresentadas, nota-se uma semelhança entre suas etapas, que contemplam a presença dos requisitos (informações) de mercado no início do projeto e,

também, uma preocupação com a análise da viabilidade física e de custo final do produto, incluindo a presença de protótipos e testes. As morfologias somente apresentam a sequencia das etapas de projeto e, normalmente, não abordam uma metodologia para tomada de decisão durante as etapas.

Em poucas ou nenhuma etapa apresentada nas morfologias tradicionais, o projeto é defrontado de maneira direta com os recursos disponíveis na empresa (financeiros, humanos, tempo, matéria-prima, infraestrutura), a gestão da empresa, o gerenciamento do projeto e a capacidade de cumprir todas as etapas do projeto, embora esses aspectos tenham bastante influência nas tomadas de decisão relativas ao produto final, como foi possível observar durante o desenvolvimento do mini-moinho. É possível observar a influência desses fatores nas situações mostradas abaixo:

- O autor considerou a qualidade do projeto e os recursos disponíveis de infraestrutura (laboratório) e humanos (*know-how* em materiais cerâmicos dos envolvidos) no processo de tomada de decisão nos conceitos do projeto.
- Na seleção do revestimento do jarro houve preferência à qualidade do projeto e influência explícita da infraestrutura disponível. Como presente no texto: “[...] infraestrutura do laboratório disponível para sua manufatura, o que diminui sua principal desvantagem [...]”.
- Na determinação da adoção de um único sistema para fixação base móvel-jarro-tampa: simplificação e redução do número de peças

Além disso, são constantes as tomadas de decisões referentes a atributos conflitantes do produto, observável no exemplo abaixo:

- Na seleção do material da parte externa do jarro teve preferência à qualidade do projeto, deixando de lado a facilidade de manufatura e o custo, imaginando um projeto para produção em larga escala.

Cooper *et al.* (2007) apresentam o modelo PAD (*Participatory action design*), que consiste numa morfologia aplicada ao desenvolvimento de tecnologias assistivas. O modelo PAD procede da seguinte maneira:

- a) Identificação das necessidades dos usuários. Pedem ser identificadas através de seminários, pesquisa ou questionários sobre requisitos específicos e possíveis soluções. As necessidades são organizadas para ajudar a identificar características desejáveis nos produtos.

- b) Desenvolvimento de um *mock-up* (modelo em escala real), no qual as principais características do produto são incorporadas. Todas as características do produto são, então, comparadas com referências disponíveis, garantindo que as características de projeto estejam coerentes com os padrões/normas da indústria.
- c) Construção do protótipo incluindo todas as características possíveis do projeto. É feito uma comparação com as normas do produto.
- d) Realização de testes para determinar a eficácia do produto. Testes de durabilidade e fadiga.
- e) Submissão para aprovação de órgão fiscalizador com a intenção de garantir segurança ao usuário final.
- f) Determinação da eficácia clínica. Divida em quatro partes: mapeamento das vantagens e desvantagens do produto segundo exposição para um grupo seletivo de clínicos, usuários e fabricantes; teste do produto com uma amostra da população; estudo de caso com uma pequena amostra da população de usuários finais; teste do produto com um grupo grande de usuários, de modo que os resultados possam ser extrapolados para toda a população. A avaliação da eficácia pode incluir medidas de capacidade física e/ou desempenho funcional. Por fim, se o produto atende as necessidades dos usuários e tem a aprovação dos clínicos, ele se torna parte do arsenal de tecnologias que melhoraram a qualidade de vida dos portadores de deficiências.

Do mesmo modo que as morfologias anteriores, o modelo PAD não contempla uma metodologia para a tomada de decisões durante as etapas do projeto.

2.1.2 Engenharia simultânea

O projeto é um processo iterativo entre suas diversas etapas e elas geralmente são executadas sequencialmente (NIEMANN, 1971). Entretanto, como alternativa ao comportamento sequencial das etapas de projeto e objetivando-se a redução no número de iterações entre as etapas, é possível aplicar o conceito da engenharia simultânea no desenvolvimento de produto.

A Engenharia Simultânea, segundo o estudo realizado pelo DARPA (*Defense Advanced Research Project Agency*) é (WINNER *et al.*, 1988 *apud* PRASAD, 1996):

“[...] uma abordagem sistemática para o desenvolvimento integrado e paralelo do projeto de um produto e os processos relacionados, incluindo manufatura e suporte. Essa abordagem procura fazer com que as pessoas envolvidas no desenvolvimento considerem, desde o início, todos os elementos do ciclo de vida do produto, da concepção ao descarte, incluindo qualidade, custo, prazos e requisitos dos clientes”.

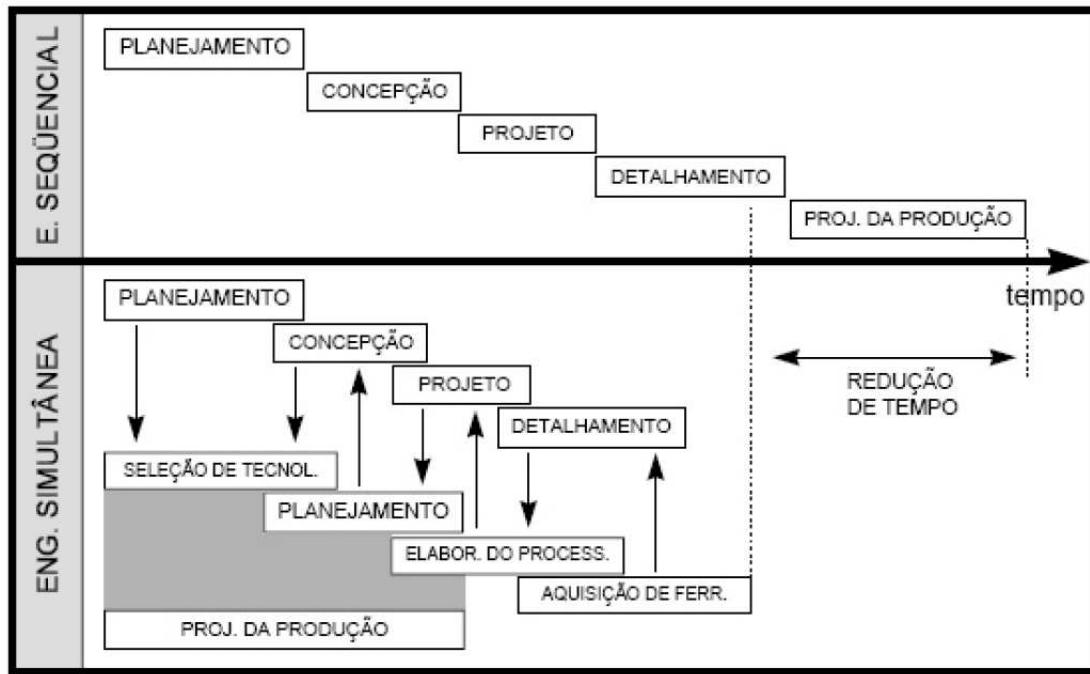


Figura 2.1 – Etapas de projeto na engenharia tradicional e na simultânea. (Fonte: CARVALHO, 2007)

2.1.3 Projeto informational

Quando se deseja ter um projeto de alta qualidade ou com uma qualidade superior aos concorrentes e, com isso, lograr sucesso na aceitação do produto e suas vendas, deve-se dar muita atenção às tomadas de decisões da primeira etapa de projeto, o projeto informacional. Para uma construção sobreviver, é necessário que suas qualidades ultrapassem um limite mínimo (NIEMANN, 1971). Mas, assim como a qualidade do projeto é determinante, outros aspectos não técnicos são de extrema importância nos projetos de engenharia. A gestão da empresa, o gerenciamento do projeto e a capacidade de cumprir todas as etapas de projeto são fatores cruciais para a qualidade final do produto.

2.1.4 Atributos do projeto

Como foi apresentado anteriormente, um produto é algo que busca atender uma função. As funções desejáveis de um produto podem ser determinadas por uma pesquisa de mercado. Se a máquina como um todo e suas peças possuírem as características e atributos adequados, a máquina poderá atender as funções para o qual foi projetada.

Rigidez, leveza, manufaturabilidade, *serviceability*, mercadabilidade, reciclagem e custo são exemplos de atributos de projeto. Shigley (2007) apresenta alguns atributos de projeto (chamados pelo autor de “*design considerations*”), mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Atributos de projeto de Shigley

Funcionalidade	Barulho/Ruído
Resistência (tensão)	<i>Styling</i> (Estilo)
Rigidez/Deflexão/Distorção	Formato
Desgaste	Tamanho
Corrosão	Controle
Segurança	Propriedades térmicas
<i>Reliability</i> (confiabilidade)	Superfície
<i>Manufacturability</i> (Manufaturabilidade)	Lubrificação
Utilidade	<i>Marketability</i> (Mercadabilidade)
Custo	Manutenção
<i>Friction</i> (atraito)	Volume
Peso	<i>Liability</i>
Vida	Remanufatura/ Recuperação de recursos

Fonte: SHIGLEY *et al.*, 2007.

Na página da internet de um fórum virtual sobre construção de veículos tipo Formula SAE (<http://fsae.com/>) é possível encontrar mais alguns atributos, mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Atributos do produto segundo Forum FSAE

Barato	Leve
Potente	Econômico
Simples	Forte/Confiável
Rígido	Ajustável/Configurável
Confortável	Compacto
Previsível	Fácil de dirigir

Disponível em:

<http://fsae.com/eve/forums/a/tpc/f/125607348/m/217101453>

Também nessa referência são encontrados outros atributos, apresentados na Tabela 2.3, relacionados à gestão do projeto, que influenciam no projeto do produto e sua qualidade final.

Tabela 2.3 – Atributos relacionados à gestão do produto segundo Forum FSAE

Fácil manufatura	Bem testado e desenvolvido
Entregue no tempo certo	Dentro do orçamento
Coerente com as habilidades e competências da equipe	Usuários treinados

Disponível em: <http://fsae.com/eve/forums/a/tpc/f/125607348/m/217101453>

Os atributos podem ser classificados em atributos externos, que são aqueles que influenciam diretamente a interação máquina-usuário, e atributos internos, que são os que fazem parte da interação produto-empresa durante o ciclo do desenvolvimento produto. Enquanto os atributos externos refletem o produto desejado pelo cliente, os atributos internos refletem a capacidade da empresa de produzir o produto desejado pelo cliente.

É importante mapear o maior número possível de atributos a partir do ponto de vista do projetista e dos clientes para garantir uma boa abrangência das opções e alternativas de projeto.

2.1.5 Priorização dos atributos

Para Shigley (2007), somente alguns dos atributos devem ser considerados e priorizados numa situação de projeto. Além disso, como ocorreu no projeto do mini-moinho, é notável que alguns atributos sejam conflitantes entre si e que outros estejam relacionados.

Um exemplo de um par de objetivos conflitantes é a qualidade e o baixo preço, pois quanto maior a qualidade de um produto, maior sua tendência de possuir um maior valor agregado e, consequentemente, um custo superior. Por exemplo, leveza geralmente se opõe a rigidez, tolerâncias estreitas podem ser conseguidas com um tempo maior para manufatura. Na realidade, os projetos estão repletos de atributos contraditórios. Portanto, para que o produto atinja suas funções (objetivo do projeto), devem-se priorizar alguns atributos a outros durante o desenvolvimento do produto.

Vale explicitar que, uma vez que alguns atributos são conflitantes entre si, nenhum projeto consegue priorizar todos os atributos ao mesmo tempo. Complementando a ideia, Niemann (1971) diz que “[...] sempre a melhor solução é aquela que melhor satisfaz o compromisso entre objetivos concorrentes.”. Ou seja, o melhor projeto será obtido pelo melhor balanço entre os atributos, sendo alguns mais importantes que outros.

No contexto do desenvolvimento de tecnologias assistivas (TA), incluindo as cadeiras de rodas, a aceitação de uma TA depende do balanço entre suas desvantagens e vantagens. Se os benefícios de uma TA superarem suas desvantagens, o produto tem uma

chance maior de ser utilizado pela comunidade dos usuários das tecnologias assistivas, sejam eles idosos ou deficientes físicos. (COOPER *et al.*, 2007)

2.1.6 Metodologia para priorização ou escolha dos atributos de projeto

Já que alguns atributos são conflitantes entre si, para guiar o projeto é necessário determinar os atributos mais importantes e priorizá-los conforme sua importância. A engenharia de sistemas, geralmente utilizada para o projeto de produtos complexos, com grande número de peças, compõe uma metodologia para priorização e escolha dos atributos de projeto que considera toda a cadeia de atividades do desenvolvimento de produto.

Outra ferramenta que auxilia a priorização dos atributos externos segundo usuários e produtos concorrentes é o *Quality Function Deployment* (QFD). O QFD consiste numa metodologia para assegurar e planejar a qualidade do produto. Nela, os requisitos dos consumidores (atributos externos) são traduzidos em requisitos técnicos, que se desdobram em processos organizacionais e requisitos de produção (atributos internos). Os atributos são, então, organizados e classificados conforme suas correlações. No método também são avaliados os concorrentes segundo os requisitos e atributos identificados (PAHL *et al.*, 2007). Para Niemann (1971), é essencial analisar os produtos concorrentes para observar suas qualidades e deficiências: “*Primeiramente o senhor observe como é que os concorrentes constroem. [...] Quando o senhor tiver determinado, experimentalmente, o que é e o que não é aproveitável, então poderá vir apresentar-me novas sugestões*”.

2.1.7 Engenharia de sistemas

A engenharia de sistemas apresenta uma boa metodologia para abordar o projeto de uma máquina, principalmente porque considera explicitamente os aspectos não técnicos que permeiam o projeto e exercem influência em seu resultado final. Ela é aplicada, geralmente, no setor aeroespacial, em que os custos envolvidos são altos e há vários sistemas envolvidos dentro de um mesmo produto.

A engenharia de sistemas consiste numa abordagem multidisciplinar cujo objetivo é permitir a realização de sistemas de sucesso. Ela foca em definir as necessidades dos consumidores e as funcionalidades requeridas o mais cedo possível no ciclo de desenvolvimento. Depois, documentar os requisitos e, então, proceder com a síntese do projeto e as otimizações de confiabilidade. Isso tudo enquanto considera o problema como um todo, incluindo processos, desempenho, testes, manufatura, custos e tempo.

Para entender sua metodologia, é preciso inicialmente observar a hierarquia dos níveis de projeto:

- Nível 1 – Detalhamento e projeto das peças. Nível em que as peças são projetadas considerando os parâmetros técnicos de engenharia como, massa, forças, tensões, taxas de transferência de calor e outros.
- Nível 2 – Nível de integração entre peças e subsistemas. Nível de união e montagem de todas as peças para compor a máquina e suas características globais. O envelope da máquina e a coerência entre os diferentes subsistemas fazem parte desse nível.
- Nível 3 – Nível de integração entre máquina e ambiente externo. Nível em que é considerada a maneira como as características da máquina estão envolvidas com os aspectos externos, não controláveis, relacionados ao produto. Nesse nível se encontra a estratégia de mercado do produto, por exemplo.
- Nível 4 – Nível da gestão do projeto. Nível mais global do projeto, em que é integrado o ambiente interno da empresa com relação ao par máquina-ambiente externo. Nesse nível, considera-se, por exemplo, como a estratégia de mercado está relacionada com os aspectos da gestão do projeto, como o tempo, orçamento, uso dos recursos humanos, por exemplo.

Os níveis 1 e 2 correspondem puramente às atividades da engenharia enquanto o nível 3 à estratégia e o nível 4 ao gerenciamento. Mas os níveis 3 e 4 não devem ser negligenciados no processo de desenvolvimento de produto, pois, conforme foi comentado, os fatores dos níveis mais elevados influenciam o resultado final do projeto e, portanto, devem ser considerados como *inputs* do projeto informacional da máquina.

2.1.8 Caminho do projeto

Pode-se observar que não é simplesmente projetando peças a esmo no primeiro nível e depois as unindo que se obtém um bom resultado para o segundo nível, e assim por diante. Atributos de níveis inferiores podem ou não contribuir para atributos de níveis superiores, ou seja, a cada atributo de um nível superior estão relacionados atributos de um nível inferior que, uma vez atendidos, resultarão no atributo do nível superior. Desse ponto de vista, surge um fluxo encadeado de critérios para seleção dos atributos do projeto através dos diferentes níveis. Na Figura 2.2 são apresentados alguns atributos agrupados que possuem alguma relação entre si, incluindo alguns atributos referentes ao ambiente das tecnologias assistivas.

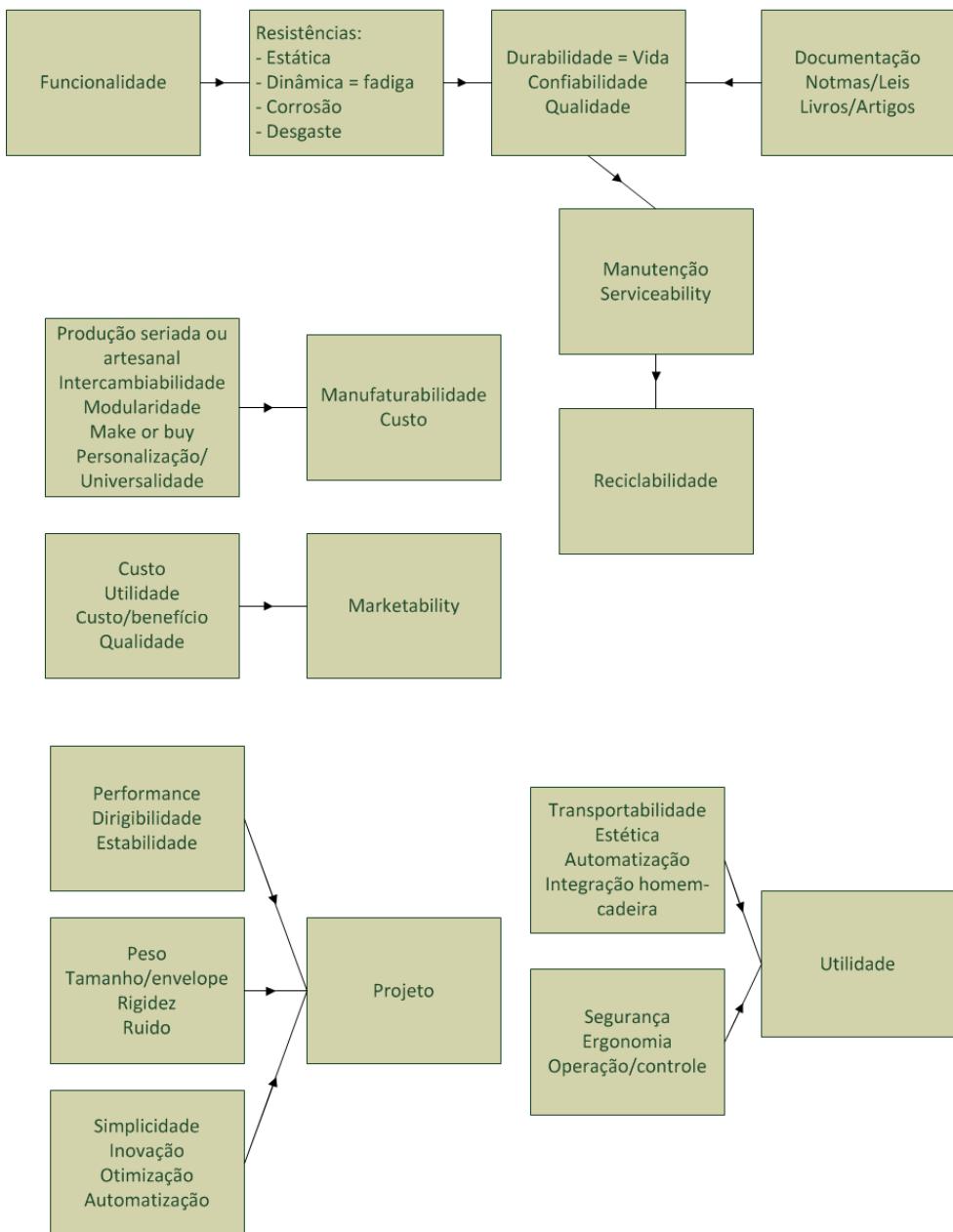


Figura 2.2 – Atributos agrupados e algumas relações entre eles.

No chamado caminho do projeto, os atributos e seus desdobramentos em metas devem ser definidos a partir dos limitantes e do potencial dos níveis mais elevados, referentes ao gerenciamento do desenvolvimento do produto e ao ambiente externo, passando pelos níveis intermediários, já iniciando a geração dos conceitos dos subsistemas, até se desdobrarem no projeto individual de cada componente da máquina, podendo ocorrer algumas idas e vindas entre os níveis até a convergência de todos os atributos e metas de projeto.

Posteriormente, determinam-se métricas para o progresso do projeto em cada nível e o trabalho é, então, executado a partir do nível 1.

Esse caminho ajudará a compreender como priorizar objetivos concorrentes ao mesmo tempo em que dará ao projetista uma compreensão detalhada do problema em si.

Também pode ser conveniente fazer o caminho inverso no processo de definição das metas e atributos para enxergar o projeto de outro ponto de vista e identificar pontos do projeto com grande potencial de melhora com o uso de poucos recursos. Por exemplo, uma peça simples e de pequenas dimensões notadamente superdimensionada que estivesse fora do escopo dos atributos e metas pode ser corrigida facilmente e, com isso, melhorar a qualidade final do projeto.

2.1.9 Considerações a serem feitas no momento da escolha dos atributos

Todo projeto está restrito pelo número limitado de recursos disponíveis e o potencial de captação de recursos da empresa, sejam eles dinheiro, pessoas, tempo ou matéria prima. Um projeto não poderá ser concluído sem dinheiro. Uma empresa poderá pagar multa caso não entregue o produto no tempo contratado. Um projeto complexo para o know-how de seus funcionários não será realizado de maneira adequada. Portanto, é crucial que os atributos priorizados, juntamente com as decisões e definições do projeto, reflitam os limites dos recursos. As pessoas são os recursos menos controláveis e mais importantes de toda a cadeia de projeto e gerenciamento, sobretudo devido aos fatores psicológicos. Todo projeto deve ser coerente com os recursos disponíveis.

Será necessário confiança, conhecimento e apoio do time de projeto para tomar decisões de quais atributos são mais importantes e quais (e quanto) o time está disposto a desconsiderar. Isso está relacionado ao desdobramento dos atributos em metas através de modelos, à compreensão da estrutura do projeto e à análise de resultados de projetos anteriores.

Devem-se tomar decisões coerentes com a capacidade de sua empresa buscando beneficiar a máquina como um todo e não somente um subsistema.

Algumas outras considerações são citadas a seguir:

- reutilizar bons projetos fazendo pequenos aperfeiçoamentos, quando necessário;
- fazer peças e conjuntos simples;
- minimizar o número de peças balanceando o número de peças com manufaturabilidade;

- construir bancadas de protótipos de novas ideias durante o projeto.

2.1.10 Desdobramento dos atributos em metas

Definidos os atributos desejáveis e com alguns conceitos dos subsistemas da máquina, é possível definir faixas de valores para os parâmetros físicos do projeto que resultarão no atributo desejado.

Para encontrar a faixa de valores para os parâmetros e ter um melhor entendimento do envelope de desempenho da máquina que está sendo projetada, podem ser construídos modelos matemáticos que correlacionam os parâmetros de um nível inferior com os parâmetros do nível imediatamente superior.

O maior número possível de parâmetros deve ser correlacionado, de modo que a análise dos resultados dos modelos forneçam indicativos de como um parâmetro influencia outro, no desempenho da máquina e nos níveis superiores. Deve-se iniciar com modelos simples e aumentar sua complexidade progressivamente, com a possibilidade de se adotar uma estratégia de modelagem modular. Na modelagem de máquinas ou sistemas com variabilidade nos valores de parâmetros de entrada, como no caso da presença da atuação humana, é possível incrementar o modelo com a aplicação da estatística nessas variáveis. Também no caso de uma atuação humana, pode-se modelar a perícia do operador e observar o comportamento dos diferentes projetos com cada tipo de operador. Um operador de menor perícia pode obter resultados melhores de uma máquina cujo projeto considerou a falta de habilidade do operador.

Através do modelo, busca-se encontrar faixas de valores para os parâmetros físicos com o intuito de se obter um bom balanço entre os diversos parâmetros e satisfazer os atributos definidos inicialmente. É muito importante verificar a validade dos modelos com valores de entrada e saída já conhecidos, quando for possível. Ao final da construção do protótipo, recomenda-se realizar a instrumentação da máquina para realizar a aquisição de dados que possibilite validar empiricamente os valores obtidos a partir dos modelos.

2.2 Cadeira de rodas

2.2.1 Introdução

Uma cadeira de rodas é um equipamento móvel utilizado por pessoas com dificuldade de locomoção. Elas são utilizadas para melhorar a função e a independência,

assim como auxiliar a vivencia do usuário em sua casa e na comunidade (SCHERER; CUSHMAN, 2001 *apud* MEDOLA, 2010). A propulsão da cadeira pode ser manual ou elétrica.

2.2.2 Breve histórico da cadeira de rodas

Passaram-se somente 1500 anos, aproximadamente, desde que o primeiro registro de um dispositivo de mobilidade sentada foi encontrado em um sarcófago chinês no ano de 525 d.C (MEDOLA, 2010). Nesse período, a cadeira de rodas apresentou uma evolução. Sua propulsão passou a ser feita pelo próprio usuário, promovendo sua reintegração a sociedade. A cadeira se tornou mais confortável, leve e resistente. A forma de cadeira de rodas como se vê nos dias de hoje, com estrutura tubular em aço, dobrável e com assento flexível, foi concebida somente no ano de 1933 (MEDOLA, 2010).

Nas últimas décadas surgiram novos conceitos de cadeira de rodas, como cadeiras para praia, esportivas, ortostáticas e, com os avanços tecnológicos na área da eletrônica, também surgiram novos conceitos de cadeira de rodas de propulsão elétrica. Novos modelos permitem a subida de escadas, por exemplo. Segundo Alvarenga (2000) *apud* Barbosa *et al.* (2010) os novos conceitos das cadeiras buscam melhorar a qualidade de vida do usuário, entretanto, atualmente, o preço desse e outros tipos de cadeiras especiais são altos, fazendo com que a maioria dos usuários opte pelas cadeiras de rodas convencionais. Com isso, o conceito da cadeira desenvolvida em 1933 prevalece sobre os demais, devido ao baixo custo e a facilidade de fabricação.

2.2.3 Futuro da tecnologia assistiva e de seu desenvolvimento

Cooper *et al.* (2007) veem no futuro das tecnologias assistivas sistemas inteligentes, de dispositivos individuais à um ambiente inteiro, que irão monitorar e comunicar com pessoas e entenderão suas necessidades e tarefas. O sistema compensará as limitações, quando necessário, enquanto se adapta as mudanças na situação, de modo que a tarefa é executada de forma segura, confiável e graciosa. Um exemplo pode ser uma futura cadeira de rodas que funciona como um compensador de manipulação e movimentos. Conhecendo as habilidades do condutor, irá proporcionar tipos e graus de assistência física, cognitiva e de navegação para ampliar a própria capacidade de mobilidade e manipulação do condutor.

Segundo Cooper *et al.* (2007), as TA's estão ficando inteligentes e o resultado disso será uma melhor interface homem-máquina, máquinas com capacidade de adaptação ou com capacidade de aprendizado, controle mais natural dos dispositivos e dispositivos mais capazes, sendo a cadeira iBOT um exemplo desse fenômeno. Prototipagem rápida, CNC's, ferramentas CAD/CAE/CAM e sistemas *Web* estão levando a manufatura de TA's à produtos personalizados, entretanto as tecnologias de manufatura que permitem a personalização ainda são caras hoje em dia.

O futuro da engenharia de reabilitação e do desenvolvimento de tecnologias assistivas depende da integração entre profissionais da área da saúde e da participação do consumidor (COOPER *et al.*, 2007). Nesse contexto está inserido o conceito do Participatory Action Design (PAD), mostrado no item referente às morfologias de projeto da revisão bibliográfica. Central ao futuro da engenharia de reabilitação está a conduta da pesquisa e desenvolvimento no ambiente natural da comunidade. Essa comunidade de pessoas e empresas deve ser o laboratório para um estudo comprehensivo do envelhecimento e da convivência com uma deficiência e dos aspectos associados ao desenvolvimento, transferência e utilização da tecnologia (COOPER *et al.*, 2007).

2.2.4 Conceitos e metodologias da Engenharia de Reabilitação

Conceitos gerais

O conceito de pessoa e sociedade deve guiar tudo que é relativo à TA's, do desenvolvimento de novos TA's a atividades de integração. A Figura 2.3 mostra que a aceitação de um dispositivo de TA ocorre quando são considerados os fatores pessoais, ambientais e psicossociais. (COOPER *et al.*, 2007)

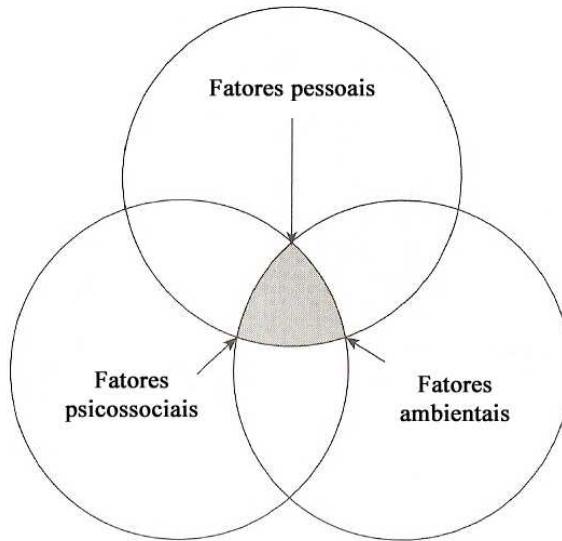


Figura 2.3 – Interação entre diferentes fatores para aceitação de tecnologias assistivas. (Fonte: COOPER *et al.*, 2007)

A assimilação dos componentes individuais, sociais, políticos e privados (empresas) de pesquisa, desenvolvimento, projeto e educação relacionados a pessoas com deficiências é o principal aspecto do domínio das TA's e da engenharia de reabilitação. (COOPER *et al.*, 2007)

Já a Figura 2.4 mostra as interações entre as pessoas e sociedade com as TA's e a engenharia de reabilitação.

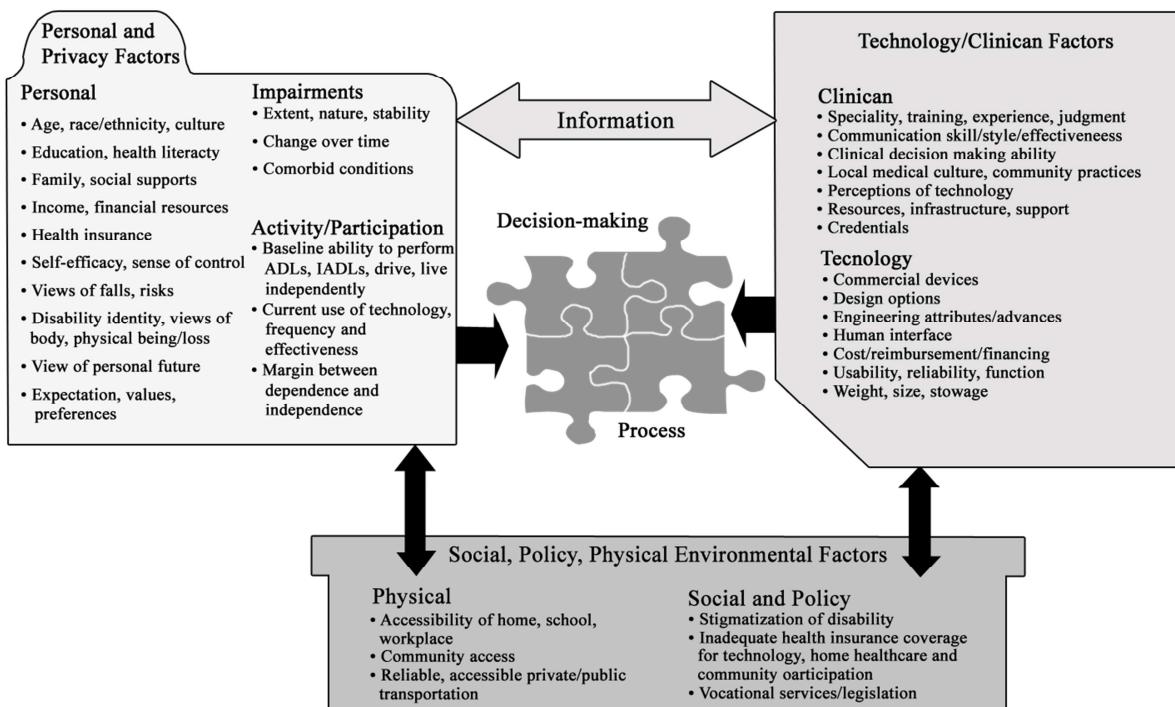


Figura 2.4 – Ilustração da permeabilidade da pessoa e da sociedade nas TA's e na engenharia de reabilitação (Fonte: COOPER *et al.*, 2007)

A engenharia de reabilitação só pode ser feita de forma efetiva se trabalhar em conjunto cientistas, clínicos, usuários e cientistas sociais e a meta da engenharia de reabilitação deve ser de dar suporte ao conceito de autodeterminação para idosos e pessoas com deficiências. O sucesso no desenvolvimento de uma TA requer competência técnica e imaginação, mas igualmente ou mais importante, depende de uma minuciosa apreciação e entendimento do processo de envelhecimento, idosos, deficiências, portadores de deficiências, fatores ambientais, custos, regulamentações, políticas e outros fatores limitantes. (COOPER *et al.*, 2007).

Independência, autonomia e controle sobre o ambiente dão as motivações humanas fundamentais. Com isso, conforme Cooper *et al.* (2007), o impacto das condições de deficiência é formado pelas suas causas, tempo, consequências funcionais e contextos sociais, e que todos esses devem ser considerados no projeto e implementação de uma tecnologia de sucesso. Humanos tem uma forte capacidade de se adaptar psicologicamente ao declínio de suas funções, mas ao mesmo tempo eles irão abraçar tecnologias que preservem e/ou melhorem suas habilidades de manter o controle sobre seus ambientes. (COOPER *et al.*, 2007). Desse modo, a tecnologia tem papel central na vida das pessoas com deficiência promovendo re integração à vida da comunidade. (COOPER *et al.*, 2007)

Atributos

Inicialmente, os dispositivos de tecnologia assistiva devem funcionar naturalmente com pessoas e não ser excessivo ou oressivo, mas devem permitir as pessoas fazerem o que querem, quando querem e sempre que possível. O relevo de grande parte de nosso país acaba sendo um limitador para o uso de cadeiras manuais. A utilização de uma TA também depende da acessibilidade do ambiente. A presença de obstáculos ambientais pode limitar a aceitação desses dispositivos (COOPER *et al.*, 2007). Os sistemas tem que funcionar diariamente em ambientes dinâmicos desestruturados. Devem ser seguros e confiáveis. Com relação ao aspecto psicológico do uso da tecnologia assistiva, os usuários devem acreditar que sua privacidade está protegida e sua modéstia é respeitada. No caso de idosos, a aceitação de TA's é determinada largamente pela visão da sociedade. Os idosos preferem TA's que não são indicativas de uma desabilidade/deficiência significante (COOPER *et al.*, 2007).

PHAATE é um modelo conceitual usado para representar os fatores a serem considerados quando se projeta uma TA. O modelo é usado para o desenvolvimento de serviços e produtos de tecnologia assistiva. PHAATE:

- *Policy* (Política): Considera-se a política pública e privada. Subestimar o efeito da política no projeto pode barrar a entrada da tecnologia no mercado.
- *Human (person)* (Humano/pessoa): A pessoa deve estar no centro do modelo e de todos os processos relacionados ao desenvolvimento da tecnologia.
- *Activity* (Atividade): A tecnologia é usada por pessoas com deficiência para cumprir uma tarefa ou realizar uma atividade. A atividade é um fator chave em determinar a participação na sociedade. Corresponde a responder a pergunta: "A tecnologia permite que o deficiente execute a atividade desejada?"
- *Assistance* (Assistência): A família e/ou enfermeiros contratados são necessários para um número significante de pessoas com deficiência.
- *Technology* (Tecnologia): A TA deve interagir com a pessoa com deficiência e com as pessoas que estão dando assistência. Corresponde a pergunta: "Permite boa interação homem-máquina e assistente-máquina?".
- *Environment* (Ambiente): É argumentado que o ambiente é o que determina se a deficiência torna-se uma desvantagem. A variedade de ambientes encontrados deve ser considerada durante o projeto.

A Figura 2.5 ilustra o modelo.

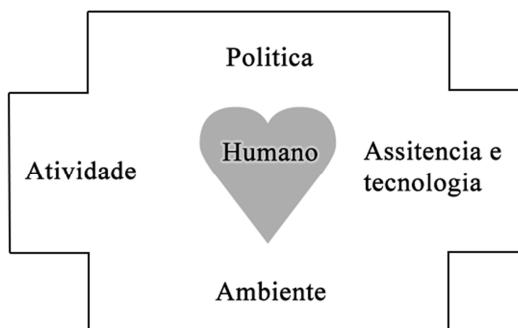


Figura 2.5 – Modelo PHAATE. (Fonte: COOPER *et al.*, 2007)

2.3 Normas

Buscaram-se normas sobre cadeiras de rodas com objetivo de se conhecer dimensões padronizadas para as cadeiras. Foram encontradas duas normas de interesse:

- ISO 7176 – Cadeiras de rodas.
 - Parte 1: Determinação da estabilidade estática.
 - Parte 5: Determinação das dimensões gerais, massa e espaço de giro.
 - Parte 7: Medição de dimensões de assentos e rodas.

- ISO 7193: Cadeiras de rodas – Máximas dimensões gerais.

Entretanto, não foi possível ter acesso a essas normas para a realização do trabalho.

Na ausência das normas desejadas, as medidas de referência para cadeiras de rodas foram retiradas da norma NBR9050:2004 - Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos.

A Figura 2.6 apresenta dimensões de referência para cadeiras de rodas manuais ou motorizadas.

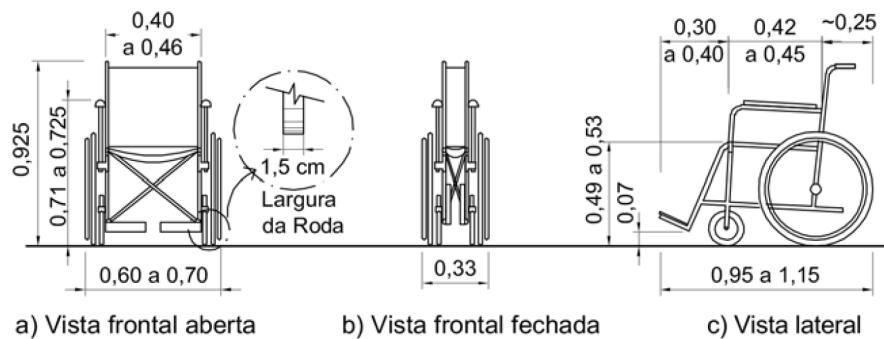


Figura 2.6 – Dimensões de referência para cadeiras de rodas. (Fonte: ABNT, 2004)

O envelope de dimensões da cadeira refere-se ao módulo de referência apresentado na norma e mostrado na Figura 2.7.

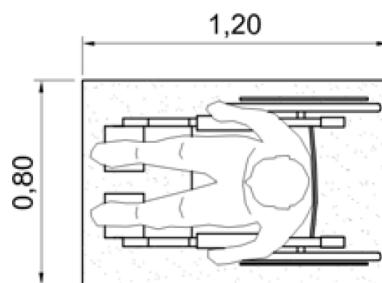
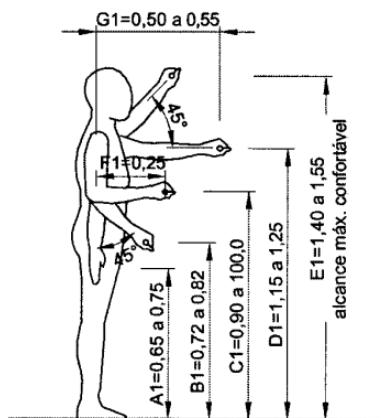


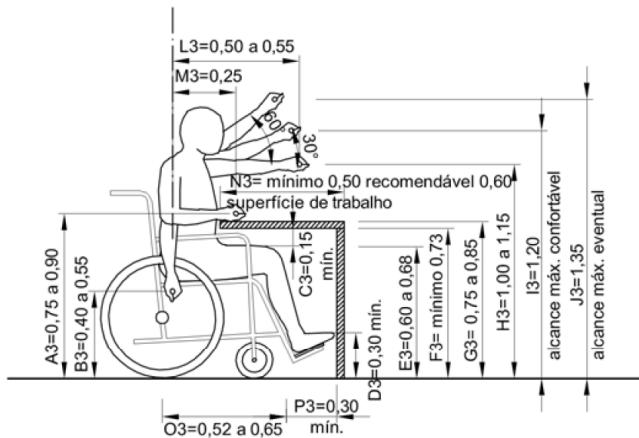
Figura 2.7 – Módulo de referência com suas dimensões. (Fonte: ABNT, 2004)

Também da NBR9050:2004 foram retiradas algumas medidas alvo para o posicionamento de projeto do manequim. As figuras Figura 2.8 e Figura 2.9 exemplificam as dimensões máximas, mínimas e confortáveis para alcance manual frontal para uma pessoa em pé e em cadeira de rodas.



- A1 = Altura do centro da mão estendida ao longo do eixo longitudinal do corpo
 B1 = Altura do piso até o centro da mão com antebraço formando 45° com o tronco
 C1 = Altura do centro da mão com antebraço em 90° com o tronco
 D1 = Altura do centro da mão com braço estendido paralelamente ao piso
 E1 = Altura do centro da mão com o braço estendido formando 45° com o piso = alcance máximo confortável
 F1 = Comprimento do antebraço (do centro do cotovelo ao centro da mão)
 G1 = Comprimento do braço na horizontal, do ombro ao centro da mão

Figura 2.8 – Alcance manual frontal de uma pessoa em pé. (Fonte: ABNT, 2004)



- A3 = Altura do centro da mão com antebraço formando 90° com o tronco
 B3 = Altura do centro da mão estendida ao longo do eixo longitudinal do corpo
 C3 = Altura mínima livre entre a coxa e a parte inferior de objetos e equipamentos
 D3 = Altura mínima livre para encaixe dos pés
 E3 = Altura do piso até a parte superior da coxa
 F3 = Altura mínima livre para encaixe da cadeira de rodas sob o objeto
 G3 = Altura das superfícies de trabalho ou mesas
 H3 = Altura do centro da mão com braço estendido paralelo ao piso
 I3 = Altura do centro da mão com o braço estendido, formando 30° com o piso = alcance máximo confortável
 J3 = Altura do centro da mão com o braço estendido formando 60° com o piso = alcance máximo eventual
 L3 = Comprimento do braço na horizontal, do ombro ao centro da mão
 M3 = Comprimento do antebraço (do centro do cotovelo ao centro da mão)
 N3 = Profundidade da superfície de trabalho necessária para aproximação total
 O3 = Profundidade da nádega à parte superior do joelho
 P3 = Profundidade mínima necessária para encaixe dos pés

Figura 2.9 – Alcance manual frontal com superfície de trabalho para uma pessoa em cadeira de rodas. (Fonte: ABNT, 2004)

2.4 Ergonomia

Segundo definição da Ergonomics Research Society (Inglaterra) (IIDA, 2005): “Ergonomia é o estudo do relacionamento entre o homem e seu trabalho, equipamento e ambiente, e particularmente a aplicação dos conhecimentos de anatomia, fisiologia e psicologia na solução de problemas surgidos desse relacionamento”.

Tilley (2002) fornece algumas especificações para o projeto de cadeiras de rodas e Medola (2010) desenvolve o projeto de um aro de propulsão ergonômico para cadeira de rodas.

2.4.1 Antropometria

A antropometria estuda as medidas do corpo humano para aplicação em projetos de ergonomia. Todas as populações humanas são compostas de indivíduos de diferentes tipos físicos ou biótipos. Pequenas diferenças nas proporções de cada segmento do corpo existem desde o nascimento e tendem a acentuar-se durante o crescimento, até a idade adulta. A antropometria busca mapear as dimensões humanas considerando as nuances citadas anteriormente. (IIDA, 2005)

Segundo Iida (2005), no Brasil não existem medidas antropométricas normalizadas da população. Entretanto, baseado em estudos, Iida (2005) relata que é possível aplicar as tabelas estrangeiras, como a da norma DIN 33402 de 1981, mostradas nas figuras Figura 2.10 e Figura 2.11, para os projetos de antropometria aplicada, na qual são toleráveis erros de até 5%.

		Mulher			Homem		
		5%	50%	95%	5%	50%	95%
		151,0	161,9	172,5	162,9	173,3	184,1
1 CORPO EM PÉ	1.2 Altura dos olhos, em pé, ereto	140,2	150,2	159,6	150,9	161,3	172,1
	1.3 Altura dos ombros, em pé, ereto	123,4	133,9	143,6	134,9	144,5	154,2
	1.4 Altura do cotovelo, em pé, ereto	95,7	103,0	110,0	102,1	109,6	117,9
	1.5 Altura do centro da mão, braço pendido, em pé	66,4	73,8	80,3	72,8	76,7	82,8
	1.6 Altura do centro da mão, braço erguido, em pé	174,8	187,0	200,0	191,0	205,1	221,0
	1.7 Comprimento do braço, na horizontal, até o centro da mão	61,6	69,0	76,2	66,2	72,2	78,7
	1.8 Profundidade do corpo, na altura do tórax	23,8	28,5	35,7	23,3	27,6	31,8
	1.9 Largura dos ombros, em pé	32,3	35,5	38,8	36,7	39,8	42,8
	1.10 Largura dos quadris, em pé	31,4	35,8	40,5	31,0	34,4	36,8
2 CORPO SENTADO	2.1 Altura da cabeça, a partir do assento, tronco ereto.	80,5	85,7	91,4	84,9	90,7	96,2
	2.2 Altura dos olhos, a partir do assento, tronco ereto	68,0	73,5	78,5	73,9	79,0	84,4
	2.3 Altura dos ombros, a partir do assento, tronco ereto	53,8	58,5	63,1	56,1	61,0	65,5
	2.4 Altura do cotovelo, a partir do assento, tronco ereto	19,1	23,3	27,8	19,3	23,0	28,0
	2.5 Altura do joelho, sentado	46,2	50,2	54,2	49,3	53,5	57,4
	2.6 Altura poplitea (parte inferior da coxa)	35,1	39,5	43,4	39,9	44,2	48,0
	2.7 Comprimento do antebraço, na horizontal, até o centro da mão	29,2	32,2	36,4	32,7	36,2	38,9
	2.8 Comprimento nádega-poplitea	42,6	48,4	53,2	45,2	50,0	55,2
	2.9 Comprimento da nádega-joelho	53,0	58,7	63,1	55,4	59,9	64,5
	2.10 Comprimento nádega-pé, perna estendida na horizontal	95,5	104,4	112,6	96,4	103,5	112,5
	2.11 Altura da parte superior das coxas	11,8	14,4	17,3	11,7	13,6	15,7
	2.12 Largura entre os cotovelos	37,0	45,6	54,4	39,9	45,1	51,2
	2.13 Largura dos quadris, sentado	34,0	38,7	45,1	32,5	36,2	39,1
3 CABEÇA	3.1 Comprimento vertical da cabeça	19,5	21,9	24,0	21,3	22,8	24,4
	3.2 Largura da cabeça, de frente	13,8	14,9	15,9	14,6	15,6	16,7
	3.3 Largura da cabeça, de perfil	16,5	18,0	19,4	18,2	19,3	20,5
	3.4 Distância entre os olhos	5,0	5,7	6,5	5,7	6,3	6,8
	3.5 Circunferência da cabeça	52,0	54,0	57,2	54,8	57,3	59,9
4 MÃOS	4.1 Comprimento da mão	15,9	17,4	19,0	17,0	18,6	20,1
	4.2 Largura da mão	8,2	9,2	10,1	9,8	10,7	11,6
	4.3 Comprimento da palma da mão	9,1	10,0	10,8	10,1	10,9	11,7
	4.4 Largura da palma da mão	7,2	8,0	8,5	7,8	8,5	9,3
	4.5 Circunferência da palma	17,6	19,2	20,7	19,5	21,0	22,9
	4.6 Circunferência do pulso	14,6	16,0	17,7	16,1	17,6	18,9
	4.7 Cilindro de pega máxima (diâmetro)	10,8	13,0	15,7	11,9	13,8	15,4
5 PÉS	5.1 Comprimento do pé	22,1	24,2	26,4	24,0	26,0	28,1
	5.2 Largura do pé	9,0	9,7	10,7	9,3	10,0	10,7
	5.3 Largura do calcanhar	5,6	6,2	7,2	6,0	6,6	7,4

Figura 2.10 – Medidas de antropometria estática resumidas da norma alemã DIN 33402 de 1981.
(Fonte: IIDA, 2005)

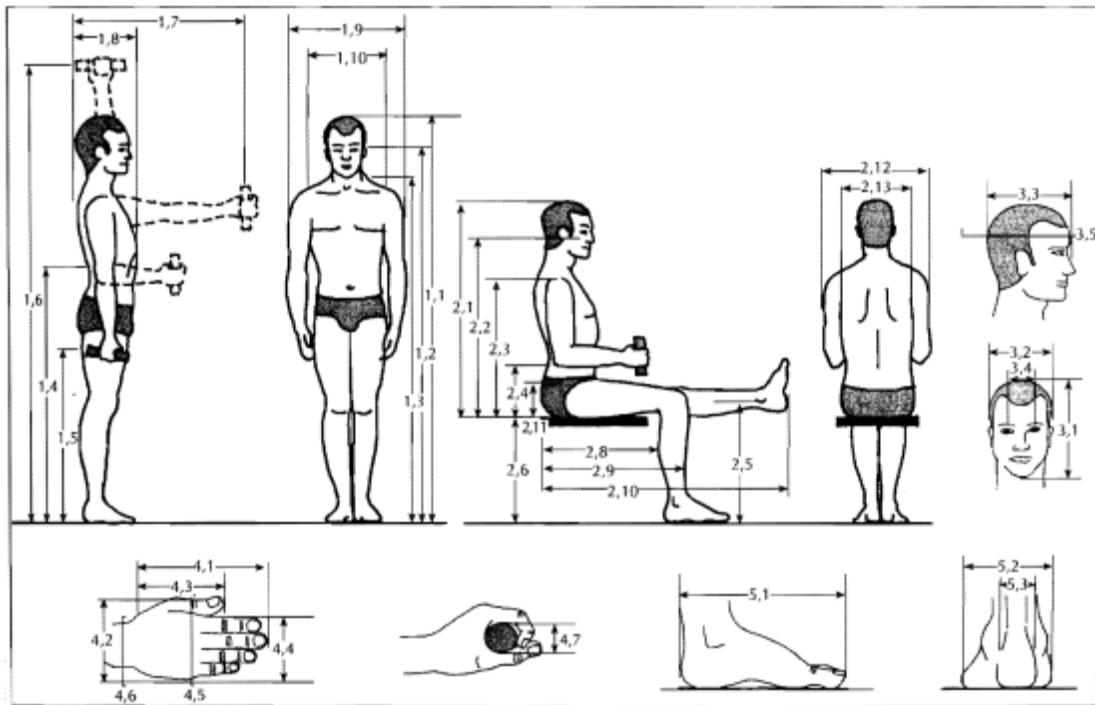


Figura 2.11 – Principais variáveis usadas em medidas de antropometria estática do corpo. (Fonte: IIDA, 2005)

Entretanto, as medidas fornecidas pela tabela da norma DIN 33402 de 1981 não são adequadas para o desenho do manequim virtual, pois não utilizam como referência para as medidas as articulações do corpo. Tilley (2002) fornece medidas baseadas em referências adequadas para o desenho do manequim, mostradas na Figura 2.12.

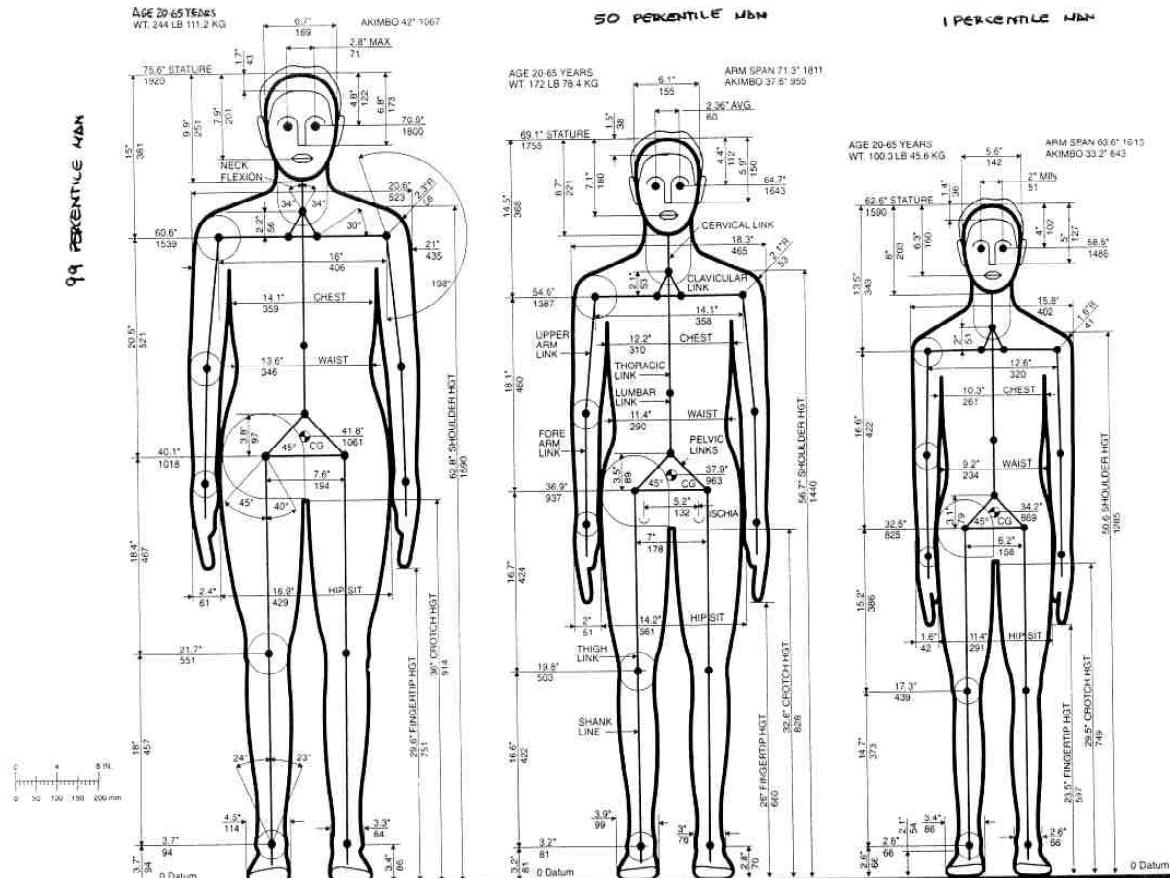


Figura 2.12 – Medidas antropométricas com referência as articulações. (Fonte: TILLEY, 2002)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente é identificado em qual etapa da morfologia de projeto o estudo se encontra e é considerado o conceito da engenharia simultânea com a identificação dos componentes do ciclo de vida do produto. Posteriormente, realizou-se a identificação dos elementos, atributos e ambientes do nível 4, 3 e 2 do projeto, referentes ao ambiente interno da empresa, ao ambiente externo à empresa e a máquina projetada, respectivamente. Guiado pelos ambientes dos níveis foi realizado o estudo da viabilidade técnica da cadeira ortostática apontando as características da cadeira mais adequadas ao escopo do estudo.

Da literatura foram utilizadas medidas antropométricas da media da população masculina com idade entre 20 e 65 anos para a construção de um manequim virtual. O manequim foi, então, utilizado como referência para o posicionamento do usuário segundo as dimensões confortáveis para alcance manual frontal para uma pessoa em pé e em cadeira de rodas conforme norma NBR9050:2004.

Por fim foram realizados equacionamentos da dinâmica da cadeira para compreender a influência de suas dimensões e posicionamento do manequim na sua estabilidade e diribilidade.

3.1 Morfologia de projeto

O tema do trabalho está situado no Grupo 1 e fases 1 e 2 da morfologia apresentada por Asimow (1962), ou seja, o tema se refere a fase inicial do projeto, relativa a concepção e estudo da viabilidade técnica de um conceito de cadeira de rodas coerente com o mercado (usuários) e os recursos disponíveis.

Sob o ponto de vista do modelo PAD, o tema aborda sua primeira etapa, correspondente a identificação das necessidades dos usuários e das características desejáveis do produto, e sua segunda etapa, correspondente ao desenvolvimento de um *mock-up* virtual.

3.2 Conceito da Engenharia Simultânea

Para utilizar o conceito da engenharia simultânea de considerar, desde o início, todos os componentes do ciclo de vida do produto, é necessário, primeiro, identificar quais são os componentes do ciclo de vida de um produto. São eles:

- pesquisa de mercado e identificação das necessidades do usuário;
- projeto (informacional, preliminar e detalhado);

- protótipo;
- testes e validação;
- homologação;
- manufatura;
- montagem;
- embalagem;
- distribuição;
- venda;
- manutenção;
- reciclagem ou eliminação.

3.3 Identificação dos níveis e ambientes

3.3.1 Elementos e atributos do nível 4

Sob esses componentes do ciclo de vida do produto irão operar os elementos do nível 4 do projeto, referentes ao ambiente interno da empresa. No caso particular do presente estudo, os elementos situam-se no ambiente em que o autor tem possibilidade de desenvolver e construir o projeto, incluindo os laboratórios e oficinas disponíveis na universidade. A cada elemento estão associados atributos do produto. A viabilidade técnica dos conceitos da máquina serão julgados e selecionados sob o ponto de vista desses atributos. Além disso, o conjunto de atributos que a máquina atende irá fornecer as características do produto.

A Tabela 3.1 aborda os elementos e atributos do nível 4 do projeto.

Tabela 3.1 – Elementos e atributos do nível 4 do projeto

Elemento	Atributos
RH – pessoas (quantidade e <i>know-how</i>)	Coerente com <i>know-how</i> do time de projeto. Coerente com nº de pessoas.
Gerenciamento do projeto	Adequado ao cronograma.
P&D	N/A
GC/TI – informação	Documentado: expressa o quanto as atividades de projeto foram registradas e podem ser rastreadas.
Infraestrutura	Dependente somente da empresa.
Testes e ensaios	Confiabilidade: expressa o quanto o produto é capaz de atender a condições adversas de uso, mesmo fora do especificado. Inclui a durabilidade e o atributo “bem testado”. Durabilidade: expressa a vida útil da peça ou produto. Bem testado: expressa a quantidade e a diversidade de testes a qual o produto ou peça é submetido.
Financeiro – dinheiro	Coerente com os recursos financeiros disponíveis.

Compras – peças	“Comprabilidade” das peças e matéria prima: expressa a disponibilidade comercial das peças e matérias primas compradas e seus preços. Peças comerciais convencionais geralmente são mais baratas e fáceis de encontrar. Inclui a disponibilidade comercial. Disponibilidade comercial: expressa se a peça ou matéria prima pode ser comprada facilmente, com dificuldade ou se não é possível comprar a peça, nesse último caso sendo necessário manufaturar a peça.
Manufatura – peças	“Manufaturabilidade”: expressa a facilidade de manufaturar a peça considerando diversos aspectos, como tipo de manufatura (convencional ou não convencional) e disponibilidade das máquinas necessárias para manufatura, volume de produção, quantidade de máquinas utilizadas, tempo de manufatura e uso de ferramental. Adequado à matéria prima disponível.
Homologação	Legal: De acordo com a legislação. Normatizado/Padronizado: De acordo com normas e padronizações. Regulamentado/Certificado: Certificado por alguma instituição regulamentadora.
Montagem	<i>Serviceability</i> : expressa o grau de facilidade de montagem e desmontagem do produto e seus subsistemas para montagem e realização de manutenções. Considera-se o número de fixações, o acesso aos fixadores, tipo de montagem de peças (interferente ou folgada), intercambiabilidade dos componentes, por exemplo.
Embalagem	“Embalabilidade”: expressa o quanto o produto pode ser compactado para ser embalado.
Distribuição, logística e cadeia de suprimentos	“Transportabilidade”: expressa a facilidade de o produto ser transportado pela empresa. Inclui a “embalabilidade” e fatores como peso e volume.
Marketing e vendas	“Mercadabilidade” (<i>Marketability</i>): expressa o quanto um produto é atraente para o mercado. Está relacionado com diversos aspectos como baixo custo, estética, qualidade e coerência com as necessidades do usuário.
Treinamento e instrução para o usuário	Intuitividade: expressa a capacidade de o produto ser utilizado de maneira adequada intuitivamente. Documentado
Manutenção, reciclagem e eliminação	<i>Serviceability</i> Mantenabilidade: expressa a periodicidade de manutenção e quantidade de atividades necessárias para realizar a manutenção. Sustentabilidade: engloba os atributos de “recicabilidade” e “degradabilidade”. Envolve a utilização de conceitos de <i>lean manufacturing</i> . “Recicabilidade”: expressa a capacidade que o produto ou peça tem de ser reciclado. “Degravabilidade”: expressa a capacidade, em termos de tempo e impacto ao meio, que o produto ou peça tem ao ser degradado no meio-ambiente.

É no ambiente dos elementos do nível 4 juntamente com a quantidade de recursos disponíveis (dinheiro, matéria prima, tempo e pessoas) que se encontram os principais fatores limitantes do projeto.

3.3.2 Seleção dos atributos do nível 4

Para que a análise dos conceitos sob o ponto de vista dos atributos seja mais clara e precisa, foi necessário fazer uma seleção dos atributos acima. Os atributos que não serão utilizados para análise dos conceitos serão os:

- atributos relacionados entre si: coerente com o nº de pessoas e dependente somente da empresa, relacionados ao tempo disponível para realização do projeto. Também a “comprabilidade” das peças, relacionada ao tempo e aos recursos financeiros disponíveis;
- atributos em que o principal realizador do projeto não é capaz de avaliar: Legal/Normatizado, pois o autor não teve acesso a normas e legislações. A “mercadabilidade”, pois é muito complexa e distante da formação do autor;
- atributos referentes às etapas posteriores a definição dos conceitos: documentado, confiabilidade, “embalabilidade”, “transportabilidade”, intuitividade e mantenabilidade.

Sendo assim, os atributos selecionados foram:

- adequado ao cronograma;
- coerente com o *know-how* do time de projeto;
- coerente com os recursos financeiros disponíveis;
- adequado à matéria prima disponível;
- manufaturabilidade (parte pode ser trabalhada após definição do conceito);
- *serviceability* (parte pode ser trabalhada após definição do conceito);
- sustentabilidade.

3.3.3 Ambiente dos atributos do nível 4

Como mencionado, o ambiente dos elementos e atributos do nível 4 são alguns dos principais limitantes do projeto. Assim, esses ambientes foram identificados.

- Coerente com o *know-how* do time de projeto. Time de projeto composto por uma pessoa, o autor do trabalho. Formação incompleta em engenharia mecânica, o que caracteriza limitação de *know-how* tanto pela diversidade de áreas como pela experiência. Professores e alunos de pós-graduação disponíveis para auxílio.

- Adequado ao cronograma. Tempo bruto disponível é de 4 meses. Desse tempo, devem ser deduzidos os tempos necessários para a realização de outras atividades do time de projeto, como aulas e estágio obrigatório.
- Coerente com os recursos financeiros disponíveis: Pouco dinheiro para utilização no projeto. Até mil reais.
- Adequado à matéria prima disponível.
- Manufaturabilidade: Oficinas da universidade (EESC, Lamafe e Numa). Máquinas CNC e convencionais (torno e fresadora), retificadoras, plainas e outras. Soldas TIG, MIG e eletrodo. Estimativa de tempo de manufatura: 1,5 mês. Possibilidade de utilização da oficina do Formula SAE (redução de tempo de manufatura a custo de tempo do autor).

Para permitir a realização do projeto de maneira coerente com os recursos financeiros disponíveis, foi adotada a estratégia de reutilização de peças de uma cadeira de rodas já existente no Laboratório de Tribologia e Compósitos – EESC-ESP. Com isso, também se reduz o tempo total de realização do projeto, restringindo o projeto e manufatura a somente alguns componentes. O modelo virtual da cadeira cujas peças serão aproveitadas encontra-se na Figura 3.1.



Figura 3.1 – Cadeira disponível para o estudo.

3.3.4 Elementos e atributos do nível 3

A Tabela 3.2 mostrada a seguir, contém elementos e atributos do nível 3 do projeto, referentes ao ambiente externo, incluindo o cliente ou usuário, com suas condições financeiras, biotipos, estatísticas de uso do produto (de tempo e local), fatores psicossociais, tipo de deficiência/necessidade; ambientes físicos, considerando sua acessibilidade, condições e perfil; sociedade, com sua cultura de consumo, cultura de exposição do deficiente e visão sobre o deficiente; instituições regulamentadoras (governo, sociedades de engenharia e de padronização) com suas normas e legislações.

Tabela 3.2 – Elementos e atributos do nível 3 do projeto

Elemento	Atributos
Cliente/Usuário	<p>Coerente com as necessidades do usuário e os requisitos de mercado: Pesquisa de mercado, identificação das necessidades do usuário.</p> <p>Utilidade: expressa a gama de funções e utilidades que o produto consegue abranger.</p> <p>Coerente com o tempo de utilização (uso esporádico ou prolongado).</p> <p>Coerente com o tipo de deficiência do usuário.</p> <p>Psicologicamente confortável: expressa o quanto o produto gera autoconfiança, autoestima e autoafirmação no usuário. Reduz a exposição do deficiente. Respeita a privacidade e modéstia do usuário.</p> <p>Permite controle sobre o ambiente.</p> <p>Custo coerente com as condições financeiras do público alvo.</p>
Instituições regulamentadoras	<p>Legal</p> <p>Normatizado/Padronizado</p> <p>Regulamentado/Certificado</p>
Sociedade	<p>Coerente com a cultura de consumo da sociedade.</p> <p>Coerente com a visão da sociedade sobre o deficiente: relacionado com o conforto psicológico e a funcionalidade proporcionada com o uso do produto.</p> <p>Estilo/Estética.</p>
Ambiente físico	<p>Coerente com o local de uso (asfalto, terra, areia, plano, inclinado, escada) e o estado de conservação dos locais de uso.</p>

A realização de uma pesquisa de mercado para determinação das funções e características desejáveis de uma cadeira de rodas estava fora do escopo do trabalho.

3.3.5 Seleção dos atributos do nível 3

Do mesmo modo do nível 4, para que a análise dos conceitos sob o ponto de vista dos atributos seja mais clara e precisa, foi necessário fazer uma seleção dos atributos acima. Os atributos que não foram utilizados para análise dos conceitos foram os:

- atributos relacionados entre si: coerente com a visão da sociedade, relacionado com o conforto psicológico e com o controle sobre o ambiente, e coerente com o tempo de utilização, relacionado com o tipo de deficiência;
- atributos em que o principal realizador do projeto não é capaz de avaliar: coerente com as necessidades do usuário e os requisitos de mercado, pois não estava no escopo do trabalho, legal/normatizado, pois o autor não teve acesso a normas e legislações. O estilo/estética e a coerência com a cultura de consumo da sociedade, pois estão distantes da formação do autor.

Sendo assim, os atributos selecionados foram:

- custo coerente com as condições financeiras do público alvo;
- utilidade;
- coerente com o local de uso e seu estado de conservação;
- coerente com o tipo de deficiência do usuário;
- psicologicamente confortável (difícil avaliação);
- permite controle sobre o ambiente.

3.3.6 Ambiente dos atributos do nível 3

Existe uma forte característica do mercado das tecnologias assistivas que motivou o projeto: o alto custo das cadeiras de rodas aliado à reduzida funcionalidade. Um dos objetivos desse projeto foi agregar, à cadeira convencional, funcionalidades que melhorem a qualidade de vida do cadeirante, mas, para atingir a maioria dos usuários e efetivamente cumprir o objetivo de melhorar sua qualidade de vida, o produto final deve ser acessível financeiramente às pessoas, ou seja, deve ser de **baixo custo**.

Para que o projeto da cadeira seja de baixo custo foi determinado que ela fosse **acionada mecanicamente**. Logo o público alvo do projeto são os usuários de cadeira de rodas que consigam utilizar as mãos para acioná-la.

Para reduzir os custos de fabricação e ter mais empresas capacitadas para realizar a manutenção da cadeira foram visadas a **manufaturabilidade** e **mantenabilidade**, respectivamente. Dessa forma, o projeto se torna mais acessível e atraente aos fabricantes.

Para facilitar a manufatura, é dada preferência a peças de revolução sem perfis curvos para a produção em tornos convencionais. Também poderão ser utilizadas peças prismáticas sem perfis curvos, para a produção em fresadoras convencionais. O projeto das

peças visou, além da facilidade de manufatura, a facilidade de montagem (*serviceability*) dos componentes para redução dos custos de montagem e de manutenção.

Justificativa para o mecanismo de ortostatismo

O usuário que permanece longos períodos utilizando a cadeira de rodas na posição sentada, seja devido a uma lesão permanente ou temporária, tem a tendência de desenvolver um encurtamento dos músculos da coxa e da panturrilha, além de úlceras de pressão. No caso dos usuários que se recuperam da lesão e tem a possibilidade de voltar a andar, o encurtamento dos músculos retarda a evolução de sua reabilitação. A alteração da posição sentada para a posição ortostática, além de prevenir as úlceras de pressão e o encurtamento dos músculos, facilita a eliminação de urina em pacientes do sexo masculino. Essa mudança de posição é facilmente conseguida com o uso de uma cadeira de rodas ortostática. (ARVA *et al.*, 2009)

Além dos benefícios fisiológicos que a cadeira ortostática pode proporcionar, existem benefícios psicológicos. Ao ficar na posição de pé com o auxílio da cadeira, o usuário amplia o alcance de suas mãos a locais mais elevados (**controle sobre o ambiente**), obtendo maior independência (**autodeterminante**). Com a possibilidade de conversar com não-usuários numa mesma altura, há um maior conforto psicológico do usuário (**psicologicamente confortável**). (ARVA *et al.*, 2009)

É notável o número de benefícios que o simples ato de ficar na posição ortostática pode trazer ao cadeirante. Com isso, a funcionalidade ortostática da cadeira foi selecionada. Por outro lado a funcionalidade ortostática deprecia o atributo da segurança pela menor estabilidade quando a pessoa está na posição ortostática. A cadeira ortostática pode trazer vários benefícios a partir de pouca modificação no projeto da cadeira de rodas convencional.

Reforçando a importância do baixo custo, atualmente não há uma cadeira que forneça os benefícios de uma cadeira ortostática que seja tão acessível financeiramente quanto às cadeiras convencionais.

O local de uso foco do projeto são os mesmos das cadeiras convencionais: chão firme e com, no máximo, pouca inclinação. Pode ser utilizada dentro de residências e prédios.

Assim, considerando os ambientes dos atributos e as decisões tomadas, refinaram-se os atributos selecionados para:

- potencial para baixo custo;

- utilidade;
- psicologicamente confortável.

3.3.7 Elementos e atributos do nível 2

A função de uma cadeira de rodas segue de sua definição: é um dispositivo móvel utilizado por pessoas com dificuldade de locomoção. Ou seja, a função da cadeira é promover ou permitir a locomoção de pessoas. Com isso surgem dois componentes desse nível do projeto, o mecanismo de propulsão e a interface com o usuário. Implícito no fator locomoção está o direcionamento da cadeira. Com isso surge outro componente, o mecanismo de direção. Uma estrutura deve suportar o usuário e os mecanismos, compondo mais um elemento do nível. Da necessidade da transição da posição sentada para a posição ortostática, surge outro elemento, o mecanismo de elevação.

Além disso, deseja-se que a propulsão da cadeira também possa ser feita com o usuário na posição ortostática, reforçando a interface entre os mecanismos de propulsão e elevação. Deve-se atentar também ao suporte do usuário quando ele está na posição ortostática.

Assim, foram listados os subsistemas da cadeira, como na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Elementos do nível 2. Subsistemas da cadeira.

Propulsão (referente à locomoção)
Direção (referente à locomoção)
Interface com usuário (referente à pessoa)
Elevação (referente ao ortostatismo)
Estrutura (referente ao suporte do usuário e dos mecanismos)

Os elementos do nível 2 e a máquina como um todo são avaliados conforme os atributos da Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Atributos do nível 2 do projeto.

Atributos	
Funcionalidade: expressa se os mecanismos funcionam adequadamente.	Bem dimensionado: expressa se as peças foram dimensionadas adequadamente, sejam elas componentes estruturais, térmicos ou elétricos. Está inserido no contexto da confiabilidade.
Ergonômico: postura correta, confortável (termicamente e em textura), entre outros.	Estabilidade

Dirigibilidade: expressa a facilidade de manobrar a cadeira em diversas condições. Expressa se a cadeira tem comportamento previsível. Inclui a precisão.	Preciso: expressa a sensibilidade de operação. Considera ausência de folga nos mecanismos e a rigidez estrutural.
Transportabilidade: expressa a facilidade em transportar a máquina.	Seguro: expressa o quanto a máquina tende a preservar a integridade humana em diversas condições. Considera a estabilidade e a ergonomia.
Estilo/Estética	Simples
Custo	Ajustável: expressa se a máquina permite regulagens e ajustes que permitam acomodar diferentes pessoas ou diferentes condições do ambiente.
Modular: expressa a independência entre as diferentes partes da máquina	Automatizado
Envelopado: expressa o quanto a máquina está no seu envelope de medida.	Leve: em termos de peso.
Rigidez adequada.	Silencioso
Compacto	Higiênico: permite limpeza com facilidade.

Os atributos do nível 2 são trabalhados após a definição dos conceitos, entretanto a viabilidade técnica de um conceito é analisada a partir de seu potencial para agregar esses atributos. Os principais atributos a serem avaliados nesse nível são:

- funcionalidade;
- estabilidade;
- ergonomia;
- simplicidade;
- potencial para transportabilidade;
- potencial de baixo peso.

Os elementos do nível 1 são listado só depois de desenvolvido os conceitos.

3.4 Manequim virtual e principais dimensões

Consideradas as medidas antropométricas da média da população masculina com idade entre 20 e 65 anos, apresentadas por Tilley (2002) e mostradas na Figura 3.2, foi construído um manequim virtual para auxiliar o desenvolvimento e análise dos conceitos, mostrado na Figura 3.3.

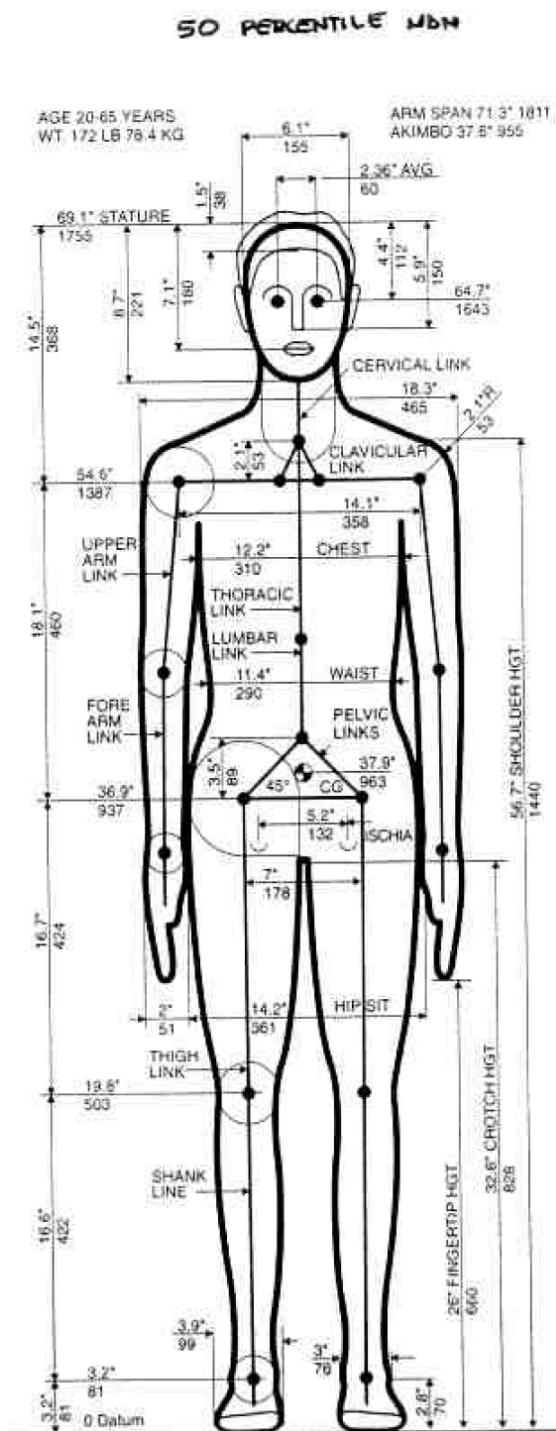


Figura 3.2 – Medidas antropométricas do corpo. (Fonte: TILLEY, 2002)

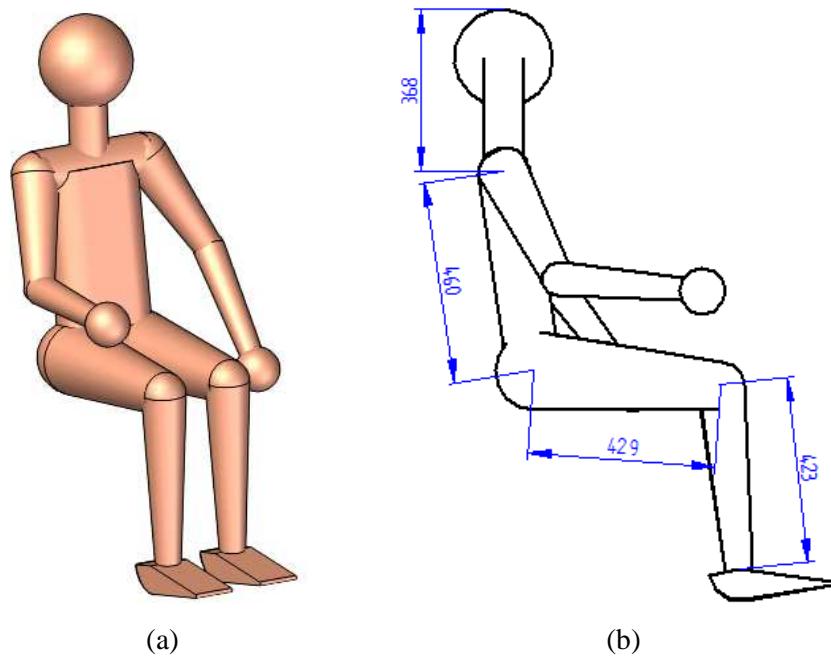


Figura 3.3 – Manequim virtual. (a) Vista isométrica. (b) Vista lateral com dimensões de antropometria.

Também foi realizado o posicionamento do manequim para que esteja de acordo com a norma NBR9050:2004 para as dimensões de conforto para alcance manual frontal em cadeira de rodas:

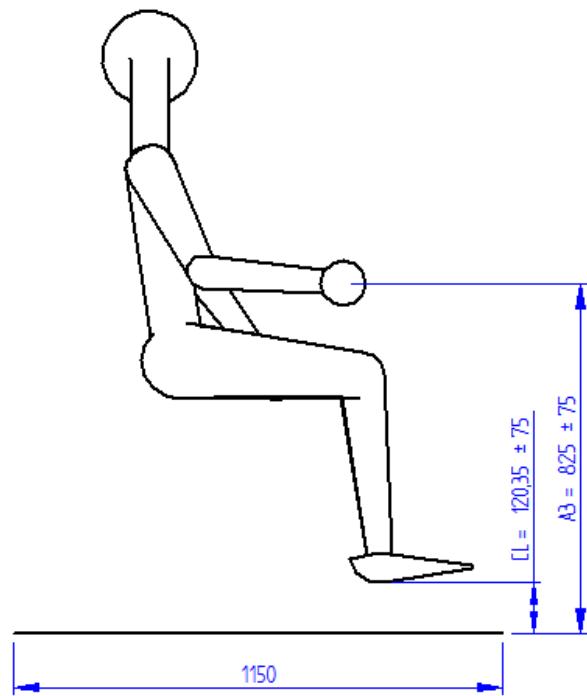


Figura 3.4 – Manequim posicionado na posição sentada.

A faixa de valor para a distância da parte mais inferior da cadeira ao chão, chamada CL na Figura 3.4, de mais ou menos 75 mm foi determinada de modo que a altura do centro da mão com relação ao chão com antebraço a 90° do tronco na posição sentada na cadeira de rodas, chamada A3 na Figura 3.4, permaneça de acordo com a norma.

Ao verificar as dimensões de conforto para alcance manual frontal em pé, verifica-se uma diferença de 220 mm na altura do centro da mão com relação ao chão com antebraço a 90° do tronco na posição em pé, chamada de C1 na Figura 3.5, podendo ser reduzida a 145 mm com a adoção do menor CL possível. Nota-se que a redução de CL também reduz a altura do centro de gravidade (CG), o que favorece a estabilidade e o desempenho da cadeira. Com a redução da medida CL, a diferença de altura da pessoa na cadeira para a altura da pessoa é de 25 mm, ou seja, a pessoa fica, praticamente, com a mesma altura.

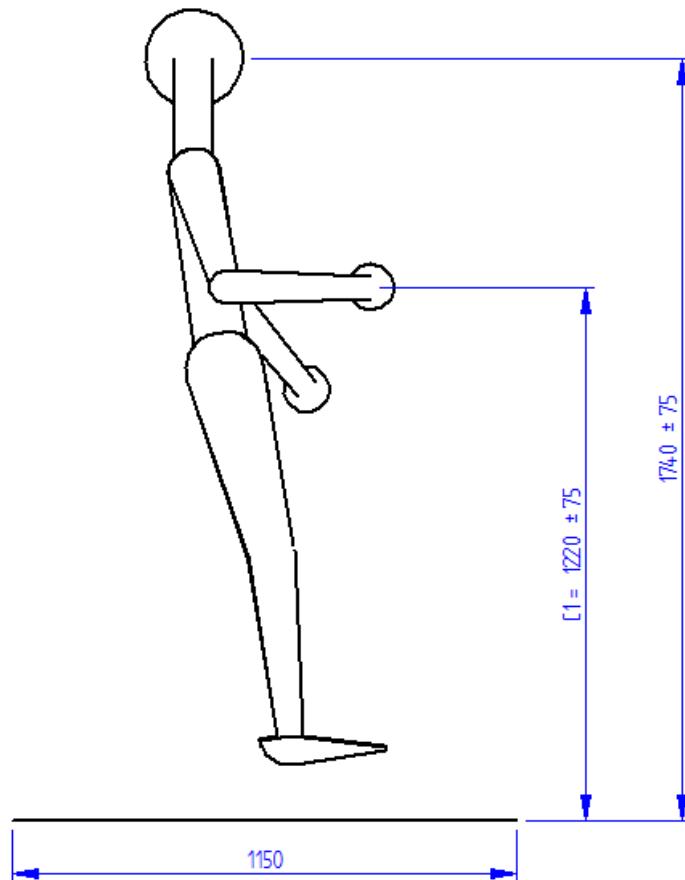


Figura 3.5 – Manequim posicionado na posição de pé.

Como referência, foram utilizadas as medidas máximas de 700 mm x 1150 mm para a cadeira, conforme fornecido pela norma NBR9050:2004 para acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos.

3.5 Previsão do comportamento dinâmico da cadeira

Para uma melhor compreensão dos atributos do nível 2 e suas relações, realizou-se uma análise da dinâmica da cadeira através do equilíbrio de forças. A análise também permitiu identificar os valores máximos de força aplicada à roda para evitar o capotamento da cadeira.

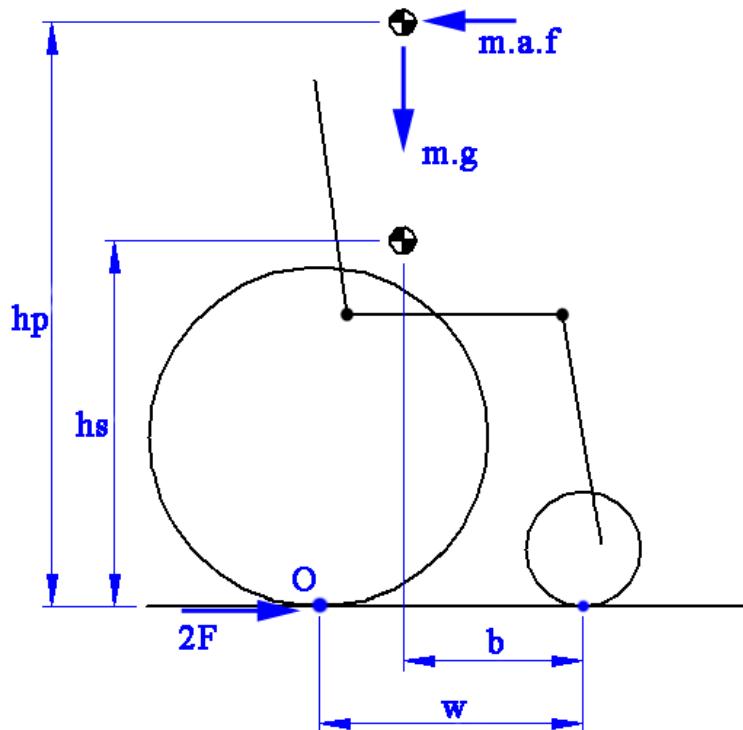


Figura 3.6 – Diagrama de corpo livre da cadeira de rodas em vista lateral.

Na Figura 3.6:

m = massa da cadeira com condutor [kg];

g = aceleração da gravidade [m/s^2];

w = entre-eixos da cadeira [m];

b = distância do eixo dianteiro ao CG [m];

a = aceleração [m/s^2];

f = fator de inércia rotativa;

h_p = altura do CG na posição ortostática [m];

h_s = altura do CG na posição sentada [m].

Sendo

$$l_l = \sqrt{(w-b)^2 + h^2} \quad (1)$$

a distância do CG ao ponto O na vista lateral.

É sabido que

$$\alpha \cdot l_l = a_{long} \quad (2)$$

Assim o equacionamento da dinâmica longitudinal da cadeira será dado pela (3), desenvolvida a seguir.

$$\begin{aligned} \Sigma M_0 = 0 \Rightarrow m.g.(w-b) - m.a_{long}.f.h &= (I_1 + m.l_l^2) \frac{a_{long}}{l_l} \\ \Rightarrow a_{long,max} &= \frac{g.(w-b)}{\frac{I_1}{m} + \frac{(w-b)^2 + h^2}{l_l}} \end{aligned} \quad (3)$$

em que:

a_{long} = aceleração longitudinal [m/s^2];

$a_{long,max}$ = máxima aceleração longitudinal na posição ortostática de modo que não ocorra capotamento [m/s^2];

h = altura do CG [m];

I_1 = momento de inércia no CG na direção transversal [$kg.m^2$].

Observa-se que, para maximizar a aceleração longitudinal, deve-se minimizar h_p , f e I_1 e maximizar m . Observando o gráfico da equação (4), mostrado na Figura 3.7, nota-se que, para maximizar a aceleração longitudinal, também se deve maximizar a diferença $(w-b)$. Portanto, deve-se maximizar w e minimizar b .

$$y = \frac{10x}{2 + \frac{4,25+x^2}{\sqrt{4+x^2}}}, \quad -30 < x < 30 \quad (4)$$

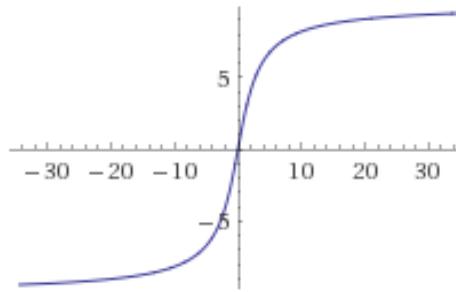


Figura 3.7 – Gráfico da equação (4).

Do equilíbrio de forças na horizontal foi verificado que o valor máximo de força que o usuário poderá imprimir a roda na posição ortostática sem que ocorra o capotamento é

$$F_{\max} = 0,5 \cdot m \cdot a_{\text{long, máx}} \cdot f \quad (5)$$

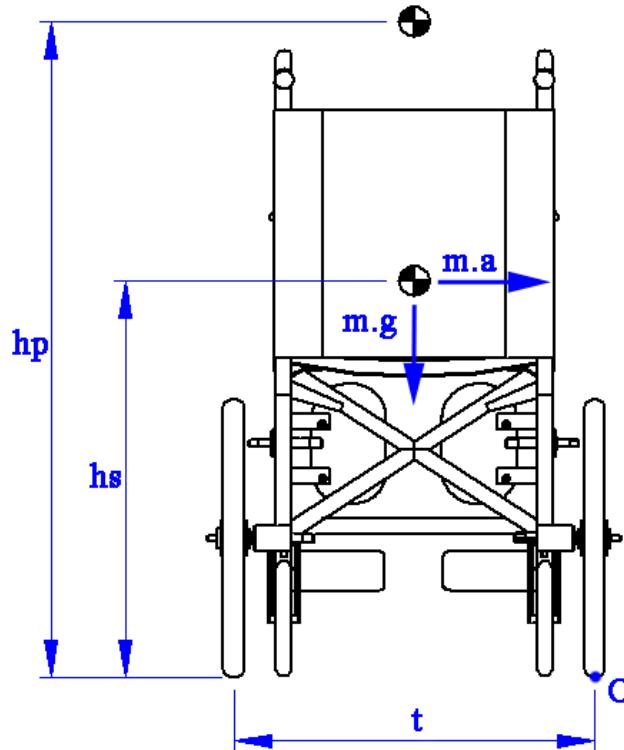


Figura 3.8 – Diagrama de corpo livre da cadeira de rodas em vista frontal.

Na Figura 3.8, t corresponde a medida da bitola da cadeira.

Sendo

$$l_f = \sqrt{(0,5 \cdot t)^2 + h^2} \quad (6)$$

a distância do CG ao ponto O na vista frontal.

É sabido que

$$\gamma \cdot l_f = a_{lat} \quad (7)$$

Assim o equacionamento da dinâmica lateral da cadeira será dado pela equação (8), desenvolvida a seguir.

$$\begin{aligned} \Sigma M_0 = 0 \Rightarrow m.g.0,5.t - m.a_{lat}.h &= (I_2 + m.l_f^2) \frac{a_{lat}}{l_f} \\ \Rightarrow a_{lat,max} &= \frac{g.0,5.t}{h_p + \frac{\frac{I_2}{m} + (0,5.t)^2 + h_p^2}{l_f}} \end{aligned} \quad (8)$$

em que:

a_{lat} = aceleração lateral [m/s^2];

$a_{lat,max}$ = máxima aceleração lateral na posição ortostática de modo que não ocorra capotamento [m/s^2];

I_2 = momento de inércia no CG na direção longitudinal [$kg.m^2$].

Observa-se que, para maximizar a aceleração lateral, deve-se minimizar h_p e I_2 e maximizar m . De modo análogo a dinâmica longitudinal, para maximizar a aceleração lateral também deve-se maximizar t .

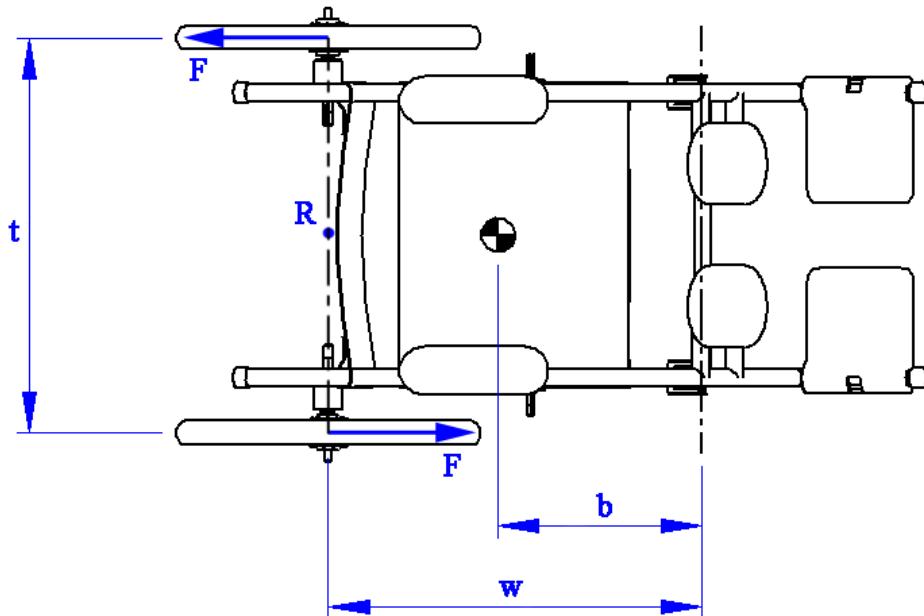


Figura 3.9 – Diagrama de corpo livre da cadeira de rodas em vista superior.

Para avaliar a dinâmica de giro no direcionamento da cadeira é utilizada a equação (9).

$$\begin{aligned}
 \Sigma M_R = 0 \Rightarrow 2.F.0,5.t &= [I_3 + m.(w-b)^2].\alpha_d + 2.I_r.\alpha_r \\
 \Rightarrow F.t &= [I_3 + m.(w-b)^2].\alpha_d + 2.I_r.\left(\alpha_d \cdot \frac{0,5.t}{D_r}\right) \\
 \Rightarrow F.t &= \alpha_d \left([I_3 + m.(w-b)^2] + I_r \cdot \frac{t}{D_r} \right) \\
 \Rightarrow \alpha_d &= \frac{F.t}{I_3 + m.(w-b)^2 + I_r \cdot \frac{t}{D_r}}
 \end{aligned} \tag{9}$$

em que:

α_d = aceleração angular da cadeira [rad/s²];

α_r = aceleração angular do subsistema de propulsão [rad/s²];

I_3 = momento de inércia no CG na direção vertical [kg.m²];

I_r = momento de inércia resultante do subsistema de propulsão no eixo traseiro [kg.m²];

D_r = diâmetro das rodas traseiras [m].

É possível dizer que a equação (9) reflete uma parte do que compõe o atributo de dirigibilidade da cadeira. Dela pode-se verificar quais parâmetros influenciam a capacidade de aceleração angular da cadeira, que, de certo modo, influencia no esforço feito pelo usuário.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da seleção dos atributos dos níveis de projeto e da identificação de seus ambientes, juntamente com a geometria virtual do manequim e os equacionamentos da dinâmica da cadeira, é possível realizar a análise da viabilidade técnica de conceitos, considerando a maioria dos aspectos do ciclo de vida do produto.

Em suma, para a análise da viabilidade técnica das alternativas de conceito dos subsistemas de propulsão, direção, interface com usuário, elevação, e estrutura, os atributos selecionados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Atributos de projeto

Adequado ao cronograma
Coerente com o <i>know-how</i> do time de projeto
Coerente com os recursos financeiros disponíveis
Adequado à matéria prima disponível
Manufaturabilidade (parte pode ser trabalhada após definição do conceito)
Serviceability (parte pode ser trabalhada após definição do conceito)
Sustentabilidade
Utilidade
Psicologicamente confortável
Funcional
Estabilidade
Ergonomia
Simplicidade
Potencial para transportabilidade
Potencial de baixo custo
Potencial de baixo peso

4.1 Princípios do mecanismo de elevação para ortostatismo

Para o mecanismo de elevação, foram levantados dois princípios, mostrados na Figura 4.1. O primeiro princípio, mais intuitivo, consiste na elevação da pessoa através da rotação do assento, enquanto o segundo consiste na elevação da articulação entre o encosto e o assento. Todos os demais conceitos encontrados utilizava um dos dois princípios.

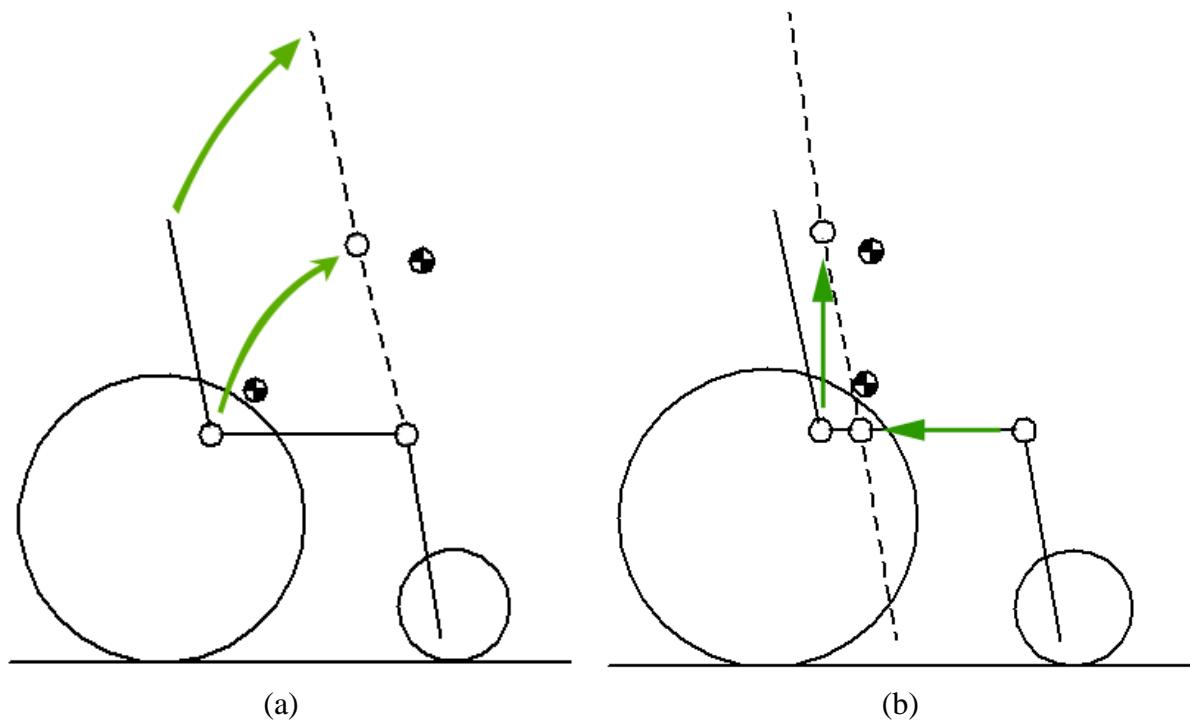


Figura 4.1 – Princípios do sistema de elevação. (a) Princípio 1. (b) Princípio 2.

É possível observar que no princípio 1 há a presença de movimentos circulares nas articulações e que o CG avança longitudinalmente, enquanto no princípio 2, os movimentos das articulações são lineares e o CG somente é elevado.

Os movimentos lineares são mais fáceis de serem produzidos e controlados, portanto o princípio 2 tem a tendência de ser mais simples. Decorrente da maior simplicidade, pode-se extrapolar e dizer que 2 tem a tendência de ser projetado em menor tempo, com a necessidade de um *know-how* menor, com manufaturabilidade e *serviceability* melhores e com maior potencial para baixo custo e peso. Além disso, o princípio 2 mantém um melhor envelope de medidas para o usuário.

O movimento longitudinal do CG no princípio 1 traz o CG para perto do eixo dianteiro o que desfavorece a estabilidade estática da cadeira com relação ao capotamento para a frente.

Considerando a análise feita, segue o desenvolvimento da cadeira com a utilização do princípio 2.

4.2 Mecanismo acionador para elevação

Escolhido o princípio número 2, deve-se avaliar as alternativas de mecanismos de elevação segundo seus princípios físicos. As propostas são:

- acionamento mecânico: parafuso de potência;
- acionamento hidráulico: macaco;
- acionamento pneumático: macaco de cadeira de escritório.

O parafuso de potência é mais difícil de ser posicionado e necessita de um número maior de estruturas de suporte e transmissão de movimento, embora seja mais confiável. Os acionamentos por fluido são mais facilmente posicionados e acionados, entretanto necessitam de mais manutenção. Já o macaco pneumático de cadeira de escritório chama a atenção pela simplicidade de construção e baixo custo, sendo adotado como mecanismo acionador para elevação.

4.3 Princípios do mecanismo de propulsão

Foram levantados quatro princípios do mecanismo de propulsão: propulsão elétrica, propulsão mecânica direta, propulsão mecânica indireta e propulsão hidráulica. A propulsão mecânica direta consiste no mecanismo de propulsão convencional, cujo acionamento é feito diretamente na roda motora. A propulsão mecânica indireta consiste num acionador auxiliar que está conectado a roda, ou seja, o acionamento da roda é indireto. Já na propulsão hidráulica o acionamento da roda é feito por meio de algum sistema hidráulico.

Nessa etapa, poderiam ser levantados alternativas de conceito para substituição da roda, como esferas ou alguma propulsão por empuxo, de modo que a propulsão e o direcionamento sejam feito através do direcionamento do bocal que expele o fluido, como ocorre, por exemplo, no veículo *JetPack*. Porém essas alternativas não foram consideradas devido à distância das soluções convencionais.

A propulsão elétrica e hidráulica foram descartadas devido à ausência de conhecimento do projetista em sistemas elétricos e hidráulicos. Para melhor avaliação da propulsão elétrica e hidráulica segundo os atributos, seria conveniente adquirir conhecimento no tema ou buscar auxílio de alguém que detenha os conhecimentos e possa avaliar o princípio.

A propulsão mecânica indireta e a propulsão hidráulica permitem o uso de rodas de menor diâmetro no eixo traseiro, que podem ser posicionadas de modo a favorecer a estabilidade da cadeira, como mostrado na Figura 4.2.

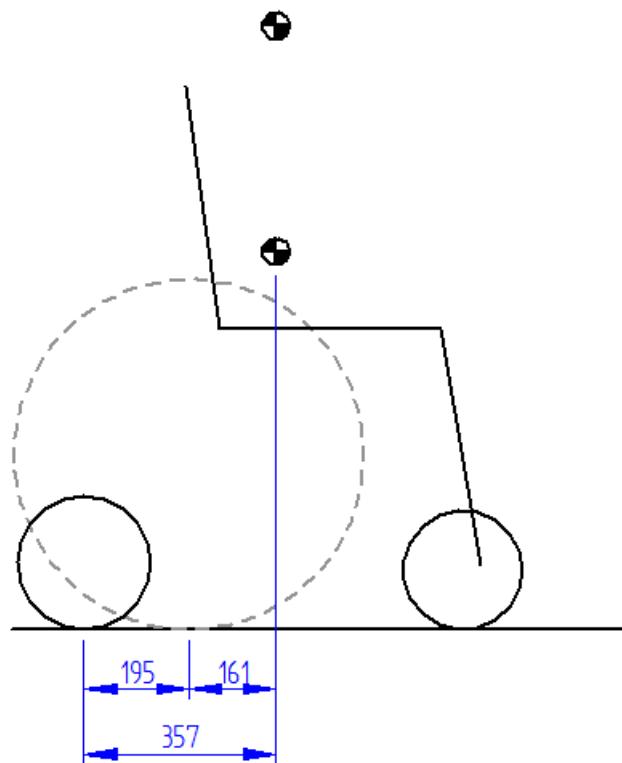


Figura 4.2 – Ganhos de estabilidade com roda de menor diâmetro.

É possível concluir que os princípios de acionamento mecânico indireto e acionamento hidráulico são mais interessantes que o sistema convencional de acionamento direto na roda, devido a maior estabilidade que proporcionam à cadeira. Entretanto, os fatores do cronograma e dos recursos financeiros disponíveis se sobressaem e, com isso, mantém-se o princípio do acionamento convencional.

4.4 Princípios do mecanismo de direção, de interface com o usuário e da estrutura

Não foram encontrados ou gerados conceitos para a estrutura e direcionamento da cadeira diferentes do convencional. Os princípios convencionais desses subsistemas já atendem a maioria dos atributos priorizados no projeto.

Na interface com o usuário, as soluções convencionais já atendem a maioria dos atributos, exceto a questão da ergonomia, a qual deve ter uma análise mais detalhada. Entretanto a análise da ergonomia está distante dos conhecimentos do projetista, sendo necessário o auxílio de um especialista. Mais especificamente, para o apoio do usuário quando estiver na posição ortostática, podem ser utilizadas, por exemplo, cintas contra barreiras rígidas estofadas.

5 CONCLUSÕES

Observando o trajeto de delineamento do conceito da cadeira, conclui-se que o desenvolvimento buscou um balanço entre os atributos de projeto técnicos e gerenciais. No âmbito técnico, foram balanceados estabilidade, simplicidade, manufaturabilidade, *serviceability*, baixo peso e baixo custo. No âmbito não técnico pode-se dizer que o conceito é, a princípio, adequado ao conhecimento do projetista, ao tempo e aos recursos financeiros disponíveis para desenvolvimento do projeto.

O esboço do conceito de maior viabilidade pode ser observado na Figura 4.1-b. Nele, o subsistema de elevação busca favorecer a estabilidade da cadeira e a simplicidade do mecanismo como um todo. Devem decorrer da sua simplicidade, uma maior manufaturabilidade, *serviceability*, baixo peso e baixo custo.

O conceito de propulsão não foi alterado da cadeira manual convencional para adequar o projeto ao tempo e os recursos financeiros disponíveis, embora houvesse uma grande vantagem técnica em alterar o sistema de propulsão.

Para os outros subsistemas foram adotados os conceitos convencionais. Nos subsistemas da estrutura e do direcionamento da cadeira, as soluções convencionais já satisfazem os atributos de projeto. No subsistema de interface com o usuário a solução convencional foi adotada porque o projetista não possui conhecimento suficiente para avaliar os conceitos.

Assim, a análise das alternativas de conceito para uma cadeira de rodas ortostática, através dos princípios da engenharia de sistemas e da engenharia simultânea baseados em atributos que buscaram refletir os ambientes do ciclo de vida do produto, permitiu investigar a viabilidade de diferentes alternativas de projeto e forneceu o conceito de cadeira de rodas ortostática de maior viabilidade técnica dentro do escopo do estudo. Ainda, a capacidade da cadeira para ortostatismo agregou uma funcionalidade que melhora a qualidade de vida do usuário.

A etapa seguinte do desenvolvimento do produto seria a identificação dos componentes do nível 1 do projeto e seus atributos. Posteriormente, a construção de modelos matemáticos que correlacionassem os diferentes parâmetros da cadeira e suas peças e, em seguida, desenvolver cada subsistema sob os aspectos dos atributos de todos os níveis do projeto e os modelos matemáticos.

6 REFERÊNCIAS

ALVARENGA, F. B. Desenvolvimento de sistema de motorização alternativa para cadeira de rodas convencionais. Campinas, 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.

ARVA, J.; PALEG, G.; LANGE, M.; LIEBERMAN, J.; SCHEMELER, M.; DICIANNO, B.; ROSEN, L. **RESNA Position on the application of wheelchair standing devices.** Journal of assistive technology. Volume 21. 161-168. Taylor & Francis, 2009.

ASIMOW, M. **Introduction to design.** Prentice Hall, 1962.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9050:** Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro, 2004. 97p.

BACK, N. **Metodologia de Projetos Industriais.** Ed. Guanabara Dois, 1983.

BARBOSA, A. P. *et al.* **Cadeira de rodas ortostática.** Revista Ceciliiana. Volume 1/2010. 22-24. Santos, 2010.

CARVALHO, R. C. **Projeto de um mini-moinho vibratório auxiliado por técnicas de metodologia de projeto.** São Carlos, 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 130p.

CARRIEL, I.R.R. **Recomendações ergonômicas para o projeto de cadeira de rodas:** considerando os aspectos fisiológicos e cognitivos dos idosos. Bauru, 2007. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista. 244p.

COOPER, R. A.; OHNABE, H.; HOBSON, D. A. **An Introduction to Rehabilitation Engineering: Series in Medical Physics and Biomedical Engineering.** Boca Raton: CRC Press, 2007. 444p.

IIDA, I. **Ergonomia:** projeto e produção. 2^a edição revisada e ampliada. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 340p.

MEDOLA, F. O. **Desenvolvimento de um aro de propulsão manual ergonômico para cadeira de rodas.** São Carlos, 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 124p.

NIEMANN, G. **Elementos de máquinas.** v.1. São Paulo: Edgard Blücher, 1971. 220p.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering Design: A Systematic Approach.** Segunda edição. Springer, 1996. 617p.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. H. **Engineering Design: A Systematic Approach.** London: Springer-Verlag, 2007.

PUGH, S. **Total Design**: Integrated method for successful product engineering. Addison Wesley, 1995.

PRASAD, B. **Concurrent engineering fundamentals**: integrated product and process development. v. 1. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K., **Shigley's mechanical engineering design**. Oitava edição. McGraw-Hill, 2007. 1055p.

TILLEY, A. R. **The measure of man and woman**. Edição revisada. New York: John Wiley & Sons Inc., 2002. 100p.

VARGAS, M. C. **Gerenciamento de projetos por meio da engenharia simultânea**: sugestões para a otimização do processo na Sudecap. Belo Horizonte, 2008. Monografia – Universidade Federal de Minas Gerais. 65p.

<http://fsae.com/eve/forums/a/tpc/f/125607348/m/217101453> (acesso em: 15/08/2012)

<http://ocw.mit.edu/courses/engineering-systems-division/esd-33-systems-engineering-summer-2004/> (acesso em: 15/08/2012)

<http://www.cadeirarodas.com/> (acesso em: 11/08/2011)

<http://www.ergoweb.com/news/detail.cfm?id=1145> (acesso em: 28/08/2011)

http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/engsimul_v2.html (acesso em: 15/08/2012)