

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADEMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNO TURMINA GUEDES**

**PROTOTIPAGEM VIRTUAL: SIMULAÇÃO DINÂMICA DE CONJUNTO  
PARA MOBILIDADE DE CADEIRANTES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2015**

BRUNO TURMINA GUEDES

**PROTOTIPAGEM VIRTUAL: SIMULAÇÃO DINÂMICA DE  
CONJUNTO PARA MOBILIDADE DE CADEIRANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 1, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Adamczuk  
Oliveira

Co-Orientador: Prof. Dr. Gilson Ditzel Santos

PATO BRANCO

2015



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, que eu amo incondicionalmente e que diariamente auxiliam na minha caminhada espiritual. À minha namorada, que me conquistou pela humildade, beleza e simplicidade.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à minha mãe Marlete, meu pai Edison, meu pai Jairo, minhas irmãs Brenda e Mariana, que sempre me apoiaram e me deram forças, especialmente no início da minha graduação, quando tive grandes obstáculos e períodos de incertezas. Agradeço por vocês contribuírem arduamente para que meus sonhos fossem realizados, por sacrificarem dias e noites para me darem o luxo de estudar.

Ao meu doador, espírito nobre, que me presenteou com o seu corpo, permitindo que eu prosseguisse minha evolução neste plano espiritual. Ao meu médico, Dr. Darci Dacome, que me enfrentou como um desafio e deu seu melhor em prol da minha saúde.

À minha namorada, a minha Isabelzinha, que dividiu suas noites de estudo comigo, e esteve presente em cada passo que eu dei a caminho do título de engenheiro, agradeço a sua compreensão e ajuda. Aos amigos e colegas, que me ensinaram a importância do trabalho em grupo, do compartilhamento do conhecimento e da ajuda ao próximo. Enfrentamos juntos a suada batalha diária para tornarmos engenheiros, vimos muitos desistirem. Em especial ao Max, 13, Zortéa e Nardino pela amizade e ao Fábio José de Camargo e Guilherme Teixeira pelo grande auxílio na confecção deste trabalho, enquanto colegas do mesmo grupo de estudo.

Não poderia deixar de agradecer ao grupo de professores e engenheiros da UTFPR, que me conduziram tal qual um escultor esculpe uma pedra bruta, em especial aos professores Gilson Adamczuk Oliveira, Fabio de Freitas Lima e Gilson Ditzel, pelas oportunidades e confiança a mim concedidas. Aos professores Paulo Rogério Novak, Francisco Augusto Aparecido Gomes e Luiz Carlos Martinelli Junior pela excelência no ensino, conhecimento e disciplina em sala de aula.

## RESUMO

GUEDES, Bruno Turmina. Prototipagem Virtual: Simulação Dinâmica de Conjunto para Mobilidade de Cadeirantes. 2015. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

Esta pesquisa busca realizar a simulação dinâmica de um conjunto para mobilidade de cadeirantes através da prototipagem virtual. Protótipo este concebido à luz do Desdobramento da Função Qualidade (QFD) e também do Planejamento e Desenvolvimento de Produtos (PDP). Este projeto é voltado à tecnologia assistiva visa melhorar e auxiliar a mobilidade dos cadeirantes através de um *front-bike*, dispositivo que adiciona uma terceira roda às cadeiras de rodas convencionais a fim de adicionar um *powertrain* (trem de força) elétrico à cadeira do usuário. O protótipo virtual foi analisado através do método por elementos finitos. Estas análises envolveram fenômenos físicos que são de imprescindível relevância ao detalhamento e dimensionamento do protótipo, como a análise dinâmica e o escoamento de fluidos sob a carenagem do protótipo (ou aerodinâmica).

**Palavras-Chave:** Prototipagem Virtual, Desdobramento da Função Qualidade, Tecnologia Assistiva, Planejamento e Desenvolvimento de Produtos (PDP).

## ABSTRACT

GUEDES, Bruno Turmina. Virtual Prototyping: Dynamic Simulation for Mobility Wheelchair. 2015. 57 p. Term Paper (Degree in Mechanical Engineering) – Mechanical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2015.

This research seeks to accomplish the dynamic simulation of a group for wheelchair user mobility through virtual prototyping. This prototype was designed based on Quality Function Deployment (QFD) and also the New Product Development methodology (NPD). This project focused on assistive technology aims to improve and assist the mobility of wheelchair users through a front-bike, a device that adds a third wheel to conventional wheelchairs to add an electric powertrain from wheelchair user. The virtual prototype has been analyzed by finite element method. These tests involved physical phenomena that are of essential importance and the detail design of the prototype, as the dynamic analysis of the flow of fluids under the careen of the prototype (or aerodynamic).

**Keywords:** Virtual Prototyping, Quality Function Deployment, Assistive Technology, New Product Development methodology (NPD).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de Estágios e <i>Gates</i> .....	17
Figura 2. Modelo Unificado do Processo de Desenvolvimento do Produto. ....	18
Figura 3. Casa da Qualidade para o QFD. ....	22
Figura 4. Diagrama de Kano.....	23
Figura 5. Modelo de um Sistema Confiável. ....	25
Figura 6. Atributos de <i>Dependability</i> . ....	26
Figura 7. Exemplo de Desenho Assistido por Computador (CAD). ....	29
Figura 8. Exemplo de Manufatura Auxiliada por Computador (CAM). ....	30
Figura 9. Exemplo de Engenharia Auxiliada por Computador (CAE). ....	31
Figura 10. Sistema Massa-Mola-Amortecedor.....	34
Figura 11. Modelo de Vibração <i>Quarter-Car</i> . ....	35
Figura 12. Forças em Corpo Bidimensional em Movimento. ....	37
Figura 13. Escoamento Viscoso em Torno de um Aerofólio. ....	38
Figura 14. Camada Limite e Efeito Esteira. ....	38
Figura 15. Desdobramento da Função Qualidade e Suas Etapas. ....	41
Figura 16. Ambiente de Modelagem ( <i>Part</i> ). ....	48
Figura 17. Ambiente de Montagem ( <i>Assembly</i> ). ....	48
Figura 18. Ambiente de Trabalho do Ansys 14.5.....	49
Figura 19. Engates Fixos na Cadeira de Rodas. ....	54
Figura 20. Componentes da Cadeira de Rodas.....	55
Figura 21. Componentes do <i>Front Bike</i> .....	55
Figura 22. <i>Front Bike</i> e Chassi com as Conexões da Cadeira de Rodas. ....	56
Figura 23. Elemento de Ligação, Engate Rápido. ....	57
Figura 24. Cadeira de Rodas do Fabricante Jumper, Modelo WCMX.....	58
Figura 25. Sistemas de Terceiros no <i>Front Bike</i> . ....	59



Figura 26. Detalhe para o Sistema de Freio, Acionamento e Amortecimento. ....	59
Figura 27. Detalhe para o Sistema de Direção e Amortecimento. ....	60
Figura 28. Protótipo Virtual do <i>Trike</i> em sua Concepção Final. ....	61
Figura 29. Protótipo Virtual em sua Versão Final. ....	62
Figura 30. Forças Agindo no <i>Trike</i> . ....	64
Figura 31. Forças Aplicadas na Simulação Estática. ....	67
Figura 32. Coeficiente de Segurança. ....	67
Figura 33. Tensão Equivalente de <i>Von-Misses</i> . ....	68
Figura 34. Linhas de Trajetória com Velocidade em m/s. ....	68
Figura 35. Variação da Velocidade em m/s. ....	69
Figura 36. Variação da Velocidade em m/s. ....	69
Figura 37. Resposta Dinâmica em Relação ao Amortecimento do Protótipo. ....	71

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Fases do Desenvolvimento de Produtos.....	20
Quadro 2. Avaliação das Respostas.....	24
Quadro 3. Aspectos Positivos e Negativos da Prototipagem Virtual.....	33
Quadro 4. Perguntas Realizadas no Questionário.....	43
Quadro 5. Escala de Respostas Psicométricas.....	44
Quadro 6. Necessidades dos Clientes.....	50
Quadro 7. Requisitos de Projeto e Grau de Importância.....	51
Quadro 8. Requisitos do Projeto, Especificações e Importância Técnica.....	53
Quadro 9. Itens de Terceiros para o Protótipo.....	58
Quadro 10. Massas dos Componentes do Trike.....	66
Quadro 11. Cronograma de Trabalho.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F(t)$	Função no Tempo
$m$	Massa
$k$	Rigidez
$c$	Amortecimento
$M$	Massa Suspensa
$m$	Massa Não-Suspensa
$Ks$	Rigidez da Massa Suspensa
$Cs$	Amortecimento da Massa Suspensa
$Kt$	Rigidez da Massa Não Suspensa
$RR$	Rigidez Equivalente da Suspensa
$\omega_n$	Frequência Natural do Sistema
$\omega_d$	Frequência Natural Amortecida
$\zeta_s$	Razão de Amortecimento
$Z$	Deslocamento da Massa Suspensa
$Z_u$	Deslocamento da Massa Não Suspensa
$Z_r$	Deslocamento do Terreno
$F_b$	Forças Sobre a Massa Suspensa
$F_w$	Forças Sobre a Massa Não Suspensa
$\alpha$	Quociente Entre Massas Não Suspensas e Suspensas
$C$	Quociente Entre Amortecimento da Massa Suspensa e Massa Suspensa
$K1$	Quociente Entre Rigidez da Massa Não Suspensa e Massa Suspensa
$K2$	Quociente Entre Rigidez da Massa Suspensa e Massa Suspensa
$j$	Operador Matemático para Números Complexos
$Cd$	Coefficiente de Arrasto
$F_d$	Força de Arrasto
$\rho$	Densidade do Protótipo
$V$	Volume do Protótipo
$A$	Área do Protótipo
$U$	Escoamento Plenamente Desenvolvido

$k$	Constante de Mola, Rigidez do Material
$k_s$	Rigidez da Massa Suspensa
$k_t$	Rigidez da Massa Não Suspensa
$F_{t1}$	Componente 1 da Força de Tração
$F_{t2}$	Componente 2 da Força de Tração
$f_t$	Força de Tração
$w_f$	Peso do <i>Front</i>
$m_f$	Massa do <i>Front</i>
$g$	Aceleração da Gravidade
$w_{wuc}$	Peso do Cadeirante e Cadeira de Rodas
$m_u$	Massa do Cadeirante
$m_{wc}$	Massa da Cadeira de Rodas

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>17</b>
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1.1 Desenvolvimento de Produtos .....	17
2.1.2 Desdobramento da Função Qualidade .....	21
2.1.3 Critério de Kano .....	22
2.1.4 Tecnologia Assistiva .....	25
2.1.5 Prototipagem Virtual .....	27
2.1.5.1 Prototipagem: Histórico e Objetivos .....	27
2.1.5.2 Tecnologias para Aplicação de Prototipagem.....	28
2.1.5.3 Prototipagem Virtual no Desenvolvimento de Produtos .....	31
2.1.5.3.1 Análise Dinâmica .....	34
2.1.5.3.2 Escoamento de Fluidos ao Redor de Corpos Imersos .....	36
<b>2.2 METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
2.2.1 Metodologias de Desenvolvimento do Trike 2 .....	40
2.2.2 Aplicações do QFD na Determinação das Especificações - Meta do <i>Trike 2</i> .....	41
2.2.3 <i>Softwares</i> para Prototipagem Virtual e Utilização no Trike .....	46
2.2.3.1 SolidWorks® .....	47
2.2.3.2 Ansys .....	49
2.3 DETERMINAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DO TRIKE.....	50
2.4 PROTÓTIPO VIRTUAL TRIKE VERSÃO 2.....	54
2.4.1 Protótipo Virtual.....	54
2.4.2 Análises e Simulações .....	63
2.5 CRONOGRAMA .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

<b>3. CONCLUSÕES .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>76</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Um problema comum na sociedade, as pessoas que possuem mobilidade reduzida sofrem cotidianamente com o desrespeito do direito de ir e vir, pois os transportes coletivos não estão adaptados, as calçadas e vias públicas não são acessíveis, os prédios, nem os públicos nem os de uso privado, respeitam as necessidades mínimas de acessibilidade para cadeiras de rodas e outras dificuldades de locomoção (IBDD, 2008).

Neste sentido, propõe-se uma tecnologia assistiva à luz do Desdobramento da Função Qualidade (QFD) e também do Planejamento e Desenvolvimento de Produtos (PDP). Sendo que durante o desenvolvimento do projeto utilizou-se a prototipagem virtual. Esta aplicação de tecnologia assistiva visa melhorar e auxiliar a mobilidade dos cadeirantes através de um *front-bike*, dispositivo que adiciona uma terceira roda às cadeiras de rodas convencionais a fim de adicionar um *powertrain* (trem de força) elétrico para o usuário.

Justifica-se a utilização da prototipagem virtual pois além de influenciar diretamente na transmissão de informações entre todos os envolvidos no desenvolvimento do produto, principalmente servirá como base para simulação dinâmica em ambiente virtual. É importante ressaltar que o uso da prototipagem virtual em detrimento da prototipagem física exige o usuário final aos testes, visto que este possui mobilidade reduzida.

Este projeto é parte integrante de projeto que envolve a fabricação e testes do protótipo físico. Espera-se ao final desse trabalho estabelecer inter-relações visando o desenvolvimento entre esse projeto (o protótipo virtual) que fornecerá elementos para a confecção do protótipo físico. Após testes de usabilidade informações realimentarão o protótipo físico.

A seguir, o próximo capítulo traz uma revisão da literatura dos conceitos, ferramentas e métodos utilizados nessa pesquisa. Esta revisão abrange o Desenvolvimento de Produtos, incluindo a definição de QFD, Critério de Kano, Tecnologia Assistiva e, por fim, a Prototipagem Virtual.

Nos métodos utilizados é apresentado o desenvolvimento da tecnologia assistiva a partir do PDP, bem como a obtenção das especificações – meta do *trike* através do uso do QFD. A partir destas especificações a metodologia mostra também quais *softwares* foram utilizados para as simulações dinâmicas propostas, a serem desenvolvidas até o final da pesquisa.

Em seguida, a determinação das especificações foi realizada, analisando as ações tomadas a fim de se ter a faixa de valores ideal de cada requisito do produto, para que este satisfaça as expectativas do cliente. Em seguida, o quinto capítulo apresenta, inicialmente (TCC1) quais simulações e análises dinâmicas serão feitas a partir do modelo sólido gerado em Desenho Assistido por Computador (CAD), e em um segundo momento (TCC2), efetivamente será discutido essas simulações. E por fim, são feitas as conclusões finais.



## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção inicialmente será abordada a relação entre o Desdobramento da Função Qualidade (QFD) e o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP). Em seguida, será explanado o critério de Kano e sua relação com o QFD. Na terceira seção serão apresentados os conceitos relacionados à Tecnologia Assistiva (TA). Por fim, será feita uma revisão de literatura sobre prototipagem virtual, assim como a sua relação com o processo de desenvolvimento de produtos.

#### 2.1.1 Desenvolvimento de Produtos

Nos últimos tempos os clientes estão cada vez mais exigentes, informados e com maiores possibilidades de escolhas. As empresas estão cada vez mais competitivas e com frequência lançam novos produtos, os quais buscam atender continuamente às necessidades dos clientes, de forma mais eficiente e com maior número de funcionalidades, tornando-os mais atrativos e criando no cliente o desejo de substituir o produto (ou modelo) anterior.

Cooper (1990) propôs os estágios denominados *gates* como pontos durante o desenvolvimento em que é reunido todas as informações do projeto e são tomadas as decisões. O autor afirma que nesses pontos o líder de projeto toma decisões a partir de resultados ou um conjunto de atividades. Cada decisão tomada em um *gate* influenciará a decisão do subsequente, sendo assim, o *gate* anterior estará subordinado ao próximo, e assim sucessivamente. Estes *gates* podem ser visualizados na Figura 1 a seguir.

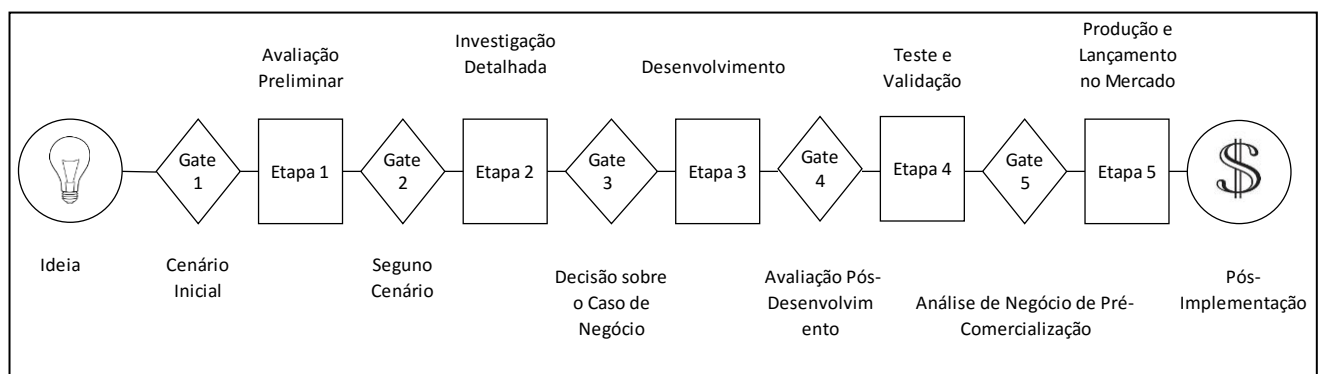


Figura 1. Sistema de Estágios e Gates.

Fonte: Adaptador de Cooper (1990).

Para Rozenfeld *et al.* (2006) afirma que o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) está na interface entre a empresa e o mercado, tendo como objetivo identificar e antecipar as necessidades do mercado, e por meio de projetos de produtos propor soluções que atendam essas necessidades.

O processo do PDP possui um elevado grau de incertezas e riscos das atividades e resultados, existindo a dificuldade de mudar as decisões iniciais visto que estas são tomadas no início do projeto, quando as incertezas são ainda maiores. Existe também a manipulação e geração de um alto volume de informações (que são oriundas de diversas fontes e áreas da empresa e da cadeia de suprimentos), e por fim, as atividades básicas seguem um ciclo iterativo: projetar, construir, testar e otimizar.

Conforme o modelo de referência apresentado por Rozenfeld *et al.* (2006) existem três macrofases: Pré-Desenvolvimento, Desenvolvimento e Pós-Desenvolvimento, apresentadas na Figura 2. Sendo que as macrofases de pré- e pós-desenvolvimento são mais genéricas, enquanto que a macrofase de desenvolvimento enfatiza os aspectos tecnológicos correspondentes à definição do produto em si, suas características e forma de produção.

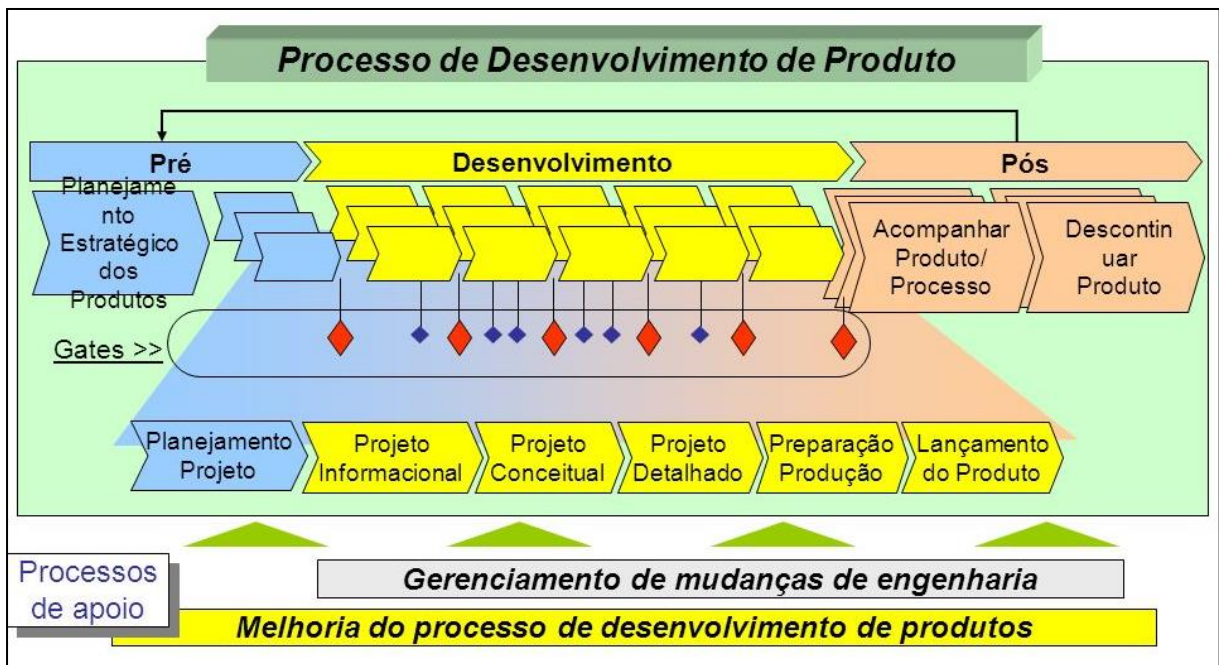


Figura 2. Modelo Unificado do Processo de Desenvolvimento do Produto.

Fonte: Rozenfeld, *et al.* (2006).

Conforme afirmam Rozenfeld *et al.* (2006), a primeira macrofase deve garantir que o direcionamento estratégico do produto a ser concebido esteja em consonância com as oportunidades, restrições e estratégias da empresa e seu portfólio.

No desenvolvimento cerca de 85% do custo final do produto é determinado, pois é nessa macrofase que são realizadas as escolhas de soluções do projeto, como materiais, conceitos e processos de fabricação. Vale salientar que é neste momento que ocorre o maior número de iterações, conforme Rozenfeld *et al.* (2006), em razão do grau de incerteza inicial, ocorrem modificações de produto nessas fases do desenvolvimento, quando informações mais precisas estão disponíveis. Sendo assim, na macrofase do desenvolvimento é que acontece o desenvolvimento de produtos, ou projeto do produto propriamente dito.

Por fim, a macrofase final que compreende o pós-desenvolvimento compreende a retirada sistemática do produto do mercado e também uma avaliação de todo o ciclo de vida do produto, para que as experiências contrapostas ao que foi planejado anteriormente sirvam de referência a desenvolvimentos futuros.

Ulrich e Eppinger (2012) conceituam um modelo de referência dividido em seis fases, que podem ser vistas no Quadro 1 a seguir. Segundo os autores o processo é uma sequência que transforma um conjunto de entradas em um conjunto de saídas. Essas fases são o planejamento, desenvolvimento do conceito, projeto em nível de sistema, projeto detalhado, testes e refinamento e produção teste. O autor ainda afirma que as principais áreas das organizações, ou seja, o *marketing*, projeto e manufatura, estarão plenamente envolvidas em todos os processos.

Fases	Título	Descrição
Fase 0	Planejamento	O conjunto de saída desta fase é a declaração de missão do projeto, na qual são especificadas as metas de mercado para o produto, objetivos de negócio, principais suposições e restrições.
Fase 1	Desenvolvimento do Conceito	As necessidades do mercado são identificadas, conceitos alternativos do produto são gerados e avaliados, sendo que alguns são selecionados para futuro desenvolvimento e teste. O conceito é a descrição da forma, função e recursos do produto, também feito uma justificativa econômica do projeto.
Fase 2	Projeto em Nível de Sistema	Nesta fase é definido a arquitetura e composição do produto em componentes e subsistemas. Também é realizado um pré-projeto dos componentes chave. Plantas iniciais do sistema de

		produção e montagem são concebidas.
Fase 3	Projeto Detalhado	Durante o projeto detalhado são realizadas as especificações completas do produto, incluindo a geometria, os materiais e tolerâncias. O conjunto de saída dessa fase é o controle de documentação para o produto, ou seja, os desenhos técnicos de cada componente do produto, especificação de ferramentas e processos de fabricação, especificação de componentes comprados, seleção de materiais e custos de produção.
Fase 4	Testes e Refinamento	Envolve a construção e avaliação de múltiplas versões de pré-produção do produto. São construídos os primeiros protótipos (versões alfa) e avaliados como o produto funciona e satisfaz as necessidades dos clientes. Em seguida mais protótipos com possíveis refinamentos são construídos (versões beta) para avaliar e testar os processos de fabricação.
Fase 5	Produção Teste	Por fim, na última fase o produto é fabricado na planta de fabricação pretendida, o objetivo desta fase é treinar as áreas envolvidas e eliminar os problemas que podem existir no processo de produção. A transição entre a produção contínua e a produção teste é usualmente gradual.

Quadro 1. Fases do Desenvolvimento de Produtos.

Fonte: Adaptado de Ulrich e Eppinger (2012).

Todavia, conforme Cheng *et al.* (1995) existem métodos para auxiliar o processo de desenvolvimento de produtos, ou seja, ações gerenciais de planejamento da qualidade. Segundo os autores, o QFD (*Quality Deployment Function*) é precisamente o método mais indicado para operacionalizar o desenvolvimento de um produto. A seguir, este método será explanado.

### 2.1.2 Desdobramento da Função Qualidade

Analisando a macrofase do Projeto Informacional, ao término desta, devem surgir as especificações-meta, ou seja, os requisitos do produto com valores-meta. Ou seja, busca-se levantar as necessidades dos clientes de cada fase do ciclo de vida. Neste sentido, desenvolvido inicialmente nas décadas de 60 e 70 no Japão pelos professores Akao e Mizuno (1994), o QFD (ou Desdobramento da Função Qualidade) foi criado para gerenciar o processo de gestão e desenvolvimento do produto – denominada ação gerencial do planejamento da qualidade.

Akao (2004) o define como um método eficaz para transformar as necessidades dos usuários de forma qualitativa em parâmetros quantitativos, introduzir nos produtos funções que contribuirão para a qualidade, implantar métodos para atingir a qualidade em projetos de componentes e subsistemas, e finalmente, a elementos específicos do processo de fabricação.

Cheng e Melo Filho (2010) afirmam que o QFD possui um forte potencial inerente ao método que é ouvir, traduzir e transmitir, de forma priorizada, a voz do cliente para dentro da empresa. Esses autores ainda descrevem que a utilização da matriz Casa da Qualidade, apresentada na Figura 3, permite que as informações e pontos de vista dos dois diferentes “mundos” (mercado e empresa) possam ser coordenados, gerando-se produtos que realmente reflitam os desejos e necessidades dos consumidores. Esta matriz vai desde a extração das características da qualidade para o produto até o estabelecimento dos valores-meta para essas características.

Cheng *et al.* (1995) teoriza sobre como obter a voz do cliente, ou seja, primeiras etapas na construção da matriz casa da qualidade. Assim, ao utilizar o QFD como uma ferramenta para transformar efetivamente parâmetros qualitativos em quantitativos, nem todas as necessidades dos clientes, representadas pelas qualidades exigidas possuem a mesma relevância.

Neste sentido, conforme as pesquisas de Kano (1984), o autor concebeu um método que busca contribuir para a priorização das qualidades exigidas pelo cliente em uma técnica de avaliação. Esta priorização influi diretamente nos índices de importância dos requisitos dos clientes (Figura 3), e será explanada a seguir.

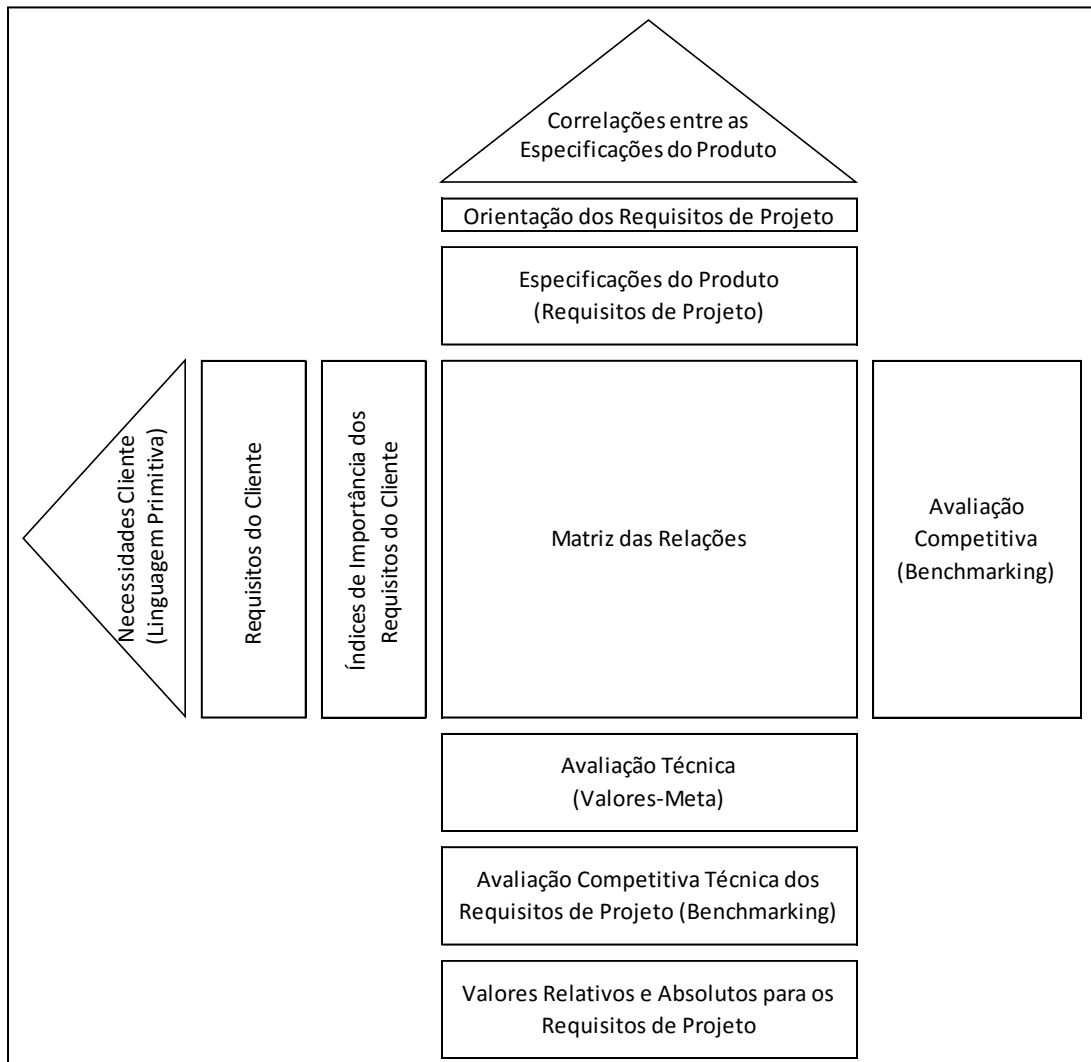


Figura 3. Casa da Qualidade para o QFD.

Fonte: Adaptado de Akao e Mizuno (1994).

### 2.1.3 Critério de Kano

Segundo Ulrich e Eppinger (2012) é essencial um sentido de importância relativa em relação às várias necessidades dos clientes. Os autores definem duas maneiras de esta identificar a relativa importância: através do consenso entre os membros do time de projetos, estes atribuindo pesos conforme suas experiências com os clientes, ou baseando-se em questionários aplicados diretamente aos consumidores.

Kano *et al.* (1984) sugere que os atributos podem ser identificados perguntando aos consumidores sobre sua reação ou satisfação, quando estes têm desempenho superior (questão positiva) e inferior (questão negativa). Dependendo das respostas para as questões positiva e negativa, o atributo pode ser identificado como atrativo, obrigatório, unidimensional, neutro ou reverso. Este modelo teórico se baseia na relação do grau de desempenho (eixo horizontal) com o grau de satisfação (eixo vertical), conforme figura abaixo, visualizado na Figura 4.

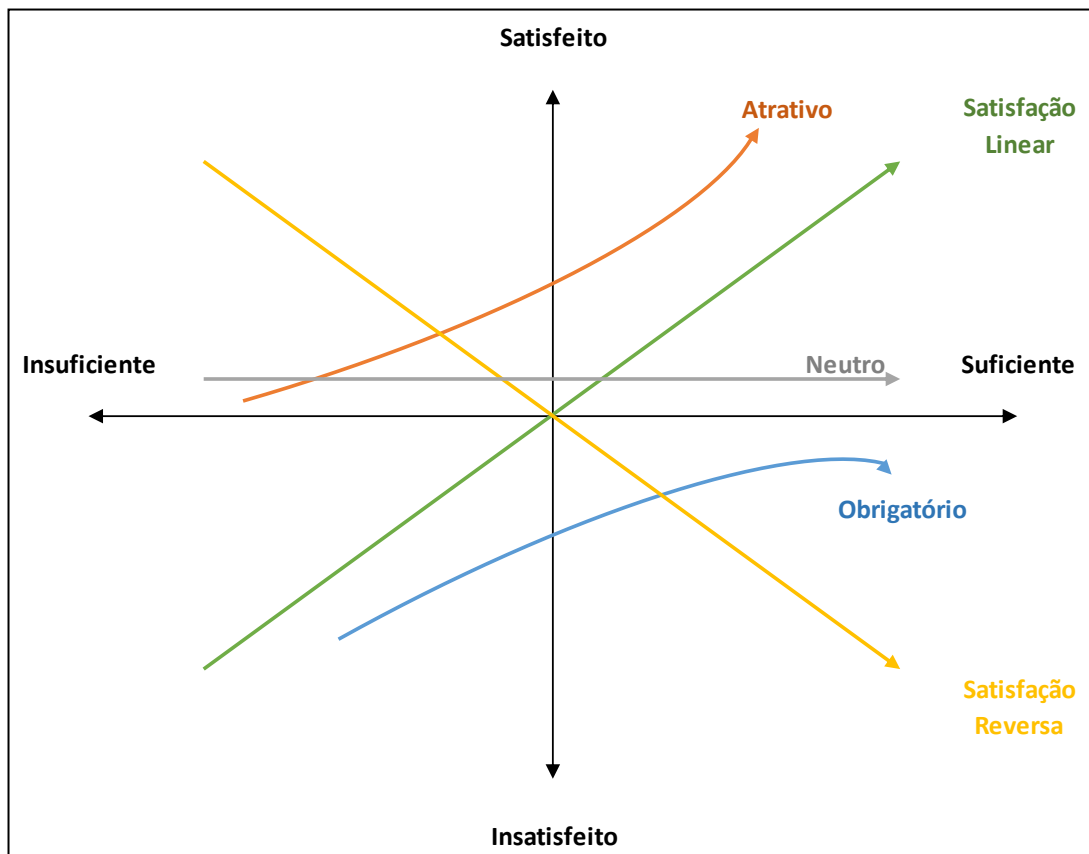


Figura 4. Diagrama de Kano.

Fonte: Kano *et al.* (1984).

Sendo assim, Kano *et al.* (1984) afirmaram que a satisfação do usuário final pode ser abruptamente aumentada adicionando-se apenas uma pequena melhoria no desempenho de um determinado atributo. Enquanto que em outros atributos, mesmo que o desempenho seja maximizado ao extremo, a satisfação do usuário não tem expressivo aumento. Esta afirmação pode ser vista/analisaada no Quadro 2 mostrado a seguir, que nada mais é que uma interpolação dos resultados da Figura 4, mostrada anteriormente.

Resposta do Usuário		Questão Disfuncional (Negativa)				
		Eu adoraria isso, mas não é imprescindível.	Isso é imprescindível.	Indiferente.	Não gostaria, mas posso conviver com isso.	É inaceitável.
Questão Funcional (Positiva)	Eu adoraria isso, mas não é imprescindível.	Questionável.	Atrativo.	Atrativo.	Atrativo.	Unidimensional.
	Isso é imprescindível.	Reverso.	Neutro.	Neutro.	Neutro.	Obrigatório.
	Indiferente.	Reverso.	Neutro.	Neutro.	Neutro.	Obrigatório.
	Não gostaria, mas posso conviver com isso.	Reverso.	Neutro.	Neutro.	Neutro.	Obrigatório.
	É inaceitável.	Reverso.	Reverso.	Reverso.	Reverso.	Questionável.

Quadro 2. Avaliação das Respostas.

Fonte: Kano *et al.* (1984).

Cheng *et al.* (1995) afirmam que a melhor maneira de se obter o verdadeiro sentido de orientação a partir dos clientes é conhecer o público-alvo, sabendo suas características e peculiaridades. Sendo assim, a próxima seção trata dos conceitos relacionados a tecnologia assistiva, sendo esta, a categoria que o produto final estará inserido.



### 2.1.4 Tecnologia Assistiva

Todo dispositivo de recursos e serviços que contribuem para proporcionar ou ampliar habilidades funcionais de pessoas com deficiência são definidos como tecnologia assistiva, ou seja, promovem vida independente e inclusão. Cook e Polgar (2013) definem a tecnologia assistiva como uma ampla gama de equipamentos, serviços, estratégias e práticas concebidas e aplicadas para minimizar os problemas encontrados pelos indivíduos com deficiência.

No Brasil, o Comitê de Ajudas Técnicas – CAT (2007) define-se como tecnologia assistiva a área do conhecimento com característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação de pessoas com deficiência, incapacidades ou mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social.

Sandhu (2002) defende o conceito de *design* universal que pode ser pensado para a tecnologia assistiva, que é uma abordagem inclusiva, onde o projetista tenta evitar opções de design que excluem determinados grupos de usuários, como pessoas com mobilidade reduzida. Este autor defende que o intuito da tecnologia é assegurar confiabilidade ao usuário. O diagrama apresentado na Figura 5 traz os atributos que uma tecnologia deve conter para ser confiável, segundo esse autor.

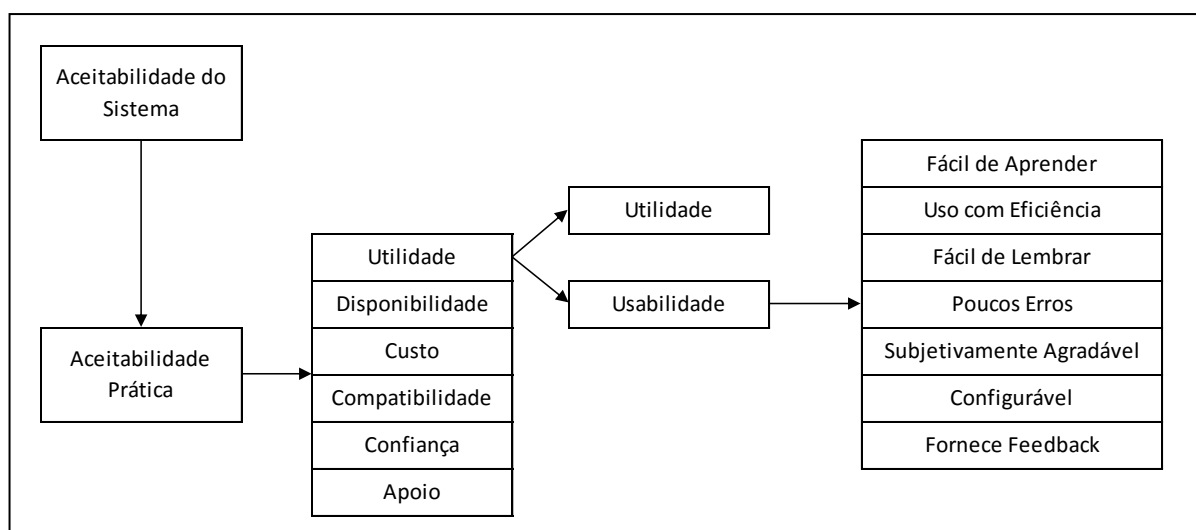


Figura 5. Modelo de um Sistema Confiável.

Fonte: Adaptado de Sandhu (2002).

Segundo Sommerville e Dewsbury (2007), pode-se desdobrar uma determinada tecnologia assistiva em grupos de atributos de *dependability* (ou *dependability attributes*): adequação à finalidade, confiabilidade, aceitabilidade e adaptabilidade. A Figura 6 traz cada conjunto e seus demais atributos.

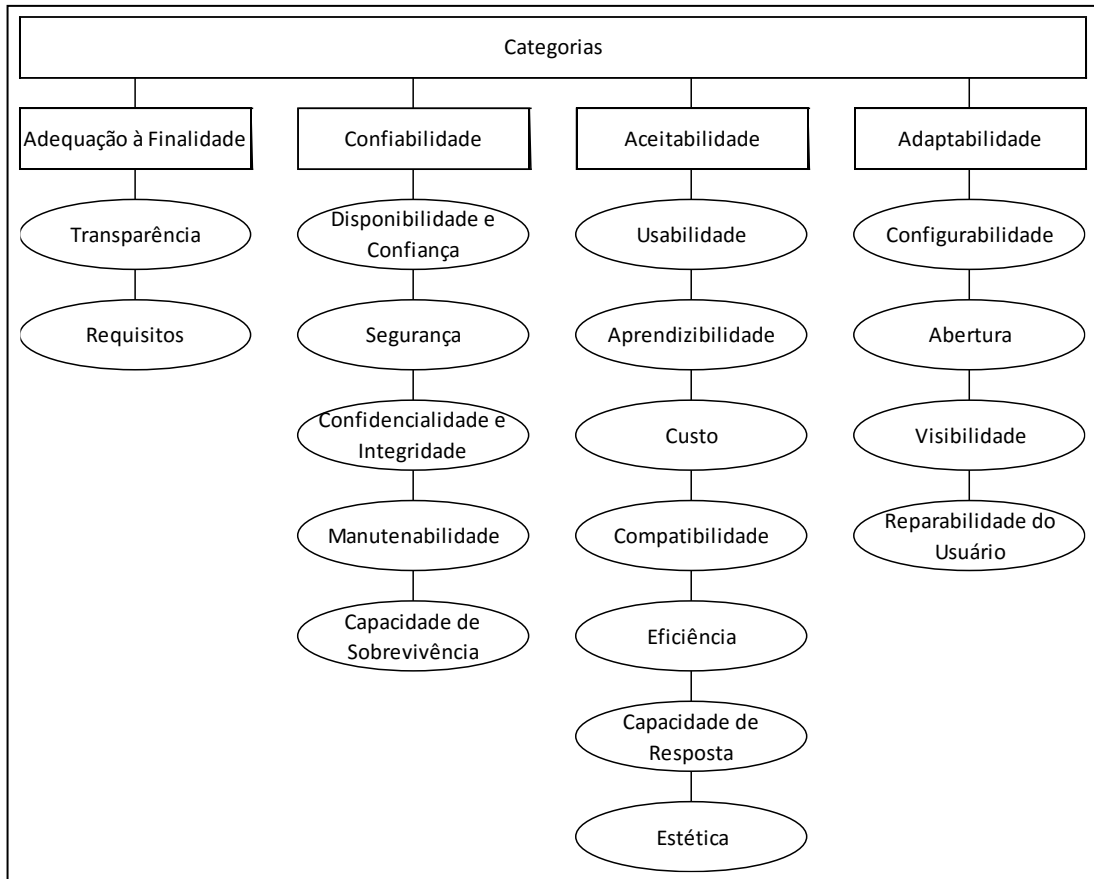


Figura 6. Atributos de *Dependability*.

Fonte: Adaptado de Sommerville e Dewsbury (2007).

Conforme as macrofases do projeto e desenvolvimento de produto apresentadas por Rozenfeld *et al.* (2006), durante o desenvolvimento existe a necessidade da construção de protótipos, estes podem ser físicos ou virtuais. A seguir são apresentados conceitos relacionados à prototipagem virtual, bem como as tecnologias para a aplicação de prototipagem e sua relação com o projeto e desenvolvimento de produtos.

### 2.1.5 Prototipagem Virtual

Ulrich e Eppinger (2012) definem a prototipagem virtual como um exercício de aproximação do objeto de estudo ou produto final, essa tem como principal propósito a redução de riscos e incertezas. Nas seções seguintes os conceitos de protótipo e prototipagem serão aprofundados, bem como a sua relação com o desenvolvimento de produtos.

#### 2.1.5.1 Prototipagem: Histórico e Objetivos

Grimm (2004) traz à tona a morfologia do termo protótipo, que do grego, *prototypon*, significa a primeira forma. Apesar dos dicionários definirem protótipo como um substantivo, para Ulrich e Eppinger (2012) pode ser um substantivo, um verbo ou um adjetivo: *designers* industriais produzem um protótipo de seus conceitos, *engineers prototype a design* (ou uma tradução livre para o português: engenheiros prototipam um projeto) e desenvolvedores de *software* escrevem programas protótipos.

Ulrich e Eppinger (2012) ainda aprofundam a definição com a seguinte explicação: “Uma aproximação do produto ao longo de uma ou mais dimensões de interesse.” A partir desta definição, qualquer objeto que exiba ao menos um aspecto do produto desenvolvido pode ser visto como um protótipo. Sendo assim, esta definição se distancia do seu uso na medida em que inclui diversas formas de tais protótipos como esboços, modelos matemáticos, simulações, teste de componentes, e versões de pré-produção totalmente funcionais do produto. Prototipagem é o processo de desenvolvimento de uma certa aproximação do produto e pode ser definida como um exercício de objeto em estudo, cujo principal propósito é a redução de riscos.

Os protótipos receberam duas classificações usuais, segundo Ulrich e Eppinger (2012): físicos ou analíticos e generalizados ou focados. Na primeira classificação, os protótipos físicos são tangíveis através de artefatos criados para aproximar ao produto. Já os protótipos analíticos são intangíveis, ou seja, de alguma maneira podem ser visualizados ou são matemáticos, a exemplo simulações computacionais, sistemas de equações codificadas em planilhas, e modelos geométricos tridimensionais.

Sob a segunda forma de classificação, os protótipos generalizados implementam a maioria (se não todos) os atributos do produto final. Em contrapartida os protótipos focados implementam um ou poucos atributos. Usualmente existem alguns protótipos focados a fim de uma maneira geral investigar atuação do produto, geralmente estes dividem-se em protótipos visuais e funcionais.

Neste sentido, Ullman (2010) afirma que as modelagens matemáticas realizadas através de *softwares* CAD (Desenho Assistido por Computador) podem ser consideradas como protótipos virtuais, e em alguns casos, substituírem os protótipos físicos. Este autor considera ainda que os protótipos virtuais podem ser um meio de juntar diretamente os desenhos técnicos e os protótipos em uma única ação, uma vez que ambos podem ser definidos como linguagens de projeto.

A seguir, serão explanadas algumas possíveis tecnologias que podem ser utilizadas para a prototipagem virtual. Estas tecnologias estão ligadas ao auxílio de computadores, e resumem-se basicamente em CAD (Desenho Assistido por Computador), CAM (Manufatura Assistida por Computador) e CAE (Engenharia Assistida por Computador), conforme explanadas a seguir.

#### 2.1.5.2 Tecnologias para Aplicação de Prototipagem

Groover e Zimmers (1984) definem como Desenho Assistido por Computador (CAD), do inglês *Computer-Aided Design*, toda tecnologia focada em usar computadores para auxiliar na criação, modificação, análise e otimização de projetos. Então, qualquer *software* que possua computação gráfica e aplicações que auxilie os objetivos de engenharia na etapa de projeto é classificado como um *software* CAD. Ou seja, conforme Zeid (2009) e Lee (1999), um *software* CAD (exemplificado na Figura 7) pode possuir desde ferramentas básicas de geometria para desenho até ferramentas para manipulação de formas complexas.

No entanto, conforme afirma Lee (1999), o papel principal dos *softwares* CAD é a definição da geometria do projeto, que pode ser uma peça mecânica, uma estrutura de arquitetura, um circuito eletrônico, o desenho de uma construção. Além disso, os desenhos e geometrias criados por estes *softwares* podem servir como ponto de partida para outros tipos de *softwares*, como CAM e CAE, que serão explicados a seguir.

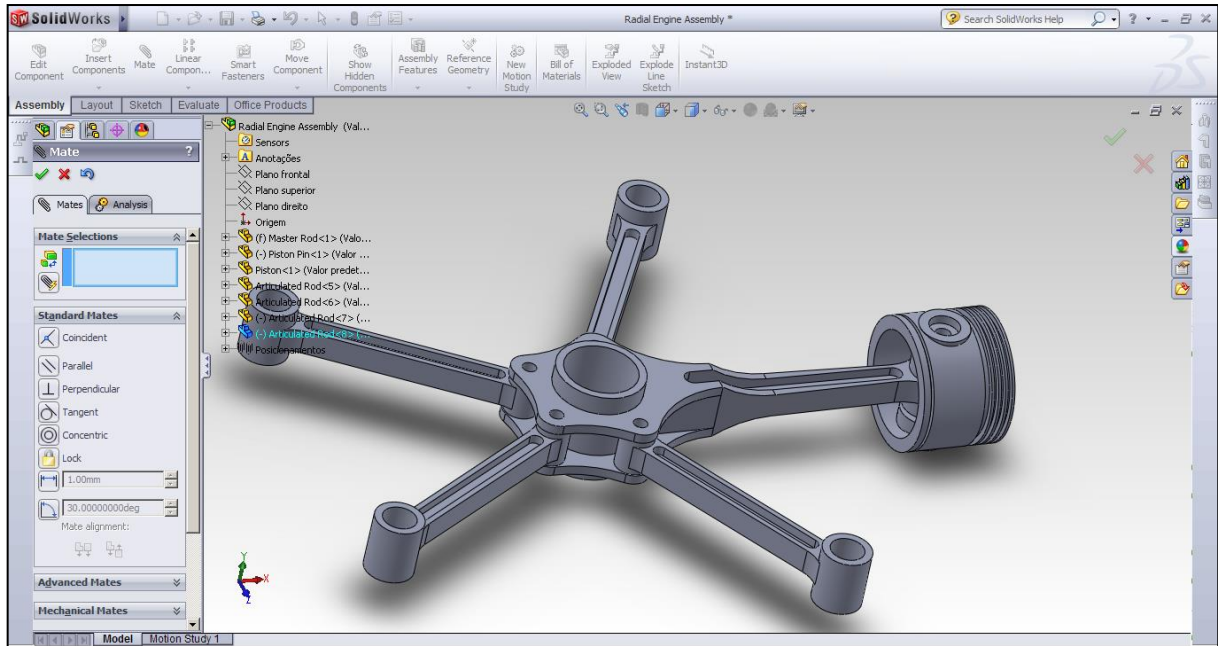


Figura 7. Exemplo de Desenho Assistido por Computador (CAD).

Fonte: do Autor em *software* SolidWorks®.

Os *softwares* concentrados em planejar, gerenciar e controlar as operações de manufatura, com interface direta ou indireta aos planos e recursos de produção são denominados os *softwares* classificados como Manufatura Assistida por Computador, ou do inglês *Computer-Aided Manufacturing*. A maioria desses programas são arquitetados através de Controle Numérico (NC), que é uma técnica de usar instruções programadas para controlar uma máquina, ou um Comando Numérico Computadorizado (CNC). Estas máquinas vão desde o CNC propriamente dito, até máquinas-ferramentas gerais, prensas e puncionadeiras, máquinas para soldagem, linhas de montagem, máquinas para corte e dobra de tubos, corte e processamento de chapas, um exemplo de *software* CAM é mostrado na Figura 8.

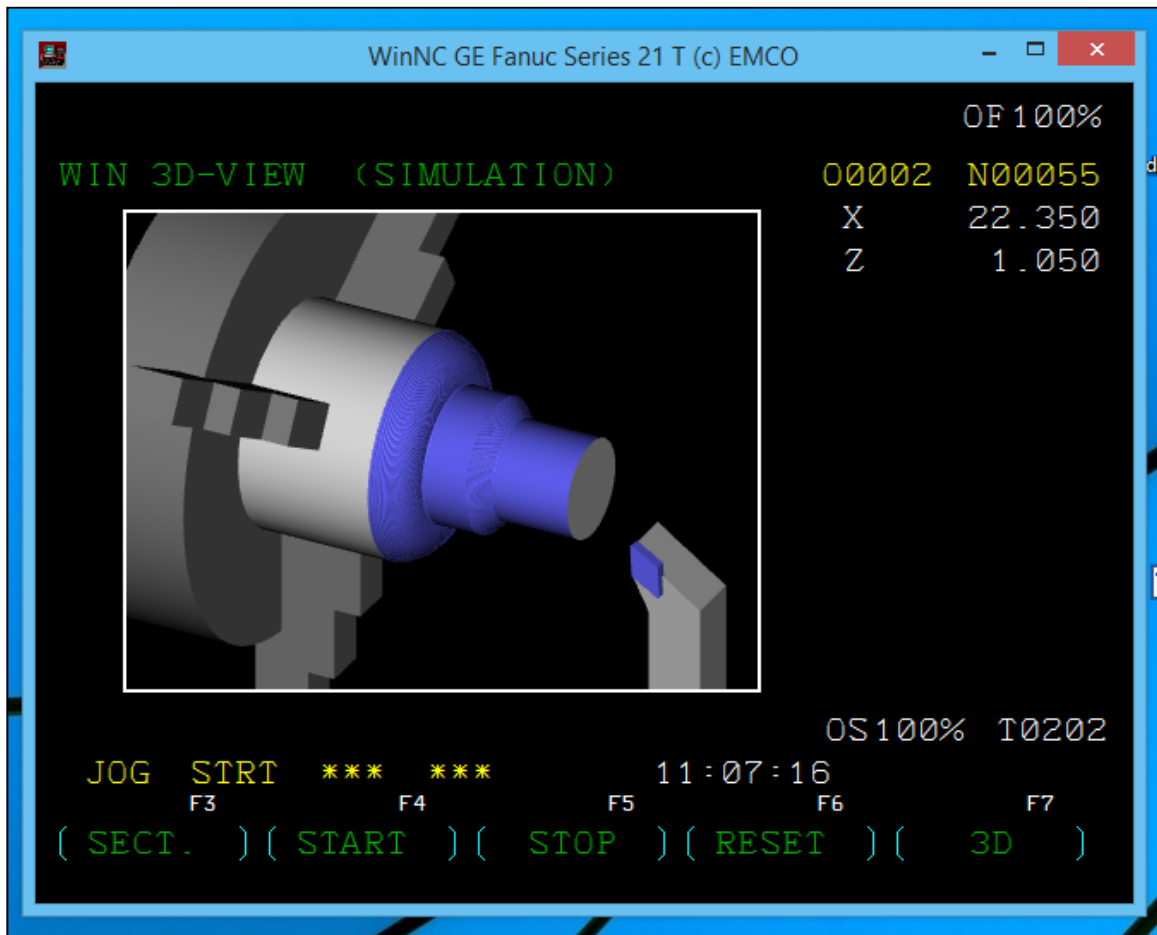


Figura 8. Exemplo de Manufatura Auxiliada por Computador (CAM).  
 Fonte: do Autor em *software* WinNC GE Fanuc Series 21 T.

Denominados como Engenharia Assistida por Computador (CAE), ou do inglês *Computer Aided Engineering*, são os programas que analisam um desenho gerado por um programa CAD, permitindo ao projetista simular e estudar como o produto se comportará, e assim, iterativamente, pode refinar e otimizar o mesmo (Figura 9). Estas análises, são feitas numericamente através do Método de Elementos Finitos (FEM), e permitem eliminar ou simplificar detalhes desnecessários dos desenhos e focar apenas nos pontos críticos. Conforme exemplifica Armstrong (1994), um objeto em três dimensões que possui uma de suas três medidas muito menores que as demais, pode ser considerado como um modelo de duas dimensões para a análise.

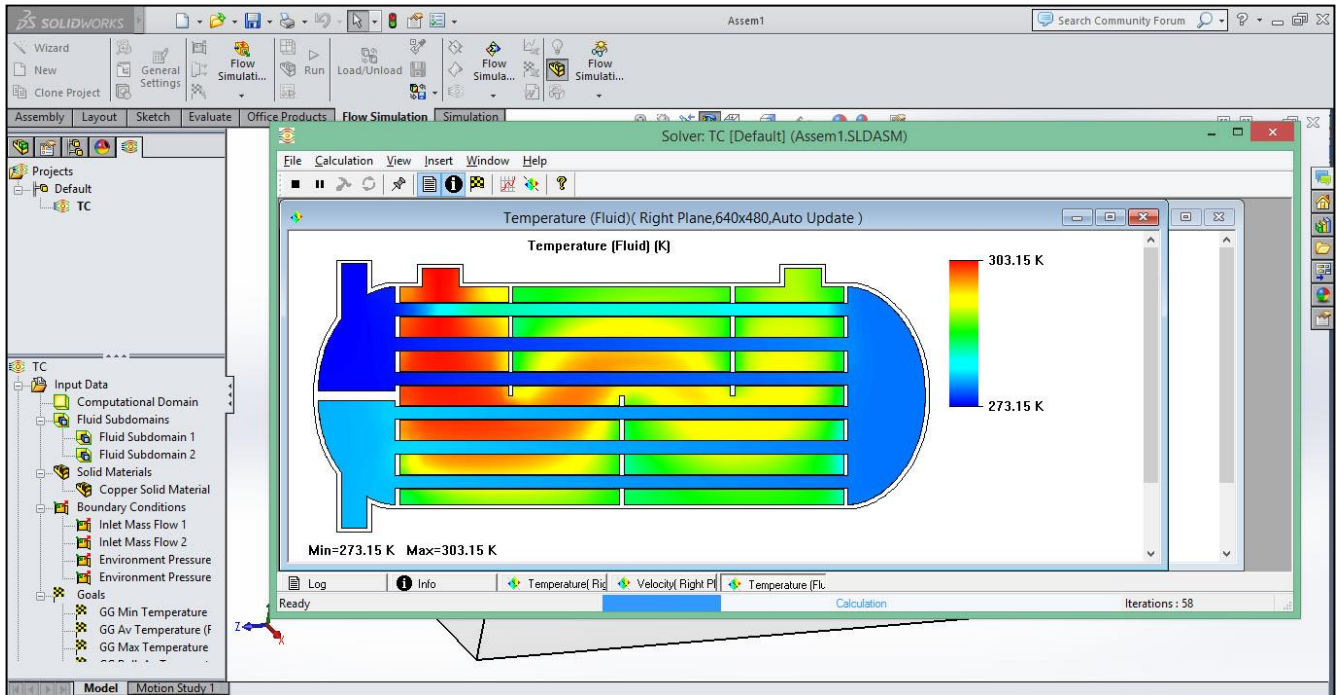


Figura 9. Exemplo de Engenharia Auxiliada por Computador (CAE).  
Fonte: do Autor em *software SolidWorks®*.

Para Rozenfeld (2006), o fato do processo de desenvolvimento de produtos estar intimamente ligado a engenharia simultânea, está minimizando o tempo de projeto. Sendo assim, é imprescindível que o time de projetos alce mão de novas ferramentas que permitam a rápida representação e desenvolvimento de novos conceitos. Assim, a próxima seção relaciona a prototipagem virtual e o processo de desenvolvimento de produtos.

### 2.1.5.3 Prototipagem Virtual no Desenvolvimento de Produtos

Norton (2004) afirma que uma verdadeira revolução ocorreu no projeto, desenvolvimento de produto e análise de engenharia com o advento do computador, visto que muitos problemas cujos métodos de solução eram conhecidos mas continuavam sendo praticamente insolúveis devido à alta demanda computacional, agora podem ser resolvidos em minutos em microcomputadores de baixo custo. Apesar de reconhecida a importância de alguns métodos por que estes mostram os resultados de uma forma compreensível, como as régua de cálculo, a engenharia está atualmente subordinada a um instrumento mais recente e poderoso, o computador.

Segundo Rozenfeld *et al.* (2006), a abordagem do desenvolvimento de produtos sob as inovações oriundas da engenharia simultânea, dinamizou a estrutura organizacional. Ou seja, ampliou a integração das diversas áreas da organização, propondo também a participação de clientes e fornecedores no processo de desenvolvimento, assim promovendo a diminuição de tempo de desenvolvimento, custo e qualidade. Além disso, os projetos são constantemente submetidos à revisão

e avaliação técnica e de custos, bem como de alinhamento com as estratégias de marketing e de produto.

Para Clark *et al.* (1992) isto implica em sucessivas iterações que objetivam experimentar e testar alternativas a fim de cumprir metas associadas à redução do tempo, custo e melhoria da qualidade do produto. Grimm (2004) evidencia os benefícios da utilização de protótipos, pois estes influenciam diretamente na transmissão de informações entre todos os envolvidos no desenvolvimento do produto.

Ullman (2010) afirma que a modelagem de sólidos em desenho assistido por computador (ou CAD), pode frequentemente substituir protótipos físicos com menor custo e tempo. Neste sentido, o autor ainda divide em quatro propósitos para os protótipos:

- Protótipo de comprovação de conceito ou função;
- Protótipo de comprovação de produto;
- Protótipo de comprovação de processo;
- Protótipo de comprovação de produção;

Sendo assim, Ullman (2010) ainda afirma que os protótipos de comprovação de produto ajudam a refinar componentes e montagens. E as ferramentas CAD entram nesta categoria para melhorar o tempo, custo e eficiência na construção destes protótipos, fazendo-os virtualmente.

Este autor ainda afirma que desenhos virtuais e modelos sólidos, ou protótipos virtuais, são utilizados para: registrar a forma geométrica do projeto, comunicar ideias entre os projetistas e engenheiros de manufatura, análise de suporte, dimensões e tolerâncias faltantes são determinadas a partir do modelo virtual, simular o funcionamento do produto e checar a plenitude do produto (quanto algum desenho ou *sketch* está sendo criado, algum detalhe pode ser despercebido pelo projetista).

Outra contribuição relevante, Ullman (2010) diferencia a prototipagem virtual em pontos positivos e negativos, conforme o Quadro 3 a seguir. Segundo o autor, na prototipagem virtual moderna não tem como diferenciar os desenhos de *layout*, detalhamento e montagem. Sendo assim, permitindo ao projetista criar um modelo sólido a partir de componentes e montagens, e, a partir destes, praticamente automaticamente construir desenhos de detalhamento e montagens.



Aspectos Positivos	Aspectos Negativos
Permite a rápida representação de conceitos e possibilita ver como a montagem e operação destes sem a construção física.	Existe uma tendência em abandonar os <i>sketchs</i> , e estes são uma forma rápida de desenvolver um grande número de ideias. O tempo necessário para desenvolver um modelo sólido é muito maior do que o tempo para construir um <i>sketch</i> (rascunho).
O uso desta ferramenta melhora o processo de projeto por que recursos, dimensões e tolerâncias são desenvolvidos uma única vez, reduzindo o erro.	Muito tempo é utilizado em detalhes logo no início da prototipagem virtual. Para iniciar a construção de um protótipo exige-se muitos detalhes, que ainda não foram definidos no projeto conceitual.
Interfaces entre os componentes são desenvolvidas de modo que os componentes compartilham as mesmas características, dimensões e tolerâncias, garantindo que estes se encaixem.	Muitas vezes, o valioso tempo de projeto é gasto usando apenas a prototipagem virtual. Aprender a utilizar um sistema de modelagem sólida (CAD) leva tempo e usá-lo muitas vezes requer controle demorado do programa.
Desenhos de montagem e detalhamento são produzidos praticamente automáticos, reduzindo a necessidade de se ter um conhecimento especializado em métodos de desenho e normas.	Muitos <i>softwares</i> de modelagem de sólidos requerem que componentes e montagens sejam planejados fora do tempo programado.

Quadro 3. Aspectos Positivos e Negativos da Prototipagem Virtual.

Autor: Adaptado de Ullman (2010).

A partir do protótipo virtual, concebido em ambiente CAD, este modelo virtual está habilitado a sofrer simulações que aproximem das solicitações mecânicas, sejam elas estáticas ou dinâmicas, da influência do escoamento do ar sob a superfície do protótipo e sua capacidade de deformação em relação aos impactos. A seguir, serão apresentados brevemente os fenômenos físicos envolvidos, que serão analisados virtualmente.

### 2.1.5.3.1 Análise Dinâmica

Segundo Costa (2005) a dinâmica veicular pode ser dividida em três fases: fontes de excitação, a resposta dinâmica do veículo e a percepção dos passageiros. Sendo assim, as fontes de excitação resumem-se a fontes externas, como o terreno onde o veículo está trafegando, e internas, como rodas, transmissão e propulsão.

Rao (2009) define um sistema vibratório como um sistema que possua um meio para armazenar energia potencial (mola ou elemento elástico), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor). Este sistema pode ou não estar submetido a uma carga externa, seja ela uma função conhecida ou qualquer outro tipo de excitação.

O sistema pode ser avaliado de acordo com o número de graus de liberdade. Este é o número mínimo de coordenadas independentes requeridas para determinar completamente as posições de todas as partes de um sistema a qualquer instante. Assim, o sistema composto por uma massa  $m$ , uma rigidez  $k$  e um amortecimento  $c$  de um grau de liberdade pode ser observado na Figura 10, onde é apresentado também o seu diagrama de corpo-livre.

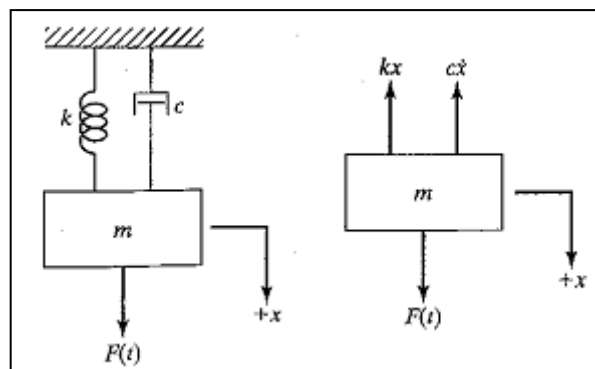


Figura 10. Sistema Massa-Mola-Amortecedor.

Fonte: Rao (2009).

Segundo o autor, se uma força  $F(t)$  agir sobre um sistema massa-mola viscosamente amortecido, conforme a figura a seguir, a equação do movimento (1) deste pode ser obtida pela segunda lei de Newton, mostrada a seguir.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

Segundo Gillespie (1992), a análise para o modelo vibracional de um automóvel pode ser simplificada pelo modelo conhecido como “quarto de carro” (ou *quarter-car*), com dois graus de liberdade, mostrado na Figura 11. Onde, a carroceria completa do automóvel

tem massa  $M$ , também chamada de massa suspensa que é suportada por uma suspensão conectada a uma massa  $m$  não suspensa, sendo que  $m$  equivale à massa do eixo, rodas e pneus. Assim, a suspensão primária possui uma rigidez  $K_s$  e amortecimento  $C_s$ , já a massa não suspensa possui simplificada uma rigidez  $K_t$ .

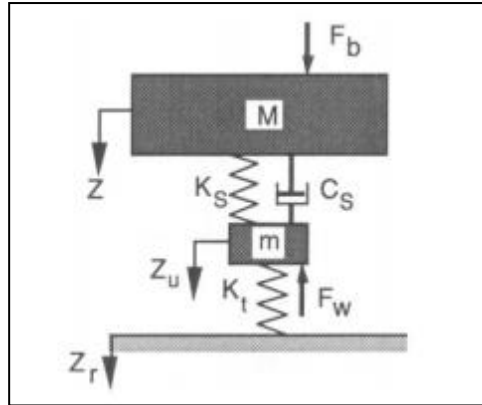


Figura 11. Modelo de Vibração *Quarter-Car*.  
Fonte: Gillespie (1992).

Nesse modelo apresentado por Gillespie (1992),  $Z$  representa o deslocamento da massa suspensa,  $Z_u$  representa o deslocamento da massa não suspensa e  $Z_r$  representa o deslocamento oriundo da estrada, via ou terreno, devido as imperfeições. As forças  $F_b$  e  $F_w$ , representam as forças sobre a massa suspensa e sobre a massa não suspensa, respectivamente.

Admitindo-se que o sistema é linear, a primeira frequência natural não amortecida  $\omega_n$  é representada pela equação e (3), e também a primeira frequência natural amortecida  $\omega_d$  da massa  $M$  são apresentadas pela equação (4) e (5), onde  $RR$  representa a rigidez equivalente da suspensão. Onde, a massa  $m$  é desprezível.

$$RR = \frac{K_s \cdot K_t}{K_s + K_t} \quad (2)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{RR}{M}} \quad (3)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta_s^2} \quad (4)$$

$$\zeta_s = \frac{C_s}{\sqrt{4K_s M}} \quad (5)$$

Assim, a partir da 2ª Lei de Newton, Gillespie (1992) descreveu o comportamento dinâmico completo para o modelo *quarter-car* em regime permanente, tanto para a massa

suspensa quanto para a massa não suspensa. Estas equações diferenciais estão representadas a seguir, em (6) e (7).

$$M \ddot{Z} + C_s \dot{Z} + K_s Z = C_s \dot{Z}_u + K_s Z_u + F_b \quad (6)$$

$$m \ddot{Z}_u + C_s \dot{Z}_u + (K_s + K_t) Z_u = C_s \dot{Z} + K_s Z + F_w \quad (7)$$

Segundo o autor, este modelo limita-se ao estudo do comportamento dinâmico apenas na direção vertical. Outra limitação deste modelo matemático é o fato de que a resposta do sistema no domínio da frequência, só é possível adotando  $Kt$ ,  $Ks$  e  $Cs$  como lineares.

Enquanto as duas equações diferenciais apresentadas anteriormente tornam a solução trabalhosa, Gillespie (1992) propõe as razões de amplitude para o movimento da massa suspensa  $M$  em resposta às entradas das imperfeições do terreno em (8), as forças no eixo em (9) e forças aplicadas diretamente na massa suspensa em (10).

$$\frac{\ddot{Z}}{\ddot{Z}_r} = \frac{K_1 K_2 + j[K_1 C \omega]}{[\alpha \omega^4 - (K_1 + K_2 \alpha + K_2) \omega^2 + K_1 K_2] + j[K_1 C \omega - (1 + \alpha) C \omega^3]} \quad (8)$$

$$\frac{\ddot{Z}}{F_w/M} = \frac{K_2 \omega^2 + j[C \omega^3]}{[\alpha \omega^4 - (K_1 + K_2 \alpha + K_2) \omega^2 + K_1 K_2] + j[K_1 C \omega - (1 + \alpha) C \omega^3]} \quad (9)$$

$$\frac{\ddot{Z}}{F_b/M} = \frac{[\mu \omega^2 - (K_1 + K_2) \omega^2] + j[C \omega^3]}{[\alpha \omega^4 - (K_1 + K_2 \alpha + K_2) \omega^2 + K_1 K_2] + j[K_1 C \omega - (1 + \alpha) C \omega^3]} \quad (10)$$

Onde,  $\alpha$  representa o quociente entre as massas não suspensa e suspensa ( $m/M$ ),  $C$  representa o quociente entre o amortecimento da massa suspensa ( $Cs/M$ ),  $K1$  representa o quociente entre a rigidez da massa não suspensa e a massa suspensa ( $Kt/M$ ),  $K2$  representa o quociente entre a rigidez da massa não suspensa e a massa suspensa ( $Ks/M$ ). As equações apresentadas acima são de forma complexa, onde a parte imaginária está denotada pelo operador complexo  $j$ .

#### 2.1.5.3.2 Escoamento de Fluidos ao Redor de Corpos Imersos

Segundo Fox (2011) sempre que existir movimento relativo entre um corpo sólido e o fluido viscoso que o circunda, o corpo experimentará uma força resultante  $F$ , que depende dentre vários fatores da velocidade relativa (entre fluido e corpo carenado) e também das próprias formas e dimensões deste corpo. Neste sentido, o autor define o fenômeno do arrasto como a componente da força sobre um corpo que atua paralelamente à direção do movimento

relativo. Assim, afere-se a força de arrasto através do coeficiente de arrasto  $C_d$ , definido pela equação (11).

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (11)$$

Para Munson *et al.* (2004) essa força resultante  $F$  é oriunda da interação entre corpo e fluido, sendo que interação pode ainda ser decomposta em função da tensão de cisalhamento, provocada pelos efeitos viscosos, e também em função da tensão normal, devido à pressão, conforme pode ser visto na Figura 12.

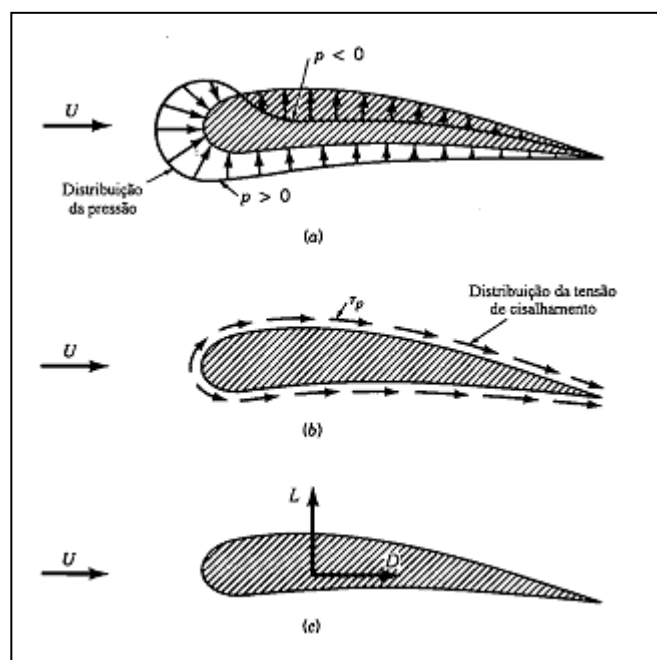


Figura 12. Forças em Corpo Bidimensional em Movimento.  
Fonte: Munson et al. (2004).

Fox (2011) contribui afirmando que a carenagem é uma tentativa de reduzir o arrasto sobre um corpo. Sendo que o arrasto pode ser dividido em duas formas: arrasto de atrito e arrasto de pressão, onde a primeira forma de arrasto depende invariavelmente da distribuição de tensão de cisalhamento ao longo do corpo carenado, e a segunda forma de arrasto depende essencialmente da área frontal (ou área projetada) do objeto.

Segundo McDonald e Palmer (1980), reduções de arrasto da ordem de 25% são possíveis apenas com o devido cuidado do contorno frontal de veículos que não permitem traseiras inteiramente carenadas. A mecânica dos fluidos é altamente visual, pois os padrões de escoamento podem ser visualizados de modos diferentes. Assim, Fox (2011) define quatro formas básicas de linhas que são usadas para visualizar escoamentos. As linhas de corrente

são linhas tangentes em todos os pontos ao vetor velocidade em um dado instante, as linhas de trajetória são o caminho real percorrido por uma determinada partícula de fluido. Já as linhas de emissão são linhas formadas por todas as partículas que passaram anteriormente por um ponto prescrito, e por fim, as linhas de filete são o conjunto de partículas de fluido que formam em um dado instante.

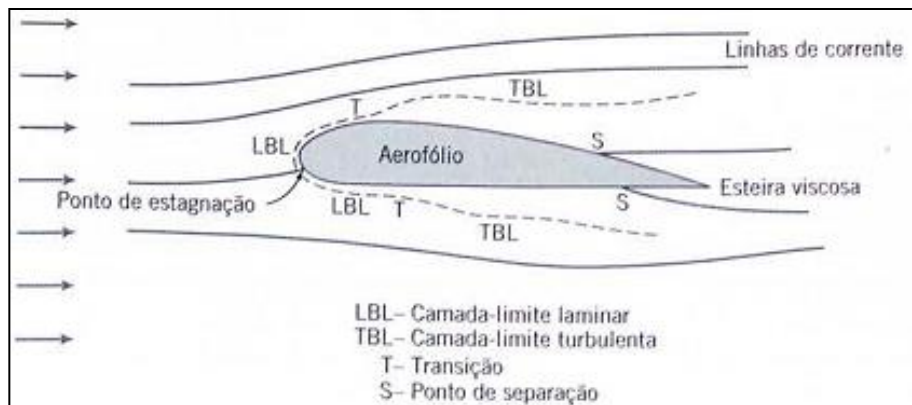


Figura 13. Escoamento Viscoso em Torno de um Aerofólio.

Fonte: Fox (2011).

Sendo assim, conforme visto na Figura 14, o escoamento externo sobre corpos, divide-se no ponto de estagnação e circunda o corpo. Camadas-limite formam-se tanto na superfície superior quanto na superfície inferior do corpo, sendo que o escoamento é inicialmente laminar e sua transição para a turbulência depende em alguns fatores, tais como o gradiente de pressão sobre o corpo. Em uma região de pressão crescente, ou seja, um gradiente de pressão adverso, tende a se opor ao movimento do fluido, desacelerando. Define-se a camada limite como a região adjacente a uma superfície sólida na qual tensões viscosas estão presentes, em contraposição à corrente livre onde as tensões viscosas são desprezíveis.

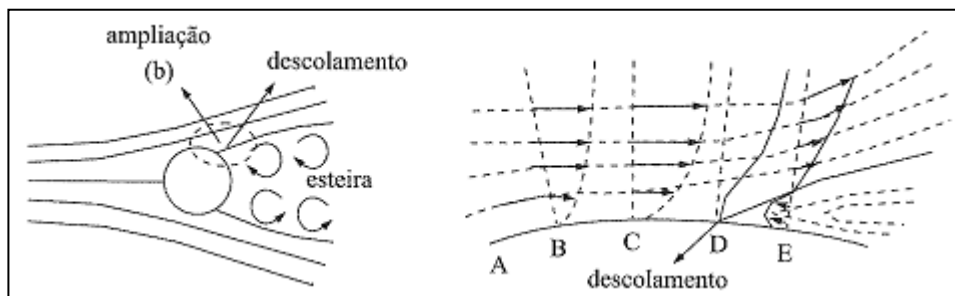


Figura 14. Camada Limite e Efeito Esteira.

Fonte: Brunetti (2008).

Brunetti (2008) afirma que, conforme a Figura 15, a partir do ponto C o fluido tende a desacelerar-se, visto que a pressão aumentará. Como visto, este fenômeno é

denominado gradiente adverso de pressões. Devido a dissipação de energia, causa pelos atritos dentro da camada limite, a velocidade não retornará ao seu valor inicial, havendo uma diminuição em  $D$ . Deste ponto em diante, o aumento de pressão resultará em uma desaceleração, o que é impossível fisicamente, visto que o fluido imediatamente após a superfície sólida está estagnado. Neste caso, a camada limite se descola da superfície sólida, criando a região de esteira, no ponto  $E$ . Neste ponto, o fluido tende a retornar no sentido das pressões crescentes, que vem a encher o vazio criado pelo descolamento da camada limite.

Partindo da premissa de que o produto pode utilizar carenagem frontal, este é interpretado como um corpo carenado: ou seja, está sujeito as análises aerodinâmicas, realizadas virtualmente, propostas por Munson (2004), Brunetti (2008) e Fox (2011). Virtualmente pode ser visualizado as linhas de corrente sobre o produto, os vórtices (efeito esteira), conforme a velocidade.

## 2.2 METODOLOGIA

Segundo Richardson (1989) a pesquisa quantitativa é caracterizada pela utilização da quantificação, assim, tanto na coleta de informações quanto no tratamento dessas utilizaram-se ferramentas estatísticas, assim como o critério proposto por Kano *et al.* (1984) para levantar prioridades junto a usuários de cadeiras de rodas. O autor também afirma que o método qualitativo se difere do quantitativo por não empregar um instrumento estatístico como base de análise do problema, não pretendendo medir ou numerar categorias.

### 2.2.1 Metodologias de Desenvolvimento do Trike 2

Conforme as macrofases apresentadas por Rozenfeld *et al.* (2006), no desenvolvimento ocorre o projeto informacional (ou de especificações), projeto conceitual e projeto detalhado. Assim, utiliza-se o QFD, bem como o método proposto por Kano *et al.* (1984), durante o projeto informacional. O limite entre o projeto informacional e o projeto conceitual são as especificações meta. Segundo os autores, as especificações metas são requisitos com valores meta (ou objetivos) e informações adicionais qualitativas, esses obtidos através do QFD.

Conforme a classificação de protótipos sugerida por Ullman (2010) os protótipos de comprovação de conceito ou função focam no desenvolvimento das funções de um produto. Estes são usados para a comparação com requisitos dos clientes ou com as especificações de engenharia. Já os protótipos de comprovação de produto, o principal objetivo é representar as formas visuais do produto em desenvolvimento. Procura-se também buscar as informações sobre a viabilidade funcional do produto, nas quais se enquadram as análises em CAE.

Neste sentido, a prototipagem virtual desta pesquisa pretende estar presente nestas duas classificações, porém em momentos distintos. Ou seja, inicialmente o protótipo servirá para comprovar que as necessidades do usuário foram realmente atendidas, e que o produto efetivamente terá as qualidades exigidas pelo consumidor final. Em um segundo momento, o modelo sólido servirá, ainda que suas medidas finais não sejam relevantes, como base para simulação dinâmica em ambiente virtual, eximindo o usuário final a testes, visto que este possui mobilidade reduzida.



### 2.2.2 Aplicações do QFD na Determinação das Especificações - Meta do *Trike 2*

Akao (2004) afirma que o desdobramento da função qualidade (QFD) é utilizado para converter as necessidades do usuário em requisitos do produto, sendo assim, ao utilizar esta ferramenta, o conjunto de entrada é a voz do cliente e o conjunto de saída é as especificações (com metas) para o produto. Conforme observa-se na Figura 15, pode-se dividir o QFD em algumas etapas, apresentadas a seguir.

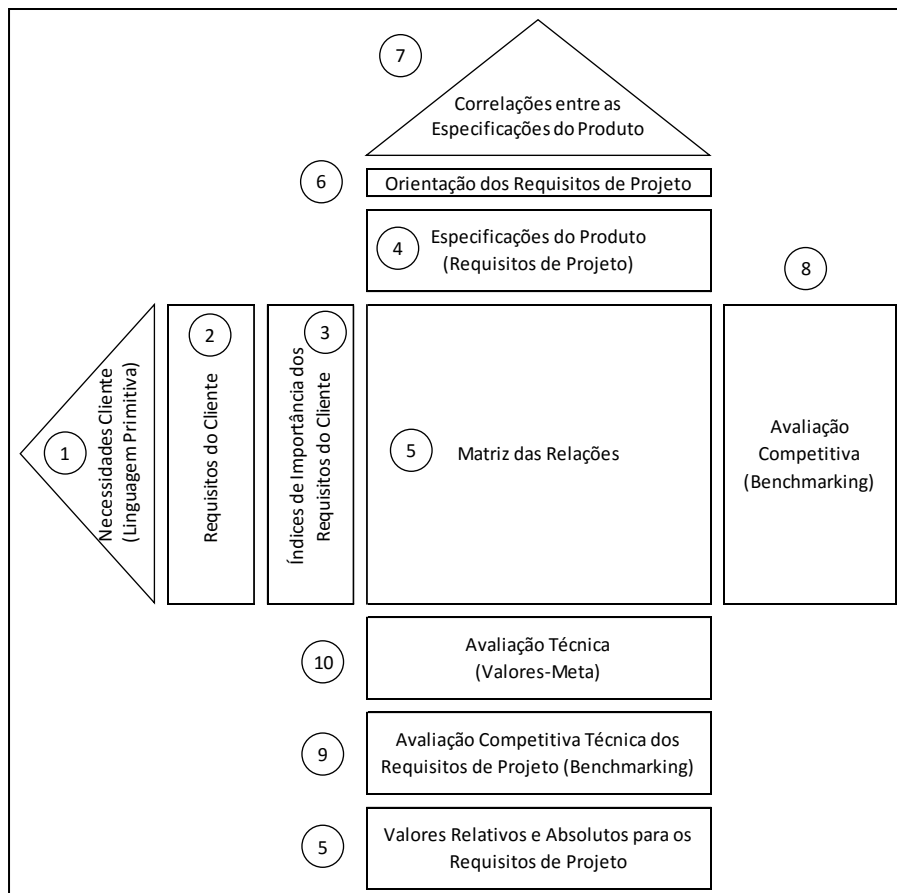


Figura 15. Desdobramento da Função Qualidade e Suas Etapas.

Fonte: Adaptado de Akao e Mizuno (1994).

As duas primeiras etapas são a obtenção das necessidades do cliente, de linguagem primitiva. Ou seja, identifica-se o cliente e extrai-se as suas necessidades (os requisitos do cliente). Para Cheng *et al.* (1995) a técnica para se obter as informações a partir dos clientes pode ser quantitativa ou qualitativa, no entanto prefere-se a utilização de métodos qualitativos. Neste sentido, a pesquisa abrangeu os dois métodos, pois inicialmente realizou-se uma entrevista em grupo, ou grupo-foco (método qualitativo), e em seguida utilizou-se um levantamento por questionário, sendo este um método quantitativo.

Cheng *et al.* (1995) define grupo focal como um grupo de discussões abertas, composto por usuários ou especialistas, estes guiados por um moderador que fornece o foco das discussões, dirigindo o grupo para os itens de interesse, aprofundando no que parece superficial e mudando o tema quando parecer exaurido. Definindo os especialistas em tecnologia assistiva como: engenheiros, médicos e fisioterapeutas, o grupo focal contou com dois engenheiros mecânicos, dois engenheiros eletricitas, um médico, um fisioterapeuta e um acadêmico. Os objetivos deste grupo focal concentraram-se em extrair a voz dos especialistas, convertendo suas afirmações em requisitos para o produto.

O grupo focal ocorreu na sala H001A - Laboratório de Produção, nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná / Campus Pato Branco. Foi realizado às 18h do dia 29 de outubro de 2014, com duração de aproximadamente 3 horas. Foram feitos questionamentos aos especialistas e mostrou-se exemplos construtivos para os mesmos opinarem. Realizou-se a transcrição deste grupo focal, que foi gravado em áudio gerando aproximadamente 11 páginas de transcrição.

Conforme afirma Cheng *et al.* (1995), o emprego de técnicas quantitativas é apropriado quando se deseja obter informações numéricas, tais como o grau de importância das necessidades, avaliação de produtos já existentes e preferência de usuários.

Para Ulrich e Eppinger (2012) é essencial um sentido de relativa importância em relação as várias necessidades dos clientes, ou seja, baseando-se em questionários aplicados diretamente aos consumidores. Sendo assim, realizou-se um questionário online destinado às pessoas com mobilidade reduzida dos membros inferiores usuários de cadeiras de rodas. O intuito deste é definir as condições de contorno para o modelo conceitual de um Trike.

Composto de onze perguntas de múltipla escolha e quatro questões abertas, o questionário baseou-se no critério de avaliação proposto por Kano *et al.* (1984) a fim de identificar os atributos que provoquem reação ou satisfação dos usuários. Neste sentido, as onze primeiras questões possuíam perguntas adjacentes representando o seu oposto, conforme pode ser visto no Quadro 4. Este questionário baseou-se inicialmente nas pesquisas de Sommerville e Dewsbury (2007), através das categorias de *dependability*. Definindo a população como cadeirantes, que é o público alvo da pesquisa, o questionário contou com 43 respostas, sendo que a idade dos respondentes foi em média de 41 anos. Este questionário esteve disponível durante 4 dias, entre 8 e 12 de Abril de 2015.

Questões de Múltipla Escolha	Em relação a aparência do trike, se existissem carenagens (lataria, plástico), como você se sentiria?
	Se o Trike tivesse regulagem de altura do guidão, como você se sentiria?
	Se a fixação do frontbike for em um único ponto e central, conforme mostra a figura, passasse entre as pernas do usuário, como você se sentiria?
	Se o Trike contasse com opcionais que o permitissem andar em vias públicas (sistemas de iluminação e sinalização), como você se sentiria?
	Se conforme a velocidade aumentasse, a direção ficasse mais pesada (melhorando a estabilidade do Trike), como você se sentiria?
	Se o trike tivesse cinto de segurança, como você se sentiria?
	Se o trike fosse na forma de acoplamento fixo à uma cadeira de rodas comercial, como você se sentiria?
	Se o trike fosse na forma de acoplamento móvel à uma cadeira de rodas comercial, como você se sentiria?
	Se em caso de colisão, o motor do Trike desligasse automaticamente, como você se sentiria?
	Se o trike tivesse duas baterias, como você se sentiria?
	Se a bateria tivesse autonomia para 25 km (em condições normais de uso), como você se sentiria?
Questões Abertas	No seu dia-a-dia, em quais momentos um trike seria útil?
	Na sua opinião, qual deveria ser a velocidade máxima do trike?
	No seu ponto de vista, qual deve ser o peso máximo do trike?
	Quanto você estaria disposto a pagar em um trike?

Quadro 4. Perguntas Realizadas no Questionário.

Fonte: Autor

A terceira etapa para a construção da matriz do QFD consiste em estabelecer o grau de importância das necessidades do cliente, ou seja, o peso de cada necessidade. Neste sentido, ao final de cada pergunta proposta no questionário utilizou-se a escala de resposta psicométrica proposta por Likert (1932). A seguir, o Quadro 5 contém as perguntas utilizadas no questionário.

Qual a importância desta questão para você?						
Totalmente desnecessária.	( )	( )	( )	( )	( )	Extremamente importante.

Quadro 5. Escala de Respostas Psicométricas.  
Autor: Adaptado de Likert (1932).

Segundo Akao (2004), na quarta etapa o interesse é em estabelecer os requisitos de projeto, onde o objetivo é identificar como os requisitos dos clientes podem ser mensurados tecnicamente, ou seja, através da linguagem de engenharia. Para Cheng *et al.* (1995), nesta etapa o interesse é identificar e organizar os itens exigidos que se referem à qualidade intrínseca do produto.

A quinta etapa da matriz do QFD é dividida em duas fases. Primeiro são realizadas as relações entre os requisitos do produto e os requisitos do cliente, e em seguida é realizado o cálculo da importância técnica do requisito do produto.

Segundo Ohfuji (1993) esta é uma das mais importantes etapas no trabalho da construção da matriz da qualidade, pois através dela que a importância atribuída pelos clientes a cada qualidade exigida é transferida às características da qualidade, determinando as prioridades para o projeto.

Nestas correlações, é atribuído uma nota ao valor da relação entre os requisitos dos clientes e os requisitos de projeto, 0 para “sem relação”, 1 para “fraca relação”, 3 para “relação média” e 9 para “forte relação”. Em seguida, é multiplicado o valor de cada relação dada pelo grau de importância (peso) do requisito do cliente. Por fim, na segunda etapa, é feito a soma de todas as relações feitas entre os requisitos dos clientes e cada requisito do produto.

A sexta etapa consiste em definir a orientação dos requisitos do projeto, este campo da matriz tem como objetivo estabelecer e informar a equipe de projeto se o requisito precisa ser minimizado, maximizado ou se é um padrão alvo. Na sétima etapa é feito a relação entre os requisitos de projeto, estes podem se relacionar de maneira positiva, negativa ou neutra. Ou seja, se determinado requisito for maximizado, outro requisito sofrerá positivamente ou negativamente com sua maximização, ou ainda, será indiferente.

Durante a oitava etapa é realizada a avaliação competitiva dos clientes, ou *benchmarking*. Ou seja, os requisitos do cliente são comparados com referências no mercado. Já a nona etapa é semelhante a oitava, o que difere é o foco das comparações, nesse momento o interesse é comparar os requisitos de projeto com o mercado. Por fim, na última etapa, o objetivo é valorar os requisitos de projeto com valores-meta. A existência de valores objetivo orienta qual deve ser o foco do time de projetos.

### 2.2.3 *Softwares* para Prototipagem Virtual e Utilização no Trike

A modelagem sólida em CAD e a simulação dinâmica do modelo sólido serão realizadas em *softwares* diferentes. Esta opção foi tomada baseado nas especificações de cada *software*. É importante ressaltar que ambos podem realizar tanto a modelagem sólida (CAD) quanto a simulação do modelo sólido (CAE). Todavia, optou-se por utilizar o *software* SolidWorks® para a modelagem sólida diante do fato de que o mesmo tem expressiva facilidade de modelagem.

Em relação às simulações dinâmicas realizadas no Ansys, no pacote *Explicit Dynamics*, o Ansys está habilitado a fazer simulações dinâmicas que fornece uma interface para calcular soluções de cargas dinâmicas, grandes deformações e complexos problemas de contato.

Para visualizar o modelo de escoamento que está submetido o protótipo, através de linhas de tempo, trajetórias, linhas de emissão ou linhas de corrente será utilizado o pacote *Fluid Flow*. Será possível realizar a análise do escoamento do ar através do protótipo quando este está em movimento.

Através do módulo *Modal* será possível calcular as frequências naturais e modos de vibração do protótipo. Será feita esta análise dinâmica pois segundo Rao (2009) sempre que a frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincidir com a frequência da excitação externa, ocorre o fenômeno conhecido como ressonância, que resulta em deslocamentos excessivos, sendo passível o colapso do sistema. Devido ao efeito devastador que as vibrações podem causar às máquinas e estruturas, testes de vibração tornaram um procedimento-padrão no projeto e desenvolvimento da maioria dos sistemas de engenharia.

Todavia, existe também a necessidade de determinar quais os modos de vibração contribuem de forma mais significativa para a resposta dinâmica do protótipo, através de curvas de resposta em frequência. Para isso é necessário excitar a estrutura com um carregamento harmônico e variar a frequência de excitação no intervalo desejado. Para esta análise podem ser utilizados os pacotes *Transient Structural* e *Harmonic Response*.

### 2.2.3.1 SolidWorks®

Segundo Dessault Systèmes (2009) o SolidWorks® é um *software* de desenho assistido por computador (CAD), desenvolvido pela Dessault Systèmes SA, empresa que desenvolve e comercializa soluções para projetos mecânicos. Fundada em 1993, sua missão é distribuir ferramentas de produtividade para as áreas de projeto e manufatura. A Dessault distribui seus produtos em mais de 70 países, através de uma rede composta por mais de 300 revendas.

Segundo Souza (2001), o SolidWorks® baseia-se na computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares. Permite a partir do modelo em três dimensões, gerar as vistas ortográficas automaticamente e também a montagem de conjuntos e dispositivos mecânicos. Sendo assim, o *software* trabalha em três ambientes gráficos distintos: o ambiente *part* (modelagem do sólido), o ambiente *drawing* (representação bidimensional, com vistas ortogonais) e o ambiente *assembly* (montagem).

Este *software* possibilita aos projetistas e engenheiros, transformarem suas ideias em projetos completos, através de comandos básicos de construção, que podem tanto acrescentar quanto retirar material do sólido, como *extrude*, *revolve*, *sweep* e *loft*. E comandos básicos de edição, que modificam o modelo sem a necessidade de um desenho auxiliar, como *fillet*, *chamfer*, *shell*, *draft* e *hole*. A versão utilizada para os trabalhos realizados nesta pesquisa foi o SolidWorks® 2009, e as Figuras 16 e 17 trazem os ambientes de trabalhos utilizados.

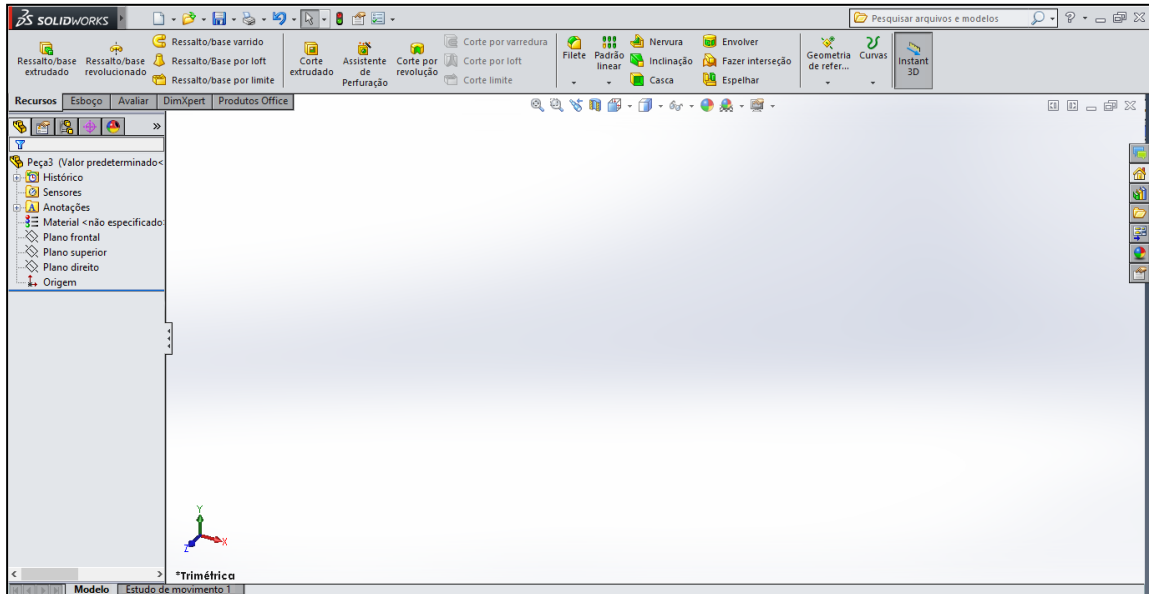


Figura 16. Ambiente de Modelagem (*Part*).

Fonte: SolidWorks®.

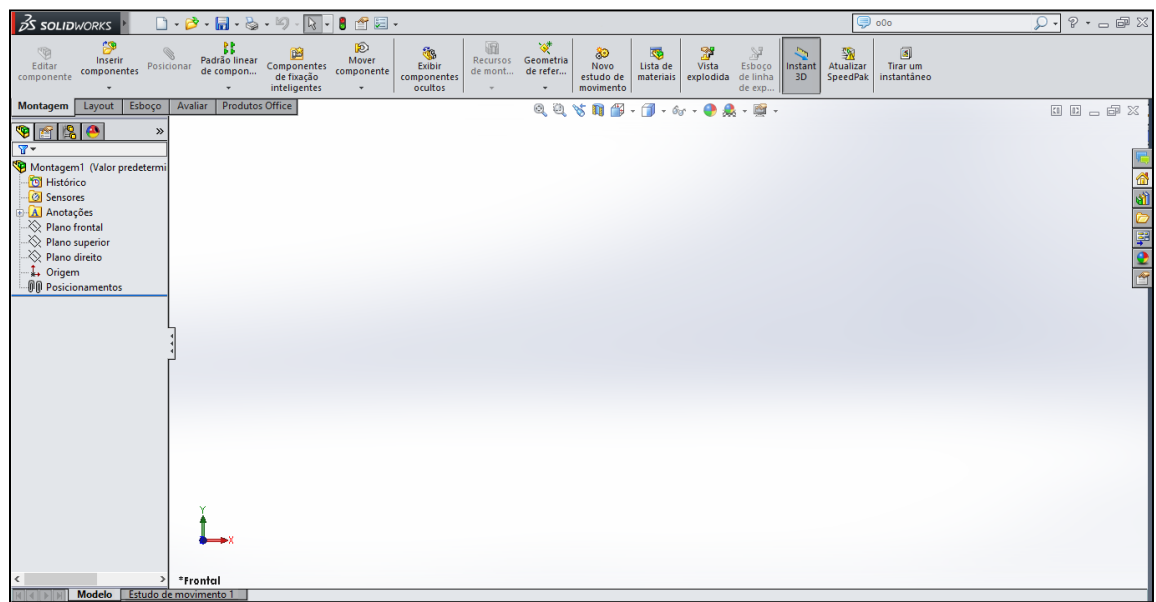


Figura 17. Ambiente de Montagem (*Assembly*).

Fonte: SolidWorks®.



### 2.3.3.2 Ansys

Desenvolvido pela Ansys Inc., o Ansys é um *software* de engenharia assistida por computador (ou CAE) baseado em análise pelo método de elementos finitos (FEM), ou também chamado de análise por elementos finitos (FEA).

Segundo Cook *et al.* (2002) este é um método numérico para a solução de problemas de campo. Estes problemas necessitam que seja determinado a distribuição espacial de uma ou mais variáveis dependentes. Matematicamente, estes problemas de campo são descritos por equações diferenciais. O elemento finito pode ser visualizado como um pequeno pedaço da estrutura. A palavra “finito” distingue estes pedaços a partir de elementos infinitesimais usadas nos cálculos.

Através de informações existentes em arquivos gerados por outros *softwares* CAD (desenho assistido por computador), ou mesmo através das ferramentas de desenho própria, o *software* permite fazer uma análise física, como mecânica estrutural, multifísica, dinâmica dos fluidos, dinâmica explícita, eletromagnetismo e hidrodinâmica.

No Ansys as análises são construídas como sistemas, que podem ser combinados em um projeto. O projeto é guiado por um fluxo de trabalho esquemático, que gerencia as conexões entre os sistemas. Dentro dos pacotes de análise disponíveis do *software*, podem ser utilizados os pacotes *Explicit Dynamics*, *Fluid Flow (Fluent)*, *Modal*, *Transient Structural* e *Harmonic Response*. O ambiente de trabalho deste *software* pode ser visto na Figura 18.

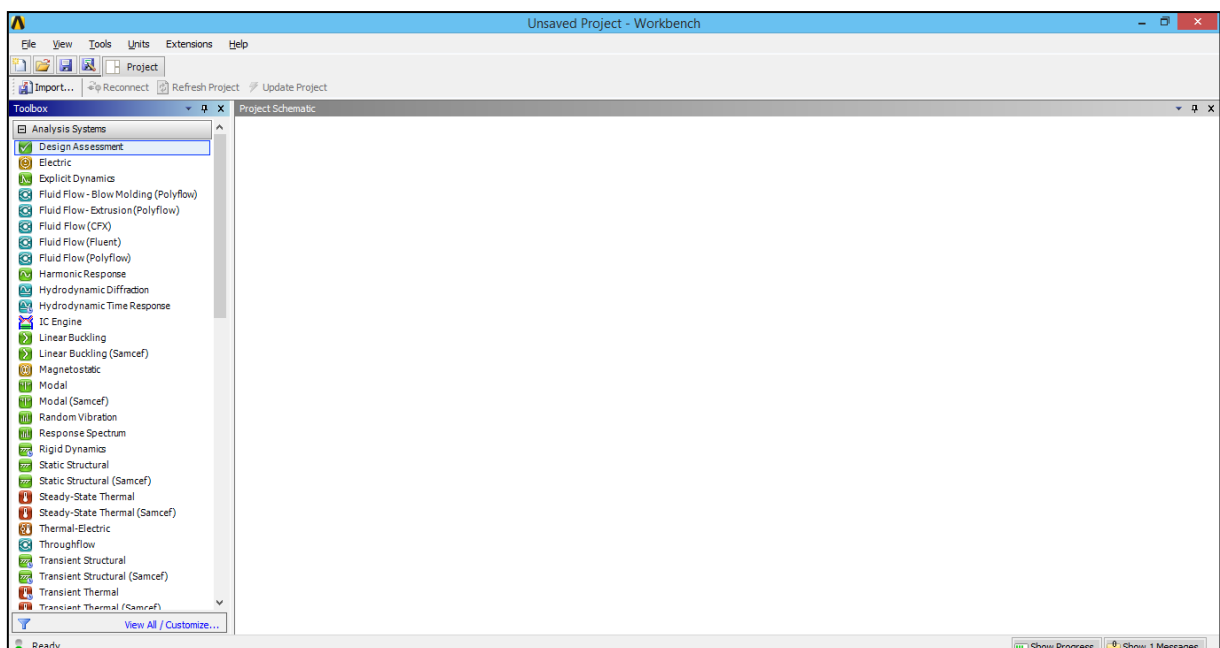


Figura 18. Ambiente de Trabalho do Ansys 14.5.

Fonte: Ansys 14.5.

### 2.3 DETERMINAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DO TRIKE

Os resultados da matriz proposta por Akao e Mizuno (1994) são os valores-meta (ou objetivos) que o produto em desenvolvimento deve apresentar. Estes nada mais são que informações técnicas do mesmo, apresentadas na matriz sob faixas de valores.

Neste sentido, as informações provenientes dos clientes e especialistas, que são o ponto de partida para a matriz, estão expostas no Quadro 6, a seguir. O quadro também apresenta os índices de importância dos requisitos dos clientes. Estes foram extraídos através da escala proposta por Likert (1932), subordinadas às perguntas do questionário aos cadeirantes.

Informações dos Clientes e Especialistas	Índices
Instabilidade de tronco, algo para manter o equilíbrio	3
Poder ser utilizado por outros portadores de mobilidade reduzida	2
Rápido acoplamento, fácil e simples	4
Compactação e integração dos produtos de forma a se tornar cada vez mais naturais	5
Algo no sentido mais vestível possível, bonito esteticamente	3
Boa autonomia, em relação a potência do motor e da bateria, distância e velocidade	4
Durabilidade, baixa manutenção	3
A dificuldade está no chassi e as pernas do cadeirante	2
Veloz para mover-se em calçadas, ciclovias e lugares fechados	5
Desligamento automático	3
Potência para vencer aclives	3
Peso leve, que não ultrapasse o peso da cadeira	5
Uso em vias públicas	4
Deve ter fácil higienização	2
Ajuste ao tamanho do usuário	4

Quadro 6. Necessidades dos Clientes.

Fonte: do Autor.

Os requisitos do usuário converteram-se em características de qualidade que o produto deve apresentar. Estas são os requisitos do produto, ou seja, suas especificações. Cada

requisito do usuário pode ser convertido em uma ou mais características de qualidade, isso depende do quão complexa seja esta necessidade. O Quadro 7 a seguir traz estes requisitos de projeto e seus respectivos graus de importância, onde a importância em “↓” é minimizada, em “↑” é maximizada e em “O” é alvo.

Importância	Requisitos do Produto
O	Cinto de Segurança: Dois Pontos
↓	Acoplamento (tempo)
↓	Peso
O	Suporte de Apoio
↓	Distância entre Eixos
O	Largura do Guidão
O	Altura em Uso
O	Altura em Desuso
O	Diâmetro da Roda
↑	Largura de Pneu
O	Banda do Pneu
O	Perfil do Pneu
O	Inclinação da Suspensão
↑	Raio de Giro
↑	Regulagem do Guidão
O	Carenagem
↑	Autonomia da Bateria
O	Regenerador de Energia
↑	Sistema de Acople
O	Velocidade
↑	Torque
O	Desligamento Automático
O	Espelhos Retrovisores
O	Farol Dianteiro (Branco ou Amarelo)
O	Lanterna Traseira (Vermelha)
O	Velocímetro
O	Buzina
↑	Resistente a Água
↓	Tipo de Bateria
↑	Painel de Instrumentos
↑	Sistema de Aceleração
↓	Distância de Frenagem
↑	Direção Progressiva

Quadro 7. Requisitos de Projeto e Grau de Importância.

Fonte: do Autor.

A partir dos requisitos do usuário convertidos em requisitos do produto, convém estabelecer as relações entre os mesmos, visto que cada desdobramento de requisito do usuário em requisito do produto não está isolado. Tendo em vista proporções que esta matriz se tornou complexa, a etapa das relações fica facilmente visualizada na Matriz QFD presente nos apêndices.

Uma característica importante da matriz proposta por Akao e Mizuno (1994) é fato do produto em concepção não ter seus limites de contorno (ou especificações técnicas) projetadas isoladamente. Sendo assim, o Apêndice A traz o Benchmarking de duas maneiras: em relação aos requisitos do usuário e requisitos do produto (ou do projeto) com os concorrentes.

Finalmente, o produto final da matriz QFD são as especificações-meta, estas são uma faixa de valores, conforme o posicionamento do produto em desenvolvimento em relação ao *benchmarking* feito com seus concorrentes, estas informações podem ser vistas no Quadro 8, a seguir. Adicionalmente, as especificações – meta trazem a importância técnica de cada requisito.

Requisitos de Projeto	Especificações - Meta	Importância Técnica (%)
Sistema de Acople	1 ponto de fixação	6,06
Cinto de Segurança: Dois Pontos	Retrátil, 2 pontos de fixação, transversal	4,75
Tipo de Bateria	Íon-Lítio, 36 a 72 V, 10 a 14 Ah	4,34
Diâmetro da Roda	15" (38,1 cm)	4,24
Peso	5 a 10 kg	4,14
Acoplamento (tempo)	2 a 30 segundos	3,94
Suporte de Apoio	N/D	3,84
Distância entre Eixos	80 cm a 1,5 m	3,74
Largura do Guidão	50 a 70 mm	3,74
Velocidade	5 a 45 km/h	3,74
Sistema de Aceleração	N/D	3,74
Velocímetro	CTB	3,64
Altura em Desuso	80 a 100 cm	3,54
Altura em Uso	90 a 100 cm	3,43
Resistente a Água	N/D	3,43
Inclinação da Suspensão	40 a 50°	3,23
Torque	N/D	3,13
Largura de Pneu	40 a 70 mm	3,03

Perfil do Pneu	Uso misto	2,93
Regulagem do Guidão	0 a 45°	2,93
Distância de Frenagem	À disco na roda dianteira	2,93
Carenagem	Fibra de vidro	2,63
Direção Progressiva	0 a 45 km/h	2,32
Autonomia da Bateria	20 a 30 km	2,22
Painel de Instrumentos	N/D	1,92
Raio de Giro	< 1,825 m	1,72
Regenerador de Energia	N/D	1,62
Espelhos Retrovisores	CTB	1,62
Farol Dianteiro (Branco ou Amarelo)	CTB	1,62
Buzina	100 a 110 dB	1,62
Banda do Pneu	30 a 50 mm	1,41
Desligamento Automático	N/D	1,41
Lanterna Traseira (Vermelha)	CTB	1,41

Quadro 8. Requisitos do Projeto, Especificações e Importância Técnica.

Fonte: Autor.

## 2.4 PROTÓTIPO VIRTUAL TRIKE VERSÃO 2

### 2.4.1 Protótipo Virtual

O protótipo virtual foi projetado no *software* SolidWorks®, utilizando uma *workstation* de propriedade do LabPro (Laboratório de Produção), da UTFPR, localizado no Bloco H, sala H001-A. Sendo que as licenças de utilização do *software* são de propriedade da universidade.

Os dispositivos do *trike* podem ser classificados primeiramente como: componentes da cadeira de rodas e componentes do *front bike* (Figuras 20 e 21). Sendo que a união destes se dá pelo chassi. Os componentes da cadeira de rodas contemplam a cadeira de rodas, logicamente, além das conexões do chassi, e parte do chassi.

Na Figura 21, na página seguinte, é possível visualizar todo o conjunto que é acoplado na cadeira de rodas: desde o engate fixo, ou garras que são parafusadas diretamente no eixo passante da cadeira (não é válido para cadeiras de rodas que podem ser dobradas pelo fato destas não possuírem este eixo passante) até o sistema de propulsão. Apesar deste ter sido projetado sob um modelo específico de cadeira de rodas (mais informações no Quadro 9), é possível que o *front bike* transforme qualquer cadeira, que possua o eixo passante entre as rodas (maioria das cadeiras existentes), em um *trike*. O seu projeto foi concebido para poder ajudar o engate fixo no melhor ângulo desejado pelo cadeirante. A Figura 19 mostra o ponto de fixação dos engates fixos e a Figura 22 o *front* completo.



Figura 19. Engates Fixos na Cadeira de Rodas.

Fonte: do Autor.



Figura 20. Componentes da Cadeira de Rodas.  
Fonte: do Autor.

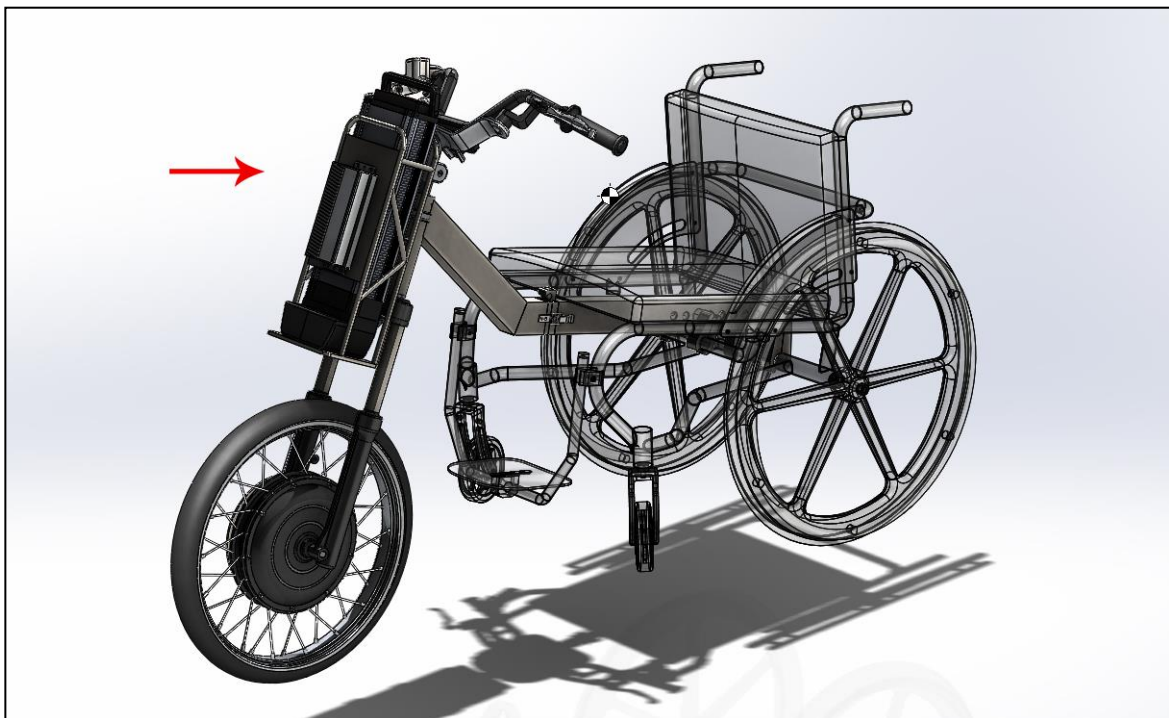


Figura 21. Componentes do *Front Bike*.  
Fonte: do Autor.



Figura 22. *Front Bike* e Chassi com as Conexões da Cadeira de Rodas.  
Fonte: do Autor.



Ainda, parte do chassi é fixado na cadeira de rodas, e a sua segunda parte adjacente fica fixado no *front bike*. O elemento de ligação entre ambos é o engate rápido, conforme previamente sinalizado pela matriz QFD, disponível no Apêndice A. Mais detalhes desse engate rápido são encontrados no Apêndice B e também na Figura 23.

Este engate rápido consiste em um pino de apoio, desenvolvido para ser a primeira região de encaixe do *front bike* e cadeira de rodas, servindo também de guia para o encaixe, seguido de dois engates rápidos laterais.

Outro dispositivo criado a fim de facilitar o engate, dando maior confiança e rapidez ao processo, consiste em um mecanismo análogo ao presente no trinco de portas, uma pequena peça, denominada *link* fica normalmente acionada (pressão de uma mola), quando o manete esquerdo do *front bike* é acionado, este *link* retorna, possibilitando o desencaixe (depois de dos engates rápidos laterais terem sido desconectados).

Todavia, no momento do encaixe, etapa que conforme a ferramenta QFD sinaliza prioridade de tempo, este *link* aciona-se automaticamente. Mais detalhes sobre este dispositivo é encontrado no Apêndice B, através dos desenhos técnicos.



Figura 23. Elemento de Ligação, Engate Rápido.  
Fonte: do Autor.

Conforme afirma Eilam (2005), a engenharia reversa consiste em descobrir os princípios tecnológicos e o funcionamento de um determinado dispositivo ou equipamento, analisando sua estrutura, função e operação. Neste sentido, utilizou-se estes conceitos na

confeção em CAD dos diversos dispositivos que farão parte do protótipo, citados na tabela a seguir, e podem ser visualizados nas Figuras 24 à 27.

Item	Descrição	Fabricante	Modelo
1	Cadeira de Rodas	Jumper	Jumper WCMX
2	Acionamento Elétrico	Windbikes	Kit Wheel 1000 W
3	Sistema de Frenagem	Yamaha	Crypton ED 115 cm <sup>3</sup>
4	Sistema de Amortecimento	Yamaha	Crypton ED 115 cm <sup>3</sup>
5	Sistema de Direção	Yamaha	Crypton ED 115 cm <sup>3</sup>

Quadro 9. Itens de Terceiros para o Protótipo.

Fonte: do Autor.



Figura 24. Cadeira de Rodas do Fabricante Jumper, Modelo WCMX.

Fonte: do Autor.

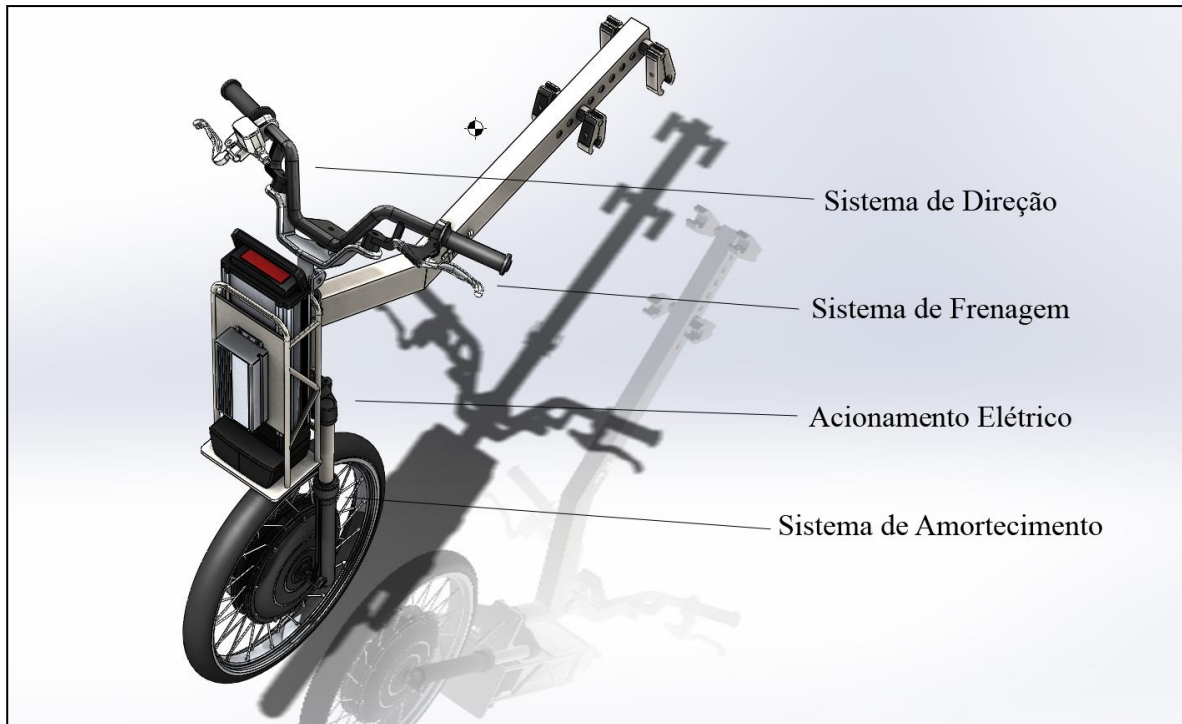


Figura 25. Sistemas de Terceiros no *Front Bike*.

Fonte: do Autor.



Figura 26. Detalhe para o Sistema de Freio, Acionamento e Amortecimento.

Fonte: do Autor.



Figura 27. Detalhe para o Sistema de Direção e Amortecimento.  
Fonte: do Autor.

Todavia, a fim de contemplar os requisitos levantados pela matriz QFD e o conjunto de ferramentas utilizadas para converter as necessidades do usuário final e advertências sinalizadas pelos especialistas em qualidades do produto, adicionou-se na versão final do *trike* (conjunto do *front bike*, cadeira de rodas e demais dispositivos) a parte estética e funcional: carenagem. Esta, além de influenciar positivamente na aerodinâmica do protótipo (conforme item 2.1.5.3.2) maximiza a concepção estética (conforme item 2.3). Isto pode ser observado nas Figuras 28 e 30, onde é apresentado a versão final do protótipo virtual.



Figura 28. Protótipo Virtual do *Trike* em sua Concepção Final.  
Fonte: do Autor.



Figura 29. Protótipo Virtual em sua Versão Final.  
Fonte: do Autor.

#### 2.4.2 Análises e Simulações

As análises seguiram um rumo diferente do projetado inicialmente. Alguns fatores contribuíram para a mudança de ferramentas de análise. Inicialmente, realizou-se a análise estática do chassi do *trike* via *software* Ansys, todavia, a análise de escoamento de fluidos (aerodinâmica) ficou por conta do pacote *Flow Simulation* do SolidWorks®, esta mudança ocorreu devido ao fato de que o acadêmico possuía mais experiência em uso nesse segundo *software*, bem como o modelamento virtual já havia sido feito neste *software*.

Mas, a análise dinâmica restringiu-se apenas a observação analítica, com dados provenientes de suspensões similares às utilizadas neste protótipo. Esta simplificação ocorreu devido ao fato de que a geometria sofria erros ao ser exportada do SolidWorks® para o Ansys. Então, para atingir os pontos desejados nesse estudo, optou-se por uma análise analítica, utilizando o modelo proposto por Gillespie (1992).

Buscou-se primeiramente saber se o chassi proposto suportará as forças proveniente da distribuição de massas, visto que este liga todos os sistemas do *trike*. Esta análise estática foi realizada no *software* Ansys, utilizando uma *workstation* de propriedade do LabPro (Laboratório de Produção), da UTFPR, localizado no Bloco H, sala H001-A. Sendo que as licenças de utilização do *software* são de propriedade da universidade.

De antemão, espera-se que o coeficiente de segurança em relação ao dimensionamento estático seja elevado, visto que o perfil já foi definido através do sistema de engate rápido: devido as capacidades construtivas para a construção e funcionamento do *link*, adotou-se tubos de perfil retangular com dimensões de 60 x 40 x 2 mm.

Conforme observa-se na Figura 30 definiu-se as forças agindo no *trike* como  $F_t$  (Força Trativa),  $W_f$  (Peso do *Front*),  $W_{wcu}$  (Peso da Cadeira de Rodas e do Usuário) e as Reações nos eixos frontal e traseiro,  $R_1$  e  $R_2$  respectivamente.

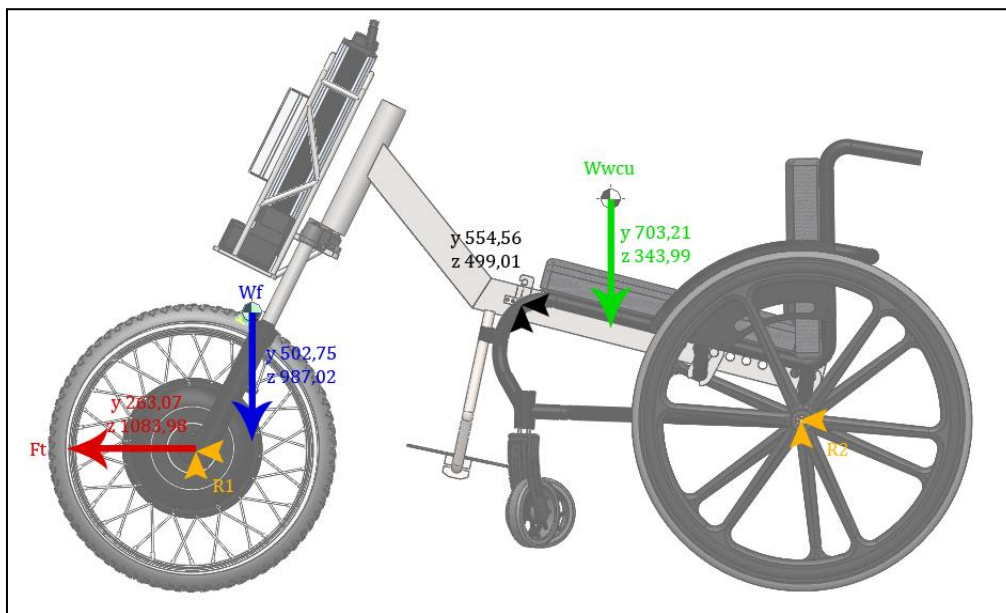


Figura 30. Forças Agindo no *Trike*.

Fonte: do Autor.

Encontrou-se a força trativa no *trike*, esta é oriunda do sistema de propulsão, acionado por um motor elétrico presente no cubo da roda dianteira do mesmo e também, considerou-se a força inercial de todo o conjunto.

A parte da força oriunda da propulsão é definida através da potência do acionamento, conforme dimensionamento a seguir, onde sabe-se que a potência máxima do *trike* é equivalente ao quociente da energia pelo tempo, ou, trabalhando algebricamente, equivale à energia na forma de trabalho (torque) pela velocidade.

Adotou-se, para fins de cálculo a maior potência admissível, ou 1000 W, e a velocidade média, 25 km/h, esta é oriunda dos valores estabelecidos na matriz QFD, entre 5 e 45 km/h. Então,

$$Ft_1 = \frac{Pot}{v} = \frac{1.000 \text{ W}}{25 \text{ km/h}} = \frac{1.000 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}}{6,94 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 144 \text{ N} \quad (15)$$

Já a parte da força oriunda da inércia de toda a massa segue os princípios da mecânica clássica. Os dados necessários para encontrá-la são a massa total do sistema, que é conhecida, a velocidade média, também conhecida, e o tempo para chegar até essa velocidade média. Para encontrar a aceleração média (quociente da velocidade média pelo tempo), admitiu-se que o *trike* atingirá sua velocidade média em 3 segundos. Isto foi uma simplificação para viabilizar o cálculo, e também com base em testes empíricos de Grigollo (2014).



$$Ft_2 = m \cdot \frac{v}{t} = 138,175 \text{ kg} \cdot \frac{6,94 \frac{m}{s}}{3 \text{ s}} = 319,6 \text{ N} \quad (16)$$

$$Ft = Ft_1 + Ft_2 = 463,6 \text{ N} \quad (17)$$

A força peso do *front bike* vem diretamente do SolidWorks®, onde este é capaz de estimar o peso dos modelos virtuais, a partir da determinação dos materiais. Este valor foi confrontado com o peso real de cada equipamento.

$$Wf = m_f \cdot \vec{g} = 20 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 196,2 \text{ N} \quad (18)$$

Já a força peso do cadeirante junto com a cadeira de rodas, seguiu de maneira análoga, pesando-se a cadeira com uma balança. O peso do cadeirante é oriundo da Norma ABNT NBR ISO 7176-22, onde é considerado para fins de dimensionamento um usuário com massa de 100 kg. Então,

$$Wwcu = (m_{wc} + m_u) \cdot \vec{g} = (12,480 \text{ kg} + 100 \text{ kg}) \cdot 9,81 \frac{m}{s} = 1.103,4 \text{ N} \quad (19)$$

Método	Sistema	Componente	Peso [kg]
Balança	Cadeira de Rodas	Roda Direita	2,060
		Roda Esquerda	2,060
		Chassi da Cadeira	7,535
		Apoio para os Pés	0,825
	Front Bike	Motor Elétrico	6,475
		Bateria	4,850
		Suporte	2,285
		Amortecedor Direito	1,470
		Amortecedor Esquerdo	1,395
		Pinça de Freio	0,760

		Disco de Freio	0,705
		Aros	1,625
		Atuador de Freio	0,240
		Controlador do Motor	0,595
		Manetes de Freio	0,140
		Display	0,160
SolidWorks®	Chassi	Chassi	5,000
Total			38,175

Quadro 10. Massas dos Componentes do Trike

Fonte: do Autor.

Vale ressaltar que para fins de simulação, utilizou-se como modelo CAD um chassi com as mesmas dimensões do protótipo, porém sem os engates rápidos laterais e o *link*, estes foram dimensionados utilizando o próprio peso total do protótipo, admitindo-se que a força necessária para abrir o engate são o peso e a força inicial.

A seguir, na Figura 32 é apresentado o diagrama de forças no *software* Ansys, utilizando o módulo *Static Structural*. Em seguida é apresentado na Figura 33 o coeficiente de segurança, de aproximadamente 15 com pontos críticos variando na ordem de 3 a 5, utilizando como material o aço 1020 e a distribuição de tensão do chassi na Figura 34, sendo a máxima atuante na ordem de 38 MPa.

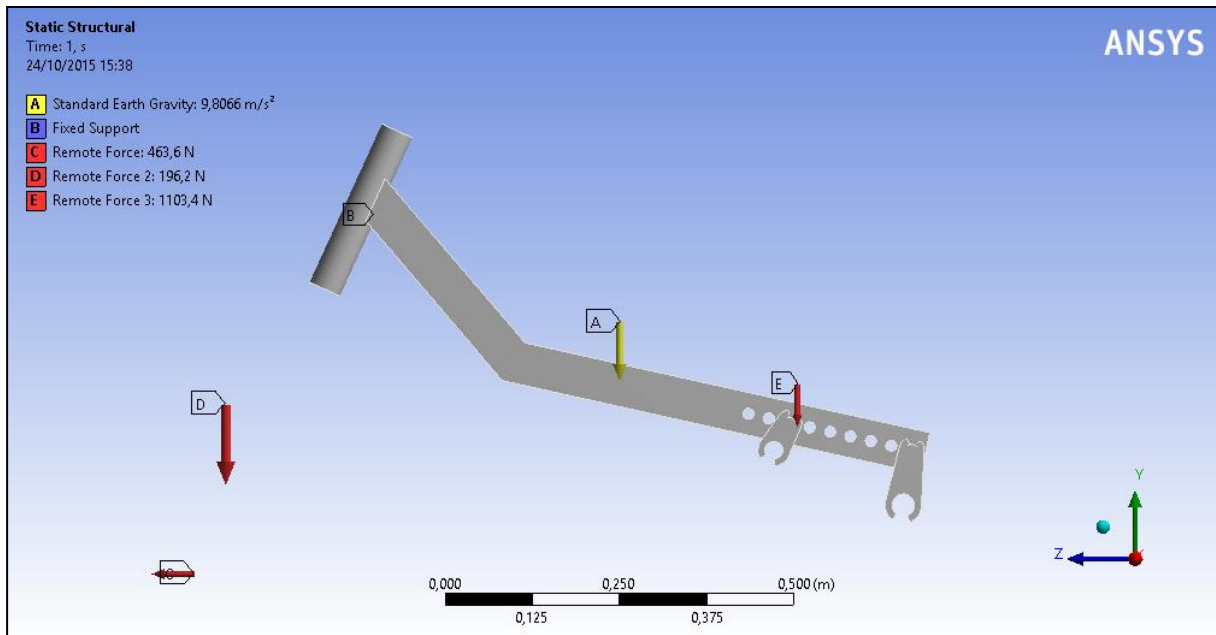


Figura 31. Forças Aplicadas na Simulação Estática.  
Fonte: do Autor.

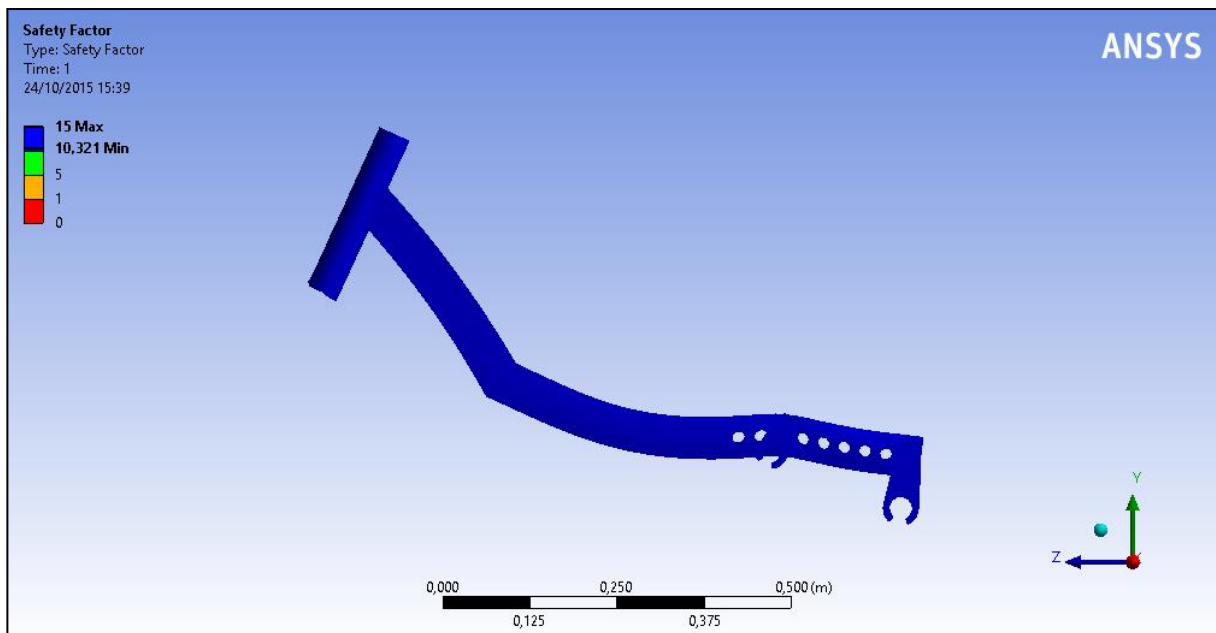


Figura 32. Coeficiente de Segurança.  
Fonte: do Autor.

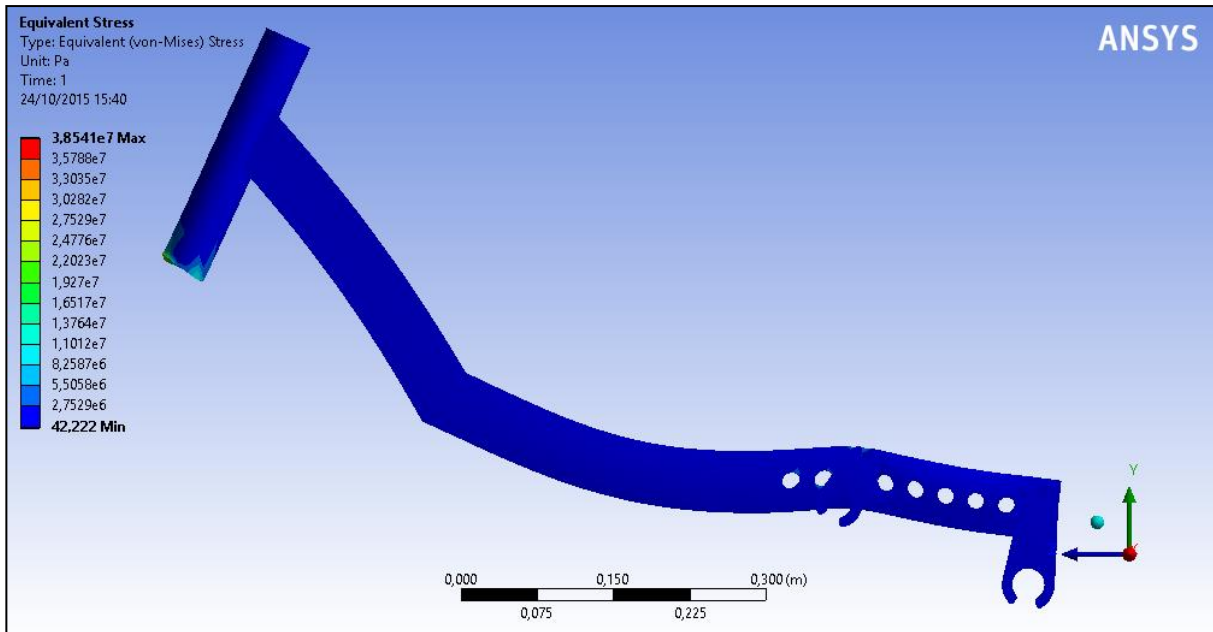


Figura 33. Tensão Equivalente de *Von-Misses*.

Fonte: do Autor.

A seguir, são mostradas as análises em relação a aerodinâmica. Restringiu-se a análise apenas a carenagem proposta. Esta carenagem protege os componentes elétricos como painel de instrumentação, bateria e controlador do motor. Buscou-se projetar uma carenagem para o *front bike* com linhas fluidas. As trajetórias do fluido são apresentadas a seguir, bem como os gráficos da variação da velocidade e pressão (admitindo-se um deslocamento de 25 km/h (6,94 m/s) nas Figuras 35, 36 e 37.

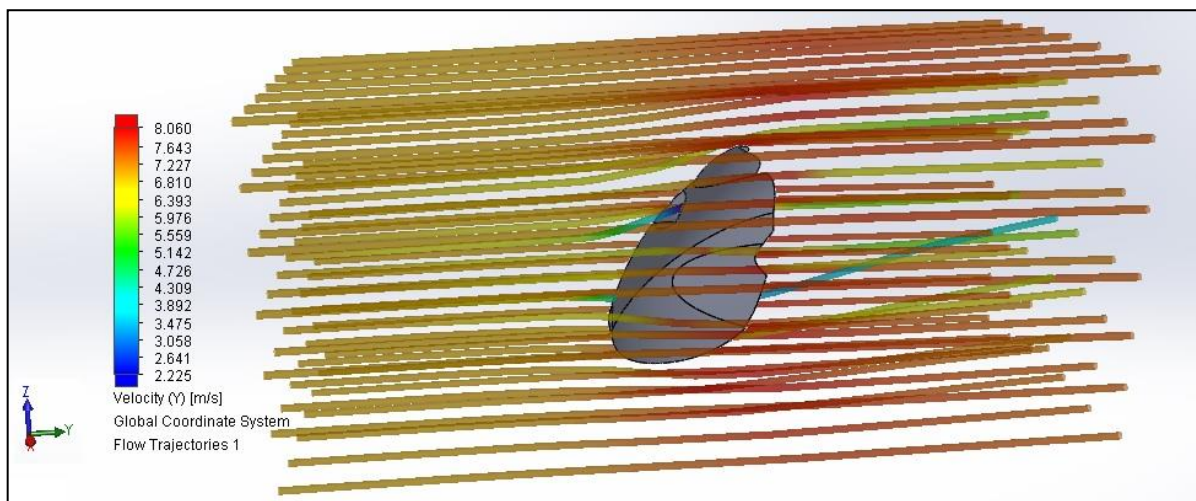


Figura 34. Linhas de Trajetória com Velocidade em m/s.

Fonte: do Autor.

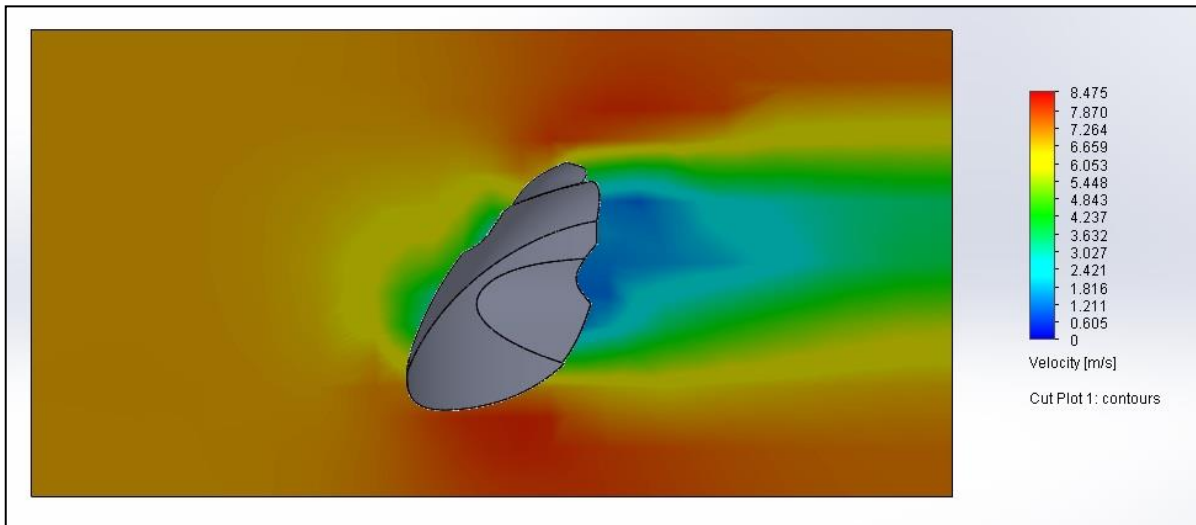


Figura 35. Variação da Velocidade em m/s.

Fonte: do Autor.

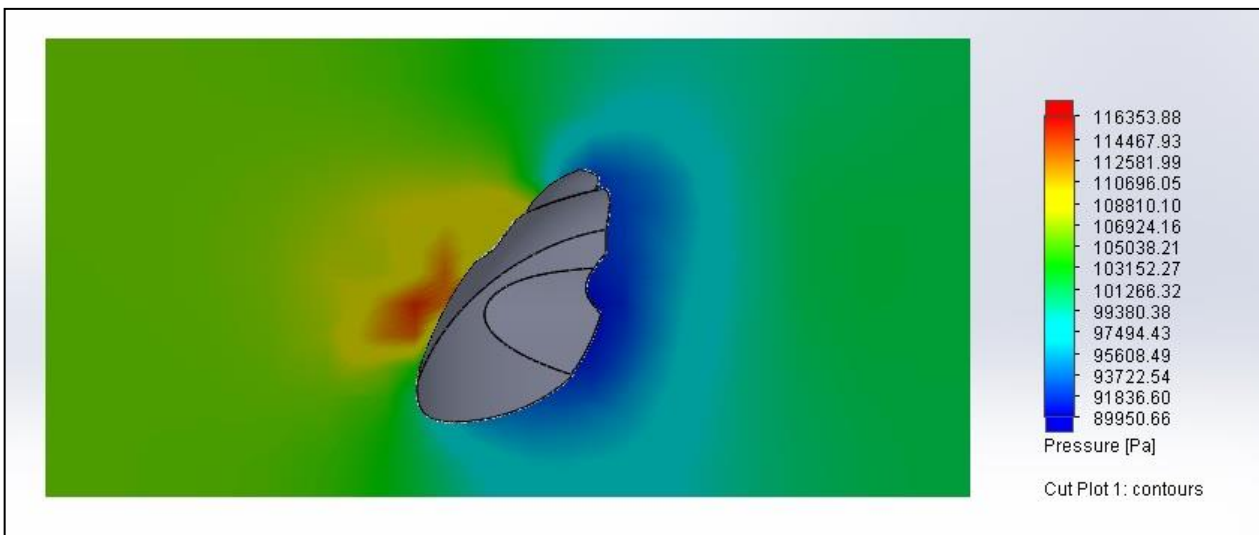


Figura 36. Variação da Velocidade em m/s.

Fonte: do Autor.

A análise dinâmica é mostrada a seguir, devido a dificuldades na transferência do protótipo virtual em CAD do *software* SolidWorks® para o Ansys, esta análise será feita de modo analítico. Os problemas de transferência da geometria se devem ao fato de que a mesma, por estar altamente detalhada, possui muitas relações de montagem, criando diversos erros. A capacidade de processamento não foi um problema, no entanto, a importação da geometria para o Ansys não foi possível.

Vale ressaltar, que é possível analisar analiticamente o protótipo com relevância dos resultados. Então, através do modelo proposto por Gillespie (1992) calculou-se a rigidez equivalente da suspensão, *RR*. Para as constantes de rigidez de mola, utilizou-se valores

obtidos por Cossalter *et al.* (2014). Então, primeiramente encontrou-se a rigidez equivalente entre a rigidez referentes a massa suspensa e não suspensa, demonstrado a seguir.

$$RR = \frac{K_s \cdot K_t}{K_s + K_t} = \frac{2.351 \frac{N}{m} \cdot 18.000 \frac{N}{m}}{2.351 \frac{N}{m} + 18.000 \frac{N}{m}} = 2.079,41 \frac{N}{m} \quad (20)$$

A frequência natural, que previamente seria obtida através de análise do módulo *Modal* do *software* Ansys, pode ser facilmente encontrada através da relação a seguir, exposta por Gillespie (1992) e Rao (2009), onde a massa M equivale a massa total do conjunto (cadeirante e *trike*).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{RR}{M}} = \sqrt{\frac{2.049,41 \frac{N}{m}}{138,175 \text{ kg}}} = 3,879 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (21)$$

A frequência natural amortecida, analogamente, é encontrada a partir da relação a seguir, a partir da dedução exposta por Rao (2009) e Gillespie (1992). É encontrada também a frequência amortecida, através da razão de amortecimento, fornecida por Cossalter *et al.* (2014).

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta_s^2} = 3,879 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot \sqrt{1 - 0,2898^2} = 3,2692 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (22)$$

Assim, através destes parâmetros que desejava-se encontrar via *software* por elemento finitos, encontra-se via planilha eletrônica, respectivamente, as razões de amplitude para o movimento da massa suspensa M em resposta às entradas das imperfeições do terreno em (22), as forças do eixo em (23) e forças aplicadas diretamente na massa suspensa em (24). Estas nada mais são que os fatores de amplificação de vibração, segundo Rao (2009). Estes cálculos estão disponíveis no Apêndice C.

$$\frac{\ddot{Z}}{\ddot{Z}_r} = \frac{K_1 K_2 + j[K_1 C \omega]}{[\alpha \omega^4 - (K_1 + K_2 \alpha + K_2) \omega^2 + K_1 K_2] + j[K_1 C \omega - (1 + \alpha) C \omega^3]} = 1,008 \quad (23)$$

$$\frac{\ddot{Z}}{F_w/M} = \frac{K_2 \omega^2 + j[C \omega^3]}{[\alpha \omega^4 - (K_1 + K_2 \alpha + K_2) \omega^2 + K_1 K_2] + j[K_1 C \omega - (1 + \alpha) C \omega^3]} = 0,006 \quad (24)$$

$$\frac{\ddot{Z}}{F_b/M} = \frac{[\mu \omega^2 - (K_1 + K_2) \omega^2] + j[C \omega^3]}{[\alpha \omega^4 - (K_1 + K_2 \alpha + K_2) \omega^2 + K_1 K_2] + j[K_1 C \omega - (1 + \alpha) C \omega^3]} = -0,007 \quad (25)$$

A Figura 37 mostra o gráfico da resposta como uma função da frequência, ou seja, o aumento da resposta está em função da frequência. Este aumento é definido de forma diferente, conforme o tipo de excitação de entrada. O eixo horizontal deste gráfico representa a frequência, medida em Hz e o eixo vertical representa o aumento da resposta. Vale ressaltar que diferente de um automóvel de competição, a busca através da suspensão do *trike* é análoga a automóveis de passeio: busca o conforto do usuário em detrimento da estabilidade, visto que o uso do *trike* não é direcionado para fins de competição.

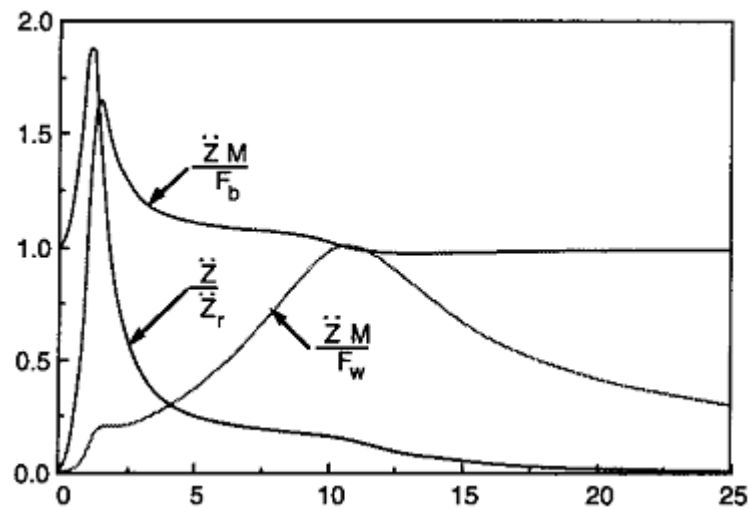


Figura 37. Resposta Dinâmica.  
Fonte: Gillespie (1992).

## 2.5 CONCLUSÕES

Propôs-se a concepção de uma tecnologia assistiva à luz dos conceitos de Desdobramento da Função Qualidade (QFD) e também de Planejamento e Desenvolvimento de Produtos (PDP). Sendo que durante o desenvolvimento do projeto utilizou-se a prototipagem virtual a fim de eximir o usuário final aos testes, visto que este possui mobilidade reduzida.

Este protótipo virtual visou fornecer à simulação virtual, um modelo virtual que admitiu análises através do método por elementos finitos. Estas análises envolveram fenômenos físicos que são de imprescindível relevância ao detalhamento e dimensionamento do protótipo, como a análise dinâmica e o escoamento de fluidos sob a carenagem do protótipo (ou aerodinâmica).

Chegou-se nas especificações-meta que o produto final deve possuir a fim de ser atrativo para o consumidor final. Estas especificações, expostas em faixas de valores de engenharia, são o ponto de partida para o início da modelagem virtual do protótipo.

Na concepção do protótipo virtual, primeiramente através da engenharia reversa, modelou-se em CAD os diversos dispositivos que fazem parte do protótipo, estes são fabricados por terceiros. A partir da aquisição destes dispositivos, através de instrumentos de medição gerou-se seus modelos virtuais.

Então, a partir dos pontos principais levantados pelas ferramentas de obtenção de requisitos do produto utilizadas, projetou-se o protótipo virtual se atendo nos principais pontos levantados.

Este trabalho teve sua maior limitação no aspecto dinâmico da simulação, esta não pode ser analisada computacionalmente, embora tenha sido explorada analiticamente. Academicamente, observa-se uma forte contribuição que o QFD e o PDP fornecem à engenharia mecânica. A sugestão para trabalhos futuros está na determinação de testes e fabricação do protótipo físico, a fim de confrontar com as práticas adotadas no protótipo virtual.



## REFERÊNCIAS

AKAO, Yoji. **Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements Into Product Design**. Cambridge: Taylor & Francis, 2004.

AKAO, Yoki; MIZUNO, Shiregu. **QFD: The Customer Driven Approach to Quality Planning and Deployment**. Cambridge: Taylor & Francis, 1994.

ANSYS, INC. **Ansys® Workbench User's Guide**. Canonsburg: Ansys Inc, 2012.

ARMSTRONG, Cecil G. **Modelling Requirements for Finite-Element Analysis**. Belfast: Journal Computer-Aided Design, 1994.

BURR, Arthur H.; CHEATHAM, John B. **Mechanical Analysis and Design**. 2ª Ed. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1995.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

CHENG, Lin Chih; MELO FILHO, Leonel Del Rey. **QFD: Desdobramento da Função Qualidade na Gestão de Desenvolvimento de Produtos**. 2ª Ed. São Paulo: Blucher, 2010.

CHENG, Lin Chih *et al.* **QFD: Planejamento da Qualidade**. 1ª Ed. Belo Horizonte: Littera Maciel, 1995.

CLARK, Kim B.; CHEW, Bruce W.; FUJIMOTO, Takahiro. **Integrating Design and Manufacturing for Competitive Advantage**. Oxford: Oxford University Press, 1992.

COOK, Albert M.; POLGAR, Jan Miller. **Assistive Technologies: Principles and Practice**. Saint Louis: Mosby Elsevier, 2013.

COOK, Robert D.; *et al.* **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4ª Ed. Wileysin: John Wiley & Sons, 2002.

COOPER, Robert G. **Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products**. Indiana: Business Horizons Journal, 1990.

COSSALTER, Vittore. LOT, Roberto. MASSARO, Mattero. **Modelling, Simulation and Control of Two-Wheeled Vehicles**. Informazione e Bioingegneria, Politecnico di Milano, Italy, Ed. Wiley, 2014.

COSTA, Álvaro Neto. **Dinâmica Veicular**. São Carlos: Notas de Aula, 2005.

DESSAULT SYSTÈMES, SolidWorks Corporation. **Student's Guide to Learning SolidWorks® Software**. Massachusetts: Dessault Systèmes, 2009.

EILAM, Eldad. **Reversing: Secrets of Reverse Engineering**. 1ª Ed. Winsconsin: John Wiley & Sons, 2005.

FOX, Robert W; *et al.* **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7ª Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2011.

GILLEPSIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale: Society of Automotive Engineers Inc (SAE), 1992.

GRIGOLO, Vinicius E. **Desenvolvimento de um Protótipo Híbrido *Frontbike* para Pessoas com Dificuldades de Mobilidade**. UTFPR, Trabalho de Conclusão de Curso, 2014.

GRIMM, Todd. **User's Guide to Rapid Prototyping**. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2004.

GROOVER, Mikell P.; ZIMMERS, Emory W. **CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing**. New Jersey: Prentice-Hall, 1984.

IBDD. **Inclusão Social da Pessoa com Deficiência: Medidas que Fazem a Diferença**. Rio de Janeiro: IBDD, 2008.

KANO, Noriaki; *et al.* **Attractive Quality and Must-be Quality**. Journal of the Japanese Society for Quality Control. Tokyo: Hinshitsu, 1984.

LEE, Kunwoo. **Principles of CAD/CAM/CAE Systems**. Boston: Addison Wesley Longman Publishing Company, 1999.

LIKERT, Rensis. **A Technique for the Measurement of Attitudes**. Michigan: Archives of Psychology, 1932.

MCDONALD, Alan T.; PALMER, George M. **Aerodynamic Drag Reduction of Inercity Buses**. Warrendale: Society of Automotive Engineers Inc (SAE), 1980.

MUNSON, Bruce R. *et al.* **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. 4ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 2ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

OHFUJI, T. **Quality Function Deployment: The Basics of QFD**. Tokyo: Societas Qualitatis, 1993.

RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Pearson, 2009.

RAMOS, Márcio de Oliveira. **Estudo das Melhores Práticas em Aerodinâmica Veicular, Visando a Melhoria de Consumo de Combustível e Redução de Emissões de Poluentes Aplicadas a Veículos de Passeio**. São Caetano do Sul: Instituto Mauá de Tecnologia, 2012.

RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa Social: Métodos e Técnicas**. São Paulo: Atlas, 1989.

ROZENFELD, Henrique; *et al.* **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma Referência para a Melhoria do Processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SANDHU, Jim. **Inclusive Design Research: Multidimensional Evaluation as a Tool in Teaching Universal Design**. Oslo: Husbanken, 2002.

SOMMERVILLE, Ian. DEWSBURY, Guy. **Dependable Domestic System Design: A Socio-Technical Approach**. Lancaster: Journal Interacting with Computers Elsevier, 2007.

SOUZA, Antônio Carlos; *et al.* **SolidWorks® – Guia Prático para Modelagem Sólida**. Florianópolis: Ed. Visual Book, 2001.

ULLMAN, David G. **The Mechanical Design Process**. 4ª Ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

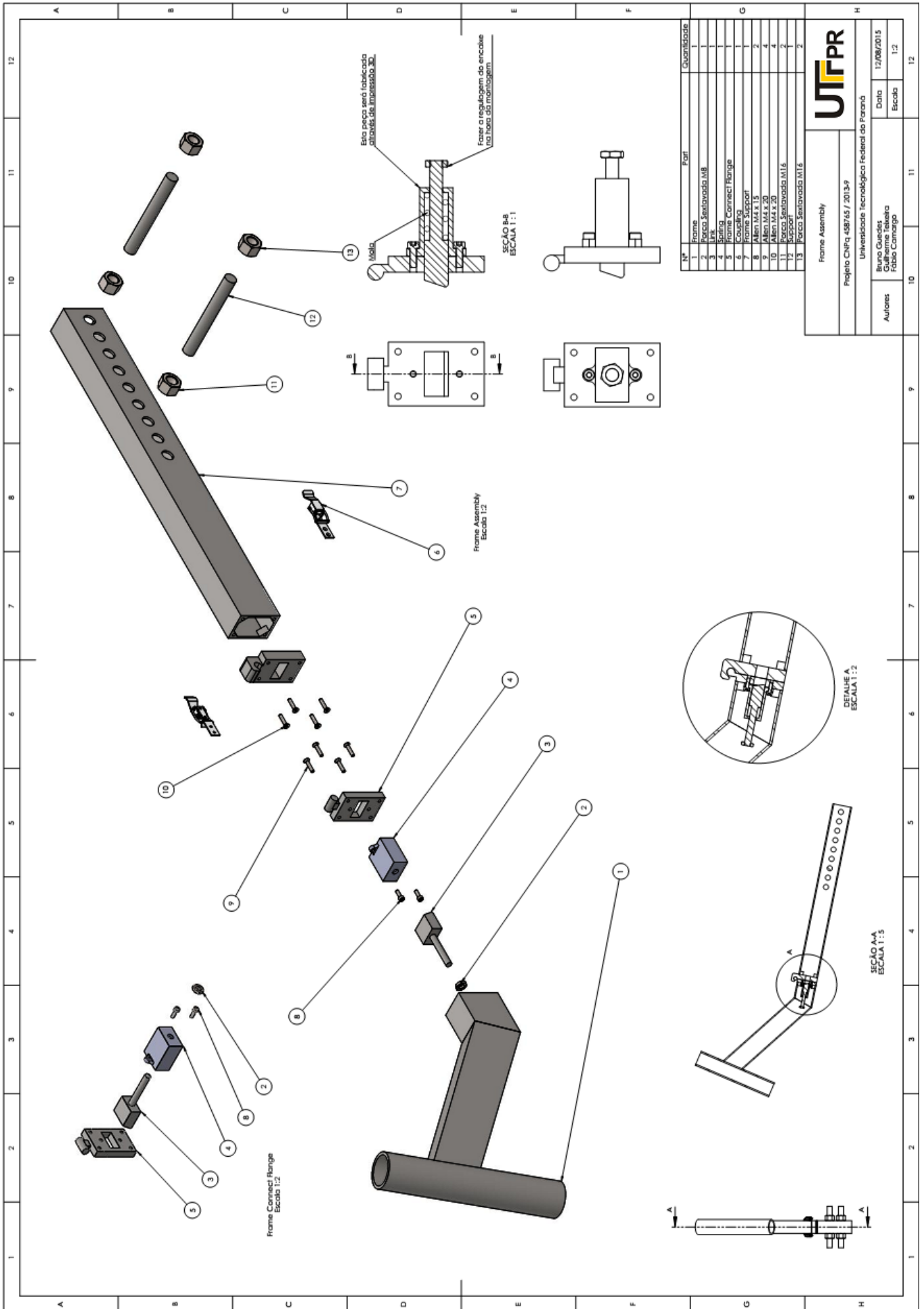
ULRICH, Karl T; EPPINGER, Steven D. **Product Design and Development**. 5ª Ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

ZEID, Ibrahim. **CAD/CAM: Theory and Practice**. 2ª Ed. Michigan: McGrill-Hill, 2009.

\_\_\_\_\_. ATA VII - Comitê de Ajudas Técnicas (CAT) - Coordenadoria Nacional para Integração da Pessoa Portadora de Deficiência (CORDE) - Secretaria Especial dos Direitos Humanos - Presidência da República. Brasília: Comitê de Ajudas Técnicas, 2007.



## APÊNDICE B – Desenhos Técnicos



N°	Part	Quantidade
1	Frame	1
2	Parco Selavizada M8	1
3	União	1
4	Spring	1
5	Frame Connect Range	1
6	Coupling	1
7	Parco Selavizada	1
8	Allen M4 X 15	2
9	Allen M4 X 20	4
10	Parco Selavizada M1,6	2
11	Parco Selavizada M1,6	2
12	Parco Selavizada M1,6	2
13	Parco Selavizada M1,6	2

**UTFPR**

Frame Assembly

Projeto CNPq 498765 / 2013-9

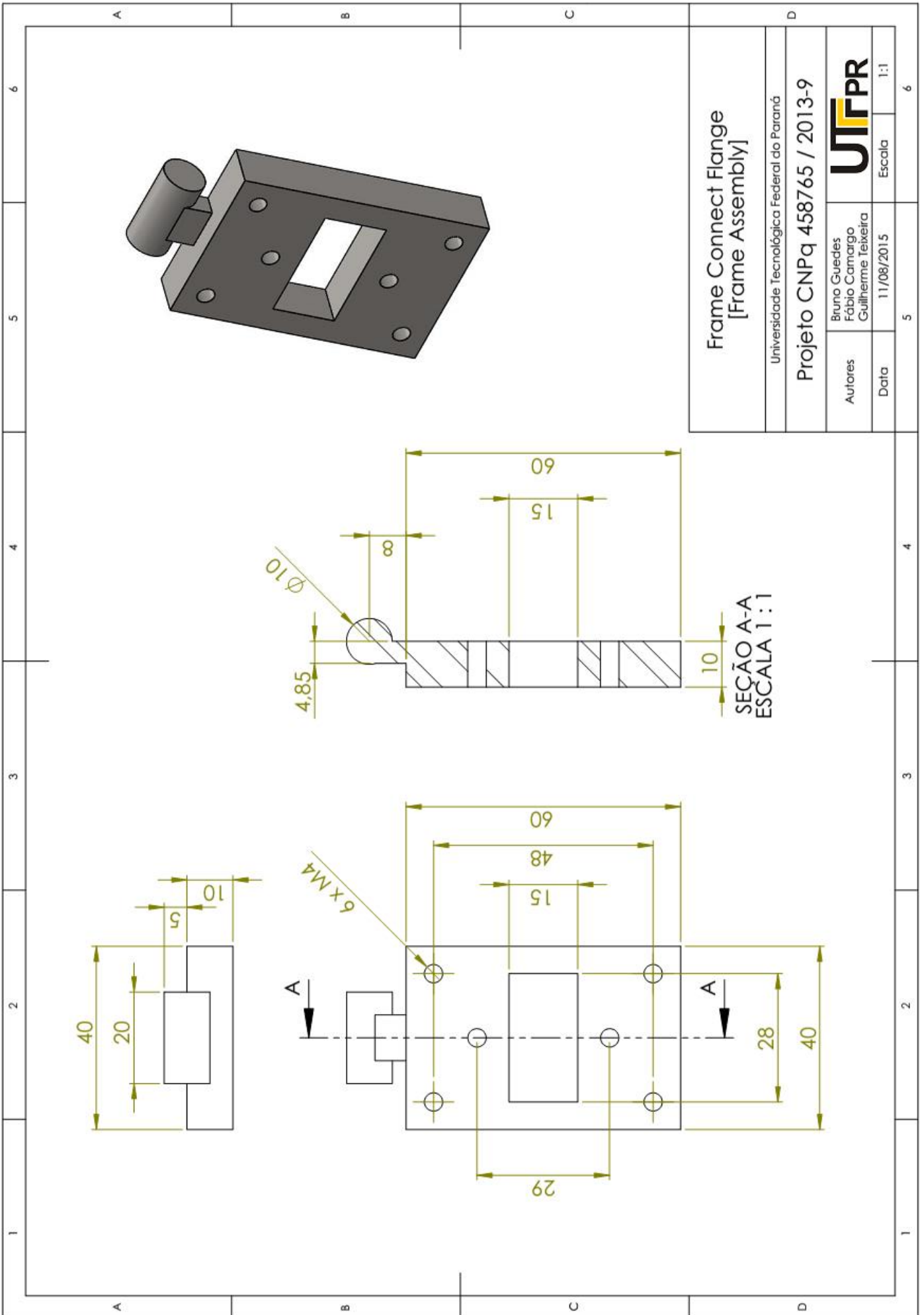
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

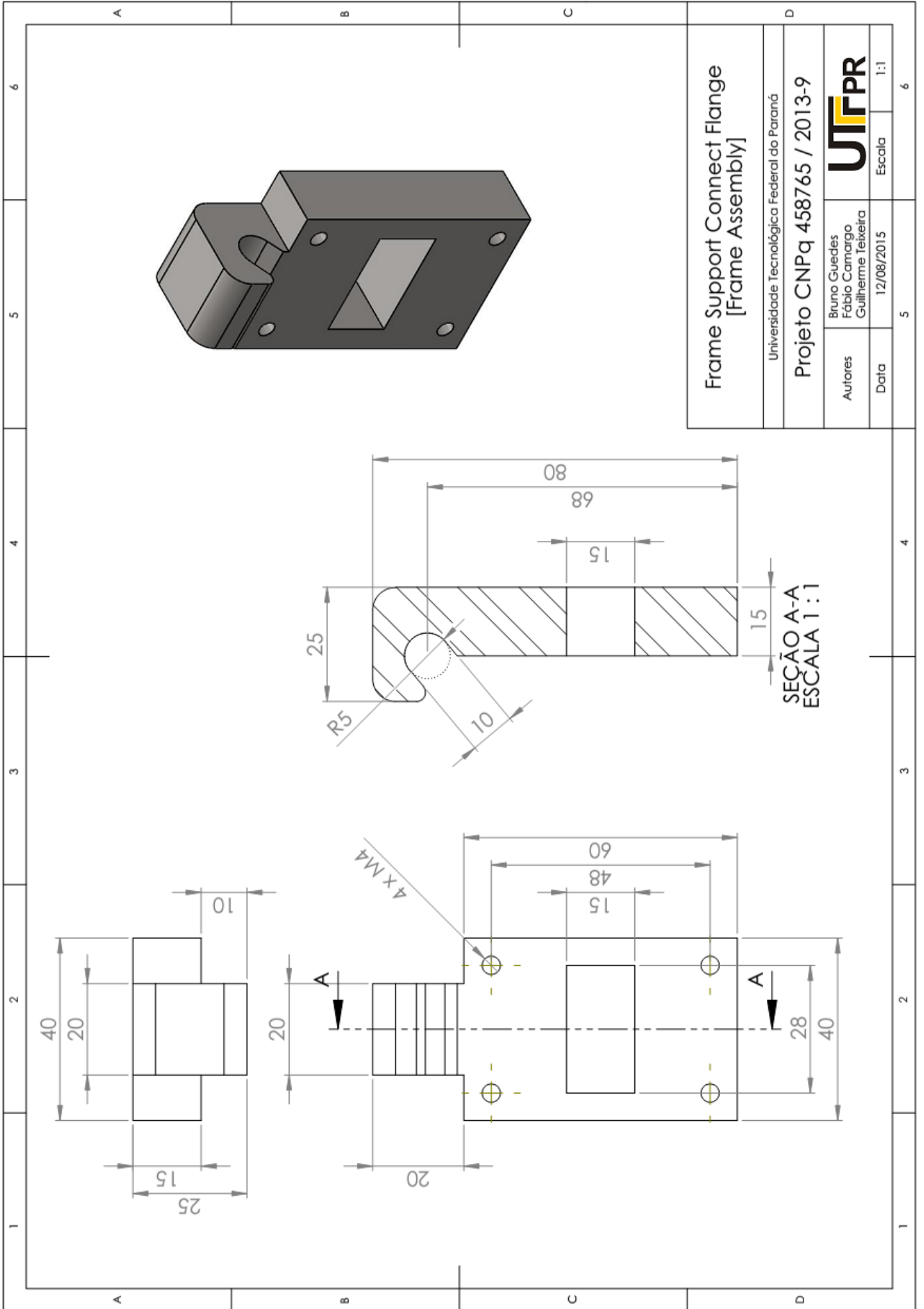
Bruno Guedes  
Roberto  
Fábio Corrêgo

Autores

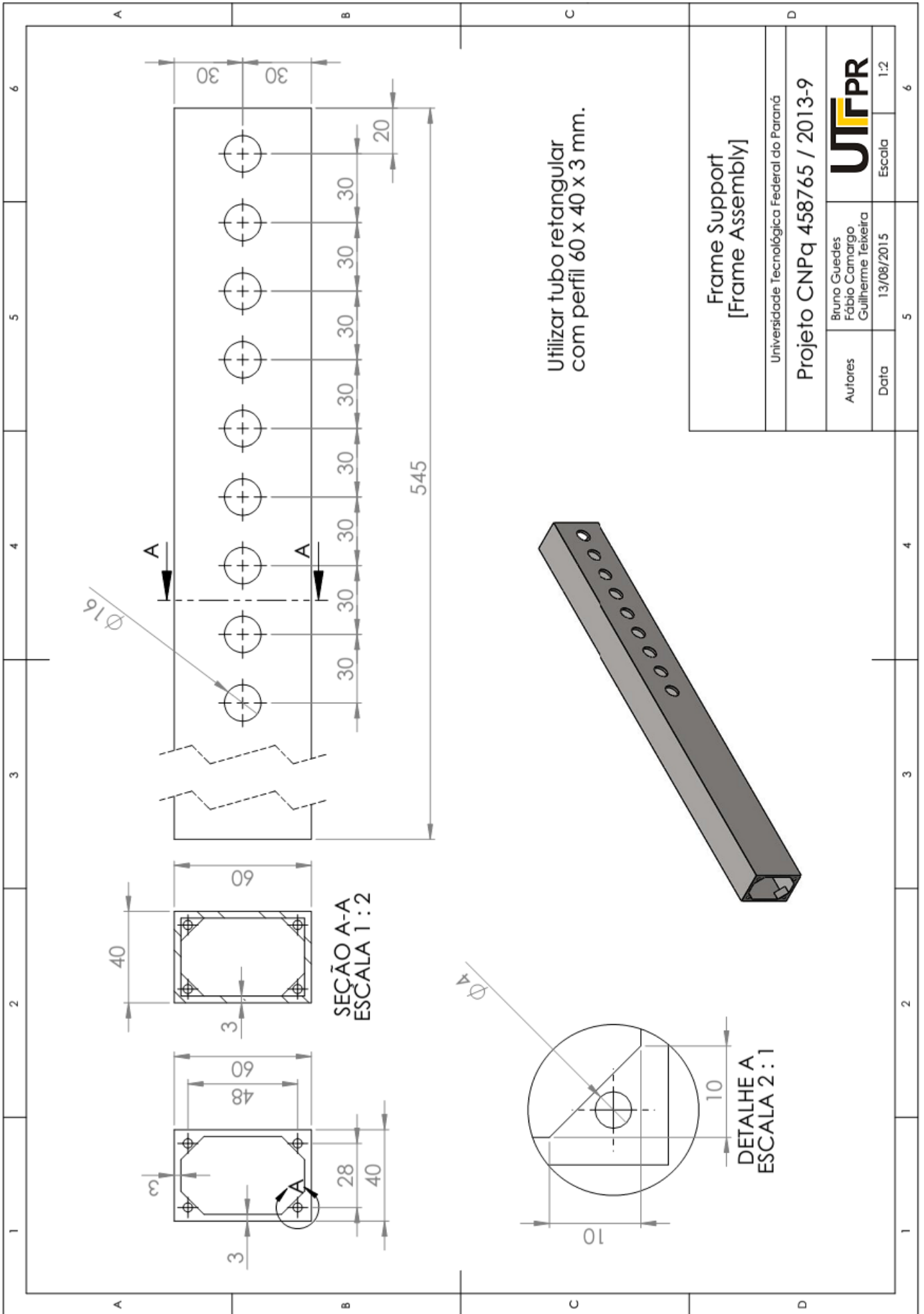
Data 12/08/2015

Escala 1:2









Utilizar tubo retangular  
com perfil 60 x 40 x 3 mm.

Frame Support  
[Frame Assembly]

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Projeto CNPq 458765 / 2013-9

Autores	Bruno Guedes Fabio Camargo Guilherme Teixeira
Data	13/08/2015
Escala	1:2

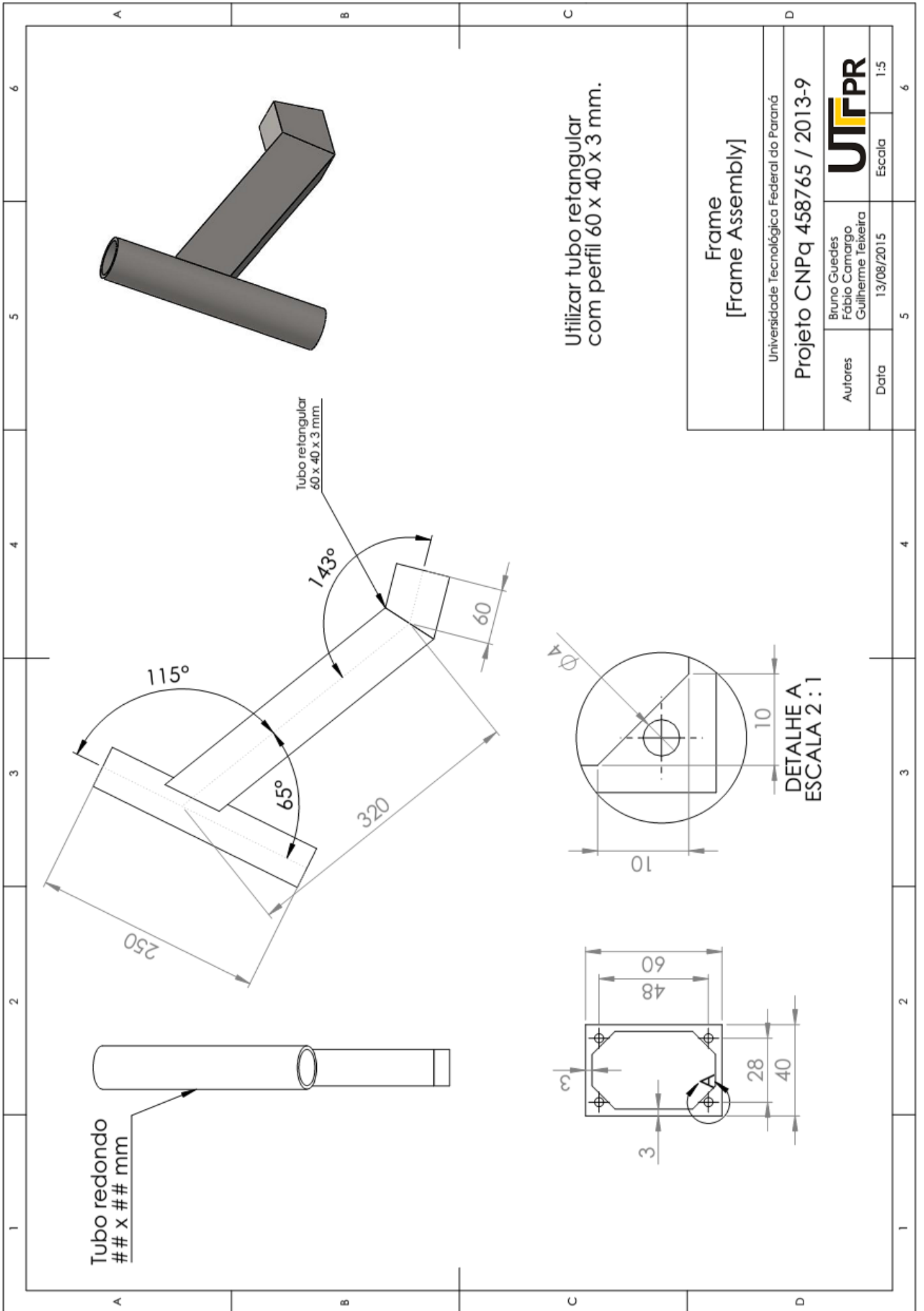


5	6
---	---

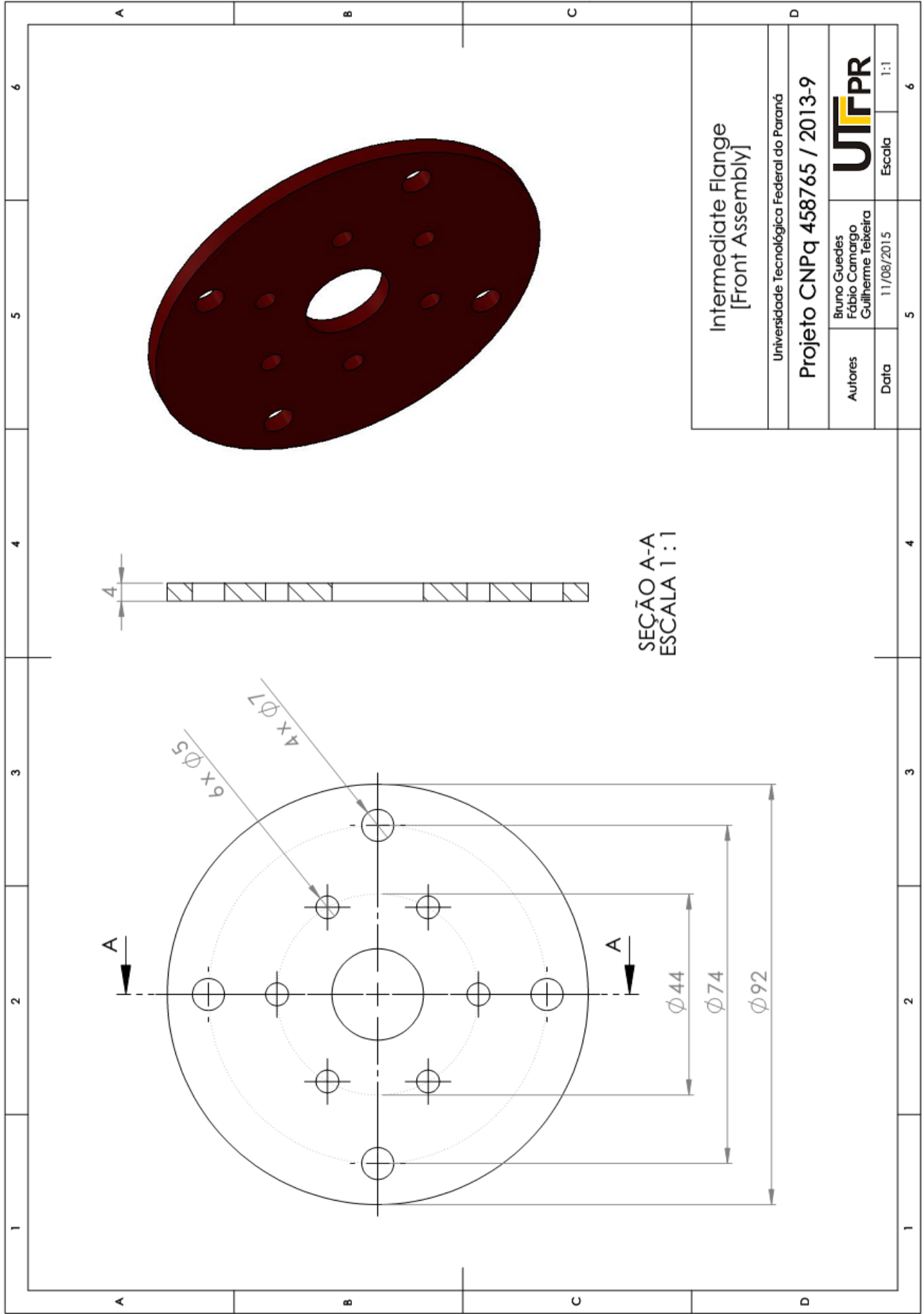
4	3
---	---

2	1
---	---

1	2
---	---

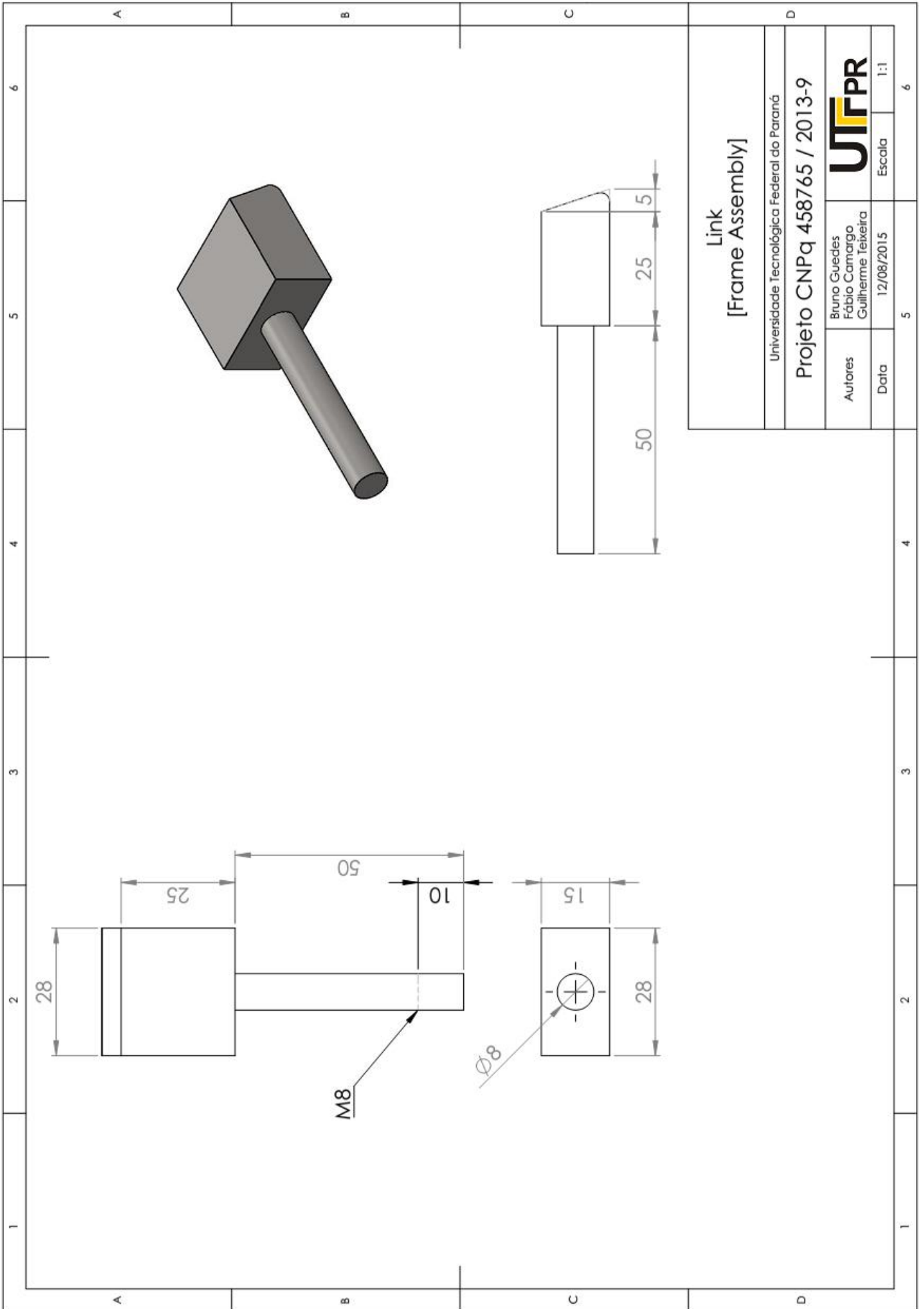


Frame [Frame Assembly]		5	6
Universidade Tecnológica Federal do Paraná			
Projeto CNPq 458765 / 2013-9			
Autores	Bruno Guedes Fabio Camargo Guilherme Teixeira	5	6
Data	13/08/2015	Escala	1:5



SEÇÃO A-A  
ESCALA 1:1

Intermediate Flange [Front Assembly]		Universidade Tecnológica Federal do Paraná	
Projeto CNPq 458765 / 2013-9			
Autores	Bruno Guedes Fabrício Camargo Guilherme Teixeira	Escala	1:1
Data	11/08/2015		



## APÊNDICE C – Cálculos da Análise Dinâmica

Ks	2351	N/m	23,51	N/mm
Kt	18000	N/m	180	N/mm
RR	2079,406417	N/m		
M	138,175	kg		
$\omega_n$	3,879314175	Hz		
Cs	1350	Ns/m		
$\zeta_s$	0,289793415			
$\omega_d$	3,26924374			
a	0,144743984			
$\omega$	3,879314175			
K1	2351			
K2	18000			
C	1350			
Z/Zr	1,008230133			
Z/Fw/M	0,006453822			
Z/Fm/M	-0,00729537			