

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

AURASIL FERREIRA GARCIA JÚNIOR

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM TRICICLO EM
LIGA DE ALUMÍNIO 6063-T5 COM ACIONAMENTO MANUAL E MOTOR
ELÉTRICO SEM ESCOVA PARA PESSOAS COM PARAPLEGIA**

Ilha Solteira

2019

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE
UM TRICICLO EM LIGA DE ALUMÍNIO 6063-T5 COM
ACIONAMENTO MANUAL E MOTOR ELÉTRICO SEM
ESCOVA PARA PESSOAS COM PARAPLEGIA**

Aurasil Ferreira Garcia Júnior

Orientador: Prof. Dr. Michael John Brennan

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio de Pádua Lima Filho

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação

Ilha Solteira – SP
Fevereiro/2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G216p Garcia Júnior, Aurasil Ferreira.
Projeto, construção e caracterização de um triciclo em liga de alumínio 6063-T5 com acionamento manual e motor elétrico sem escova para pessoas com paraplegia / Aurasil Ferreira Garcia Júnior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
127 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação, 2019

Orientador: Michael John Brennan
Co-orientador: Antonio de Pádua Lima Filho
Inclui bibliografia

1. Paraplegia. 2. Liga de alumínio 6063-T5. 3. Estrutura tubular. 4. Elementos finitos.



João Josué Barbosa

Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: PROJETO, CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM TRICICLO EM LIGA DE ALUMÍNIO 6063-T5 COM ACIONAMENTO MANUAL E MOTOR ELÉTRICO SEM ESCOVA PARA PESSOAS COM PARAPLEGIA

AUTOR: AURASIL FERREIRA GARCIA JÚNIOR
ORIENTADOR: MICHAEL JOHN BRENNAN
COORIENTADOR: ANTONIO DE PADUA LIMA FILHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Mecânica dos Sólidos pela Comissão Examinadora:

Antônio de Padua Lima Filho

Prof. Dr. ANTONIO DE PADUA LIMA FILHO
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Amarildo Tabone Paschoalini

Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Claudio Luiz Carvalho

Prof. Dr. CLAUDIO LUZ CARVALHO
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

João Roberto Sartori Moreno
Prof. Dr. JOÃO ROBERTO SARTORI MORENO
Engenharia Mecânica / UTEPR

Wesley Pontes

Prof. Dr. WESLEY PONTES
UNITOLEDO - Araçatuba - SP / Centro Universitário Toledo

Ilha Solteira, 25 de fevereiro de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico essa pesquisa a minha esposa Ticiane e ao meu filho Marco Antônio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Professores Doutores Michael John Brennan e Aparecido Augusto de Carvalho pela concessão da oportunidade nos programas de Doutorado e Mestrado, respectivamente. Nesse mesmo sentido, agradeço ao Professor Doutor Antonio de Pádua Lima Filho pela paciência, ensinamentos com energia positiva e disposição em fazer sempre o melhor por seus orientados.

Aos Professores Doutores Amarildo Tabone Paschoalini e Douglas Domingues Bueno pelo acompanhamento no desenvolvimento dessa pesquisa. Ao Professor Doutor Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira, compartilho também meus agradecimentos.

Agradeço a minha esposa Ticiane Petean Pina pela paciência e incentivo ao trabalho e ao meu filho, Marco Antônio Pina Garcia pelos momentos de farras e alegria. Ao meu sogro Lázaro Benedito Pina, agradeça pelo incentivo ao trabalho e estudo.

Agradeço aos meus pais Aurasil Ferreira Garcia e Ivone Gomes de Paula Garcia pelos primeiros ensinamentos ainda enquanto criança que me prepararam para encarar a vida com determinação. Agradeço também as minhas irmãs Rita Maria de Paula Garcia e Cassia Maria de Paula Garcia pelo apoio e incentivo aos estudos, assim como aos meus cunhados e cunhadas, Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, Fábio Ribeiro, Aline Peten Pina, Fabiana Bertachini Pina e Gabriela Bertachini Pina pelos momentos de descontração.

Aos colegas de Doutorado Bernardo Luis Pessuto e Jeferson Camargo Fukushima pelo companheirismo nas atividades didática desenvolvidas nas disciplinas cursadas.

Agradeço aos companheiros da Pós Graduação em Engenharia Elétrica do campus de Ilha Solteira, Luiz Henrique Vitti Felão, Ricardo Taoni Xavier e Ricardo Gouveia Teodoro pelos conselhos e sugestões oferecidos.

A prestimosa colaboração do colega Rodrigo Alessandro Nunes de Oliveira na instalação elétrica do triciclo híbrido e do Leonardo Olbrick Rodrigues Menossi pela colaboração na simulação empregando Método dos Elementos Finitos no ANSYS.

A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), mais especificamente, ao Miguel Borodiak que gentilmente colaborou nesta pesquisa disponibilizando as facilidades na CBA para a caracterização mecânica e metalográfica dos corpos de prova dos tubos de Al 6063-T5 empregados na estrutura do protótipo desenvolvido nesse trabalho. Esta parceria foi fundamental nessa pesquisa de Doutorado.

Aos estimados companheiros Anderson Rodrigo Piccini, Angela Fontana Marques, Ana Maria Denardi, Antão Rodrigo Valentim, Eber de Santi Gouvea, Gilson Maekawa Kanashiro, José Barbosa Dias Júnior, Julio Estéfano Augusto Rosa, Lucas Ferreira de Souza, Ricardo Gouveia Teodoro, Ricardo Toshiyuki Kato, Rodolfo Rodrigues Barrionuevo Silva, Sérgio Inácio Gomes, Tatiana Colombo Pimentel, Valeriê Cardoso Machado Inaba e Viviane Moretto da Silva Fuly do Instituto Federal do Paraná, campus Paranavaí, agradeço pela compreensão, paciência e, sobretudo, diligência.

De forma geral, agradeço a todos que contribuíram indiretamente para o desenvolvimento dessa tese de doutorado.

RESUMO

A independência funcional para indivíduos com deficiência motora é indispensável para a qualidade de vida, principalmente quando se considera tarefas como o autocuidado (incluindo a higiene pessoal), as transferências e locomoção. Essa pesquisa apresenta um triciclo inovador para pessoas com paraplegia ou alguma deficiência motora dos membros inferiores, desenvolvido com duas formas de acionamento: cíclico manual (*handbike*) e elétrico. A estrutura tubular foi elaborada com liga de alumínio 6063 - T5. A plataforma ANSYS *Academic* versão 19.2 foi empregada para uma análise estrutural do chassi do equipamento. O chassi foi submetido num ensaio de carregamento estático progressivo de até 1200 N aproximadamente. O deslocamento onde apoia os pés do usuário foi medido por um relógio comparador de precisão de 0,01 mm. O deslocamento da plataforma inferior de apoio dos pés apresentou uma divergência de aproximadamente 4% se comparado com os dados obtidos pela plataforma ANSYS. Assim, validando a análise teórica pela plataforma ANSYS e confirmando que a estrutura fabricada por dobramento e solda TIG suporta com segurança um usuário de até 100 kg. Parâmetros relacionados ao sistema elétrico de acionamento do motor *brushless* de 1000 W foram obtidos por meio de sensores de corrente e voltagem, assim como parâmetros de desempenho mecânico foram obtidos empregando uma célula de carga de fundo de escala de 2kN para análise de força de tração e um sensor de velocidade. Os resultados indicam uma eficiência energética do conjunto de até 92%. A força máxima de tração do equipamento é de 500 N, o que possibilita realizar uma subida com a inclinação de 20°, aproximadamente considerando um usuário de 80 kg. Testes em pista foram realizados por um usuário paraplégico para analisar o desempenho do equipamento. O tempo de autonomia das baterias foi de 2,5 horas garantindo um percurso de até 40 km aproximadamente numa pista que tem a inclinação, declive e plana. Em relação ao sistema de propulsão manual, um estudo de ergonomia foi realizado para identificar o perfil antropométrico do usuário. Dessa forma, o equipamento deve acomodar com conforto e segurança, um usuário com estatura superior a 165,8 cm. Além disso, considerando uma força de 400 N para o acionamento manual, é possível superar uma inclinação de até 12°, aproximadamente. Este protótipo foi desenvolvido através de um projeto de Extensão Universitária (UNESP/PROEX).

Palavras-chave: Handbike. Motor brushless. Paraplegia. Liga de alumínio 6063-T5. Estrutura tubular. ANSYS 19.2.

ABSTRACT

Functional independence for individuals with motor disabilities is essential for quality of life, especially when considering tasks such as self-care (including personal hygiene), transfers and locomotion. This research presents an innovative tricycle for people with motor deficiency of the lower limbs, developed with two forms of drive: manual cyclic (handbike) and electric. The tubular structure was made with 6063 - T5 aluminum alloy. The ANSYS Academic version 19.2 platform was used for a structural analysis of the equipment chassis. A static loading test of up to 1200 N was performed on the chassis. The deformation of support the user's feet was measured by a dial gauge with a 0,01 mm precision. The deformation of the lower footrest platform showed a divergence of approximately 4% when compared to the data obtained by the ANSYS platform. Thus, validating the theoretical analysis by the ANSYS platform and confirming that the structure manufactured by TIG welding safely supports a user of up to 100 kg. Parameters related to the electric drive system of the 1000 W brushless motor were obtained by means of current and voltage sensors, as well as mechanical performance parameters were obtained employing a load cell of 2kN for force analysis and a speed sensor. The results indicate an energy efficiency of the equipment of up to 92%. The maximum strength of the equipment is 500 N, which makes it possible to perform a climb with slope of 20°, approximately considering a user of 80 kg. Track tests were performed by a paraplegic user to analyze the performance of the equipment. The electric motor operating time was 2.5 hours, which makes it possible to travel up to approximately 40 km. In relation to the manual propulsion system, an ergonomics study was performed to identify the user profile. In this way, the equipment can comfortably and safely accommodate a user with a height greater than 165.8 cm. In addition, considering a force of 400 N for the manual drive, it is possible to carry out a climb with slope of up to approximately 12°. This prototype was developed through a University Extension project (UNESP / PROEX).

Keywords: Handbike. Brushless machine. Paraplegia. 6063 - T5 aluminum alloy. Tubular structure. ANSYS 19.2.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Músculos da região do Manguito Rotador.....	25
Figura 2 - Dimensões de uma cadeira de rodas de acordo com a NBR 9050/2004. Vista frontal (a); Vista lateral (b).....	30
Figura 3 - Relação entre o ângulo de inclinação do sistema de direção do triciclo e o assento...	32
Figura 4 - Estatura média da população brasileira de acordo com a idade.	33
Figura 5 - Relação as medidas antropométricas de acordo com a estatura.	33
Figura 6 - Relação entre as medidas antropométricas de pessoas do sexo masculino e feminino de acordo com a estatura H.....	34
Figura 7 - Mecanismo de 4 barras.	35
Figura 8 - Ensaio experimental para obtenção da força de acionamento dos pedais.	37
Figura 9 - Plano compacto formado por um grupo de átomos sujeito a uma força de tração no eixo vertical.	38
Figura 10 - Estado plano de tensão de um elemento com um ângulo θ em relação ao sistema de coordenada xy.....	39
Figura 11 - Círculo de Mohr para o estado plano de tensão.....	40
Figura 12 - Representação do estado plano de tensão considerando von Mises como critério de escoamento.	45
Figura 13 - Representação do estado plano de tensão considerando Tresca como critério de escoamento.	48
Figura 14 - Comparação do critério de Tresca (vermelho) e von Mises (azul).....	48
Figura 15 - Modelagem matemática para a resolução de problemas estruturais empregando MEF.	51
Figura 16 - Solução exata para um problema de tensão e deslocamento de uma estrutura.	51
Figura 17 - Esquema de representação das fases para a utilização do MEF.	52
Figura 18 - Sólido Hexaédrico Linear com os componentes de forças nodais u, v, w respectivamente nas direções x, y, z.....	53
Figura 19 - Triciclo híbrido de acionamento manual (a) e elétrico (b).	56
Figura 20 - Ensaio para obtenção da força de acionamento cíclico manual do triciclo híbrido....	57
Figura 21 - Diagrama do circuito elétrico do triciclo híbrido.	58
Figura 22 - DAQ NI USB-6009 da <i>National Instruments</i>	59
Figura 23 - Curva de calibração da célula de carga.....	60
Figura 24 - Diagrama do circuito de condicionamento de sinais para a célula de carga.	61
Figura 25 - Diagrama elétrico do INA 129.	61
Figura 26 - Resistor <i>Shunt</i> acoplado ao triciclo.....	62
Figura 27 - Curva de calibração da resistência <i>Shunt</i>	63
Figura 28 - Diagrama elétrico do INA 122.	64
Figura 29 - Esquema elétrico do condicionador de sinais para a tensão das baterias.	65
Figura 30 - Bancada de instrumentação fixada na traseira do triciclo híbrido.....	65

Figura 31 - Sensor de velocidade tipo <i>pick-up</i> instalado em um dos raios da roda traseira lado esquerdo do triciclo híbrido.....	66
Figura 32 - Suporte de fixação da célula de carga ao triciclo.	67
Figura 33 - Montagem experimental na rodovia SP 595.....	68
Figura 34 - Pontos de aplicação de carga sobre a estrutura do chassi.....	70
Figura 35 - Relógio comparador Mitutoyo com suporte de fixação.	72
Figura 36 - Montagem do ensaio de carregamento.	73
Figura 37 - Corpos de prova de tubos de liga de alumínio 6063-T5 com solda (direita) e sem solda (esquerda) encaminhados à CBA. Comprimento 250 mm.....	75
Figura 38 - Tubo soldado, face voltada para o interior do tubo.	75
Figura 39 - Tubo soldado, face voltada para o exterior do tubo.....	75
Figura 40 - Tubo sem solda, face voltada para o interior do tubo.....	76
Figura 41 - Tubo sem solda, face voltada para o exterior do tubo.	76
Figura 42 – Modelagem do sistema cíclico de propulsão manual.....	78
Figura 43 - Ensaio da força aplicada no acionamento manual do triciclo híbrido. Vista geral e detalhe da leitura no dinamômetro Krato de fundo de escala de 20 kgf.	80
Figura 44 – Força de acionamento cíclico manual do triciclo híbrido em função da inclinação do aclave considerando um usuário de 800 N.....	81
Figura 45 - Velocidade de deslocamento do triciclo híbrido em função do tempo.....	81
Figura 46 - Força de tração do triciclo híbrido sobre o trator em função do tempo.....	82
Figura 47 - Tensão das baterias em função do tempo durante o teste do equipamento acoplado ao trator.	83
Figura 48 - Corrente elétrica em função do tempo para o ensaio durante o teste do equipamento acoplado ao trator.	83
Figura 49 - Corrente elétrica drenada pelo motor elétrico <i>brushless</i> em um ensaio estático de tração.	84
Figura 50 - Decomposição de forças de acordo com o ângulo da rampa.....	85
Figura 51 - Potências elétrica e mecânica obtidas nos ensaios de tração sob a ação da massa inercial de 5000 kg (trator).	86
Figura 52 - Superfície das amostras fornecidas para ensaio de tração.	87
Figura 53 - Diagrama tensão deformação dos corpos prova tubular da liga Al 6063-T5 sem (CP 1, CP 2, CP 3 e CP 4) e com solda (CP 5, CP 6, CP 7 e CP 8).	88
Figura 54 - Cordões de solda na região de maior concentração de tensão no chassi da estrutura tubular de Al 6063-T5.	90
Figura 55 - Seção em corte dos corpos de prova de alumínio soldados (liga Al 6063-T5) de 3,18 mm de espessura.....	91
Figura 56 - Seção transversal do cordão de solda de caráter dendrítico ilustrando alguns defeitos de solda (a) e detalhe da raiz da solda ressaltando a falta de penetração e trincas, gerando ponto de fadiga e queda de propriedades mecânicas, ZAT menor que 2,0 mm (b).	92

Figura 57 - Detalhes da caracterização da solda, perfil de dureza e detalhe da falha na raiz da solda, faltando preenchimento e comprometendo as propriedades mecânicas como analisadas anteriormente.	93
Figura 58 - Malha da estrutura tubular do triciclo elaborada.	94
Figura 59 -Regiões de aplicação de carga sobre o chassi do triciclo híbrido.....	95
Figura 60 - Distribuição de tensão de von-Mises.....	96
Figura 61 - Fator de segurança.	97
Figura 62 – Deslocamento da estrutura original.....	97
Figura 63 - Deslocamento da estrutura sem barra central.	99
Figura 64 - Distribuição de tensão de von-Mises (sem barra central).....	99
Figura 65 - Modo de vibrar em 50,02Hz.....	100
Figura 66 - Modo de vibrar em 75,7Hz.....	101
Figura 67 - Modo de vibrar em 132,9Hz.....	101
Figura 68 - Modo de vibrar em 174,4Hz.....	102
Figura 69 - Curva de deslocamento referente ao ponto A.....	103
Figura 70 - Curva de deslocamento referente ao ponto B.....	103
Figura 71 - Curva de deslocamento referente ao ponto C.....	104
Figura 72 - Curva de deslocamento referente ao ponto D.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos materiais de acordo com o limite escoamento.....	37
Tabela 2 - Variáveis empregadas para o cálculo do coeficiente de resistência ao rolamento do triciclo híbrido.	57
Tabela 3 - Identificação dos blocos de concreto e suas respectivas massas.....	73
Tabela 4 - Valor do material empregado para a construção do triciclo híbrido (dados de 2013). 77	
Tabela 5 - Potência elétrica, potência mecânica e rendimento energético.	86
Tabela 6 - Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência a Tração (LRT) e Deformação Específica (DE) das amostras de tubos de liga de alumínio 6063-T5 com solda e sem solda.	89
Tabela 7 - Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência a Tração (LRT), Deformação Específica (DE) e Desvio Padrão (DP) das amostras de tubos de liga de alumínio 6063-T5 com solda e sem solda considerando 80%** e 95%* de confiabilidade.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al	Alumínio
CAAE	Certificado de Apresentação para Apreciação Ética
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAT	Comitê de Ajudas Técnicas
CBA	Companhia Brasileira de Alumínio
CC	Corrente Contínua
CEP	Comitê de Ética em Pesquisa
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CP	Corpo de Prova
CS	Cordão de Solda
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DE	Deformação Específica
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DP	Desvio Padrão
GF	Gota Fria
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INA	<i>Instrumentation Amplifier</i>
LE	Limite de escoamento
LM	Lesão Medular
LRT	Limite de Resistência a Tração
MEF	Método dos Elementos Finitos
Mg	Magnésio
NAEPE	Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NI	<i>National Instruments</i>
PVC	Policloreto de Polivinila

rms	<i>root mean square</i>
Si	Silício
SNT	Sistema Nacional de Trânsito
TA	Tecnologia Assistiva
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
ZAT	Zona Afetada Termicamente
IPI	Impostos sobre Produtos Industrializados

LISTA DE SÍMBOLOS

F_p	Força aplicada no pé-de-vela
Z_1	Número de dentes da engrenagem motora
Z_2	Número de dentes da engrenagem movida
μ	Coefficiente de resistência ao rolamento
α	Inclinação do plano em relação a horizontal
Θ	Ângulo de inclinação entre o sistema de referência xy e $x'y'$.
σ_x	Tensão normal no eixo x considerando um sistema de referência xy
σ_y	Tensão normal no eixo y considerando um sistema de referência xy
τ_{xy}	Tensão cisalhante no plano x e direção y considerando um sistema de referência xy
$\sigma_{x'}$	Tensão normal no eixo x' considerando um sistema de referência $x'y'$
$\sigma_{y'}$	Tensão normal no eixo y' considerando um sistema de referência $x'y'$
$\tau_{x'y'}$	Tensão cisalhante no plano x' e direção y' considerando um sistema de referência $x'y'$
J_2	Segundo invariante do tensor-tensão-desvio
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais
σ_0	Tensão limite de escoamento
τ_{max}	Máxima tensão de cisalhamento
τ_0	Tensão de cisalhamento máxima considerando um ensaio simples de tração
τ_1, τ_2, τ_3	Tensões de cisalhamento máximas
$\{f\}$	Matriz coluna contemplando as forças aplicadas nos nós
$[k]$	Matriz rigidez de um elemento
$\{\delta\}$	Matriz coluna contemplando os deslocamentos nodais.
x_{rms}	Valor rms para um sistema discretizado
N	Número de pontos de uma amostra
x_i	Valor correspondente da variável x no ponto i
V	Velocidade linear
R	Raio
P	Período
P_{el}	Potência elétrica
I	Corrente elétrica

U	Tensão elétrica
P_{mec}	Potência mecânica
δW	Elemento infinitesimal de energia
Δt	Elemento infinitesimal de tempo
η	Eficiência energética
Mg ₂ Si	Siliceto de magnésio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
P	Força peso
P_x	Força com sentido contrário à ação do motor <i>brushless</i>
<i>arc sen</i>	Arco seno

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	23
2.1	Justificativas	24
2.2	Estrutura da Pesquisa.....	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1	Normas Regulamentadoras.....	28
3.2	Estudo da Ergonomia	31
3.3	Força de Acionamento Manual do Triciclo Híbrido	36
3.4	Critérios de falha estática	37
3.5	Análise de falha por deformação plástica.....	38
3.6	Critérios de escoamento para materiais dúcteis	43
3.6.1	<i>CRITÉRIO DE VON MISES</i>	43
3.6.2	<i>CRITÉRIO DE ESCOAMENTO DE TRESCA</i>	45
3.7	Elementos Finitos	49
3.7.1	<i>SISTEMAS DISCRETOS</i>	49
3.7.2	<i>MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS</i>	51
3.7.3	<i>SÓLIDO HEXAÉDRICO LINEAR-MEF</i>	52
4	MATERIAL E MÉTODOS	55
4.1	Protótipo triciclo híbrido	55
4.2	Estimativa da força manual para o acionamento cíclico do triciclo híbrido	56
4.3	Instalação do sistema de acionamento elétrico do triciclo híbrido.....	58
4.4	Análise de Potência	59
4.4.1	<i>SENSOR DE FORÇA</i>	59
4.4.2	<i>SENSOR DE CORRENTE ELÉTRICA</i>	62
4.4.3	<i>SENSOR DE TENSÃO ELÉTRICA</i>	64
4.4.4	<i>SENSOR DE VELOCIDADE</i>	66
4.5	Análise em pista	67
4.6	Análise de Tensão Mecânica.....	70
4.7	Ensaio de Carga e Deslocamento da Estrutura do Triciclo Híbrido.....	72
4.8	Ensaio de tração do material usado na estrutura do triciclo híbrido tubular	74

4.9	Ensaio metalográfico dos tubos da estrutura do triciclo híbrido sem solda e com solda	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1	Construção da estrutura tubular do triciclo híbrido	77
5.2	Ergonomia	78
5.3	Análise do Acionamento Manual no Plano Horizontal e Inclinado	80
5.4	Análise do Acionamento Elétrico do Triciclo Híbrido em Pista	81
5.5	Resultado do Ensaio de Tração	87
5.6	Análise macrográfica dos corpos de prova soldados	90
5.7	Análise micrográfica dos corpos de prova soldados	92
5.8	Critérios de Tresca e von Mises	94
5.9	Elementos Finitos	94
5.9.1	<i>SIMULAÇÃO ESTÁTICA-ELEMENTOS FINITOS</i>	95
5.9.2	<i>ANÁLISE MODAL-ELEMENTOS FINITOS</i>	99
5.10	Carga e Deslocamento	102
6	CONCLUSÃO	107
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A - Modelagem empregando técnica de elementos finitos para uma barra sujeito a esforços de tração.	115
	APÊNDICE B – Etapas de fabricação do chassi do triciclo híbrido.	123
	ANEXO 1- Relatório de Caracterização de Material (CBA)	124

1 INTRODUÇÃO

Para indivíduos com deficiência motora, a independência funcional é indispensável para a qualidade de vida, principalmente quando se considera tarefas como o autocuidado (incluindo a higiene pessoal), as transferências e locomoção (FLORIO *et al.*, 2015).

Segundo Pires Junior *et al.* (2006), as pessoas portadoras de necessidades especiais buscam a inclusão social por intermédio da participação de atividades diversas no meio em que convivem. Assim, o desenvolvimento de equipamentos e dispositivos economicamente acessíveis que possam auxiliar na melhoria da qualidade de vida ou até mesmo na promoção da independência das pessoas com deficiência é importante.

A engenharia biomédica desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de técnicas e equipamentos que visam o bem-estar por meio da inclusão social e na reabilitação de pessoas com necessidades especiais. De forma geral, constitui uma área da engenharia aplicada tanto na área da biologia como na medicina. Equipamentos ergométricos adaptados para a prática de atividades físicas: 1.) Esqui ergométrico para pessoas com deficiência motora dos membros inferiores; 2.) “*Hand bike*”; 3.) Mesa para portadores de necessidades motoras; 4.) Bancada escolar para uso de microscópio óptico; 5.) Cama hospitalar especial para movimento decúbito de pessoas acamadas; e 6.) Bicicleta que impulsiona triciclo que movimenta os membros inferiores (GARCIA JÚNIOR, 2015; LIMA FILHO *et al.*, 2016; GARCIA JÚNIOR *et al.*, 2013; LIMA FILHO *et al.*, 2014; GOMIDE, *et al.*, 2015; LIMA FILHO *et al.*, 2017) são protótipos desenvolvidos pelo nosso Grupo de Pesquisa e voltados para a inclusão social, reabilitação e uso na medicina. Dos projetos mencionados, foram realizados até o momento e aprovados três registros de patente de aplicação industrial:

- 1- Mesa para portadores de necessidades motoras / BR 10 2013 012283 1 (LIMA FILHO, 2013);
- 2- Configuração aplicada em bancada / BR 30 2014 005756 1 (LIMA FILHO e VIEIRA, 2014); e
- 3- Bicicleta que impulsiona triciclo que movimenta membros inferiores / BR 20 2018 007886 6 (LIMA FILHO; OLIVEIRA ; GARCIA JÚNIOR, 2017).

De acordo com Bélanger *et al.* (2000), a limitação da mobilidade dos membros do corpo humano, seja congênita ou adquirida, induz o sedentarismo, que pode acelerar a descalcificação óssea (osteoporose) e, conseqüentemente, favorecer a fratura dos membros paralisados. Por outro lado, outros tipos de patologias associadas ao sedentarismo são comuns em pessoas com deficiência motora, tais como: alteração cardiovascular, atrofia muscular e obesidade.

Em se tratando de pessoas com deficiência motora, as dificuldades de locomoção são mais evidentes em razão da dependência de equipamentos individuais apropriados (cadeiras de rodas) ou de meios coletivos de locomoção adaptados de acordo com as normas vigentes de acessibilidade para o transporte de cadeirantes (ônibus com plataforma elevatória para cadeirantes).

Por meio de uma pesquisa realizada por Seron *et al.* (2015) no município de Londrina, foi elaborado um questionário pontuando os principais fatores que pudessem facilitar ou dificultar a prática de atividades físicas por pessoas com deficiência motora. O questionário foi aplicado a 43 pessoas de ambos os sexos com idade igual ou superior a 18 anos. Eles identificaram que uma das barreiras para a prática de esportes ou atividades físicas, diz respeito aos meios de transporte adequados para pessoas com deficiência motora como descrito anteriormente. Aqui, o protótipo que está sendo estudado, contribuiu para facilitar o transporte de pessoas com necessidades especiais com paraplegia ou com limitação no sistema cardiovascular nas vias públicas urbanas.

Aguiar *et al.* (2009) definem mobilidade urbana como sendo um termo utilizado para sinalizar a facilidade de deslocamento de pessoas nas regiões urbanas. O planejamento urbano reflete diretamente nos meios de transportes adotados. Em espaços de uso coletivo, a existência de obstáculos tais como degraus, rampas com inclinação excessiva ou meio de transporte inadequado, são exemplos de barreiras físicas que dificultam a locomoção de pedestres e cadeirantes.

Em termos de mobilidade, as cadeiras de rodas atuam como um acessório fundamental para a locomoção de pessoas com limitação de movimento, resultado de uma lesão medular ou durante a fase de reabilitação em procedimentos pós-cirúrgicos (SLAMAN *et al.*, 2014).

Woods e Watson (2004) relataram uma imagem de uma cadeira de rodas em um sarcófago chinês do século VI. Eles acrescentam que, apesar de se desconhecer as características e funcionalidades, há indícios de uma cadeira de rodas desenvolvida nos anos de 3500 A.C.. Assim as cadeiras de rodas são equipamentos desenvolvidos por civilizações antigas, o seu aprimoramento e aperfeiçoamento vem se consolidando ao longo dos tempos.

Essas informações sugerem que, mesmo na antiguidade, já existia uma preocupação da sociedade em buscar recursos ou serviços que pudessem contribuir ou ampliar habilidades funcionais de pessoas com algum tipo de deficiência e conseqüentemente promover a independência funcional e a inclusão social. Tais recursos ou serviços, estão inseridos em um termo definido por Tecnologia Assistiva (TA).

O Comitê de Ajudas Técnicas (CAT), instituído em 16 de novembro de 2006 pelo Decreto nº 5.296/2004 por meio da Portaria nº 142, tem como foco aperfeiçoar, dar transparência e legitimidade ao desenvolvimento da Tecnologia Assistiva no Brasil. Segundo o CAT (2006):

Tecnologia Assistiva é uma área do conhecimento, de característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação, de pessoas com deficiência, incapacidades ou mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social (CAT 2006, p. 9).

Dessa forma, pode-se afirmar que o nosso Grupo de Pesquisa trabalha para o desenvolvimento de protótipos que se enquadram no âmbito da Tecnologia Assistiva, contribuindo para a valorização, integração e inclusão social de pessoas com necessidades especiais.

De acordo com Chaves *et al.* (2004), as cadeiras de rodas são usadas principalmente para aumentar as funcionalidades e independência de pessoas com deficiência motora de forma a possibilitar a inclusão social. Eles citam que as cadeiras de rodas representam o equipamento mais importante de mobilidade, considerada por muitos como sendo uma extensão do corpo humano. Contudo, ela deve satisfazer as expectativas e preferências de acordo com as necessidades físicas e funcionais de seus usuários, proporcionando interações com o meio onde vivem.

Entretanto, Aguiar *et al.* (2009) afirmam que as cadeiras de rodas convencionais geralmente apresentam limitações de uso de acordo com o ambiente (qualidade de pavimentação das pistas de rolamento), ergonomia/deficiência do usuário e sistema de propulsão inadequado. Os Autores complementam que embora exista um número elevado de modelos de cadeiras de rodas, os projetos comerciais encontram-se ainda relacionados aos modelos clássicos, isto é, sem inovações tecnológicas aplicadas, mantendo um alto valor comercial. De fato, a limitação do uso das cadeiras de rodas nas pistas de rolamento foi relatada por Lima Filho, *et al.* (2016), disponível em https://cooperation.epfl.ch/wp-content/uploads/2018/12/1133-Lima-Filho-SE16-HAB_Full-Paper.pdf (Acessado em: 11/08/2018).

De acordo com Hettinga *et al.* (2011), para manter o corpo saudável, pessoas com lesão medular devem praticar exercícios diários nos membros superiores. Eles acrescentam que o movimento cíclico da parte superior do corpo (mãos e braços) de pessoas com paraplegia é a forma mais eficiente de propulsão para um indivíduo. Sendo assim, com o propósito de servir como meio inovador e alternativo de transporte para pessoas com deficiência motora dos membros inferiores, um triciclo de acionamento tanto manual como motorizado foi desenvolvido neste trabalho.

Assim, a motivação dessa pesquisa está relacionada a uma lacuna existente no mercado: invariavelmente, os equipamentos de locomoção individual oferecidos comercialmente são necessariamente de acionamento manual (como é o caso das cadeiras de rodas e *handbikes*) ou sistemas motorizados. Por outro lado, o protótipo neste estudo combina os dois tipos de acionamento tanto elétrico como manual não disponibilizado no mercado.

2 OBJETIVOS

Essa pesquisa e doutorado tem por objetivo geral, desenvolver e avaliar as funcionalidades um triciclo de acionamento manual e elétrico para pessoas com deficiência motora dos membros inferiores. Dessa forma, para se alcançar este objetivo geral, os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- Inovar os meios de transporte voltados a pessoas com deficiência motora nos membros inferiores;
- Produzir um protótipo dentro da Universidade Pública acessível para a comunidade carente financeiramente.
- Avaliar a funcionalidade e desempenho de um triciclo de acionamento manual e elétrico na região urbana por um voluntário com paraplegia.
- Certificar a integridade estrutural do protótipo construído na UNESP-Campus de Ilha Solteira no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) tanto estática como dinâmica empregando métodos de elementos finitos usando a plataforma ANSYS *Academic* 19.2.
- Realizar um ensaio com carga estática empregando um relógio comparador posicionado na estrutura para comparar com o deslocamento obtido teoricamente na plataforma ANSYS *Academic* 19.2.
- Identificar as características dinâmicas no que diz respeito a potência, força e autonomia do triciclo.
- Prover um protótipo testado e assim um projeto confiável para ser comercializado;
- Contribuir na inclusão social de pessoas com necessidades especiais, idosas e com limitações do sistema cardiovascular.

2.1 Justificativas

O Censo de 2010 revelou que a quantidade total de deficientes foi de 61,4 milhões numa população de 190.755.799 habitantes, isto é, 32,2% da população brasileira. Desse grupo, a quantidade de pessoas que declarou apresentar algum tipo de deficiência grave foi em torno de 13,17 milhões, sendo que 4,42 milhões declararam ter problemas motores severos (IBGE, 2010).

Esse dado expressa a importância do desenvolvimento de equipamentos e dispositivos economicamente acessíveis que possam contribuir na melhoria da qualidade de vida ou até mesmo na promoção da independência das pessoas com baixa mobilidade e com baixo poder aquisitivo.

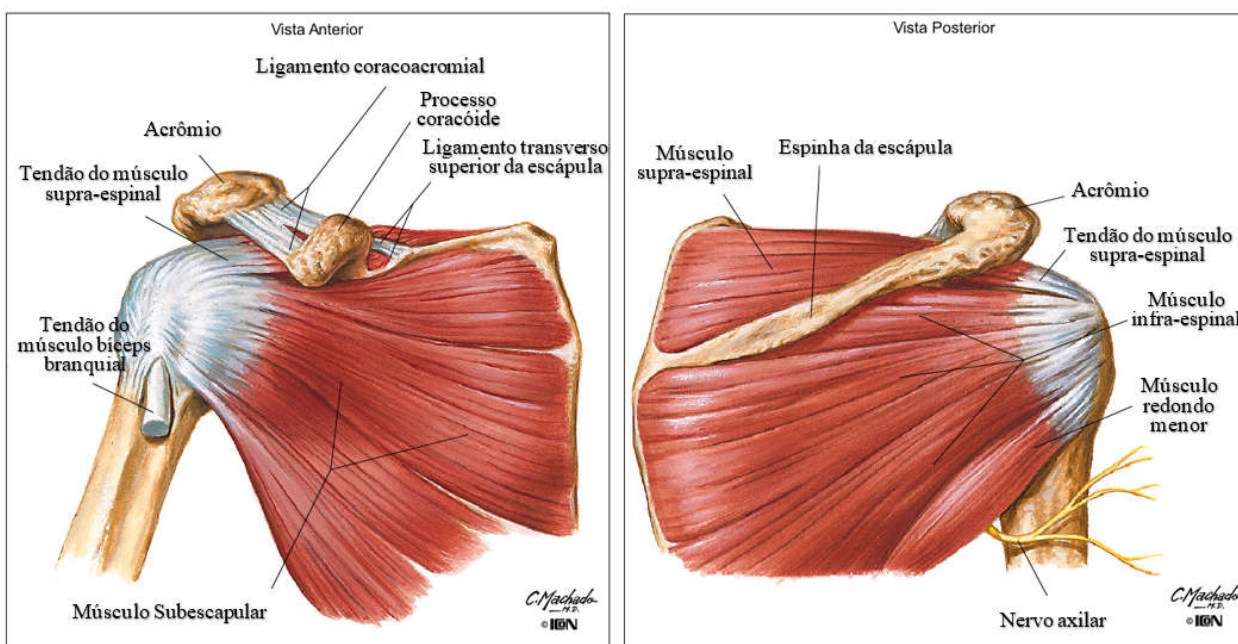
Ressaltando como anteriormente descrito, o sedentarismo é comum em pessoas com deficiência motora e pode promover: alteração cardiovascular, atrofia muscular, obesidade, hematoma (inflamação muscular na região do corpo onde a pessoa com deficiência se apoia para compensar o desequilíbrio corporal) e rigidez nas articulações (GAMA *et al.*, 2008). Além disso, tanto os sistemas pulmonares como o digestório ficam prejudicados. Consequentemente, as condições de saúde física e mental são deterioradas progressivamente (BÉLANGER *et al.*, 2000).

Por outro lado, a melhora do desempenho cotidiano e a manutenção da saúde estão intimamente ligadas à prática de atividades físicas principalmente quando se considera o envelhecimento do corpo humano (SLAMAN *et al.*, 2014). Dessa forma, o desenvolvimento e construção de equipamentos para pessoas com deficiência motora para uso nas ruas estimulam a acessibilidade e inclusão social ampliando a independência funcional dessas pessoas.

O sistema convencional de propulsão das cadeiras de rodas provoca uma sobre carga nas extremidades dos membros superiores, principalmente quando se considera pessoas com paraplegia (DRONGELEN *et al.*, 2006; DALLMEIJER *et al.*, 2004). Segundo os Autores, os danos no sistema musculoesquelético são provocados durante o desenvolvimento das atividades diárias ao longo do tempo e agravados tanto pelo ganho de massa corporal induzido pelo sedentarismo como também pelo estilo de propulsão de cada equipamento.

Valent *et al.* (2010) também estudaram que a propulsão manual de cadeiras de rodas tem um consumo energético ineficiente dos membros superiores e a sobre carga do aparelho musculoesquelético. Dessa forma, lesões nos membros superiores em usuários de cadeiras de rodas são comuns, principalmente na região dos ombros em decorrência da carga excessiva aplicada no manguito rotador – grupo de músculos com seus respectivos tendões cuja função é estabilizar as articulações dos ombros (VALENT *et al.*, 2010). A Figura 1 ilustra a região mais comprometida do ombro em razão das atividades físicas realizadas no movimento de propulsão das cadeiras de rodas.

Figura 1- Músculos da região do Manguito Rotador.



Fonte: Adaptado de Netter (2004).

Como forma de avaliar o método mais eficiente de acionar o arco das cadeiras de rodas convencionais, Slowik *et al.* (2016) dividiram o ciclo de propulsão em duas etapas: 1.) fase de contato, quando a energia mecânica é fornecida para a cadeira de rodas pelo contato das mãos no arco; e 2.) a fase de recuperação, quando as mãos são reposicionadas em preparação para o próximo ciclo. Empregando 223 voluntários paraplégicos, eles puderam mapear os movimentos cíclicos de propulsão por meio de câmeras e algoritmos desenvolvidos para representar numericamente os movimentos.

Os resultados sugerem que independentemente do movimento empregado durante a fase de recuperação, é inevitável que ocorra um pico de carga na região dos ombros na fase de contato descrita anteriormente.

De acordo com Valent *et al.* (2016), o sistema de propulsão cíclico de cadeiras de rodas, foi introduzido nas unidades holandesas de reabilitação como um modo de exercício e um estilo de mobilidade. O modelo de acionamento cíclico é menos cansativo e diminui o risco de desenvolver lesões nas regiões dos ombros como descrito por Bélanger *et al.* (2000). Segundo Sarraj e Massarelli (2011), o acionamento cíclico manual com as duas mãos pode oferecer um modo alternativo e adequado de treinamento ou mobilidade para pessoas com lesão medular ou que experimentam alguma condição de reabilitação clínica.

Dessa forma, o mecanismo cíclico de acionamento manual do triciclo apresentado nesse estudo, pode contribuir com o condicionamento cardiopulmonar e muscular, auxiliar na manutenção da saúde e servir como meio de transporte eficiente e seguro para pessoas com paraplegia sem provocar dores ou lesões nos membros superiores como ressaltado anteriormente. Por outro lado, com o sistema elétrico de acionamento (motor elétrico sem escova) o protótipo configura um meio de transporte eficiente quando se considera percursos de grandes distâncias, avaliado neste trabalho por volta de 40 km, contribuindo positivamente para a qualidade de vida e inclusão social de pessoas com deficiência motora, idosas e com problema cardiovascular.

2.2 Estrutura da Pesquisa

Este estudo apresenta um protótipo de triciclo híbrido de acionamento manual e elétrico. A seguir são apresentados os seguintes assuntos:

- Na Seção 3, é apresentado uma revisão bibliográfica contemplando os modelos atuais de propulsão adotados por pessoas com deficiência motora para a locomoção, as normas regulamentadoras de trânsito para ciclomotores, ergonomia, um breve relato dos critérios de escoamento de Tresca e von Mises e modelo de Elementos Finitos empregado para a análise estrutural do triciclo híbrido.

- Uma abordagem do material utilizado para o desenvolvimento do protótipo, bem como metodologia adotada para o mapeamento das características mecânicas, metalúrgicas, dinâmicas do equipamento, tais como potência, rendimento e autonomia são apresentadas na Seção 4.
- Resultados obtidos na pesquisa e uma discussão sobre o assunto, são apresentados na Seção 5.
- Na Seção 6, é finalizado este estudo com a Conclusão do trabalho realizado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Meios alternativos de locomoção e mecanismos de acionamento tanto cíclico manual como elétrico para pessoas com deficiência motora têm sido apresentados na comunidade científica Zukowski *et al.* (2014); Alves (2017); Kit Livre (2017); Lima Filho *et al.* (2011); Arnet *et al.* (2015); Disabled gear (2016); Siebert (2010); Lasher Sport (2016). Pesquisadores têm desenvolvido protótipos para o acionamento das cadeiras de rodas com o objetivo de minimizar os efeitos negativos do sistema de propulsão convencional.

3.1 Normas Regulamentadoras

A lei N° 10.098, de 19 de dezembro de 2000 estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida, mediante a supressão de barreiras e de obstáculos nas vias e espaços públicos, no mobiliário urbano, na construção e reforma de edifícios e nos meios de transporte e de comunicação.

De acordo com o Artigo 2° do Capítulo I, fica definido:

I – acessibilidade: possibilidade e condição de alcance para utilização, com segurança e autonomia, dos espaços, mobiliários e equipamentos urbanos, das edificações, dos transportes e dos sistemas e meios de comunicação, por pessoa portadora de deficiência ou com mobilidade reduzida;

II – barreiras: qualquer entrave ou obstáculo que limite ou impeça o acesso, a liberdade de movimento e a circulação com segurança das pessoas;

III – pessoa portadora de deficiência ou com mobilidade reduzida: a que temporária ou permanentemente tem limitada sua capacidade de relacionar-se com o meio e de utilizá-lo;

Além da Lei N° 10.098 que define pessoas portadoras de deficiência e conceitua acessibilidade e barreiras, é importante conhecer as normas regulamentadoras de trânsito principalmente quando se trata do desenvolvimento de triciclos com acionamento elétrico, assunto deste trabalho. No Brasil, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) é o órgão máximo normativo, consultivo e coordenador da política nacional de trânsito, competente do Sistema Nacional de Trânsito (SNT), responsável pela regulamentação do Código de Trânsito Brasileiro (DENATRAN, 1987).

A Resolução 315/2009 do CONTRAN estabelece regras para classificar como ciclomotores, os meios de transporte com acionamento elétrico (bicicletas, triciclos, patinetes, *skates*, etc.). De forma resumida, a Resolução 315 estabelece que ciclomotores são veículos de duas ou três rodas equipados com motor entre 350 W e 4 kW de potência com presença ou não de pedais acionados pelo condutor. Além disso, devem apresentar uma velocidade máxima de 50 km/h de condução e não podem ultrapassar a massa total (incluindo o condutor) de até 140 kg.

Porém, a Resolução 465 de 27 de novembro de 2013 altera o Art. 1º da Resolução nº 315.

§ 2º Fica excepcionalizado da equiparação prevista no capítulo deste artigo os equipamentos de mobilidade individual autopropelidos, sendo permitida sua circulação somente em áreas de circulação de pedestres, ciclovias e ciclo faixas, atendidas as seguintes condições:

I – velocidade máxima de 6 km/h em áreas de circulação de pedestres;

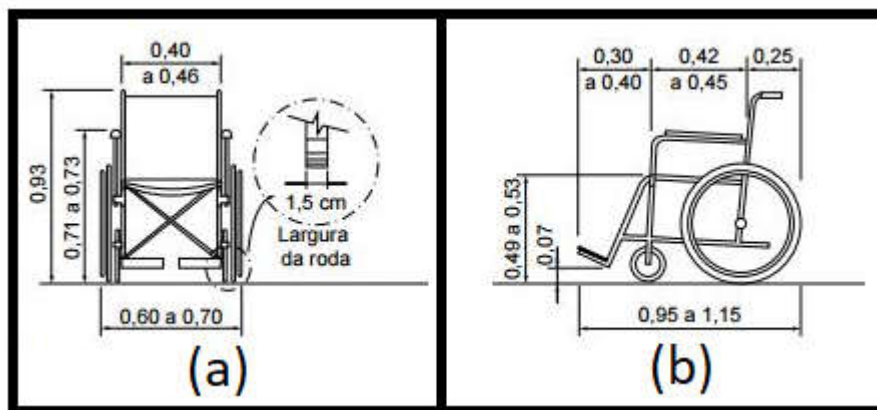
II – velocidade máxima de 20 km/h em ciclovias e ciclo faixas;

III – uso de indicador de velocidade, campainha e sinalização noturna, dianteira, traseira e lateral, incorporados ao equipamento;

IV – dimensões de largura e comprimento iguais ou inferiores às de uma cadeira de rodas, especificadas pela Norma Brasileira NBR 9050/2004.

A Figura 2 ilustra esquematicamente, as dimensões de uma cadeira de rodas de acordo com a NBR 9050/2004.

Figura 2- Dimensões de uma cadeira de rodas de acordo com a NBR 9050/2004. Vista frontal (a); Vista lateral (b).



Fonte: Adaptado de ABNT (2004).

Diante da Resolução 465 apresentada anteriormente, fica claro que não existe uma lei regulamentadora que estabelece regras destinadas aos equipamentos de mobilidade individual autopropelidos que se enquadram nas características citadas no parágrafo 2º da Resolução 465.

No 4º parágrafo da mesma Resolução (465), é acrescentado que:

§ 4º Caberá aos órgãos e entidades executivos de trânsito dos municípios e do Distrito Federal, no âmbito de suas circunscrições, regulamentar a circulação dos equipamentos de mobilidade individual autopropelidos e da bicicleta elétrica de que tratam os parágrafos 2º e 3º do presente artigo.

O triciclo híbrido, isto é, tanto de propulsão elétrica como manual desenvolvido neste trabalho, se enquadra nas características citadas no parágrafo 2º da Resolução 465. Sendo assim, não existe uma regulamentação pelo CONTRAN que normalize a utilização desses equipamentos em vias públicas. Além disso, esse equipamento contribui com a acessibilidade, considerando as definições estabelecidas pela lei N° 10.098, citada anteriormente.

3.2 Estudo da Ergonomia

Para o desenvolvimento do triciclo de acionamento manual e elétrico, considerou-se a ergonomia do equipamento visando um melhor conforto e segurança aos usuários, tendo em vista, principalmente o sistema de propulsão elétrico e manual.

De acordo com Iida (2005), considerando o sistema homem-máquina-ambiente, a ergonomia se insere no contexto de interação entre o homem e o trabalho. De forma mais abrangente, a ergonomia está vinculada com as interfaces dos locais onde ocorrem trocas de informações ou energia entre o homem, máquina e ambiente, interferindo diretamente na realização do trabalho. A ergonomia pode ser dividida em três grandes segmentos:

1- Ergonomia Física – Está relacionada com a postura no trabalho, manuseio de materiais, movimentos repetitivos, distúrbios músculo - esqueléticos, projeto de postos de trabalho, segurança e saúde do trabalhador. Dessa forma, está inserida no âmbito das características da anatomia humana, antropometria, fisiologia e biomecânica.

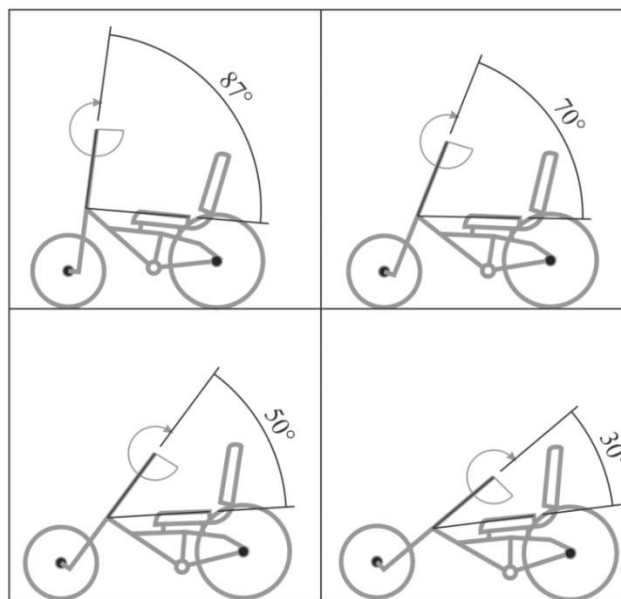
2- Ergonomia Cognitiva – Está relacionada com a função mental, tomada de decisões e estresse. De forma simplificada, envolve os processos mentais, tais como a percepção, memória, raciocínio e resposta motora, levando em consideração as interações entre as pessoas e máquinas/equipamentos.

3- Ergonomia Organizacional – Abrange a estrutura organizacional, política e processos, tais como: comunicações, projeto de trabalho, programação do trabalho em grupo, projeto participativo, trabalho cooperativo, cultura organizacional, organizações em rede, teletrabalho e gestão da qualidade.

O protótipo desenvolvido neste trabalho se enquadra no contexto da Ergonomia Física, pois abrange características relacionadas aos movimentos repetitivos (sistema cíclico de propulsão manual), postura e características músculo - esquelético do usuário. Foi, portanto, desenvolvido priorizando o conforto, segurança e principalmente a posição do sistema de acionamento cíclico manual de acordo com as características físicas (análise antropométrica) de uma pessoa.

Nesse contexto, uma característica importante do triciclo está no ângulo de inclinação do sistema de direção. O projeto foi implementado seguindo os estudos realizados por Lima Filho *et al.* (2012) na otimização de um modelo de *handbike* para pessoas com deficiência motora dos membros inferiores. A Figura 3 apresenta o ângulo de inclinação entre o suporte de direção do triciclo e a posição do assento.

Figura 3 - Relação entre o ângulo de inclinação do sistema de direção do triciclo e o assento.

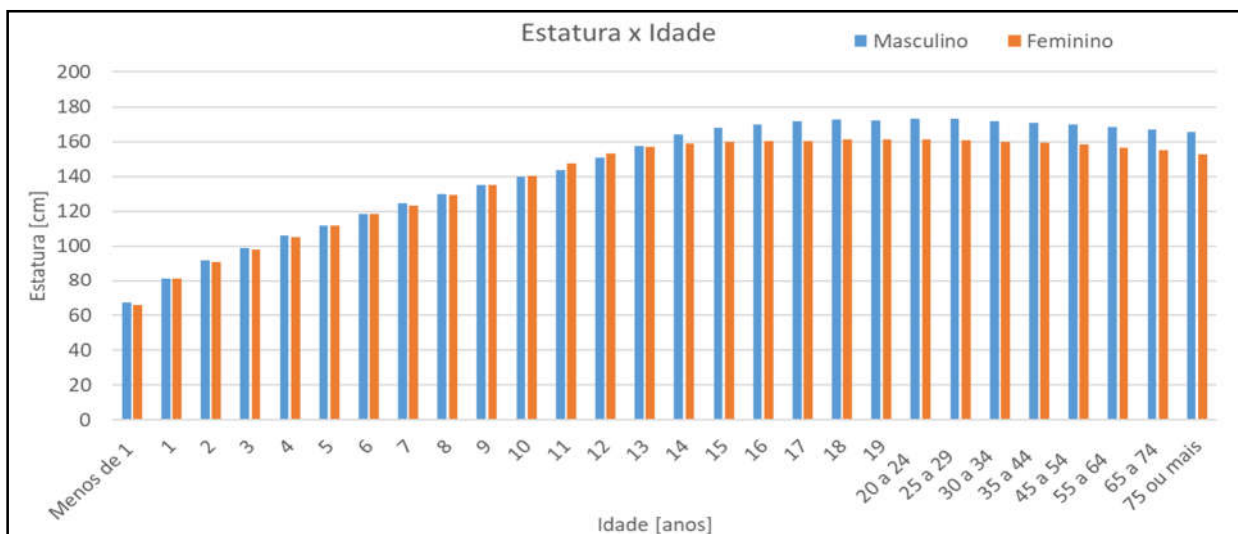


Fonte: Lima Filho et al. (2012).

Lima Filho *et al.* (2012) afirmaram que a redução do ângulo de inclinação do sistema de direção em relação ao assento, diminui a força normal sobre a roda dianteira, pois aumenta a distância entre eixos, afetando dessa forma, a capacidade de tração quando se utiliza o sistema cíclico manual de acionamento. Por outro lado, o aumento do ângulo de inclinação da direção do triciclo, aproxima a roda frontal/sistema de direção ao banco, reduzindo dessa forma, o espaço da plataforma de acomodação dos pés do usuário sobre a estrutura tubular do equipamento.

Neste trabalho, para garantir o conforto do usuário, um ângulo de 60 graus foi identificado por meio do trabalho desenvolvido por Lima Filho *et al.* (2012), considerando um usuário adulto. De acordo com o IBGE (2010), a estatura média da população adulta brasileira é de 170,4 cm para homens e 158,8 cm para mulheres. A Figura 4 ilustra a estatura média dos homens e mulheres no Brasil, de acordo com a idade.

Figura 4 - Estatura média da população brasileira de acordo com a idade.

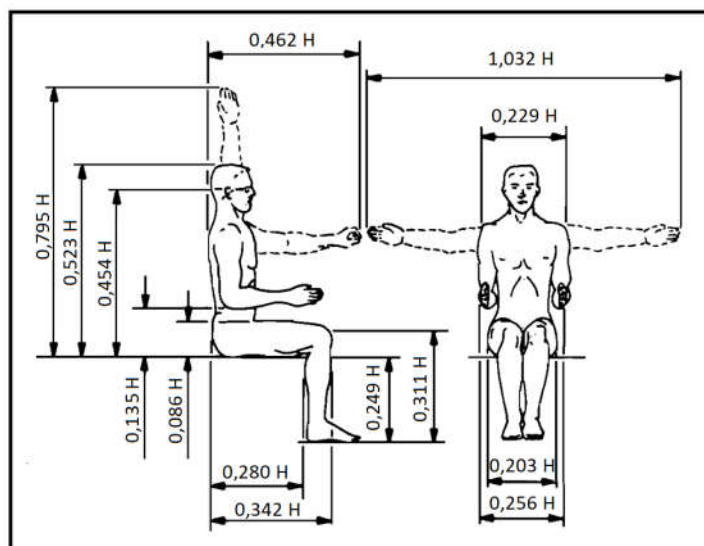


Fonte: Adaptado de IBGE (2010).

Para garantir o ajuste do triciclo ao perfil antropométrico dos usuários como descrito anteriormente, foi implementado um assento ajustável longitudinalmente ao triciclo. Com isso é possível configurar a posição do banco em relação ao sistema cíclico de propulsão de acordo com a estatura/medida antropométrica.

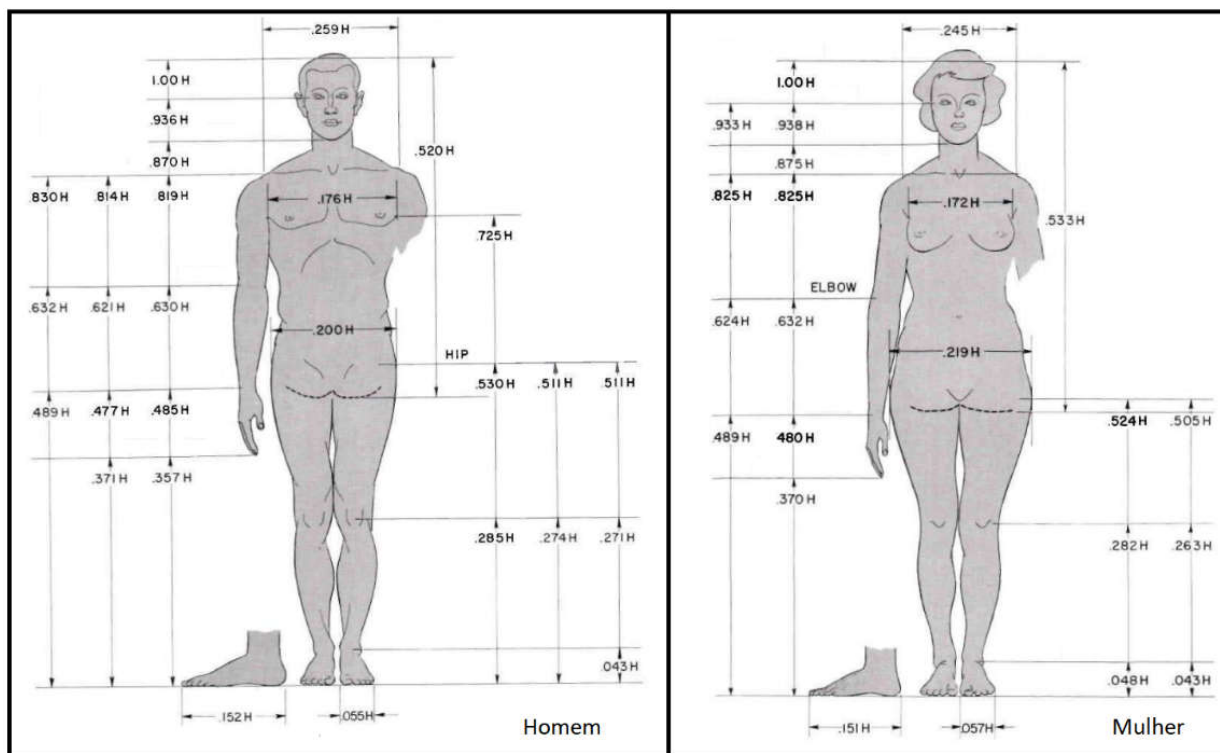
Lida (2005) cita que Roozbazar *et al.* (1979) e Contini (1972) elaboraram modelos para medidas antropométricas de acordo com a estatura de uma pessoa. As Figuras 5 e 6 ilustram respectivamente os modelos elaborados por Roozbazar *et al.* (1979) e Contini (1972).

Figura 5 - Relação as medidas antropométricas de acordo com a estatura.



Fonte: Adaptado de Roozbazar (1979).

Figura 6 - Relação entre as medidas antropométricas de pessoas do sexo masculino e feminino de acordo com a estatura H.

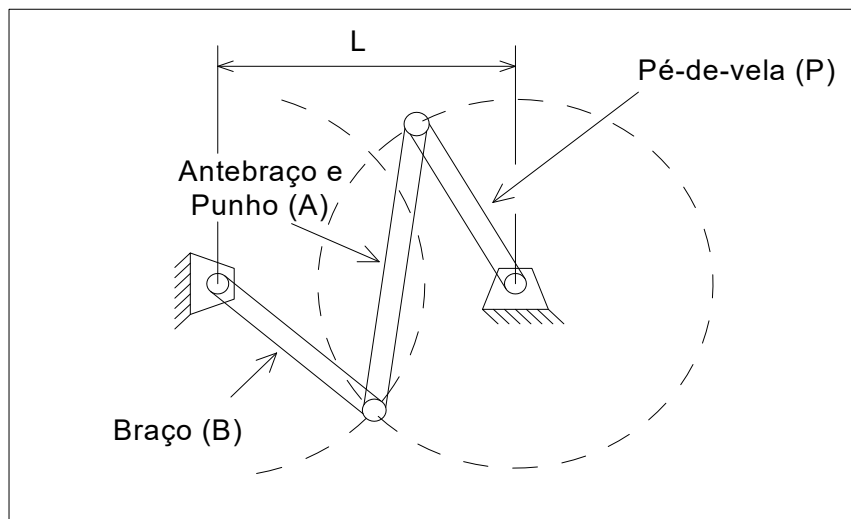


Fonte: Adaptado de Contini (1972).

É importante notar que o modelo apresentado por Roozbazar *et al.* (1979) é limitado ao sexo masculino em posição sentado. Já o modelo de Contini (1972), apresenta a proporção em relação a estatura, da mão, antebraço e braço para uma pessoa do sexo masculino e feminino na posição ereta. Além disso, considerando um homem e uma mulher com a mesma estatura, pode-se afirmar que os membros superiores do corpo feminino são ligeiramente maiores quando comparado aos membros superiores do corpo masculino.

Empregando a relação antropométrica do modelo de Contini (1972) - Figura 6, é possível estabelecer uma analogia entre o acionamento cíclico manual do triciclo (*handbike*) e um mecanismo de 4 barras (Figura 7) considerando as dimensões dos membros superiores. Assim, é possível identificar a menor estatura do usuário da *handbike* considerando o acionamento cíclico manual.

Figura 7 - Mecanismo de 4 barras.



Fonte: Próprio Autor.

Norton, (2010) apresenta os princípios de Grashof, para um mecanismo de 4 barras. A condição de Grashof prevê a possibilidade de rotação do mecanismo com base no comprimento dos elos. Dessa forma, para satisfazer a condição de que pelo menos um dos elos seja capaz de efetuar uma revolução completa em torno do elo de referência, é necessário que:

$$\text{Barra menor} + \text{Barra maior} \leq \text{Somatória das Barras Intermediárias}$$

De acordo com a Figura 7, tem-se B, A, P e L respectivamente os comprimentos do braço, antebraço com punho, pé-de-vela e distância entre os pontos fixos de articulação dos ombros e a caixa de centro do pé-de-vela. As dimensões de A e B, podem ser definidos em relação a estatura da pessoa (H) - Contini (1972).

A distância entre o centro da palma de mão (ponto aproximado de empunhadura) e a articulação do cotovelo foi empregada para determinar a dimensão do elemento A em relação a estatura do usuário, ou seja:

$$A = (0,630H - 0,485H) + \frac{0,485H - 0,357H}{2} \Rightarrow A = 0,209H \quad (1)$$

A distância entre o ponto de articulação dos ombros e o cotovelo foi empregada para determinar a dimensão do elemento B (Braço) em relação a estatura do usuário, ou seja:

$$B = 0,819H - 0,630H \Rightarrow B = 0,189H \quad (2)$$

Na modelagem adotada para o mecanismo de 4 barras, o pé de vela do triciclo tem 180 mm de comprimento e corresponde ao menor elemento do mecanismo. A distância entre os pontos fixos de articulação dos ombros e a caixa de centro do pé de vela (L) pode ser ajustado de acordo com a estatura do usuário por meio do reposicionamento do assento. Para efeito de cálculos, o valor de L foi determinado considerando o assento posicionado o mais próximo possível do sistema de direção. Com essa configuração, L apresenta um valor de 48 cm. A Expressão 3, adaptada de acordo com a nomenclatura dos membros, apresenta o critério para atender o princípio de Grashof, para um mecanismo de 4 barras.

$$P + L \leq A + B \quad (3)$$

P: Comprimento do pé-de-vela;

L: Distância entre a articulação dos ombros e a caixa de centro do pé-de-vela;

A: Comprimento do antebraço e o centro da palma da mão; e

B: Comprimento do braço.

3.3 Força de Acionamento Manual do Triciclo Híbrido

Lima Filho *et al.* (2016) desenvolveram uma equação para calcular a força necessária para acionar os pedais reposicionados na *handbike* no plano horizontal e inclinado. Esta equação é empregada para estimar a inclinação máxima que o usuário pode superar por meio do acionamento manual (Equação 4).

$$F_p = W \frac{D}{2P} \left(\frac{Z_1}{Z_2} n \right) [\mu \cos(\alpha) + \text{sen}(\alpha)] \quad (4)$$

F_p : Força aplicada no pé-de-vela [N];

W: Peso total do conjunto (triciclo híbrido e usuário) [N];

Z_1 : Número de dentes da engrenagem motora;

Z_2 : Número de dentes da engrenagem movida;

D: Diâmetro da roda dianteira [m];

P: Comprimento do pé-de-vela[m];

μ : Coeficiente de resistência ao rolamento;

α : Inclinação do plano em relação a horizontal; e

n: Relação de redução do cubo Nexus (0,75).

De acordo com Lima Filho *et al.* (2016), é possível estimar o coeficiente de resistência ao rolamento de forma experimental por meio do acoplamento de dinamômetros nas alavancas de acionamento (pedais reposicionados) da *handbike* com o objetivo de se obter a força (F_p) necessária para iniciar o movimento a partir da velocidade zero. A Figura 8 ilustra um ensaio realizado em um triciclo de acionamento manual para determinar o coeficiente de resistência ao rolamento do equipamento.

Figura 8 - Ensaio experimental para obtenção da força de acionamento dos pedais.



Fonte: Lima Filho *et al.* (2016).

3.4 Critérios de falha estática

Esta seção apresenta um estudo relacionado aos critérios de falha estática por deformação plástica. A importância desta abordagem está no fato de que materiais com características mecânicas dúcteis se comportam diferentemente de materiais frágeis (como será apresentado a seguir) e impacta diretamente na modelagem matemática empregada nas análises estruturais. Neste contexto, a Tabela 1 indica a resistência dos materiais de acordo com o limite de escoamento.

Tabela 1 - Classificação dos materiais de acordo com o limite escoamento.

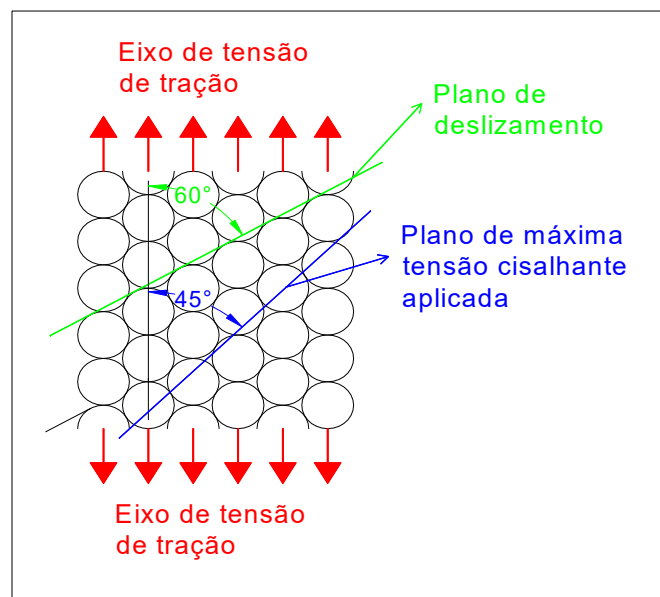
Material	Limite de escoamento (MPa)
Baixa resistência	0 - 250
Média resistência	250 - 750
Alta resistência	750 - 1500
Ultra alta resistência	Superior a 1500

Fonte: Adaptado de Charles (1997).

3.5 Análise de falha por deformação plástica

A Figura 9 ilustra uma estrutura cristalina com plano compacto formada por um grupo de átomos sujeito a uma força de tração. No diagrama esquemático, o eixo de tração está orientado numa disposição sobre o plano compacto dos átomos para ilustrar o ângulo de deslizamento atômico por cisalhamento. De acordo com a Figura 9, observa-se que a deformação plástica está associada a tensão cisalhante a 60° (plano de deslizamento atômico) em relação ao eixo de ação da força de tração. Por outro lado, a tensão cisalhante máxima ocorre em um plano orientado a 45° em relação ao eixo de ação da força de tração de acordo com o círculo de Mohr (JUVINALL, 1967). Essa configuração será justificada matematicamente a seguir.

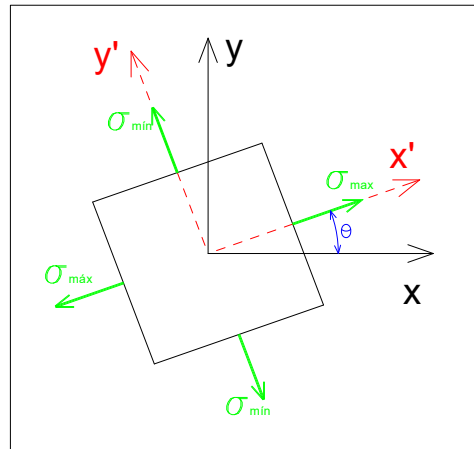
Figura 9 - Plano compacto formado por um grupo de átomos sujeito a uma força de tração no eixo vertical.



Fonte: Adaptado de Juvinal (1967).

Segundo Dieter (1982), o estado de tensão em um ponto qualquer de um elemento infinitesimal de uma placa fina (estado plano de tensão), pode ser representado matematicamente em qualquer orientação de eixos coordenados. A Figura 10 apresenta o estado de tensão de um elemento rotacionado com um ângulo θ em relação ao sistema de coordenada xy .

Figura 10 - Estado plano de tensão de um elemento com um ângulo θ em relação ao sistema de coordenada xy .



Fonte: Próprio Autor.

Dessa forma, a tensão normal no eixo x e no eixo y , tensões principais, são projetadas no plano x' e y' gerando tensões normais e de cisalhamento. Estas podem ser calculadas pelas Equações 5, 6 e 7. Essas equações representam a projeção do estado de tensão principal (xy) sobre o sistema de coordenada $x'y'$.

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos(2\theta) + \tau_{xy} \sin(2\theta) \quad (5)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos(2\theta) - \tau_{xy} \sin(2\theta) \quad (6)$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin(2\theta) + \tau_{xy} \cos(2\theta) \quad (7)$$

σ_x : Tensão normal no eixo x considerando um sistema de referência xy ;

σ_y : Tensão normal no eixo y considerando um sistema de referência xy ;

τ_{xy} : Tensão cisalhante no plano x e direção y considerando um sistema de referência xy ;

$\sigma_{x'}$: Tensão normal no eixo x' considerando um sistema de referência $x'y'$;

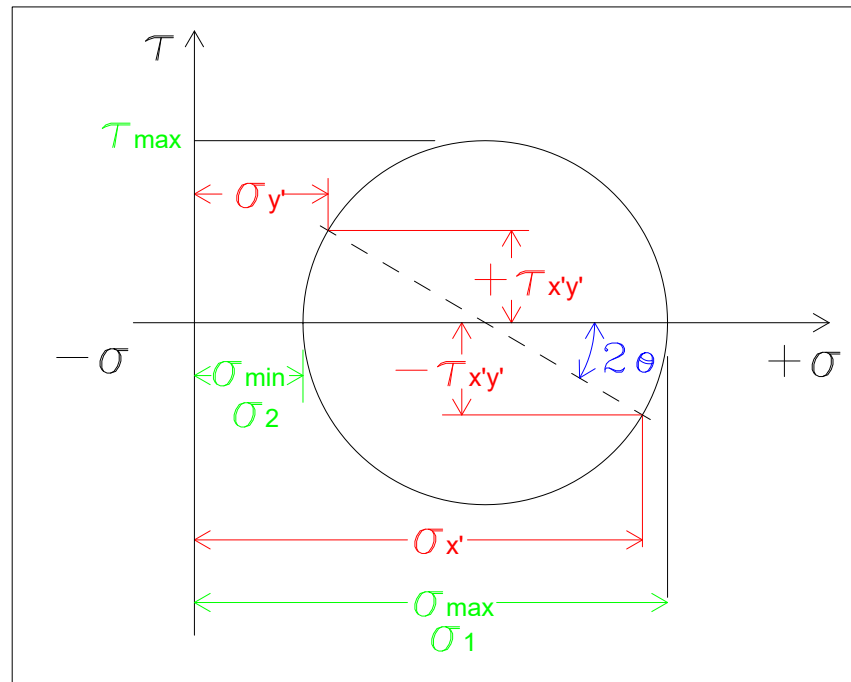
$\sigma_{y'}$: Tensão normal no eixo y' considerando um sistema de referência $x'y'$;

$\tau_{x'y'}$: Tensão cisalhante no plano x' e direção y' considerando um sistema de referência $x'y'$;

θ : Ângulo de inclinação entre o sistema de referência xy e $x'y'$.

Analogamente, o Círculo de Mohr (Figura 11) pode ser usado para determinar de maneira gráfica, as componentes de tensão em relação a um sistema rotacionado, isto é, agindo sobre um plano de orientação diferente no ponto em estudo (DIETER, 1982).

Figura 11 - Círculo de Mohr para o estado plano de tensão.



Fonte: Adaptado de Dieter (1982).

Empregando as Equações 5, 6 e 7 em conjunto com a representação gráfica por meio do círculo de Mohr, pode-se afirmar (DIETER, 1982):

1-A tensão cisalhante máxima ocorre em um ângulo a meio caminho entre as tensões normais máxima e mínima;

2-Os valores máximo e mínimo da tensão normal em um plano qualquer, ocorrem quando a tensão cisalhante é nula.

O plano de máxima tensão cisalhante ocorre a 45° em relação ao eixo de ação das tensões principais. Analisando o Círculo de Mohr, a máxima tensão cisalhante ocorre a 90° em relação ao eixo x. Porém, um ângulo θ no elemento físico é representado por 2θ no círculo de Mohr.

Inclinando o eixo de ação da força em 15° (Figura 9) em sentido horário, o plano de máxima tensão cisalhante irá coincidir com o plano de deslizamento. Por outro lado, nos materiais cristalinos, a orientação aleatória dos grãos torna os planos de deslizamento também aleatórios. Dessa forma, a ação dos diversos planos de deslizamentos (orientados de forma aleatória) no material, são responsáveis pelo deslocamento atômico envolvendo poucos átomos de cada vez, favorecendo a propagação da deformação plástica nessa região (JUVINALL, 1967). Os materiais frágeis apresentam planos de deslizamento limitados e outros critérios de escoamento devem ser aplicados como será apresentado abaixo.

No processo de deformação plástica de um material sujeito a uma carga, não há variação volumétrica pelo deslizamento dos planos atômicos (JUVINALL, 1967). De acordo com Dieter (1982), a deformação transversal é uma fração constante da deformação na direção longitudinal, conhecida por Módulo de Poisson, ou Coeficiente de Poisson, que para a maioria dos materiais seu valor se aproxima a 0,33 no regime elástico. A liga de alumínio 6063 T5 (material empregado na construção estrutural do triciclo) tem um Coeficiente de Poisson de 0,333 (BUDYNAS, 2016).

Para o dimensionamento estrutural de um projeto, é fundamental se conhecer os esforços atuantes para identificar os principais tipos de falhas inerentes no material. Os materiais podem ser classificados em dúcteis ou frágeis dependendo da sua capacidade de suportar uma deformação plástica (JUVINALL, 1967). Características de materiais dúcteis são aqueles que sofrem estrição na carga máxima no ensaio de tração, provocando o deslizamento e encruamento localizado seguido da fratura dúctil tipo taça/cone nesta região, indicando alta absorção de energia.

Por outro lado, para materiais com menor ductilidade, a deformação plástica localizada ocorre parcialmente no momento da fratura. Isto pode ocorrer em materiais dúcteis que foram previamente trabalhados a frio. O encruamento aproxima o limite de escoamento do limite de resistência e assim diminuindo a região plástica com baixos planos de deslizamento atômico. Isto pode resultar fratura mista com predominância por clivagem caracterizando uma fratura frágil.

Dessa forma, um material com comportamento mecânico frágil, o limite de escoamento está próximo do limite de resistência à tração. Ao passo que um material com comportamento mecânico dúctil, apresentaria uma deformação plástica antes da fratura, uma vez que há intervalo considerável entre o limite de escoamento e o limite de resistência à fratura (DIETER, 1982).

Juinall (1967) alega que fraturas com mais de 5% de deformação plástica podem ser atribuídas a materiais dúcteis, enquanto que fraturas com menos de 5% de deformação plástica podem caracterizar materiais com comportamento mecânico frágil.

Em se tratando de aspectos de fraturas, normalmente a fratura dúctil é descrita como “fratura cisalhante” como foi descrita anteriormente e produz um aspecto fibroso e fosco, indicando absorção de grande quantidade de energia durante a propagação da falha. Por outro lado, a fratura frágil envolve clivagem ao longo do plano cristalográfico e produz um aspecto brilhoso e granular, indicando baixa absorção de energia plástica (JUVINALL, 1967).

Dieter (1982) descreve que um elemento estrutural ou componente de máquina pode falhar segundo quatro critérios:

- 1- Deformação elástica excessiva que, por sua vez, está associada ao módulo de elasticidade do material;
- 2- Deformação plástica excessiva, quando o limite de escoamento é ultrapassado, causando uma mudança permanente de forma por meio do escoamento do material;
- 3- Fratura por fadiga; e
- 4- Fratura frágil ou catastrófica.

Juinall (1967) cita que quando se considera estruturas soldadas, por conta do efeito de variações térmicas excessivas na região da solda, (ZAT - Zona Afetada Termicamente), alguns materiais podem estar mais suscetíveis a falha por 3 razões:

- 1- O material da região da solda pode estar inerentemente mais dúctil do que o metal base por conta das alterações metalúrgicas no local;
- 2- Entalhes geométricos, metalográficos e metalúrgicos estão presentes na região da solda, podendo gerar um estado triaxial de tensão; e
- 3- Tensões residuais provocadas pelo ciclo térmico e distribuição térmica durante o processo de resfriamento do cordão de solda podem acelerar a falha estrutural diminuindo a ductilidade do material.

Segundo Dieter (1982), o escoamento de um metal dúctil sob condições de carregamento estático à temperatura ambiente raramente provoca falhas catastróficas, porque à medida que o metal se deforma plasticamente, ele encrua, aumentando assim a sua resistência mecânica. Por outro lado, materiais com granulação grosseira apresentam maior tendência a sofrer fratura frágil, pois facilitam a propagação da trinca (JUVINALL, 1967). Além do crescimento de grãos, outros fatores podem contribuir para a ocorrência da fratura frágil:

- 1- Baixa temperatura;
- 2- Impacto;
- 3- Tensão de tração próxima ao limite de resistência do material;
- 4- Seções grossas, estado plano de deformação (estado triaxial de tensão); e
- 5- Entalhes.

3.6 Critérios de escoamento para materiais dúcteis

Para Dieter (1982), quando um material é submetido a uma combinação de tensões qualquer, a dedução de relações matemáticas capazes de predizer as condições em que se inicia o escoamento é fundamental para projetos que envolvam dimensionamentos estruturais. Nesse contexto serão apresentados dois principais critérios de escoamento para a previsão do início de escoamento nos metais dúcteis: von Mises e Tresca.

3.6.1 CRITÉRIO DE VON MISES

Os coeficientes que relacionam a tensão com as coordenadas do ponto no corpo são os componentes do tensor-tensão. De maneira genérica, um tensor é uma forma de representação matemática de vetores em configuração de matrizes, associada a um conjunto de operações, tais como, a soma e o produto. Dieter (1982) subdivide o tensor de tensão total em um tensor de tensão hidrostático ou médio, (que envolve somente tração ou compressão pura) e um tensor-tensão desvio, (que representa a tensão cisalhante no estado de tensões total).

O critério de von-Mises propõe que o escoamento se dá quando a energia de deformação por distorção alcança ou excede a energia de distorção para um elemento sujeito a tração simples.

Matematicamente, Dieter (1982) iguala o segundo invariante do tensor-tensão-desvio, J_2 a um valor crítico de tensão " k^2 ". A Equação 8 apresenta o segundo invariante do tensor-tensão-desvio, J_2 :

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (8)$$

O valor limite de J_2 para que não ocorra o escoamento é apresentado na Equação 9.

$$J_2 = k^2 \quad (9)$$

Considerando um ensaio de tração simples, tem-se que:

$$\sigma_1 = \sigma_0$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma_3 = 0$$

Considerando os valores de σ_1, σ_2 e σ_3 na Equação 8, tem-se que:

$$J_2 = \frac{1}{6} [\sigma_0^2 + \sigma_0^2] \Rightarrow J_2 = \frac{\sigma_0^2}{3} \quad (10)$$

Igualando as Equações 8 e 9, tem-se que:

$$\frac{\sigma_0^2}{3} = k^2 \quad (11)$$

Assim, o critério de escoamento de von Mises pode ser obtido em função das tensões principais igualando as Equações 8 e 11:

$$\frac{\sigma_0^2}{3} = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (12)$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Dessa forma, von Mises prevê a ocorrência do escoamento quando as diferenças de tensões no lado direito da Equação 13 excedem o limite de escoamento em tração uniaxial σ_0 .

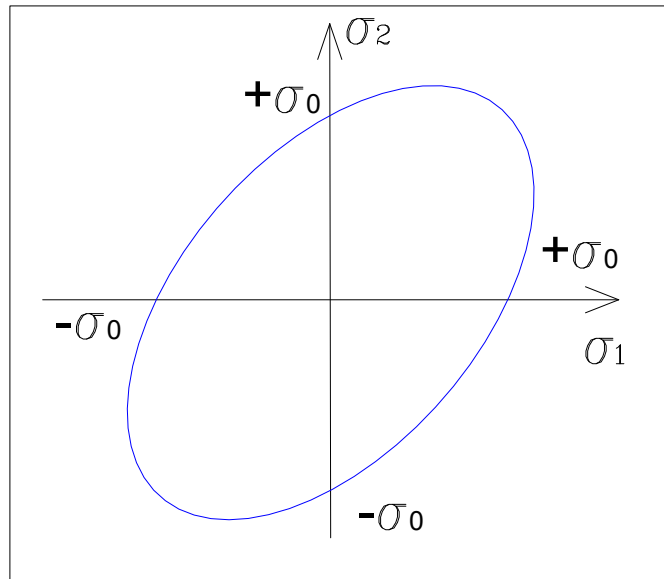
Agora, considerando um estado plano de tensão ($\sigma_3 = 0$) e aplicando este valor na Equação 13, tem-se:

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - 0)^2 + (0 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$\sigma_0^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \quad (15)$$

A Equação 15 e a Figura 12 fornecem respectivamente a Equação matemática de uma elipse e a representação gráfica considerando um estado plano de tensão segundo o critério de escoamento de von Mises.

Figura 12 - Representação do estado plano de tensão considerando von Mises como critério de escoamento.



Fonte: Adaptado de Dieter (1982).

A região interna delimitada pela elipse (Figura 12), representa as condições em que um material dúctil não sofreria escoamento de acordo com o critério de von Mises.

3.6.2 CRITÉRIO DE ESCOAMENTO DE TRESCA

De acordo com Dieter (1982), o critério de escoamento de Tresca considera que o escoamento ocorre quando a tensão máxima de cisalhamento atinge o valor da tensão de cisalhamento no ensaio uniaxial de tração.

A Equação 16 apresenta a tensão cisalhante máxima em um estado triaxial de tensões (DIETER 1982).

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (16)$$

Al-Qureshi (1991) apresenta a modelagem matemática para a elaboração gráfica do critério de Tresca. Considerando um estado simples de tração ou compressão, têm-se:

$$\tau_{xy} = 0$$

$$\sigma_y = 0$$

$$\sigma_x = \sigma_0$$

$$\tau_{max} = \tau_0$$

Atualizando os valores na Equação 16, é possível obter a máxima tensão de cisalhamento τ_0 para um estado simples de tração ou compressão:

$$\tau_{max} = \tau_0 = \frac{\sigma_0}{2}. \quad (17)$$

As expressões matemáticas em 18, 19 e 20 apresentam as condições de resistência ao escoamento considerando as tensões de cisalhamento:

$$-\tau_0 < \tau_1 < \tau_0; \quad (18)$$

$$-\tau_0 < \tau_2 < \tau_0; e \quad (19)$$

$$-\tau_0 < \tau_3 < \tau_0. \quad (20)$$

As tensões de cisalhamento máximas, τ_1 , τ_2 e τ_3 são apresentadas pelas Equações 21, 22 e 23, respectivamente.

$$\tau_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \quad (21)$$

$$\tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (22)$$

$$\tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (23)$$

As condições de resistência ao escoamento, podem ser obtidas os valores das Equações 21, 22 e 23 nas Equações 18, 19 e 20, obtendo:

$$-\sigma_0 < \sigma_2 - \sigma_3 < \sigma_0 \quad (24)$$

$$-\sigma_0 < \sigma_1 - \sigma_3 < \sigma_0 \quad (25)$$

$$-\sigma_0 < \sigma_1 - \sigma_2 < \sigma_0 \quad (26)$$

Considerando um estado plano de tensão, $\sigma_3 = 0$, as condições de resistência ao escoamento se resumem às Equações 27, 28 e 29.

$$-\sigma_0 < \sigma_2 < \sigma_0 \quad (27)$$

$$-\sigma_0 < \sigma_1 < \sigma_0 \quad (28)$$

$$-\sigma_0 < \sigma_1 - \sigma_2 < \sigma_0 \quad (29)$$

Para representar graficamente a Teoria de Tresca no plano σ_1 e σ_2 , Dieter (1982) apresenta dois casos de acordo com o sinal das tensões (compressão (-) ou tração (+)):

1º Caso: as duas tensões principais têm o mesmo sinal. Considerando ambas as tensões de tração, as Equações 27, 28 e 29 podem ser apresentadas por:

$$\sigma_2 < \sigma_0 \quad (30)$$

$$\sigma_1 < \sigma_0 \quad (31)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 < \sigma_0 \quad (32)$$

Dessa forma, as Equações 30, 31 e 32 podem ser empregadas para traçar graficamente a Teoria de Tresca no plano σ_1 e σ_2 para o 1º quadrante. O 3º quadrante pode ser deduzido de forma análoga considerando o estado de compressão em ambas as tensões principais, σ_1 e σ_2 .

2º Caso: as duas tensões principais têm sinal oposto. Considerando $\sigma_1 > 0$ e $\sigma_2 < 0$, as Equações 27, 28 e 29 podem ser apresentadas por:

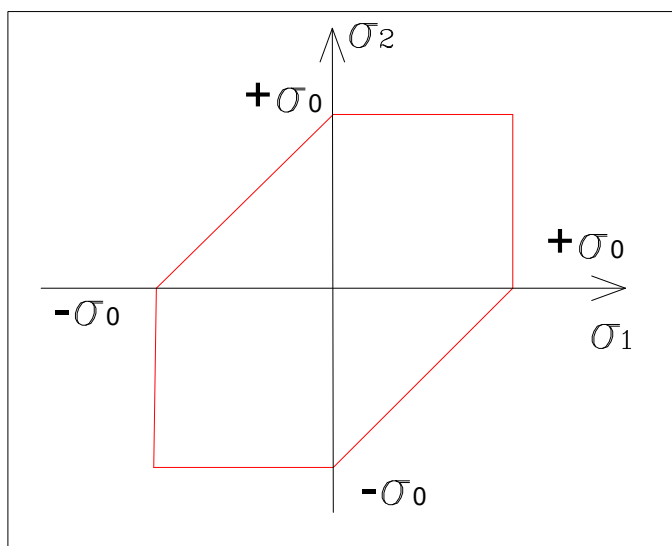
$$\sigma_2 > -\sigma_0 \quad (33)$$

$$\sigma_1 < \sigma_0 \quad (34)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 < \sigma_0 \quad (35)$$

Dessa forma, as Equações 33, 34 e 35 podem ser empregadas para traçar graficamente a Teoria de Tresca no plano σ_1 e σ_2 para o 4º quadrante. O 2º quadrante pode ser deduzido de forma análoga considerando $\sigma_1 < 0$ e $\sigma_2 > 0$. A Figura 13 apresenta graficamente o critério de Tresca considerando um estado plano de tensão.

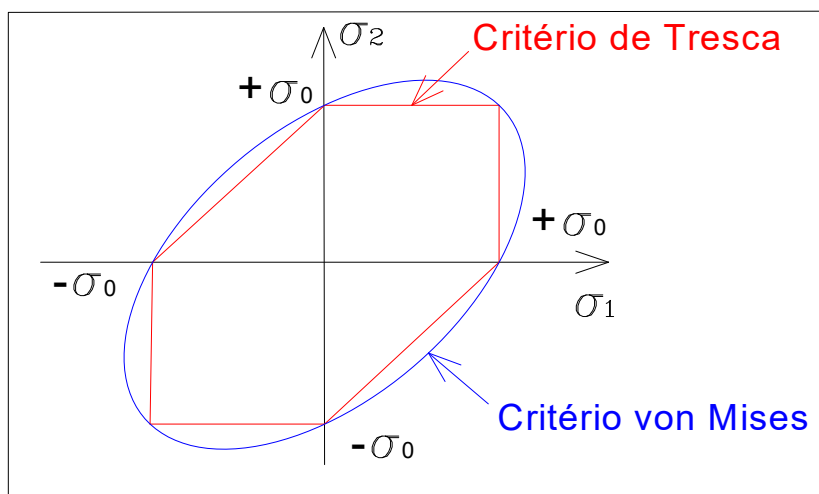
Figura 13 - Representação do estado plano de tensão considerando Tresca como critério de escoamento.



Fonte: Adaptado de Dieter (1982).

A região interna delimitada pelo hexágono (Figura 13), representa as condições em que o material em estudo, não sofreria escoamento de acordo com o critério de Tresca. A Figura 14 compara o critério de Tresca e de von Mises. Então, o critério de Escoamento de Tresca é mais conservador do que o de von Mises. Na simulação estrutural do protótipo construído de tubos de ligas de Al 6063-T5, foi usado o critério de Escoamento de von Mises.

Figura 14 - Comparação do critério de Tresca (vermelho) e von Mises (azul).



Fonte: Adaptado de Dieter (1982).

3.7 Elementos Finitos

Os computadores tornaram-se ferramentas indispensáveis para a sociedade principalmente pela ampla capacidade de armazenamento de informações aliado a confiabilidade e agilidade no processamento de dados. Esses fatores refletem diretamente na economia de tempo e ganho de qualidade nas atividades desenvolvidas, o que facilita a vida dos usuários quando se considera os meios de comunicação na chamada “era digital” (VILELA, 2007).

No campo da engenharia, a utilização de computadores nas áreas térmicas se faz presente principalmente para a resolução de problemas abordando simulação de escoamento de fluidos, transferência de calor e análises estruturais empregando Método dos Elementos Finitos (MEF) graças a alta capacidade de processamento de dados (ALVES, 2007). Dessa forma, nessa Seção será apresentada uma introdução ao Método dos Elementos Finitos, bem como o *software* utilizado para a simulação estrutural do triciclo híbrido desenvolvido.

3.7.1 SISTEMAS DISCRETOS

A representação de um fenômeno físico real por equações matemáticas resulta na maioria das vezes da elaboração de um modelo simplificado empregando variáveis consideradas fundamentais para descrever o comportamento do sistema. De acordo com Kwon e Bang (2000), o modelo matemático utilizado para descrever um fenômeno físico, invariavelmente é constituído por equações diferenciais e condições de contorno. Kwon e Bang (2000) acrescentam que as equações diferenciais são complexas de serem resolvidas de forma analítica mesmo considerando a simplificação do problema.

Alves (2007) cita que na maioria dos casos envolvendo modelagem matemática para a representação de um fenômeno físico, encontrar uma solução analítica cujas variáveis se distribuem continuamente em todo o domínio do problema é um grande desafio.

Com a evolução e a difusão da linguagem de computadores para fazer os modelos numéricos, várias técnicas de soluções numéricas têm sido desenvolvidas por meio da discretização e resolução de problemas de engenharia. Método dos Elementos Finitos (MEF) constitui uma ferramenta computacional que subdivide o domínio do problema em subdomínios menores, conhecidos por Elementos Finitos. Dessa forma, a representação do problema passa a ser constituído por um grande número de Elementos Finitos (KWON ; BANG, 2000).

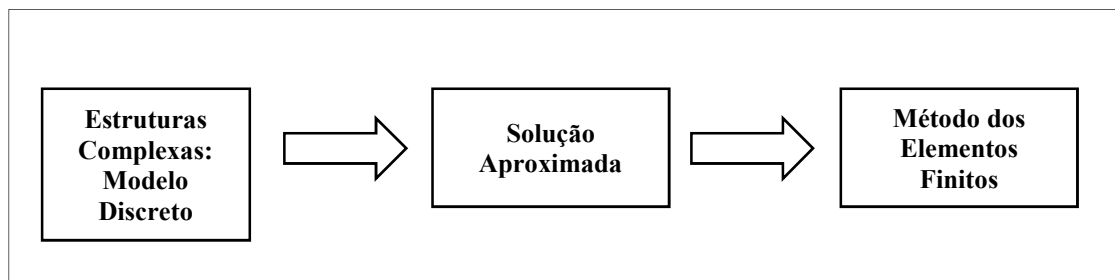
Para a utilização do sistema computacional, é necessário elaborar modelos discretos adotando hipóteses simplificadas dos sistemas equivalentes (ALVES FILHO, 2013). A identificação das variáveis relevantes (condições de apoio, por exemplo), constitui a base para o desenvolvimento de um projeto adequado que possa reproduzir o comportamento do sistema analisado de forma idealizada.

Segundo Molina e Calil Junior (2009), os modelos matemáticos empregados para simular o comportamento de estruturas envolvendo tensão e deformação, se restringem ao comportamento elástico, ou seja, a região linear limitada pelo limite de escoamento intrínseco ao material. Sendo assim, as estruturas analisadas por MEF acabam sendo, na maioria das vezes, capazes de resistir a esforços significativamente superiores aos esforços de projeto por desprezar critérios verdadeiros de ruptura.

Muitos programas de Elementos Finitos comerciais com interfaces intuitivas de utilização (SolidWorks, ANSYS, CATIA...) foram desenvolvidos com o intuito de estabelecerem relações diretas entre as forças e seus correspondentes deslocamentos aplicados em elementos discretos. Esses programas oferecem geração automática de malha (nós e elementos estruturais) e condições de contorno tendo por base em um desenho digital em CAD (*Computer Aided Design*) previamente elaborado. De acordo com Alves Filho (2013), o processo automático de geração de malhas depende de ajustes realizados pelos usuários do programa de acordo com seu conhecimento e experiência. Ele acrescenta que hipóteses mal formuladas pelo analista, podem comprometer os resultados e acarretar em erros. Além disso, sempre que um modelo discreto é utilizado para representar a solução matemática de um problema, um conjunto de equações algébricas substitui o sistema de equações diferenciais (modelagem contínua) (ALVES, 2007; LAZUKA *et al.*, 2015).

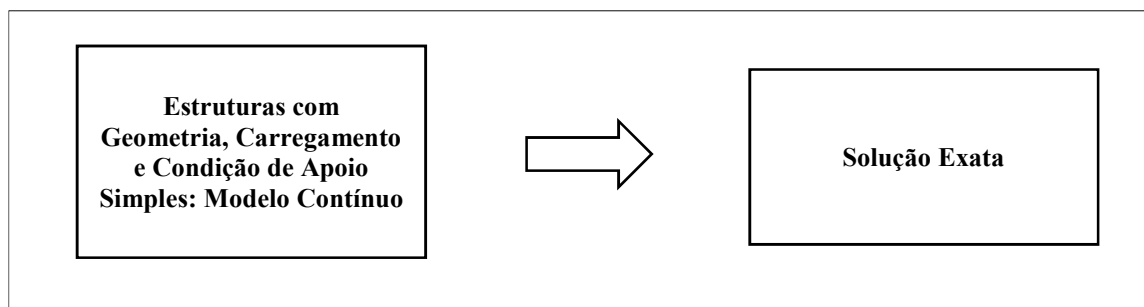
As Figuras 15 e 16 ilustram respectivamente, em diagramas de bloco, duas estratégias que podem ser aplicadas para a solução aproximada e exata de problemas, adotando como exemplo, uma solicitação de tensão e deslocamento de uma estrutura.

Figura 15 - Modelagem matemática para a resolução de problemas estruturais empregando MEF.



Fonte: Alves Filho (2013).

Figura 16 - Solução exata para um problema de tensão e deslocamento de uma estrutura.



Fonte: Alves Filho (2013).

A resposta exata para um fenômeno físico é obtida através da resolução de equacionamento empregando modelagem clássica analítica, porém em condições que envolvam geometrias complexas, a modelagem contínua se torna inviável para a simulação estrutural.

Sendo assim, o Método dos Elementos Finitos (MEF) pode ser usado tanto em análise estrutural (MARINHO, 2002), nos processos de fabricação (MOLINA; CALIL JUNIOR, 2009), como estudos que envolvam simulação de transferência de massa e calor (OCTAVIANI, 2013). Entretanto, os projetistas não têm acesso completo aos modelos matemáticos aplicados pelos *softwares* comerciais e, muitas vezes, desconhecem até mesmo a base de cálculo empregada (AZEVEDO, 2003).

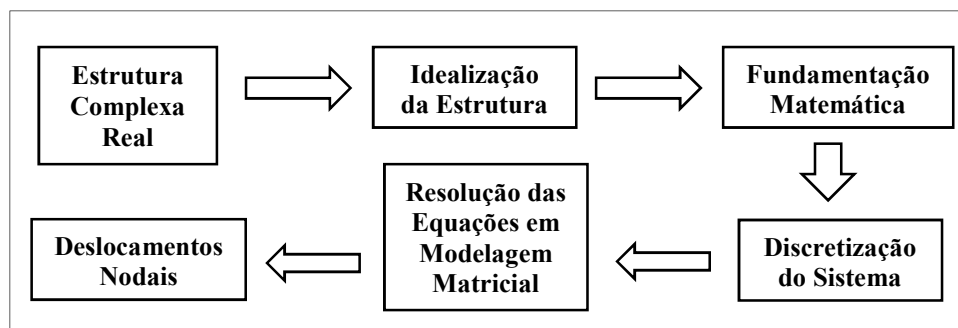
3.7.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos é baseado na ideia de subdividir um problema, constituído por um domínio de um sistema, em subdomínios menores, conhecidos por elementos, como descrito anteriormente. Aos pontos de união de cada elemento, dá-se o nome de nós.

Assim, o comportamento equivalente do sistema como um todo passa a ser representado pela contribuição individual de cada elemento do sistema, em cada nó do modelo.

Com emprego computacional, é possível resolver as equações algébricas que regem a teoria da Resistência dos Materiais para cada elemento, elaboradas a partir de suas respectivas condições de equilíbrio. Por questão de organização, a forma usual de armazenar as informações no computador, quando se utiliza os conceitos de MEF, é por meio de matrizes. Esse tipo de notação possibilita um melhor gerenciamento das equações elaboradas para cada elemento em estudo. O Fluxograma (Figura 17) ilustra as etapas do Método dos Elementos Finitos.

Figura 17 - Esquema de representação das fases para a utilização do MEF.



Fonte: Próprio Autor.

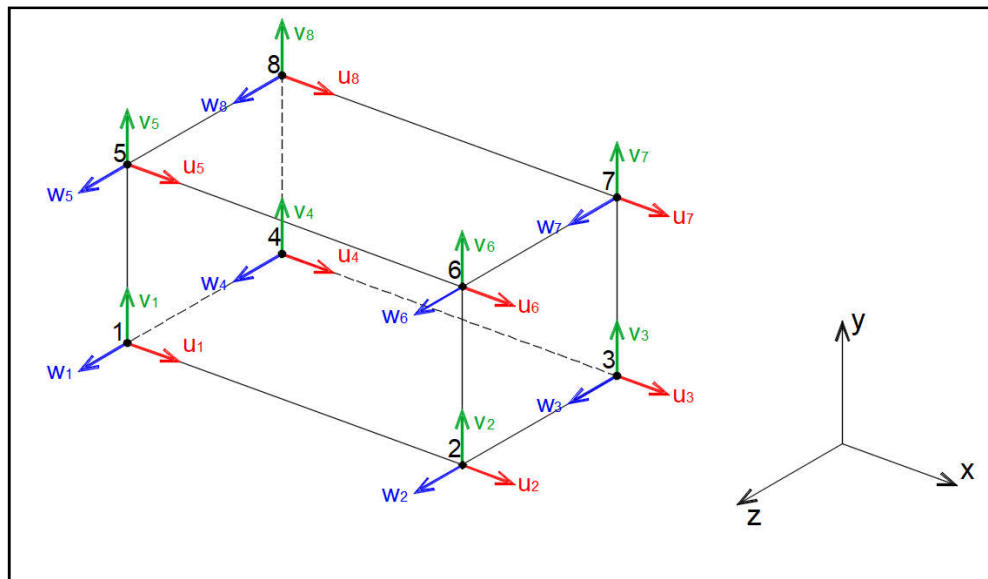
Neste trabalho, foi empregado o *Software ANSYS 19.2 Academic* suficiente para a realização da simulação estrutural do triciclo desenvolvido. O desenho da estrutura do triciclo foi elaborado em plataforma *SolidWorks* versão 2014.

Na sequência, será apresentada a modelagem matemática de MEF para um sólido hexaédrico linear, elemento empregado na simulação estrutural do triciclo desenvolvido, tendo por base a plataforma ANSYS.

3.7.3 SÓLIDO HEXAÉDRICO LINEAR-MEF

A linguagem matemática empregada para o MEF é baseada em modelagem matricial como descrito anteriormente. O Apêndice A apresenta a relação entre as forças nodais aplicadas em uma barra (elemento unidimensional) e os correspondentes deslocamentos nodais com 4 graus de liberdade. A seguir, serão apresentadas as principais características do elemento sólido denominado de hexaédrico linear (Figura 18) com geometria tridimensional.

Figura 18 - Sólido Hexaédrico Linear com os componentes de forças nodais u , v , w respectivamente nas direções x , y , z .



Fonte: Adaptado de Alves Filho (2013).

De acordo com Alves Filho (2006), a geometria tridimensional do sólido hexaédrico linear é constituída por 8 nós, sendo que cada nó apresenta três componentes de deslocamentos (u, v, w). Esse elemento possui 24 graus de liberdade.

Em forma matricial compacta, a Equação 36 apresenta a Lei de Hooke para o Elemento Sólido Hexaédrico.

$$\{f\}_{24 \times 1} = [k]_{24 \times 24} \cdot \{\delta\}_{24 \times 1} \quad (36)$$

$\{f\}$: Matriz coluna contemplando as forças aplicadas nos nós;

$[k]$: Matriz rigidez do elemento;

$\{\delta\}$: Matriz coluna contemplando os deslocamentos nodais.

O elemento sólido hexaédrico é muito empregado nas simulações envolvendo MEF para materiais com baixa compressibilidade, uma vez que possui excelentes propriedades numéricas: geração rápida e eficiente de malhas aliado a alta precisão na mecânica dos sólidos tanto em problemas envolvendo simulação estática como dinâmica (ARTIOLI, *et al.*, 2013; JOHNEN, *et al.*, 2017).

Em se tratando de um modelo matemático linear, os deslocamentos dos elementos variam linearmente ao longo das faces comuns aos elementos vizinhos (as faces adjacentes se mantem planas após a deformação). Dessa forma, os deslocamentos também serão iguais nos nós e nos contornos compartilhados entre os elementos (ALVES FILHO, 2013). Em termos de cálculos, o modelo matemático linear adotado reduz o tempo computacional sem comprometer de forma significativa, a precisão na simulação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Uma atividade importante desenvolvida pela engenharia, diz respeito ao aperfeiçoamento de dispositivos voltados a tecnologia assistiva, objetivando contribuir com recursos que permitam ampliar habilidades funcionais de pessoas com deficiências. Aqui será apresentado o material utilizado para a construção do triciclo híbrido bem como a metodologia adotada para realização dos testes práticos de desempenho e análise estrutural.

4.1 Protótipo triciclo híbrido

O triciclo de acionamento manual e elétrico (triciclo híbrido) foi projetado e construído visando baixo custo de manutenção. Alguns componentes empregados podem ser encontrados em lojas de peças de bicicletas. O motor elétrico 1000 W / 48 V sem escova (*brushless motor*) é importado da China e é comercializado no Brasil.

A estrutura do protótipo foi feita com tubos de liga de alumínio 6063-T5, diâmetro externo de 31,75 mm e espessura de 3,18 mm. Essa liga de alumínio tem 0,7 % de Mg e 0,40% de Si e apresenta uma resistência a tração de 186 MPa, resistência ao escoamento de 145 MPa, resistência ao cisalhamento de 117 MPa, resistência a fadiga de alto ciclo de 69 MPa e dureza de 60 HB, aproximadamente (BRAY, 1995).

As ligas de alumínio apresentam baixa soldabilidade quando comparado aos aços estruturais, por exemplo. Isso ocorre principalmente pela dificuldade em concentrar calor no local da solda em razão da alta condutividade térmica do alumínio puro (237 W/mK) em relação ao ferro (80,2 W/mK), isto é, as ligas de Al conduzem praticamente três vezes mais calor do que as ligas de Fe (ÇENGEL ; GHAJAR, 2012). Além disso, as ligas de alumínio apresentam uma camada superficial de óxido de alumínio (Al_2O_3), que atua tanto como isolante elétrico como um revestimento insolúvel na poça de fusão, dificultando o processo de molhagem do material de adição e passagem de elétrons (FIGUEIREDO, 2000).

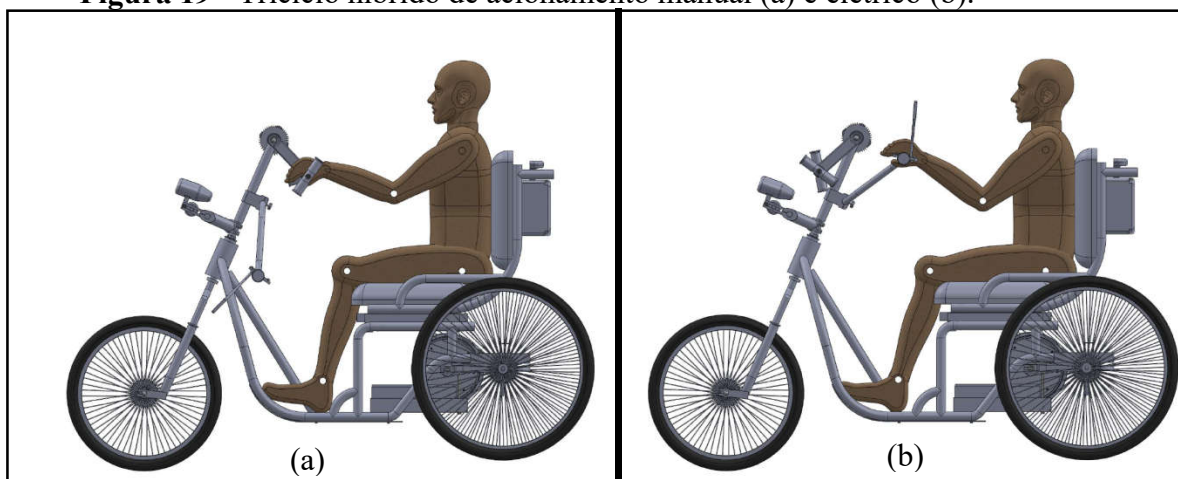
Por outro lado, as ligas de alumínio têm uma massa específica de 2,702 g/cm³ e as ligas ferrosas 7,87 g/cm³ (ÇENGEL ; GHAJAR, 2012). Então, as ligas de Al são aproximadamente 3 vezes mais leve do que o aço e assim garantido um estrutura mais leve e de elevadas propriedades mecânicas específicas, resultando no menor consumo de energia tanto no acionamento manual como elétrico.

Assim, a construção do chassi do triciclo híbrido foi realizado empregando o processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) para a soldagem dos tubos de liga de Al 6063-T5. A máquina de solda Precision TIG 225 cedida pelo fabricante Lincoln, o qual tem atuado como parceira para o desenvolvimento dessa pesquisa, foi usada na soldagem da estrutura tubular de Al 6063-T5.

Os tubos foram soldados com junta de topo no Laboratório de Máquinas Operatrizes do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP-Campus de Ilha Solteira pelo técnico de laboratório. A usinagem na extremidade dos tubos foi feita para obter um bom encaixe para a soldagem.

As etapas de fabricação do chassi do triciclo híbrido podem ser observadas pelas Figuras em anexo no Apêndice B. A empresa Kabbana Cobertura e Toldos gentilmente realizou o processo de calandragem de acordo com o modelo do chassi estabelecido em projeto, Figura 19.

Figura 19 - Triciclo híbrido de acionamento manual (a) e elétrico (b).



Fonte: Próprio Autor.

4.2 Estimativa da força manual para o acionamento cíclico do triciclo híbrido

Conforme apresentado anteriormente, empregando a Equação 4, é possível estimar o coeficiente de resistência ao rolamento de acordo com a força de acionamento cíclico manual do triciclo híbrido. Dessa forma, foi realizado um experimento para se obter a força de acionamento das alavancas por meio da adaptação de dois dinamômetros de molas da marca Kratos com fundo de escala de 10 kgf e precisão de 0,2 kgf fixados no par de alavancas (pé de vela). O ensaio foi realizado em piso não inclinado, nivelado e livre de irregularidades.

O sistema mecânico de acionamento do triciclo é composto pelo par de engrenagens (motora e movida) por transmissão por corrente que aciona um cubo da marca Shimano modelo Nexus que transmite o torque da engrenagem movida para a roda dianteira. O cubo oferece três opções de transmissão, sendo que a posição “1” fornece a maior relação de redução e menor esforço de acionamento.

A força de acionamento empregada para a obtenção do coeficiente de resistência ao rolamento foi obtida no momento em que o triciclo híbrido iniciou o movimento no plano horizontal. A Figura 20 ilustra o experimento realizado com o dinamômetro fixado nas alavancas e um usuário acionando o dinamômetro na quadra interna da UNESP-campus de Ilha Solteira.

Figura 20- Ensaio para obtenção da força de acionamento cíclico manual do triciclo híbrido.



Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 2 apresenta os dados do triciclo híbrido com acionamento manual necessários para o cálculo do coeficiente de resistência ao rolamento do equipamento empregando a Equação 4 (LIMA FILHO *et al.*, 2012).

Tabela 2 - Variáveis empregadas para o cálculo do coeficiente de resistência ao rolamento do triciclo híbrido.

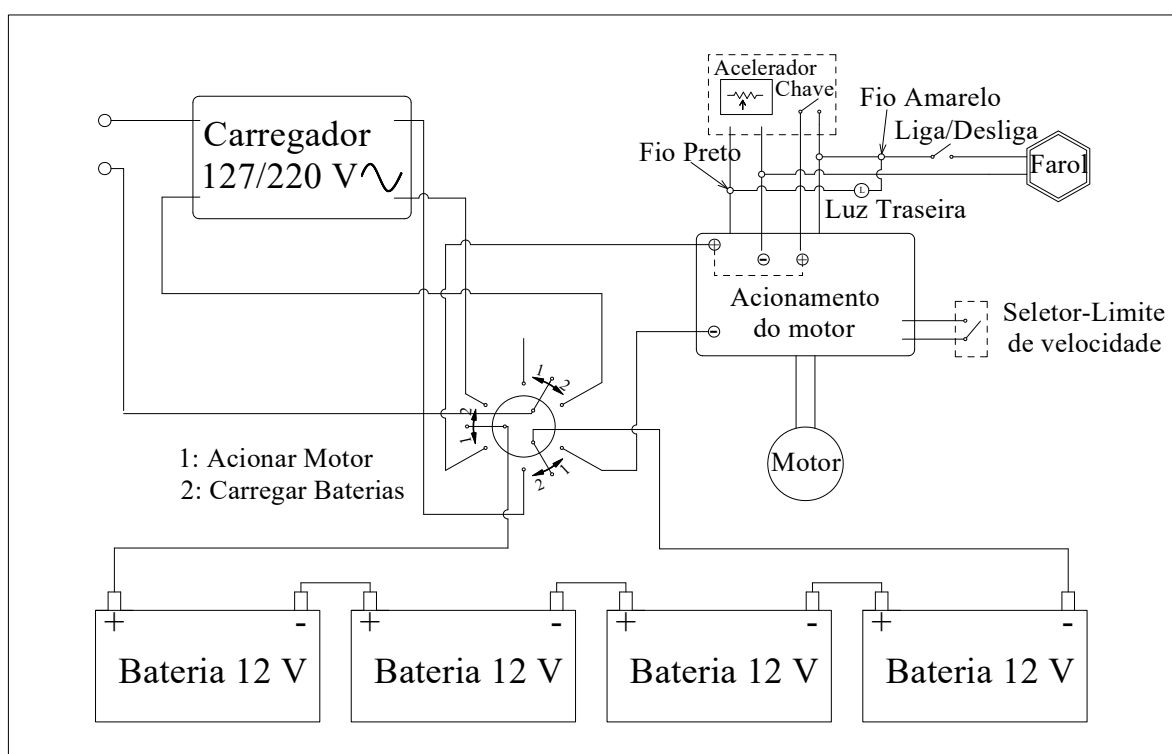
Z_1	Z_2	D [m]	P [m]	α [graus]	W [N]	n
23	22	0,60	0,18	0	1700	0,75

Fonte: Próprio Autor.

4.3 Instalação do sistema de acionamento elétrico do triciclo híbrido

O carregador foi fixado no triciclo para facilitar o carregamento das baterias por meio de uma caixa de Policloreto de Polivinila (PVC) em conjunto com a unidade de controle do motor. Esta caixa garante a segurança do condutor, além de proteger todo o sistema elétrico contra umidade. Um esquema elétrico foi elaborado para ilustrar a montagem elétrica do triciclo (Figura 21).

Figura 21 - Diagrama do circuito elétrico do triciclo híbrido.



Fonte: Próprio Autor.

O projeto de pesquisa intitulado “Equipamentos para promoção de melhor qualidade de vida de pessoas com deficiência motora” foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) e aprovado em 03 de setembro de 2014. Foi registrado pelo Certificado de Apresentação para Apreciação Ética (CAAE), na unidade de Brasília-DF, com o número 15283613.0.0000.5402. Isso possibilita avaliar o equipamento com pessoas com deficiência motora. O período junto ao CEP foi estendido por mais um ano (setembro de 2017). Na sequência, será abordado um estudo relacionado a ergonomia com o objetivo de garantir tanto a segurança, como o conforto dos usuários.

4.4 Análise de Potência

O mapeamento dos parâmetros do sistema elétrico do acionamento do triciclo foi determinado por meio de testes dinâmicos. Com essas informações, foi possível identificar as características do protótipo, por exemplo, capacidade para superar aclives, aceleração, potência elétrica, potência mecânica, autonomia, força e torque.

Para determinar o desempenho do triciclo por acionamento elétrico, foram medidos: 1. Força de tração (N); 2. Tensão nas baterias (V); 3. Corrente elétrica (A); e 4. Velocidade de deslocamento (m/s). Para cada sensor, foi elaborado um sistema de condicionamento de sinais. A obtenção dos dados foi baseada na plataforma LabVIEW com utilização do NI USB-6009 da *National Instruments*. A placa de aquisição possui 8 entradas e duas saídas, todas analógicas, com resolução de 14 bits. A Figura 22 ilustra o DAQ USB-6009 empregado. Este *hardware* funciona como uma interface entre a placa de condicionamento de sinais e o computador.

Figura 22 - DAQ NI USB-6009 da *National Instruments*.



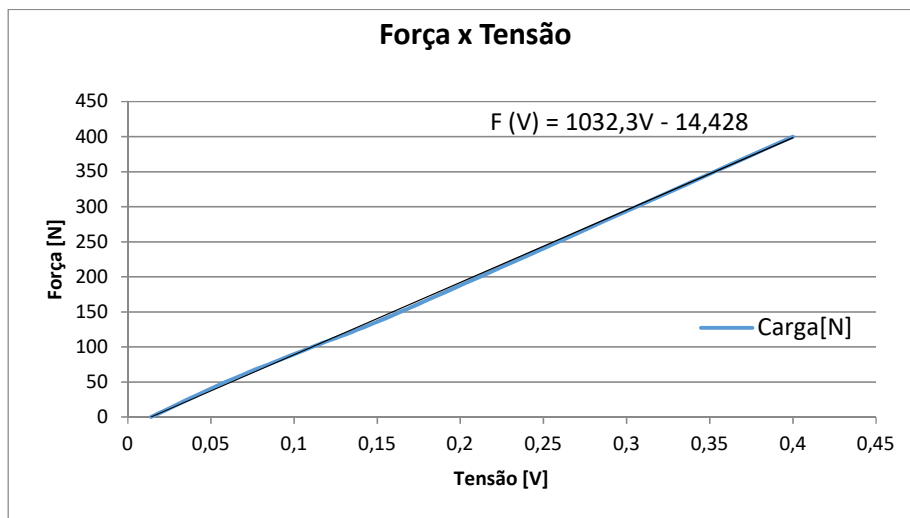
Fonte: Próprio Autor.

A seguir, uma breve descrição dos sensores e seus respectivos sistemas de condicionamento de sinais empregados são apresentados.

4.4.1 SENSOR DE FORÇA

Uma célula de carga da marca Sensortec com capacidade de 2 kN foi empregada para determinar a força do triciclo em ensaios estáticos e dinâmicos de tração. A Figura 23 ilustra a curva de calibração do sensor de força utilizado na pesquisa empregando blocos padrões de massas.

Figura 23 - Curva de calibração da célula de carga.



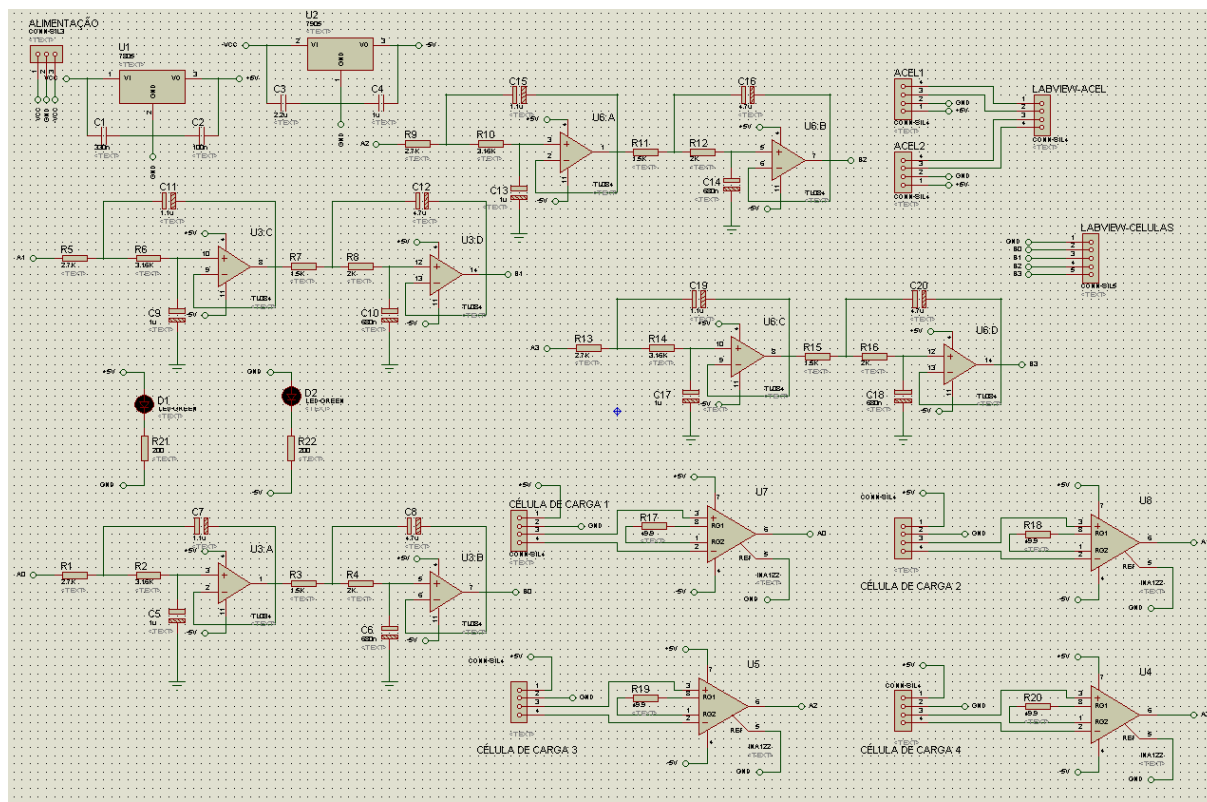
Fonte: Próprio Autor.

Um sistema de condicionamento de sinais com seis canais (quatro células de carga e dois acelerômetros), foi desenvolvido pelo Proponente em pesquisas anteriores (GARCIA JÚNIOR, 2015) e utilizado nessa pesquisa para obter o sinal proveniente da célula de carga. A Figura 24 ilustra o diagrama do circuito de condicionamento de sinais.

O circuito de condicionamento de sinais para as células de carga foi implementado utilizando quatro amplificadores de instrumentação INA 129, da *Texas Instruments*, sendo um para cada canal. Na Figura 25 é apresentado o diagrama interno do amplificador INA 129.

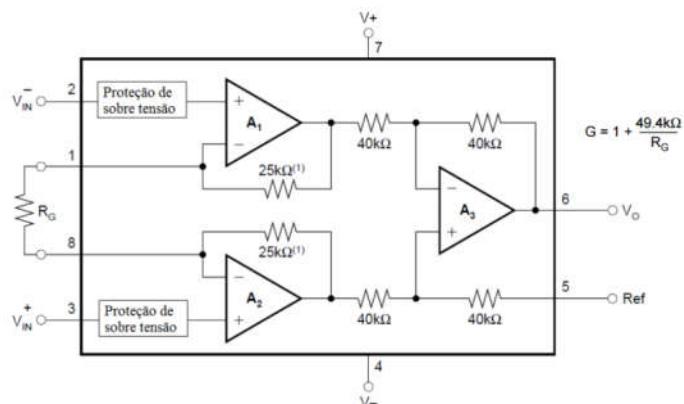
Optou-se por um ganho de modo diferencial de 990 V/V empregando um resistor de $49,9 \Omega$. Para a alimentação do circuito, foram utilizadas duas baterias de 12 volts e 6 Ah. Utilizou-se também reguladores de tensão 7805 e 7905 para construir uma fonte simétrica regulada em +5V, -5V. Esse arranjo fornece uma tensão de entrada constante para a alimentação do sistema.

Figura 24 - Diagrama do circuito de condicionamento de sinais para a célula de carga.



Fonte: Garcia Júnior (2015).

Figura 25 - Diagrama elétrico do INA 129.



Fonte: Adaptado de Burr Brown Corporation (2005).

4.4.2 SENSOR DE CORRENTE ELÉTRICA

Um resistor tipo *shunt* foi instalado em série com as baterias para determinar a corrente elétrica transmitida ao motor.

De acordo com o fabricante, esse dispositivo fornece uma queda de tensão de 50 mV quando uma corrente de 30 A circula sobre ele (resistência interna de 1,66 m Ω). A Figura 26 ilustra o resistor fixado na estrutura do triciclo e ligado em série com as baterias.

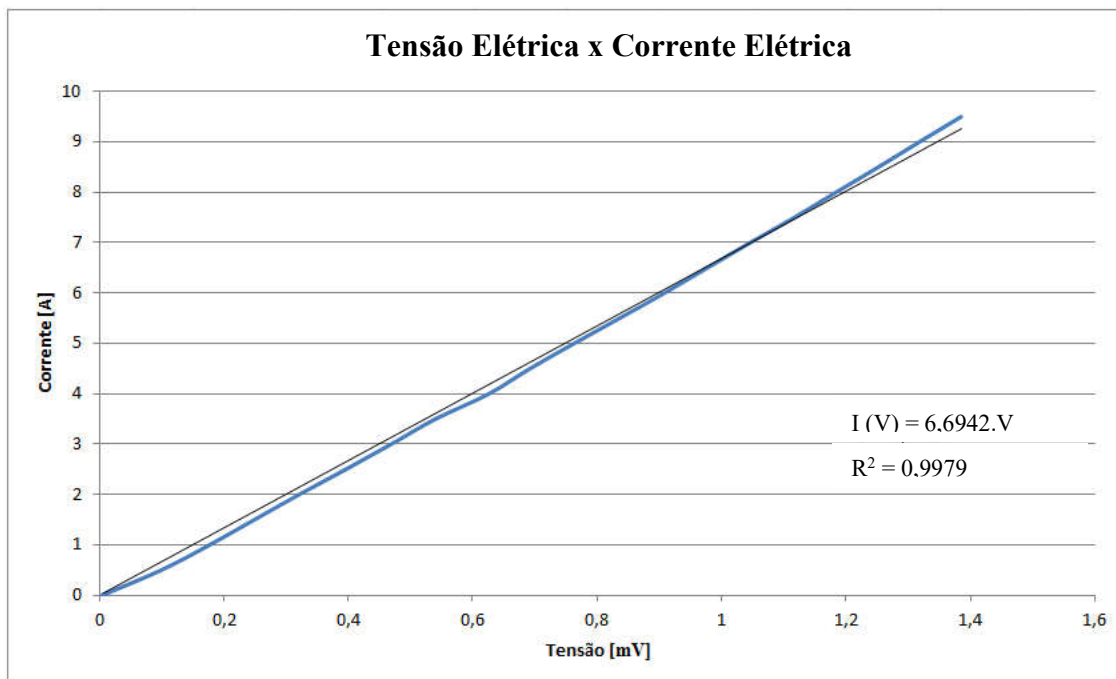
Figura 26 - Resistor *Shunt* acoplado ao triciclo.



Fonte: Próprio Autor.

Testes de bancada foram realizados para determinar a resistência elétrica real. Para isso, duas fontes CC (corrente contínua) Minipa modelo MPL-3305M de 520 W de potência máxima foram conectadas em paralelo e utilizadas para a calibração do dispositivo. Essa configuração foi empregada para fornecer uma corrente elétrica suficientemente alta (9,5 A) para calibrar a resistência *shunt*. Para identificar a queda de tensão entre os terminais do resistor, um multímetro de bancada da marca Agilent modelo 34410A foi utilizado. Dessa forma, a curva de tensão elétrica por corrente elétrica foi obtida. A corrente elétrica máxima adotada no ensaio foi de 9,5 A, limitada pela potência das fontes ligadas em paralelo. A limitação foi necessária, em razão da potência máxima disponibilizada pelas fontes (5 A por fonte). A Figura 27 ilustra a curva de calibração obtida no ensaio empregando a resistência *Shunt*.

Figura 27 - Curva de calibração da resistência *Shunt*.

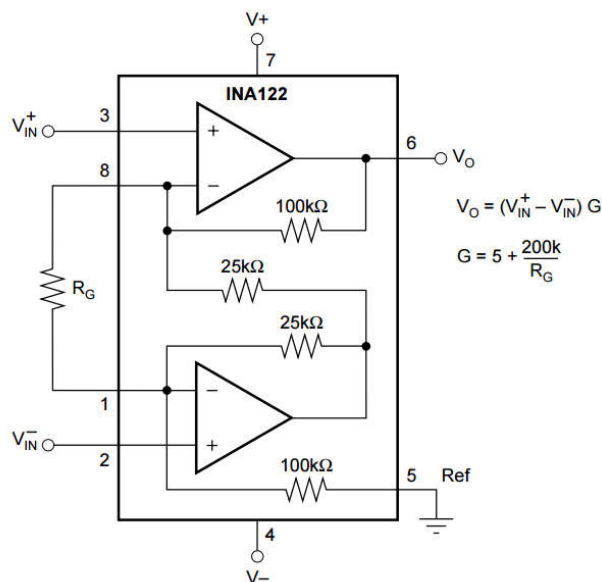


Fonte: Próprio Autor.

Com os dados, foi possível identificar uma resistência elétrica de $0,15 \text{ m}\Omega$ a qual é diferente da especificação do fabricante como descrita anteriormente. Assim, os sinais gerados pelo sensor de tensão instalado em série com as baterias no triciclo são confiáveis.

Para a elaboração do sistema de condicionamento de sinais para o sensor de corrente elétrica, foi utilizado um Amplificador Operacional INA 122 para a amplificação da queda de tensão fornecida pela resistência *Shunt*. A Figura 28 ilustra o diagrama elétrico do INA 122 da marca *Texas Instruments*.

Figura 28 - Diagrama elétrico do INA 122.



Fonte: Adaptado de Burr Brown Corporation (2005).

Um resistor de 200Ω foi adicionado ao circuito (R_G). Dessa forma, a queda de tensão no resistor *shunt* ($0,15 m\Omega$) foi amplificada por cerca de 1005 vezes, fornecendo condições de leitura pelo sistema de aquisição de dados.

No programa elaborado em LabVIEW, foi possível calcular a corrente elétrica no motor *brushless* por meio da Equação 37.

$$I = \frac{U}{1005 \cdot R} \quad (37)$$

I: Corrente elétrica no motor [A];

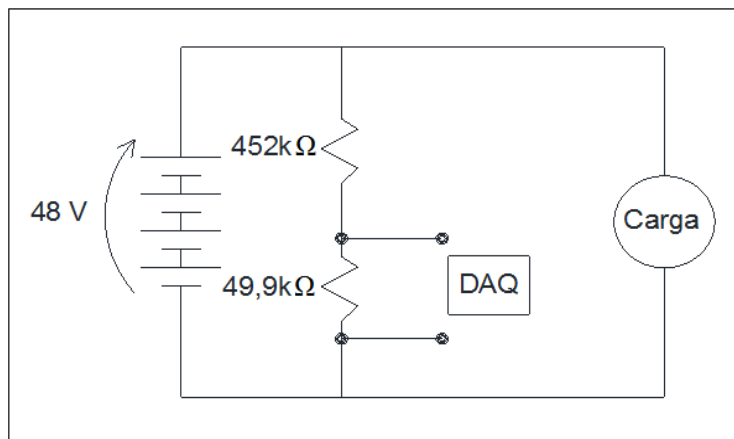
U: Queda de tensão entre os terminais do resistor *shunt* [V];

R: Resistor *shunt* ($0,15 m\Omega$).

4.4.3 SENSOR DE TENSÃO ELÉTRICA

Um divisor de tensão foi elaborado para servir como condicionador de sinais. Dessa forma, a tensão máxima fornecida ao DAQ é de aproximadamente 4,8 V quando o motor estiver em espera (*standby*). A Figura 29 ilustra o diagrama elétrico do circuito elaborado.

Figura 29 - Esquema elétrico do condicionador de sinais para a tensão das baterias.



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com o diagrama elétrico do circuito (Figura 29), a medida que o motor elétrico sem escova é acionado, ocorre uma queda de tensão nos terminais ligados ao DAQ na mesma proporção da queda de tensão das baterias. A Figura 30 ilustra a bancada elaborada para fixar o sistema de condicionamento de sinais, as baterias e o *notebook* (Itautec Intel Core 2 Duo) que foram utilizados nos testes.

Figura 30 - Bancada de instrumentação fixada na traseira do triciclo híbrido.



Fonte: Próprio Autor.

4.4.4 SENSOR DE VELOCIDADE

Foi empregado um sensor tipo *pick-up* para determinar a velocidade de deslocamento do triciclo durante a realização dos testes práticos. A Figura 31 ilustra o sensor acoplado ao raio da roda traseira esquerda do equipamento.

Figura 31 - Sensor de velocidade tipo *pick-up* instalado em um dos raios da roda traseira lado esquerdo do triciclo híbrido.



Fonte: Próprio Autor.

O princípio de funcionamento desse sensor é baseado em uma excitação de tensão induzida por um corpo com propriedades magnéticas e um ímã permanente. Na montagem do sensor tipo *pick-up* no triciclo, o corpo magnético (constituído por um pequeno bloco cilíndrico de aço ferromagnético) foi fixado na própria estrutura do triciclo, enquanto que o ímã permanente foi instalado em um dos raios da roda traseira direita do triciclo. Com essa configuração de montagem, um pequeno pulso de tensão é induzido sempre que o bloco cilíndrico se aproximava do ímã, em todos os ciclos completos de rotação realizados pela roda. Essa informação indica de forma direta, o período de rotação da roda. Esse sinal foi transmitido diretamente ao sistema de aquisição de dados (DAQ 6009) e convertido em velocidade no próprio programa em LabVIEW (Equação 38).

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{P} \quad (38)$$

V: Velocidade de deslocamento do triciclo [m/s];

r: raio da roda [m];

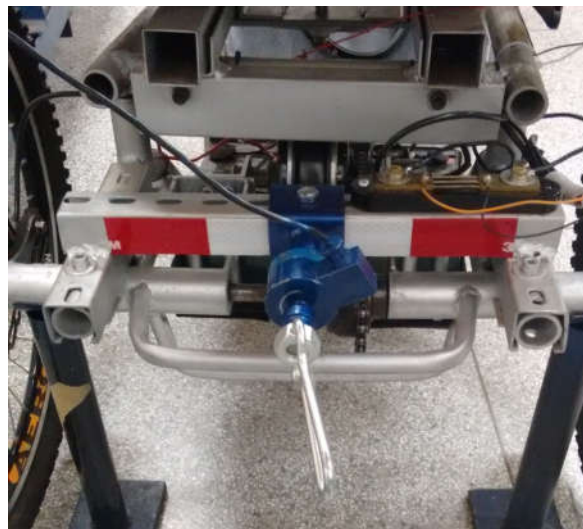
P: Período [s].

4.5 Análise em pista

Testes de pista foram realizados utilizando o acionamento elétrico para determinar a capacidade dinâmica do triciclo híbrido de acordo com o seu desempenho. Assim, para determinar as características do motor *brushless* (sem escovas), testes de reboque foram realizados. Uma carga inercial foi empregada com o objetivo de manter constante a velocidade de deslocamento do triciclo com acionamento em potência máxima.

Dessa forma, foi empregado um trator John Deere modelo 5090E com 90 cv de potência e aproximadamente 5000 kg. O triciclo de aproximadamente 700 N foi acoplado na parte frontal do trator por meio de um cabo de aço de 3/16” de diâmetro. Um dispositivo para acoplamento do cabo de aço ao triciclo foi construído. A Figura 32 ilustra o suporte da célula de carga fixada ao triciclo em conjunto com a célula de carga.

Figura 32 - Suporte de fixação da célula de carga ao triciclo.



Fonte: Próprio Autor.

Após realizar o acoplamento entre o trator e o triciclo (com ambos os equipamentos estacionados), o motor elétrico do triciclo foi acionado na potência máxima. Na sequência, a velocidade do trator (massa inercial) foi gradativamente aumentada para obter a força gerada pelo triciclo híbrido. Velocidades crescentes no trator de até 5 m/s aproximadamente foram adotadas para a realização dos testes de arraste no plano.

Um tempo mínimo de aproximadamente 8 segundos foi empregado para cada intervalo de velocidade que foi suficiente para gerar os dados (1000 pontos por segundo) provenientes da célula de carga (e demais sensores) usada no experimento. Os testes foram repetidos por três vezes. A Figura 33 ilustra a montagem do experimento.

Figura 33 - Montagem experimental na rodovia SP 595.



Fonte: Próprio Autor.

O experimento foi conduzido na Rodovia dos Barrageiros que liga Ilha Solteira a Santa Fé do Sul (SP 595), próximo ao km 72 em região com ausência de desnível.

Para efeito de cálculos, os dados obtidos pelos sensores de carga, tensão elétrica e corrente elétrica foram convertidos em rms (*root mean square*). A Equação 39 foi empregada para os cálculos dos valores rms discretizados. A taxa de aquisição de dados foi de 1 kHz como citado anteriormente.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (39)$$

N e x_i são respectivamente o número de pontos da amostragem e cada ponto da variável.

Com os dados obtidos foi possível calcular a potência elétrica e mecânica do equipamento. As Equações 40 e 41 foram empregadas para realizar o cálculo da potência elétrica e potência mecânica, respectivamente.

$$P_{el} = IU \quad (40)$$

P_{el} : Potência Elétrica [W]

I: Corrente Elétrica [A]

U: Tensão Elétrica [V]

$$P_{mec} = \frac{\delta W}{\delta t} = \frac{\delta(Fx)}{\delta t} = F \frac{\delta x}{\delta t} = FV \quad (41)$$

P_{mec} : Potência Mecânica [W]

δW : Energia [J]

δt : Tempo [s]

F: Força [N]

V: Velocidade [m/s]

x : Deslocamento [m]

Com os dados referentes a potência elétrica (Eq. 40) e potência mecânica (Eq. 41), é possível obter a eficiência energética do conjunto (Eq. 42).

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{el}} \quad (42)$$

η : eficiência energética

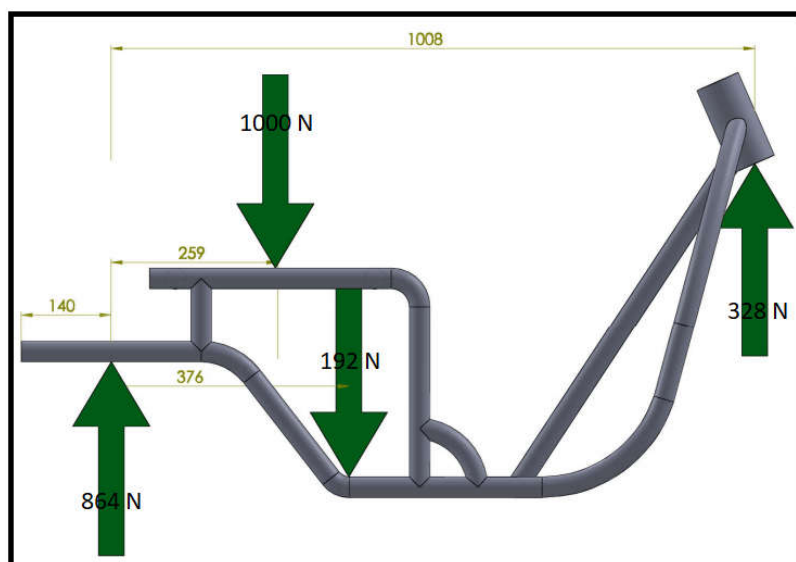
4.6 Análise de Tensão Mecânica

A análise de tensão mecânica é importante para se obter os pontos de concentração de tensão e verificar os níveis de esforços solicitados de acordo com o carregamento imposto sobre a estrutura tubular. Para a realização da simulação estática, foram definidos como pontos de fixação da estrutura, o eixo traseiro e a extremidade dianteira constituída pelo tubo de fixação do garfo do triciclo híbrido.

Foi considerado uma força de 1000 N na região de apoio do assento e uma força de 192 N correspondente às baterias. O sistema de fixação do motor *brushless* está posicionado sobre o eixo traseiro. Dessa forma, para a simulação estrutural estática do chassi, foi desconsiderado a massa do motor (7,5 kg). A Figura 34 apresenta de forma esquemática, a distribuição de forças sobre a estrutura do triciclo.

Além dos ensaios estáticos, foi realizada uma análise modal na estrutura visando a obtenção dos modos de vibrar do chassi.

Figura 34 - Pontos de aplicação de carga sobre a estrutura do chassi.



Fonte: Próprio Autor.

A Seção 5 (Resultados e Discussão) apresenta os dados obtidos referentes aos testes e simulações para a validação da estrutura do triciclo tanto dinâmica como estática para pessoas com deficiência motora dos membros inferiores.

O ponto de partida para realizar uma simulação em elementos finitos envolvendo parâmetros de tensão e deformação, consiste na elaboração do desenho em *software* adequado e compatível com o programa de simulação. Conforme citado anteriormente, o desenho foi elaborado em plataforma SolidWorks para posteriormente ser exportado ao programa ANSYS. Após o desenvolvimento do desenho, foi iniciado o processo de ajustagem do programa ANSYS.

Empregando a ferramenta de modelagem *Design Modeler* do ANSYS, foi possível remodelar e ajustar o desenho. Nessa etapa, foram eliminadas inconsistências que poderiam gerar incompatibilidade na geração de malhas, tais como sobreposições de componentes e espaços vazios nas regiões de união entre as seções da estrutura.

Outra modificação importante realizada por meio do *software* de simulação foi converter todo o chassi (estrutura do triciclo) em uma superfície de casca fina (*Surfaces from Faces*). O uso dessa ferramenta oferecida pelo ANSYS faz com que modelos contendo elementos tubulares ou de pequenas espessuras, sejam tratados pelo programa como geometrias mais simples, impactando diretamente na capacidade de processamento. Isso se dá em virtude da malha criada pelo *software* ser mais uniforme quando comparada às malhas de corpos sólidos.

A utilização do *Design Modeler* possibilita ocultar o corpo sólido que deu origem a casca e suprimir os orifícios nas extremidades dos tubos, eliminando dessa forma os efeitos de descontinuidades na estrutura.

Foram adicionadas as propriedades dimensionais (espessura do tubo-3,18 mm) e mecânicas do material (Poisson – 0,33 e Módulo de Young – 70 GPa) por meio da tela inicial do *workbench* para a realização das análises modais e estruturais.

A elaboração da malha (processo de subdivisão da estrutura em elementos finitos) foi realizada empregando o recurso *MultiZone* no próprio *software* de simulação. Foi selecionado o método tetraedros (*tetrahedral*) com elementos predominantemente hexaédricos (*Hex Dominant*) como descrito anteriormente. O programa oferece recursos que possibilitam limitar a dimensão dos elementos. Dessa forma, para a simulação, adotou-se um tamanho máximo de 5 mm para cada elemento.

A ferramenta *midside nodes* foi empregada visando um aumento no número de nós intermediários dos elementos hexaédricos. Dessa forma, o número de nós foi alterado de 8 para 20, aumentando conseqüentemente a quantidade de equações em razão da interpolação de informações presentes em cada elemento (curvas que caracterizam o deslocamento do elemento), favorecendo dessa forma a precisão da simulação numérica. A malha resultante foi composta por aproximadamente 30 mil elementos.

É importante ressaltar que a confiabilidade dos resultados está intimamente ligada ao tamanho dos elementos sólidos. Neste caso, elementos grandes irão fornecer uma malha grosseira cuja quantidade de elementos pode não ser o suficiente para caracterizar o problema. Por outro lado, uma malha mais refinada fornece resultados mais confiáveis, porém exigem maior capacidade e tempo de processamento (JOHNEN *et al.*, 2017).

4.7 Ensaio de Carga e Deslocamento da Estrutura do Triciclo Híbrido

Um ensaio estático de carregamento foi realizado com o objetivo de avaliar o deslocamento da estrutura do triciclo. Dessa forma, foi empregado um relógio comparador da marca Mitutoyo analógico com precisão de $\pm 0,005$ mm com fundo de escala de 1 mm e suporte de fixação com base magnética (Figura 35).

Figura 35 - Relógio comparador Mitutoyo com suporte de fixação.



Fonte: Próprio Autor.

Para realizar o carregamento, 10 blocos de concreto foram selecionados e suas massas identificadas por meio de uma balança digital da marca Toledo do Brasil com precisão de 0,2 kg. A Tabela 3 indica a massa de cada bloco utilizado no ensaio.

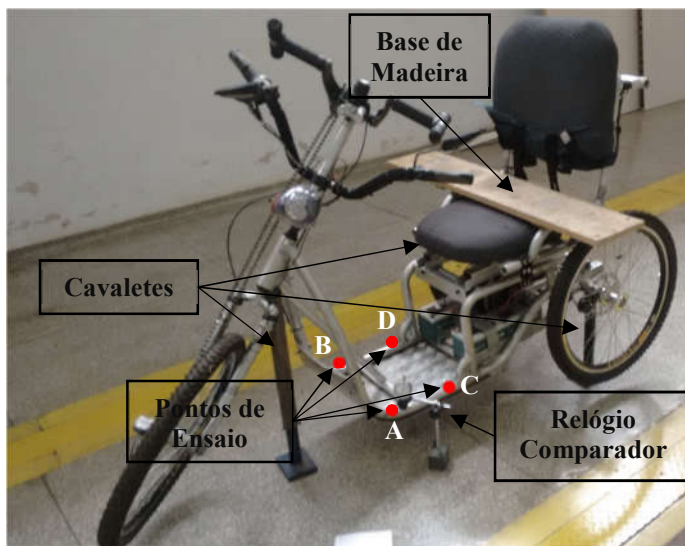
Tabela 3 - Identificação dos blocos de concreto e suas respectivas massas.

Identificação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Massa [kg]	12,02	12,53	11,69	12,08	12,29	12,02	12,19	12,35	12,17	12,35
Acumulado [kg]	12,02	24,55	36,24	48,32	60,61	72,63	84,82	97,17	109,34	121,69

Fonte: Próprio Autor.

Três cavaletes de aço AISI (*American Iron and Steel Institute*) 1020 foram elaborados para apoiar a estrutura do triciclo híbrido. Dois foram posicionados nas extremidades do eixo traseiro e um foi posicionado na região dianteira do chassi (suporte do guidom do triciclo). A Figura 36 ilustra a montagem experimental do ensaio de carregamento.

Figura 36 - Montagem do ensaio de carregamento.



Fonte: Próprio Autor.

Essa montagem elimina os efeitos de deslocamento das rodas e pneus. Dessa forma, a leitura registrada pelo relógio comparador fica restrita ao deslocamento do chassi de alumínio do triciclo somada ao deslocamento dos cavaletes. Para a análise dos resultados, o deslocamento dos cavaletes em virtude da tensão de compressão no ensaio de carregamento foi desprezado, visto que a carga máxima aplicada (aproximadamente 1200 N) não é suficientemente alta para comprometer os resultados.

O carregamento da estrutura foi realizado empilhando gradualmente os blocos sobre o assento do banco do triciclo, sempre respeitando a sequência de identificação das cargas (de 1 a 10). A massa acumulada em cada etapa do ensaio está identificada na Tabela 3. Uma base de madeira foi empregada para servir de apoio aos blocos de concreto. O deslocamento da estrutura foi analisado em 4 pontos (A, B, C, D) localizados abaixo da plataforma de apoio dos pés (Figura 36) do triciclo. Em cada ponto, foram realizadas três repetições de carregamento, sendo os resultados apresentados estatisticamente, considerando uma confiabilidade de 95%.

O ensaio foi realizado no Laboratório Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE) do Departamento de Engenharia Civil da Unesp campus de Ilha Solteira. O local apresenta uma base de concreto que minimiza efeitos de vibração por fontes externas que poderiam eventualmente interferir no experimento (leitura no relógio comparador).

4.8 Ensaio de tração do material usado na estrutura do triciclo híbrido tubular

Cinco amostras de 250 mm de comprimento da estrutura tubular do triciclo de Al 6063-T5 sem solda e soldadas foram encaminhadas a CBA (Companhia Brasileira de Alumínio) para ensaio de tração e metalografia, Figura 37. O ensaio de tração, de acordo com a norma NBR 7549/1982 Alumínio, Magnésio e suas Ligas- Ensaio de tração dos produtos dúcteis e fundidos, foi realizado para obter os valores do limite de escoamento, limite de resistência a tração e a deformação da liga Al 6063-T5 empregado na estrutura do triciclo híbrido sem solda e com solda.

Na CBA, somente quatro corpos de prova para cada condição foram preparados para ensaio de tração. As Figuras 38, 39, 40 e 41 ilustram os corpos de prova elaborados pela CBA. A máquina de ensaio de tração da marca EMIC com célula de carga com fundo de escala de 2000 kgf – Trd 29, extensômetro Trd 4 foi empregada, Anexo 1.

A CBA, localizada na cidade de Alumínio – SP, gentilmente disponibilizou as facilidades do Laboratório da Empresa para colaborar com a nossa pesquisa.

Figura 37- Corpos de prova de tubos de liga de alumínio 6063-T5 com solda (direita) e sem solda (esquerda) encaminhados à CBA. Comprimento 250 mm.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 38- Tubo soldado, face voltada para o interior do tubo.



Fonte: Adaptada da CBA (2018).

Figura 39- Tubo soldado, face voltada para o exterior do tubo.



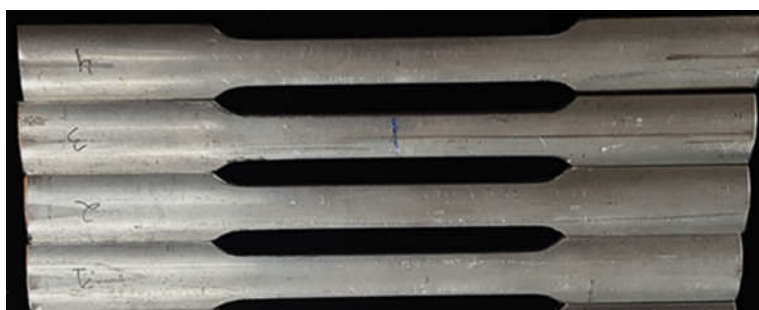
Fonte: Adaptada da CBA (2018).

Figura 40- Tubo sem solda, face voltada para o interior do tubo.



Fonte: Adaptada da CBA (2018).

Figura 41- Tubo sem solda, face voltada para o exterior do tubo.



Fonte: Adaptada da CBA (2018).

4.9 Ensaio metalográfico dos tubos da estrutura do triciclo híbrido sem solda e com solda

O estudo metalográfico dos tubos da liga de alumínio 6063-T5 com solda e sem solda foi feito com o objetivo de identificar a microestrutura do material e eventuais descontinuidades nos pontos de solda. A análise metalográfica foi feita na CBA por um microscópio óptico marca Olympus BX51, seguindo as seguintes etapas:

1. Sequência de lixas – 220; 440; 800 e 1200;
2. Polimento manual – abrasivo alumina; e
3. Polimento mecânico final: sílica coloidal.

Não foi aplicado ataque por reagente químico nas amostras para revelar microconstituintes e contornos de grão. Entretanto, um microscópio de luz polarizada foi empregado para identificar o tamanho de grão do metal base, da zona termicamente afetada, cordão de solda e eventuais defeitos na soldagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Construção da estrutura tubular do triciclo híbrido

O projeto desenvolvido, tem por um dos objetivos o baixo custo de fabricação e manutenção por empregar componentes de bicicleta. Considerando um valor total de fabricação de R\$3.298,00 sem considerar impostos sobre produtos industrializados (IPI), pois a lei 10425/18 está em análise no Congresso Nacional para isentar IPI sobre produtos de Tecnologia Assistiva. Por outro lado, os modelos de acionamento elétrico comercializados nos últimos anos podem variar de R\$5.500,00 até R\$12.000,00. A Tabela 4 indica os valores referentes ao material empregado para a construção do triciclo híbrido.

Tabela 4 - Valor do material empregado para a construção do triciclo híbrido (dados de 2013).

Componente	Valor [R\$]
Tubos e chapas de alumínio	300,00
Serviço de bicicletaria	150,00
Conjunto de freio hidráulico	170,00
Conjunto de rodas e pneus	160,00
Conjunto motor <i>brushless</i> /1000 W	1450,00
Caixa de Centro Shimano	34,00
Conjunto de transmissão traseira <i>Dream Bike</i>	330,00
Conjunto de pedais dianteiros	109,00
Cubo Shimano Nexus Freio Contra Pedal	300,00
Conjunto corrente/engrenagem (relação)	30,00
Conjunto do guidom	45,00
Sistema de sinalização	150,00
Estofamento do assento	70,00
Total	3298,00

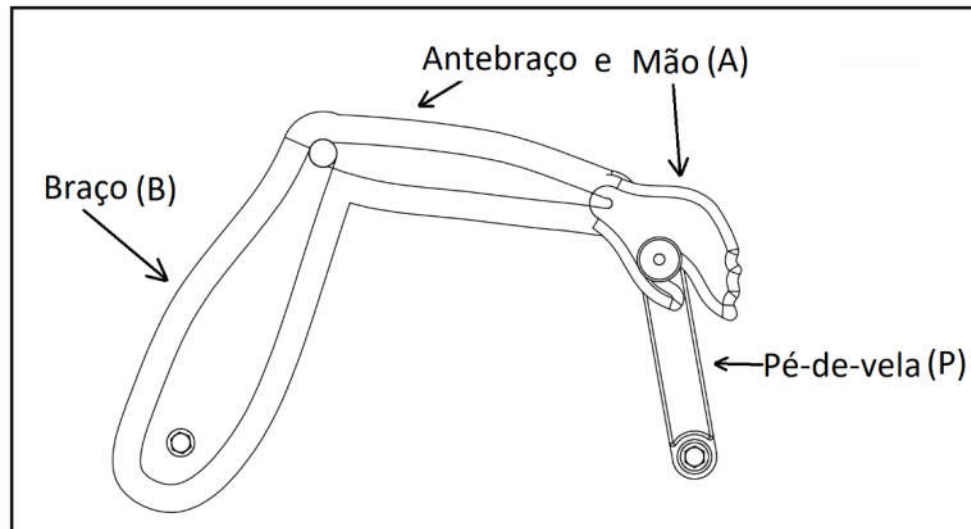
Fonte: Próprio Autor.

O protótipo construído tem como vantagens em relação aos concorrentes: 1-a capacidade de superar obstáculos, tais como buracos e rampas de até 20° e 10° com acionamento elétrico e manual respectivamente (dados não citados no manual dos equipamentos disponíveis no comércio); 2-o conforto aliado a segurança do equipamento; 3-o *design* inovador desenvolvido pelo perfil do chassi; 4- a possibilidade de praticar atividade física por meio do acionamento cíclico manual; 5- a capacidade de se locomover em longas distâncias (autonomia de até 40 km em uso urbano); e 6- acionamento manual caso ocorra defeito no acionamento elétrico. Estas características serão analisadas ao longo do estudo.

5.2 Ergonomia

A análise da Ergonomia é fundamental neste trabalho, pois estuda a ação do corpo humano sobre a propulsão manual do triciclo. A seção “3.3 Estudo da Ergonomia” apresentou uma revisão detalhada sobre o assunto nesta pesquisa. A Figura 42 ilustra o acoplamento e a ação dos membros superiores e o sistema de propulsão manual do protótipo projetado neste trabalho.

Figura 42 – Modelagem do sistema cíclico de propulsão manual.



Fonte: Próprio Autor.

O sistema é semelhante a um mecanismo de 5 barras, porém, para o desenvolvimento da modelagem matemática, algumas considerações são apresentadas a seguir:

- 1- A região dorsal deve estar em contato permanente com o apoio das costas do assento para garantir melhor apoio durante o ciclo de movimento;
- 2- A posição da articulação dos ombros deve estar na mesma altura da caixa de centro do pé-de-vela (pedal reposicionado);
- 3- O movimento angular entre o antebraço e a mão foi desconsiderado. Dessa forma, o modelo matemático empregado se assemelha ao mecanismo de 4 barras como descrito anteriormente;
- 4- O ponto referencial de empunhadura, acionamento da manivela, foi considerado como a parte central da palma da mão; e

5- O manequim empregado foi do sexo masculino, pois como analisado anteriormente, os membros superiores femininos são ligeiramente superiores.

Para atender aos critérios de Grashof (elementos de quatro barras), conforme apresentado anteriormente pela Equação 3:

$$P + L \leq A + B$$

P: Comprimento do pé-de-vela;

L: Menor distância entre a articulação dos ombros e a caixa de centro do pé-de-vela;

A: Comprimento do antebraço e o centro da palma da mão; e

B: Comprimento do braço.

Considerando a distância entre o ponto de articulação dos ombros e o centro do pé de vela (L) igual a 48 cm, têm-se que:

$$18 + 48 \leq 0,209H + 0,189H \Rightarrow H \geq 165,8 \text{ cm}$$

Dessa forma, de acordo com a Figura 4, que apresenta a estatura média da população brasileira de acordo com a idade, pode-se afirmar que as dimensões do triciclo implementado, acomoda uma pessoa de ambos os sexos com idade igual ou superior a 14 anos.

Araújo (2009) cita que pessoas com paraplegia apresentam a zona inferior do corpo subdesenvolvida em decorrência da ausência de atividades físicas. Como consequência, ocorre um alargamento do quadril em razão do acúmulo de massa corporal na região do abdômen e atrofia muscular nos membros inferiores. Por outro lado, o modelo de propulsão convencional das cadeiras de rodas estimula o desenvolvimento muscular dos membros superiores. Dessa forma, a região da clavícula e escápula, que formam a região dos ombros, os braços e todo o tronco, apresentam um maior desenvolvimento quando comparado aos demais membros do corpo.

O acionamento elétrico pode ser operado por pessoas de ambos os sexos com estatura acima de 165,8 cm sem comprometer a dirigibilidade do equipamento.

5.3 Análise do Acionamento Manual no Plano Horizontal e Inclinado

Empregando a Equação 4 desenvolvida por Lima Filho *et al.* 2012, foi obtido um valor de 0,0157 para o coeficiente de resistência ao rolamento (μ) do triciclo híbrido em um ensaio prático realizado em ambiente livre de desnível ($\alpha=0$). A Figura 43 ilustra a leitura de 1,5 kgf obtida em um dos diâmetros durante o ensaio de força.

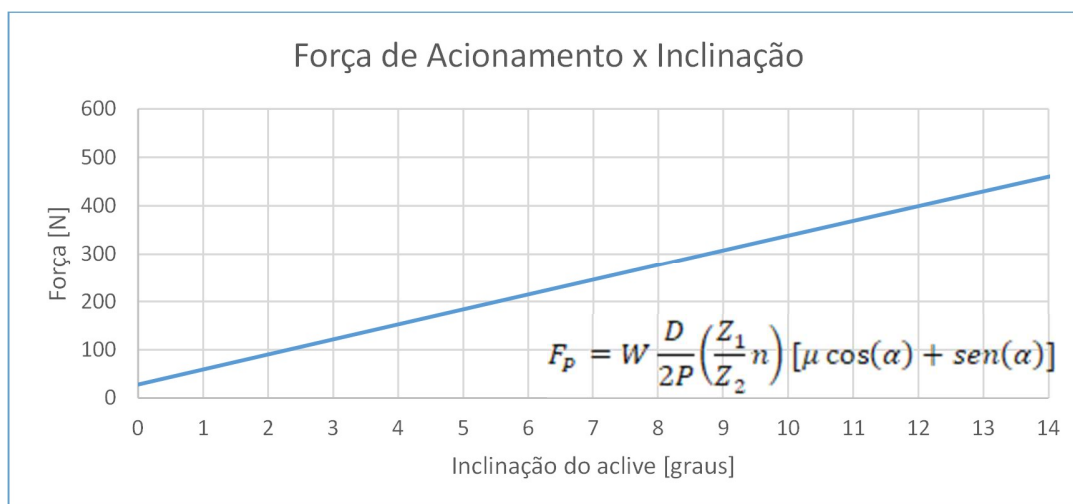
Figura 43 - Ensaio da força aplicada no acionamento manual do triciclo híbrido. Vista geral e detalhe da leitura no dinamômetro Krato de fundo de escala de 20 kgf.



Fonte: Próprio Autor.

Para efeito de cálculos, foi considerada a leitura de ambos os dinamômetros (3 kgf) na eminência de movimento do triciclo híbrido por acionamento manual. A Figura 44 ilustra a força de acionamento manual do equipamento de acordo com o ângulo de inclinação do terreno em condição de subida.

Figura 44 – Força de acionamento cíclico manual do triciclo híbrido em função da inclinação do aclave considerando um usuário de 800 N.



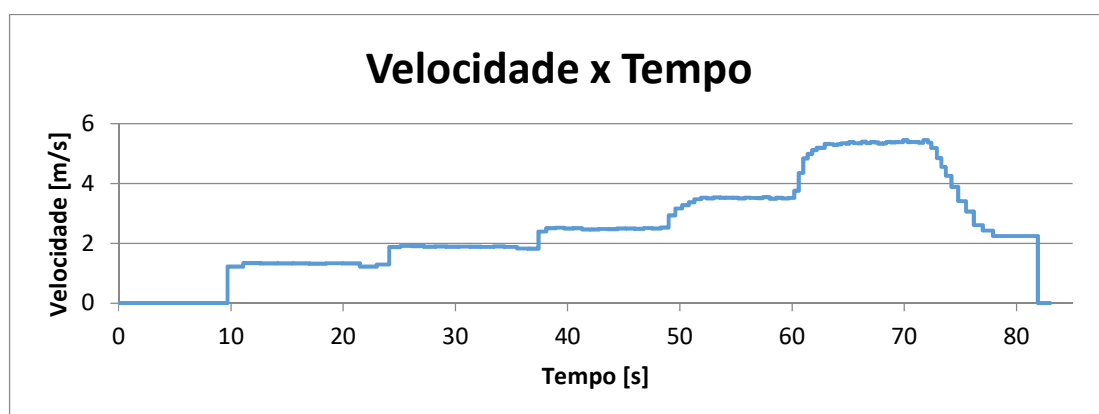
Fonte: Próprio Autor.

Considerando uma força motriz de 420 N para uma pessoa hígida de 800 N do sexo masculino (ROGATTO, 2003), é possível realizar uma subida empregando o acionamento manual de até 12°, aproximadamente.

5.4 Análise do Acionamento Elétrico do Triciclo Híbrido em Pista

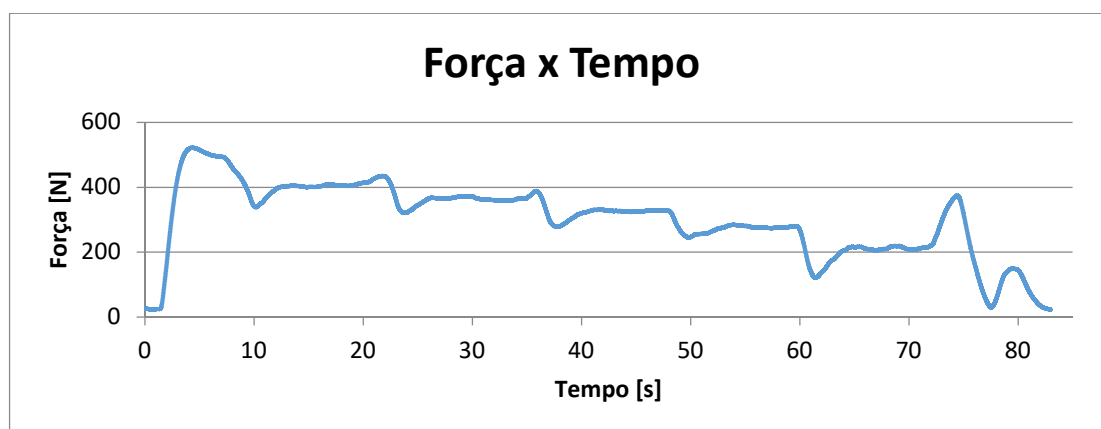
Utilizando o sistema de sinais e dados montados neste trabalho foi possível mapear as características do motor *brushless* de 1000 W do triciclo híbrido para os testes realizados junto a uma massa inercial de 5000 kg (trator). As Figuras 45, 46, 47 e 48 ilustram, respectivamente, os dados de velocidade, força, tensão e corrente elétrica obtidos no ensaio realizado.

Figura 45 - Velocidade de deslocamento do triciclo híbrido em função do tempo.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 46 - Força de tração do triciclo híbrido sobre o trator em função do tempo.



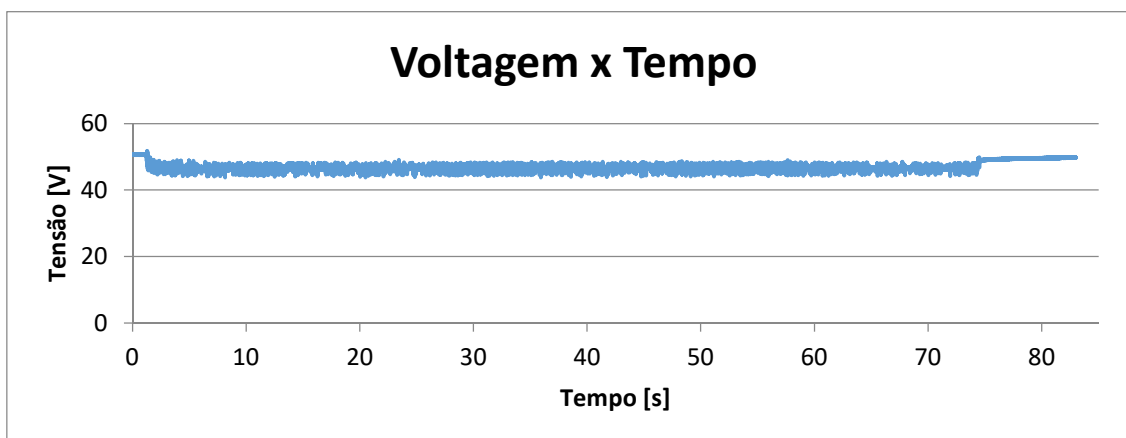
Fonte: Próprio Autor.

Para o cálculo de potência mecânica, é importante que em cada condição de velocidade, não haja aceleração. Analisando a Figura 45, é possível identificar a ausência de variação de velocidade em cada intervalo de teste.

Em relação a curva de força (Figura 46), observa-se que no início ou no final de cada intervalo existe um regime transiente justificado pela variação da quantidade de movimento do triciclo híbrido tracionando o trator. Assim, a aceleração durante a mudança de velocidade ocorre, seguido de um regime aproximadamente permanente.

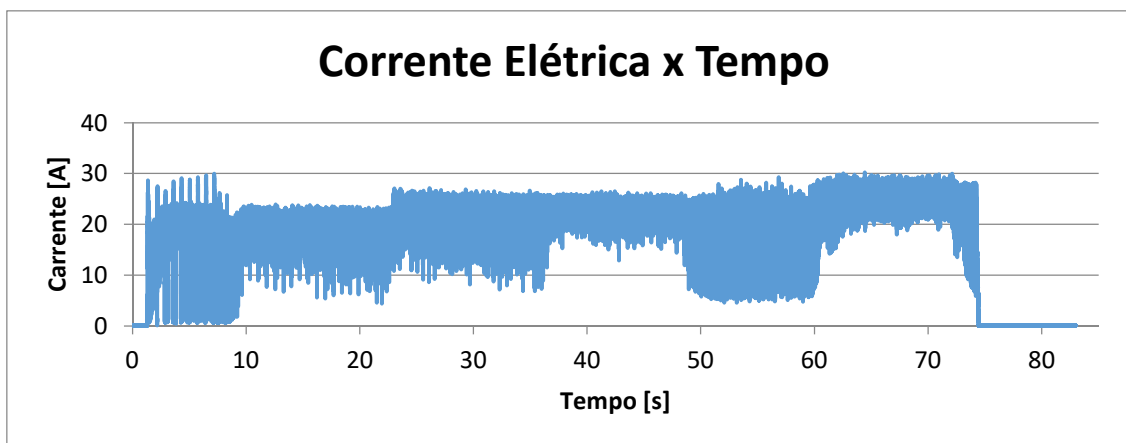
De acordo com a Figura 47, é possível verificar que a tensão nas baterias variou em condições de potência máxima nos testes. Em relação a corrente elétrica, uma oscilação ocorreu (Figura 48). Embora o conjunto elétrico seja alimentado por corrente contínua (CC), o controle do motor é realizado por um inversor de frequência trifásico que induz uma corrente alternada ao motor. Dessa forma, é possível identificar que a corrente elétrica no inversor de frequência trifásico que controla o motor elétrico é de natureza alternada. A Figura 49 ilustra a corrente elétrica obtida em um teste estático de tração em um intervalo de 2 segundos em potência máxima.

Figura 47 - Tensão das baterias em função do tempo durante o teste do equipamento acoplado ao trator.



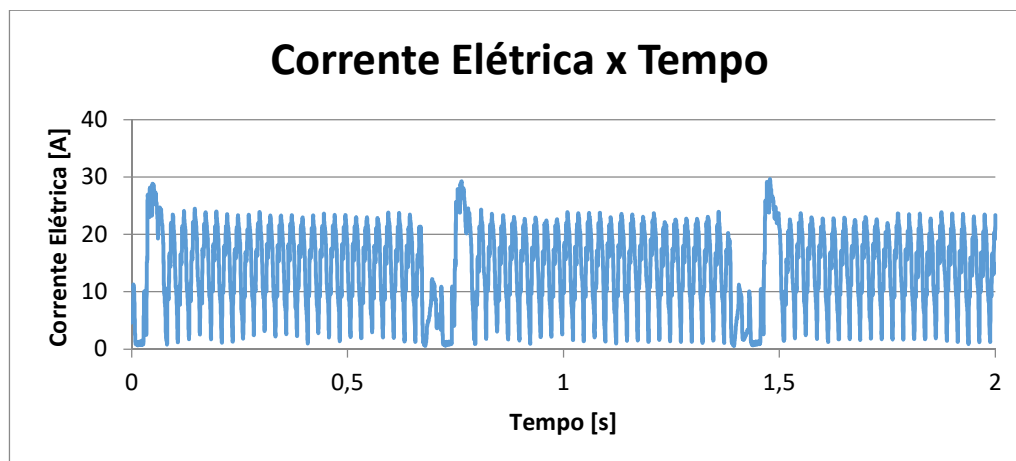
Fonte: Próprio Autor.

Figura 48 - Corrente elétrica em função do tempo para o ensaio durante o teste do equipamento acoplado ao trator.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 49 - Corrente elétrica drenada pelo motor elétrico *brushless* em um ensaio estático de tração.

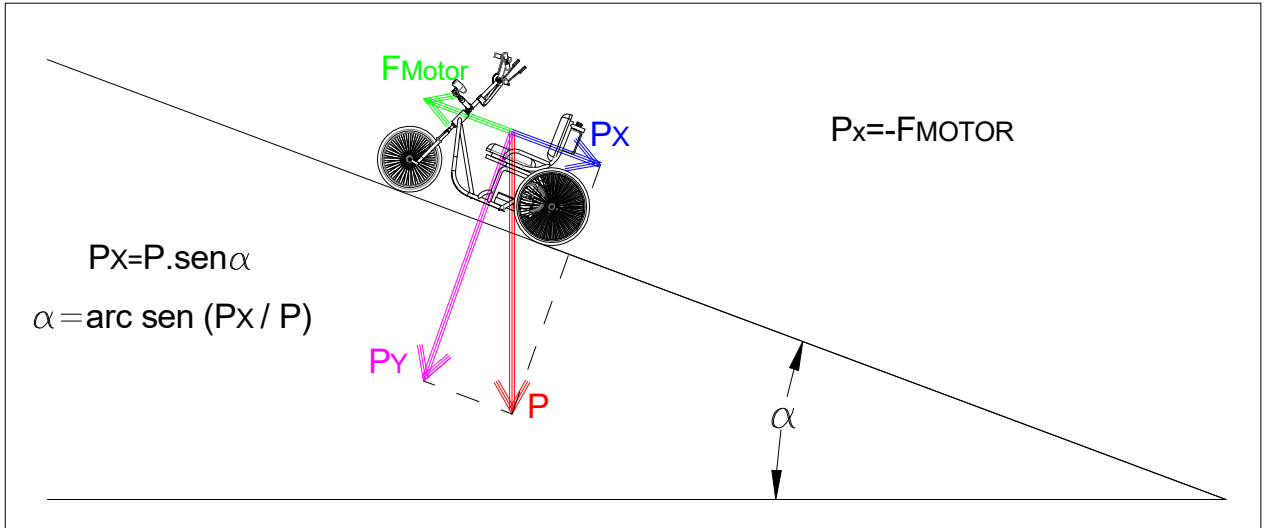


Fonte: Próprio Autor.

Por meio dos testes de tração, em condição estática, trator parado, foi obtido um valor médio de 502 N de força. O peso total do triciclo híbrido é de 700 N e considerando um condutor de 800 N, a força de tração do triciclo possibilita realizar uma subida com aclive de 20°, aproximadamente. A Figura 50 apresenta de forma esquemática, a decomposição de forças considerando o triciclo em condição de aclive. A Força Peso é representada por “P” (1500 N) e “Px” corresponde a força máxima desenvolvida pelo triciclo (502 N) em condição estática, ou seja, velocidade de deslocamento igual a zero.

A Equação 43 apresenta o ângulo máximo de subida de acordo com o torque máximo fornecido pelo motor *brushless* do triciclo.

Figura 50 - Decomposição de forças de acordo com o ângulo da rampa.



Fonte: Próprio Autor.

$$P_x = P \cdot \text{sen}(\alpha) \Rightarrow \alpha = \text{arc sen} \left(\frac{P_x}{P} \right) \quad (43)$$

α : ângulo de subida;

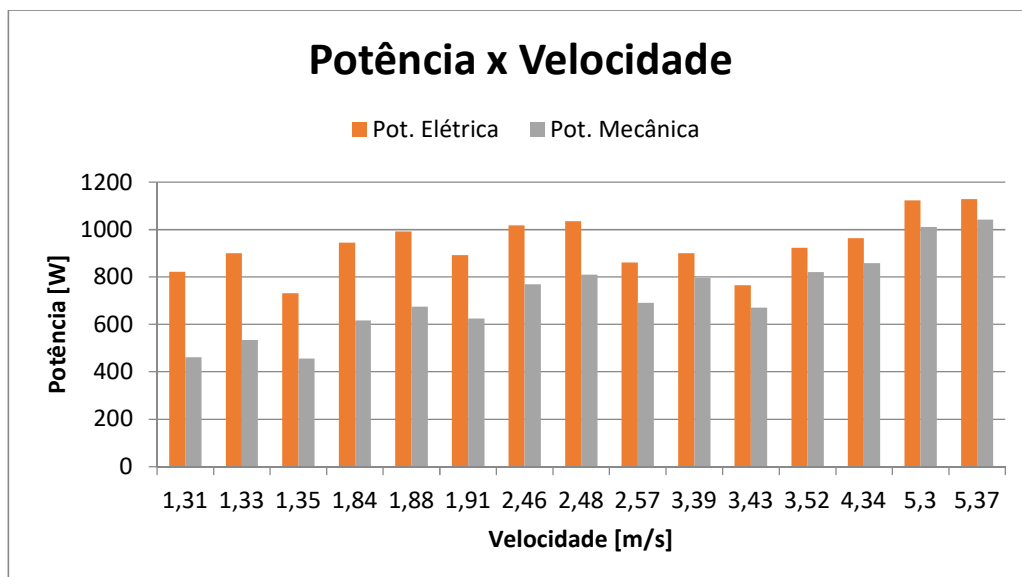
P: Força peso;

P_x : $-F_{MOTOR}$;

É importante ressaltar que 502 N corresponde a máxima força desenvolvida pelo triciclo em condições de baterias com carga máxima (torque máximo do motor *brushless*).

Os dados de potência elétrica e potência mecânica em função da velocidade, referentes a cada teste, são apresentados na Figura 51.

Figura 51 - Potências elétrica e mecânica obtidas nos ensaios de tração sob a ação da massa inercial de 5000 kg (trator).



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 51 sugere uma aproximação entre os valores de potência (elétrica e mecânica) a medida que a velocidade de deslocamento do conjunto aumenta. Por outro lado, na medida em que a velocidade diminui, a potência mecânica diminui. Isso ocorre em função do valor da potência mecânica ser diretamente dependente da velocidade do equipamento. Dessa forma, em condição de regime estático, a potência mecânica é zero, porém com dissipação de energia elétrica em forma de calor (efeito Joule) ao acionar o motor. Pode-se concluir dessa forma que o rendimento energético do conjunto aumenta com a elevação da velocidade de deslocamento. A Tabela 5 indica os valores de rendimento traduzidos em termos de eficiência energética líquida.

Tabela 5 - Potência elétrica, potência mecânica e rendimento energético.

Vel.[m/s]	1,31	1,33	1,35	1,84	1,88	1,91	2,46	2,48	2,57	3,39	3,43	3,52	4,34	5,3	5,37
Pot. El. [W]	821	900	731	945	992	891	1017	1034	861	899	765	923	964	1123	1128
Pot. Mec. [W]	462	535	456	617	675	624	769	810	691	795	670	821	859	1011	1041
Rendimento	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,70	0,75	0,78	0,80	0,88	0,88	0,89	0,89	0,90	0,92

Fonte: Próprio Autor.

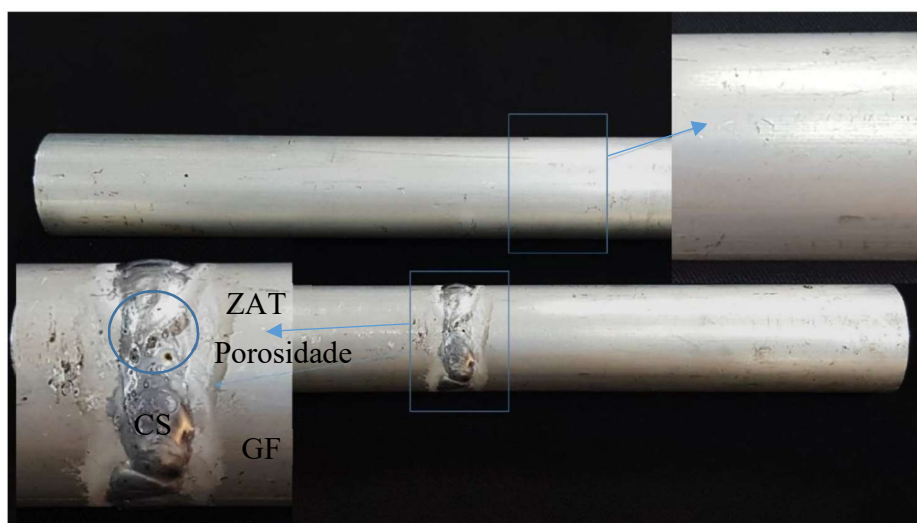
5.5 Resultado do Ensaio de Tração

A Figura 52 ilustra a superfície externa dos tubos 6063-T5 preparados para ensaio de tração sem solda e unidos por solda (TIG). A superfície das amostras sem solda apresenta bom acabamento, tipicamente de uma superfície extrudada e sem entalhe de fabricação. Por outro lado, a região superficial das amostras soldadas apresenta um cordão de solda (CS) com pontos de porosidade, uma trinca tipo junta fria (gota fria - GF) e uma região superaquecida indicando a zona afetada termicamente (ZAT). Esses defeitos são indicados na Figura 52.

As amostras soldadas para ensaio de tração estão comprometidas por entalhe geométrico superficial e pode comprometer a resistência mecânica e a ductilidade da junta soldada, como será analisada a seguir. Assim, na linha de produção, a verificação da correta instalação da tocha TIG na máquina de solda deve ser inspecionada para não correr possível arrastamento do ar ambiente. Além disso, a qualidade da energia elétrica que chega na máquina de solda deve ser garantida.

Em se tratando de uma linha de produção por manipulação manual da tocha TIG, o soldador deve ser orientado para evitar gota fria ao término da operação de soldagem e verificar a correta aplicação dos parâmetros de solda: vazão do fluxo do gás protetor (Ar-argônio) para evitar turbulência ou obter a proteção eficiente do cordão de solda e o ajuste adequado da amperagem de acordo com o eletrodo empregado.

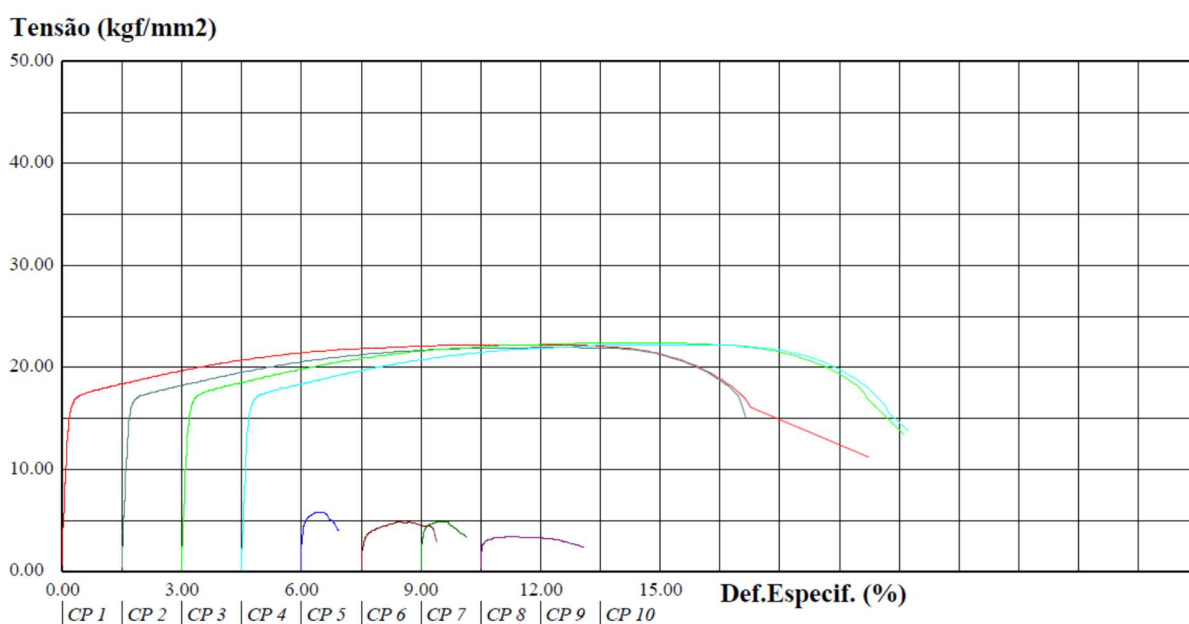
Figura 52 - Superfície das amostras fornecidas para ensaio de tração.



Fonte: Adaptado da CBA (2018).

A Figura 53 ilustra os diagramas tensão x deformação obtidos das amostras tubulares Al 6063-T5 sem e com solda. A resistência mecânica e ductilidade dos tubos sem solda são bem superiores quando comparado aos tubos soldados, conforme apresentado anteriormente na análise feita. Isto sugere que os parâmetros e a operação de soldagem têm que ser revistos para obter uma estrutura soldada com menores pontos de defeitos os quais serão analisados mais detalhadamente a seguir através da caracterização por microscopia óptica (metalografia). Dessa forma, a análise por elementos finitos que será apresentada a seguir para identificar as regiões da estrutura soldada de maior sollicitação e o estado de tensão atuante é fundamental durante o desenvolvimento do chassi do triciclo híbrido.

Figura 53 - Diagrama tensão deformação dos corpos prova tubular da liga Al 6063-T5 sem (CP 1, CP 2, CP 3 e CP 4) e com solda (CP 5, CP 6, CP 7 e CP 8).



Fonte: Adaptado da CBA (2018).

Os resultados referentes aos ensaios de tração realizados para cada corpo de prova tubular nas duas diferentes condições são apresentados na Tabela 6 para efeito quantitativo de comparação.

Tabela 6 - Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência a Tração (LRT) e Deformação Específica (DE) das amostras de tubos de liga de alumínio 6063-T5 com solda e sem solda.

Amostra	LE [MPa]	LRT [MPa]	DE [%]
CP 1 sem solda	167,3	217,8	17,7
CP 2 sem solda	166,6	215,9	17,6
CP 3 sem solda	168,2	219,4	18,5
CP 4 sem solda	167,2	218,1	18,0
CP 1 com solda	31,0	33,6	3,7
CP 2 com solda	46,0	48,3	1,7
CP 3 com solda	38,5	48,1	3,0
CP 4 com solda	54,2	57,3	1,9

Fonte: Adaptado da CBA (2018).

Os dados da Tabela 6 são usados para a análise estatística, indicando o índice de confiabilidade baseada no desvio padrão obtido para cada situação (Tabela 7). Ressalta que nas regiões dos tubos soldados foi necessário aplicar um índice de confiabilidade de 80% porque resultou num maior desvio padrão em relação a amostragem sem solda (95%). Então, os parâmetros no procedimento de soldagem, conforme descrito anteriormente, precisam ser redefinidos.

Tabela 7 - Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência a Tração (LRT), Deformação Específica (DE) e Desvio Padrão (DP) das amostras de tubos de liga de alumínio 6063-T5 com solda e sem solda considerando 80%** e 95%* de confiabilidade, respectivamente.

Amostra	LE [MPa]	DP [MPa]	LRT [MPa]	DP [MPa]	DE [%]
CP com solda**	42,25±8,16	9,95	48,2±8,04	9,80	2,45±0,77
CP sem solda*	167,25±1,05	0,66	217,95±2,29	1,44	17,85±0,64

Fonte: Próprio Autor.

A relação do Limite de Escoamento e de Ruptura entre os corpos de provas sem solda e com solda são respectivamente menores de 4 e 5 vezes aproximadamente. Por sua vez, a Deformação Específica foi 7 vezes inferior nas amostras soldadas. Assim, baseando nas propriedades mecânicas dos tubos soldados, a resistência e a tenacidade na região de solda da estrutura tubular do triciclo híbrido estão severamente prejudicadas.

Isso se deve principalmente pela qualidade da solda aplicada nos corpos de prova para ensaio de tração como descrito anteriormente. Este assunto será discutido a seguir através da análise macrográfica e micrográfica. Por outro lado, a Figura 54 ilustra a qualidade dos cordões de solda na região de maior solicitação de tensão do chassi do triciclo para efeito de comparação com os corpos de provas (Figura 52). De fato, a análise macrográfica indica uma qualidade superior dos cordões de solda e eventualmente uma maior penetração que aumenta a qualidade da estrutura soldada.

Figura 54 - Cordões de solda na região de maior concentração de tensão no chassi da estrutura tubular de Al 6063-T5.



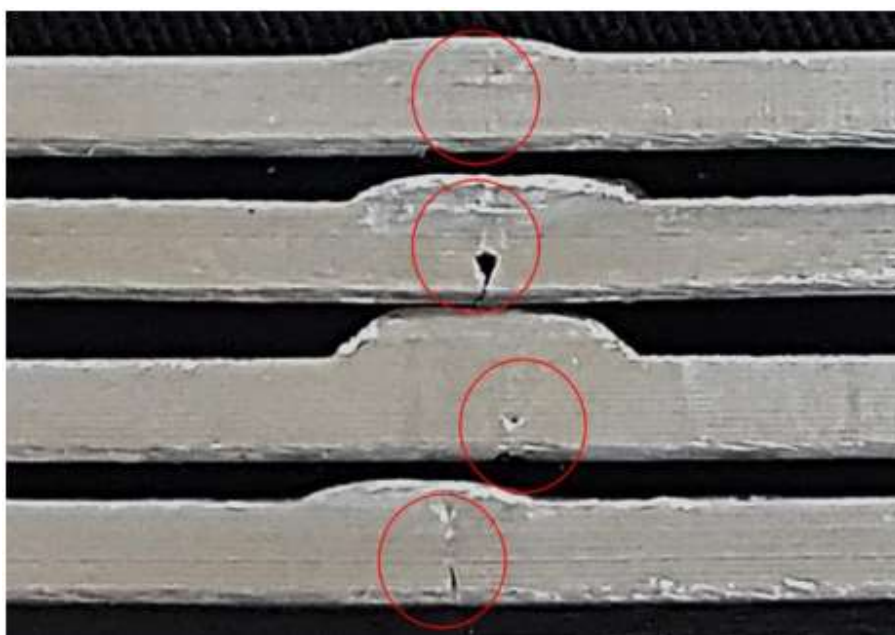
Fonte: Próprio Autor.

5.6 Análise macrográfica dos corpos de prova soldados

A Figura 55 ilustra a seção transversal dos cordões de solda da estrutura tubular da liga Al 6063-T5 de 3,18 mm de espessura. A falta de penetração na raiz da junta da solda é observada. Isto pode ser atribuída ao controle na condução da tocha TIG pelo soldador e no ajuste da amperagem adequada para a execução da solda como descrito anteriormente. Esta falta de penetração é um entalhe geométrico que pode levar a falha catastrófica da estrutura e gerar ponto de fadiga.

O projeto do chassi do triciclo híbrido foi feito para que os pontos de solda estejam sob compressão. Assim, a análise por MEF da estrutura do triciclo híbrido, foi uma ferramenta fundamental para identificar a distribuição de tensão no chassi projetado do protótipo que será analisado neste trabalho.

Figura 55 - Seção em corte dos corpos de prova de alumínio soldados (liga Al 6063-T5) de 3,18 mm de espessura.

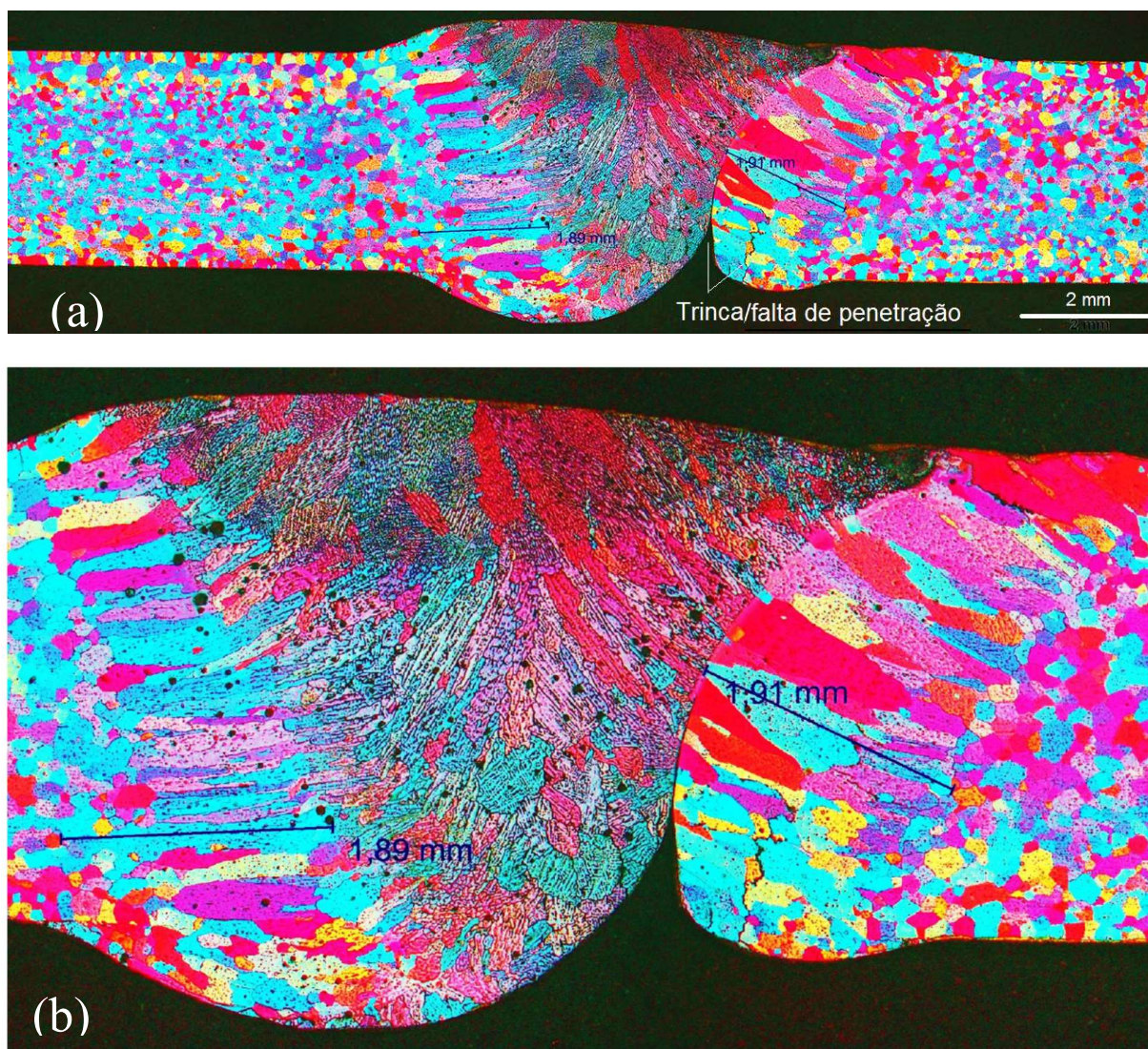


Fonte: Próprio Autor.

A Figura 56 ilustra um corte transversal na seção da solda preparada para análise por luz polarizada no microscópio óptico. A estrutura do cordão de solda é predominantemente colunar com orientação à fonte de calor (tocha TIG) e apresenta um comprimento da ZAT menor que 2,0 mm aproximadamente. Trincas/falta de penetração são observadas, como indicada na Figura 55.

Esta falha gera ponto de fadiga e provoca a redução nas propriedades mecânicas estáticas e na tenacidade como analisada anteriormente.

Figura 56 - Seção transversal do cordão de solda de caráter dendrítico ilustrando alguns defeitos de solda (a) e detalhe da raiz da solda ressaltando a falta de penetração e trincas, gerando ponto de fadiga e queda de propriedades mecânicas, ZAT menor que 2,0 mm (b).



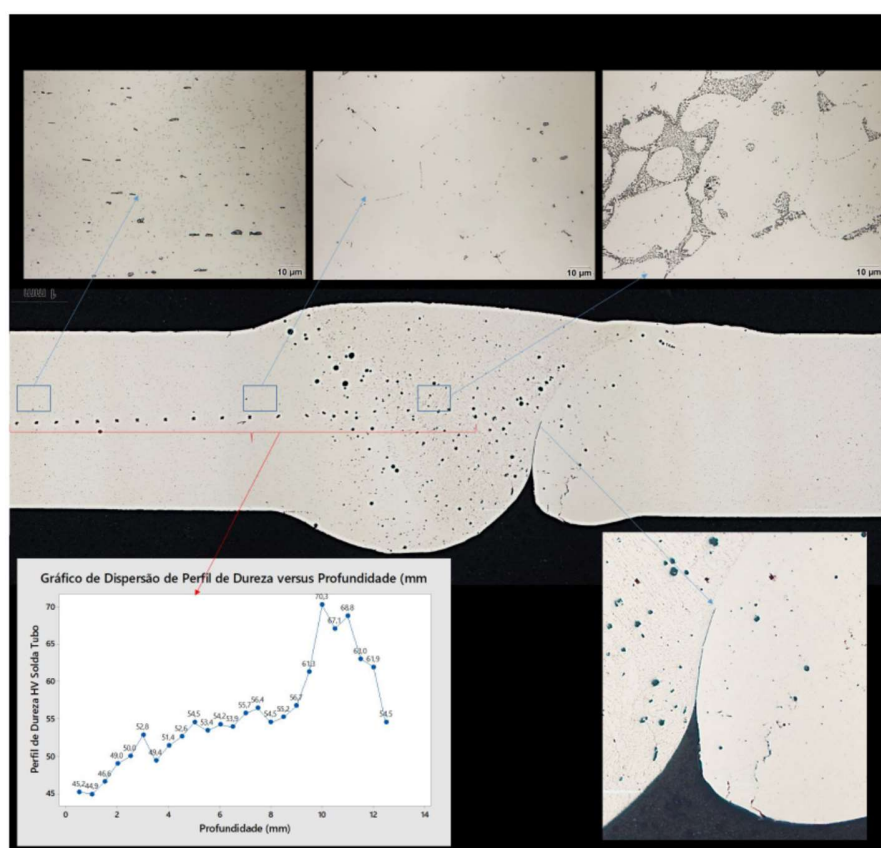
Fonte: Adaptado da CBA (2018).

5.7 Análise micrográfica dos corpos de prova soldados

A Figura 57 ilustra micrografias evidenciando a microestrutura da região da solda e gráfico de perfil de dureza HV com profundidade de 12 mm a partir do cordão de solda em direção ao metal base. Observa-se ligeira queda de dureza ao ponto que se afasta da região da solda.

A microestrutura nesta região mostra a presença de precipitados grosseiro do composto Mg_2Si em decorrência do aquecimento pelo processo de solda. A medida em que se aproxima da região da solda, houve solubilização parcial dos precipitados Mg_2Si , mantendo-os em solução sólida e gerando pequeno ganho de dureza. O material de preenchimento da solda mostra pico de dureza, condição típica pela presença de eutéticos Al-Si-Mg, modificados naturalmente pela extração de calor do cordão de solda pelo metal base.

Figura 57- Detalhes da caracterização da solda, perfil de dureza e detalhe da falha na raiz da solda, faltando preenchimento e comprometendo as propriedades mecânicas como analisadas anteriormente.



Fonte: Adaptado da CBA (2018).

A análise tanto mecânica, por meio do ensaio de tração, como macrográfica/micrográfica, foi baseada no Relatório de Caracterização de Material dos perfis tubular da liga 6063-T5 encaminhados ao Laboratório Químico – Metalografia Gestão de Ativos da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) – Anexo 1.

5.8 Critérios de Tresca e von Mises

Segundo Dieter (1982), a teoria da tensão cisalhante máxima (Tresca) e a teoria da energia de distorção (von Mises) predizem o limite de escoamento para as condições de qualquer estado de tensão. O critério de von Mises fornece um limite de escoamento em cisalhamento puro cerca de 15% superior ao critério da tensão cisalhante máxima. Considerando que o material empregado é a liga de alumínio 6063-T5 (material dúctil), é possível afirmar que antes de ocorrer a falha, é inevitável que ocorra o escoamento.

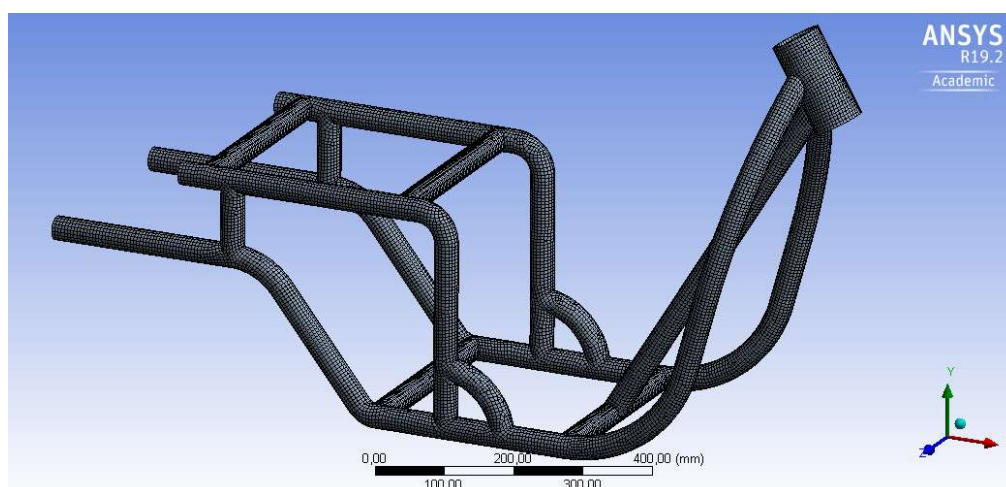
Assim, para as análises de elementos finitos, foi empregado von Mises como critério de falha, já que a teoria da energia de distorção oferece um limite de escoamento superior ao critério de Tresca, como citado anteriormente. Além disso, com o escoamento do material, ocorre também o encruamento, que por sua vez eleva o limite de escoamento. Sendo assim, a estrutura tende a suportar maiores níveis de tensão a partir da eventual deformação plástica, principalmente nos pontos de maior concentração de tensão.

Os resultados referentes a simulação empregando técnicas de elementos finitos, são apresentados a seguir.

5.9 Elementos Finitos

A malha foi elaborada limitando os elementos (*Hex Dominant*) com dimensões de até 5 mm, conforme apresentado anteriormente no item 4.8.4-Modelagem ANSYS. A Figura 58 ilustra a malha empregada para a simulação estática e dinâmica da estrutura do triciclo híbrido em estudo.

Figura 58 - Malha da estrutura tubular do triciclo elaborada.



Fonte: Próprio Autor.

A malha gerada foi composta por aproximadamente 30 mil elementos como descrito anteriormente. Pela Figura 58, é possível observar uma concentração maior de elementos nas regiões de maior complexidade geométrica (furos e pontos de soldagem), indicando uma coerência na malha elaborada pelo *software* ANSYS 19.2 *Academic* (JOHNEN, *et al.*, 2017).

De acordo com Lazuka *et al.* (2015), o refinamento da malha pelo *software* ocorre nas áreas onde a estrutura é interligada com outros componentes e onde existem entalhes geométricos, pois estas são as regiões suscetíveis a concentração de tensão. Nessas regiões, o processo automático de refinamento de malha oferecido pelo *software* garante uma maior precisão e confiabilidade na análise, porém com uma maior exigência computacional (JOHNEN, *et al.*, 2017).

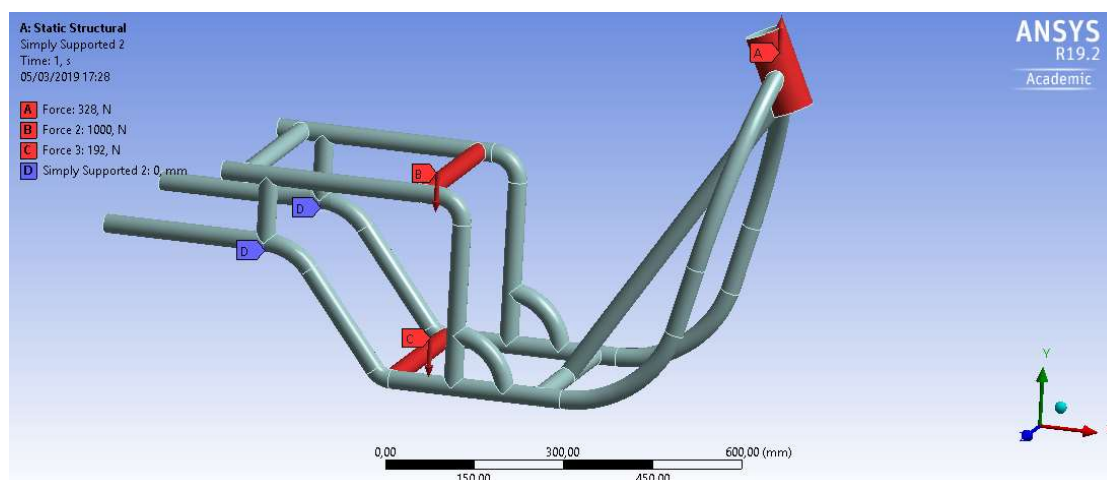
5.9.1 SIMULAÇÃO ESTÁTICA-ELEMENTOS FINITOS

A liga de alumínio 6063-T5, apresenta uma resistência a tração de 186 MPa, resistência ao escoamento de 145 MPa, resistência ao cisalhamento de 117 MPa e resistência a fadiga de 69 MPa (ASM HANDBOOK, 1995), como descrito anteriormente.

Segundo Almaraz *et al.* (2012), esse material apresenta polimento superficial elevado, boas propriedades de soldagem e resistência à corrosão, satisfazendo a aplicabilidade no protótipo fabricado neste trabalho.

A Figura 59 ilustra os pontos de aplicação de carga para a simulação empregando o *software* ANSYS 19.2 *Academic*.

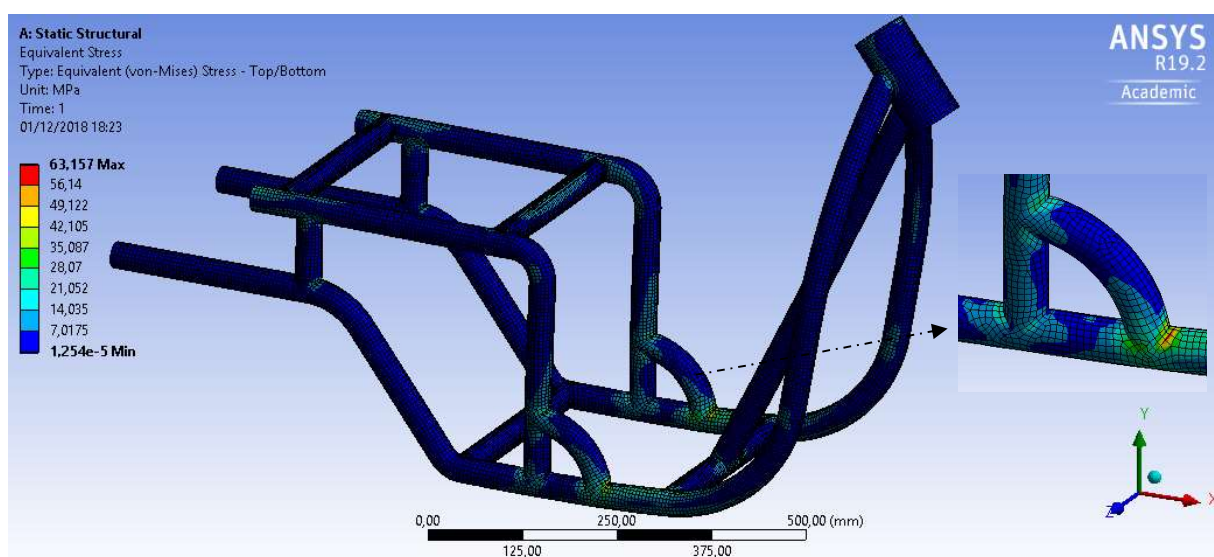
Figura 59-Regiões de aplicação de carga sobre o chassi do triciclo híbrido.



Fonte: Próprio Autor.

As regiões apresentadas por B e C representam respectivamente as forças aplicadas considerando um usuário de 1000 N e o peso das baterias (192 N). A região A apresenta a força para garantir o equilíbrio estático da estrutura de acordo com a Figura 34 apresentado na página 69. A região apresentada por, D são os pontos de apoio do chassi. A Figura 60 ilustra a distribuição de tensão de von-Mises para a estrutura do triciclo híbrido.

Figura 60 - Distribuição de tensão de von-Mises.



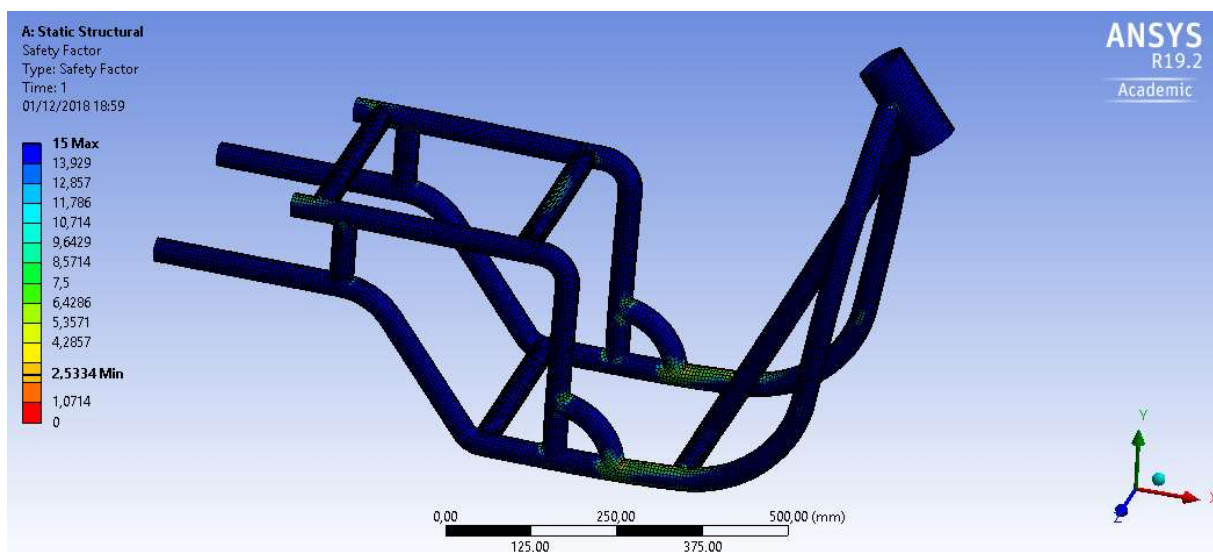
Fonte: Próprio Autor.

De acordo com a Figura 60, é possível identificar qualitativamente os pontos de concentração de tensão localizados nas regiões de união por solda da estrutura mais solicitada. Os resultados apresentados em forma de cores indicam pontos com tensões próximas a 63 MPa (vermelhas) e regiões com cores azuis (sem solicitação de esforços, isto é, próxima de zero). Considerando um limite de escoamento de 167 MPa para a liga de Al 6063-T5 obtido pela CBA, é possível afirmar que a estrutura suporta com segurança, um usuário de massa de 100 kg sem sofrer uma falha mecânica por escoamento plástico.

A Figura 61 ilustra a confiabilidade da estrutura com fatores de segurança superiores a duas unidades em todos os elementos da estrutura do triciclo, confirmando os resultados apresentados pela Figura 60 (Critério de von-Mises).

A presença de regiões com coloração vermelha, indicariam pontos críticos da estrutura, ou seja, tensões próximas ou ultrapassando o limite de escoamento do material e início das deformações plásticas.

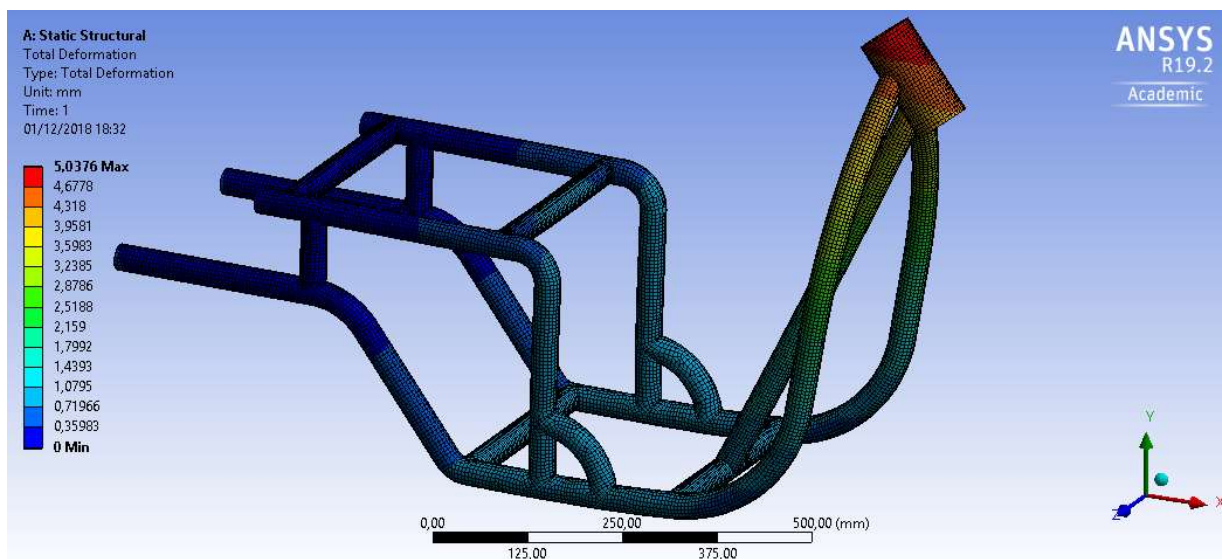
Figura 61 - Fator de segurança.



Fonte: Próprio Autor.

Em relação ao deslocamento (Figura 62), é importante observar que a região do suporte do guidom apresenta maior deslocamento da estrutura com a aplicação das cargas.

Figura 62 – Deslocamento da estrutura original.



Fonte: Próprio Autor.

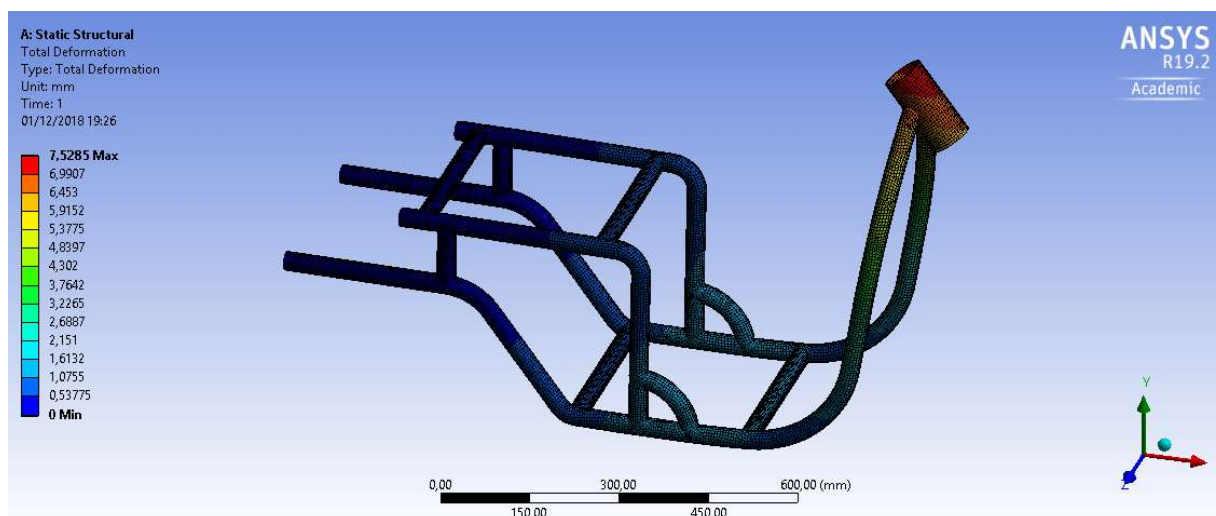
De acordo com Soares *et al.* (2012), o chassi interliga todos os componentes do veículo. Ele deve suportar as cargas mecânicas de forma a garantir segurança aos usuários e o correto funcionamento do sistema de direção e suspensão do veículo. Barbosa (2015) acrescenta que os deslocamentos ocasionados pelas cargas externas não devem limitar o funcionamento adequado do veículo. Em ensaios práticos de utilização do equipamento, foi identificado que esse deslocamento não interfere no funcionamento adequado do triciclo híbrido.

Assim, quando o equipamento se encontra em movimento, a deformação elástica do chassi e o seu molejo proporciona maior conforto ao usuário em condições de pisos irregulares por meio da absorção de choques mecânicos.

De acordo com Barbosa (2015), tanto a dirigibilidade quanto o comportamento vibracional do veículo são afetados pela rigidez do chassi. Dessa forma, em se tratando de um equipamento desprovido de suspensão, o amortecimento dos impactos causados por pisos irregulares fica restrito à ação dos pneus e à rigidez da estrutura de alumínio do triciclo, justificando a importância da flexibilidade do chassi desenvolvido.

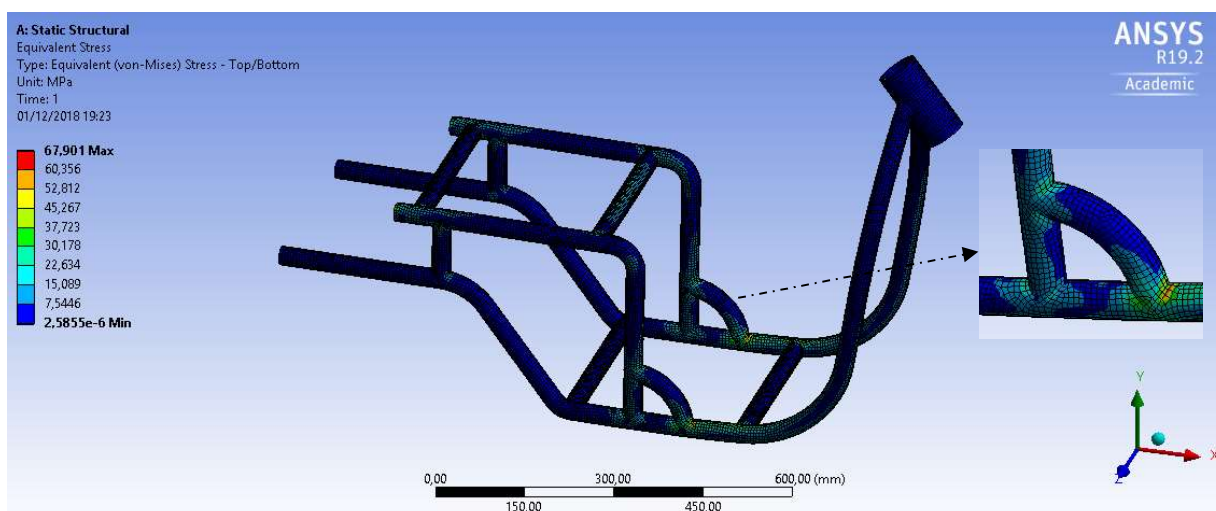
Foi realizada uma análise estrutural considerando a remoção da barra central do chassi. Foi possível identificar um maior deslocamento na região do suporte do guidom em decorrência da menor rigidez da estrutura. Mesmo sem ação da barra central, a tensão de von-Mises mantém-se em torno de 68 MPa, ou seja, 8% maior, mas ainda inferior ao limite de escoamento (Figura 64). Porém, em condições de acionamento do freio contra pedal (roda dianteira) pelo acionamento manual das manivelas, a componente de força na direção horizontal poderia comprometer a integridade da estrutura nos pontos de solda e eventual falha mecânica ao longo do tempo. A Figura 63 ilustra o deslocamento nesta condição.

Figura 63 - Deslocamento da estrutura sem barra central.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 64 - Distribuição de tensão de von-Mises (sem barra central).



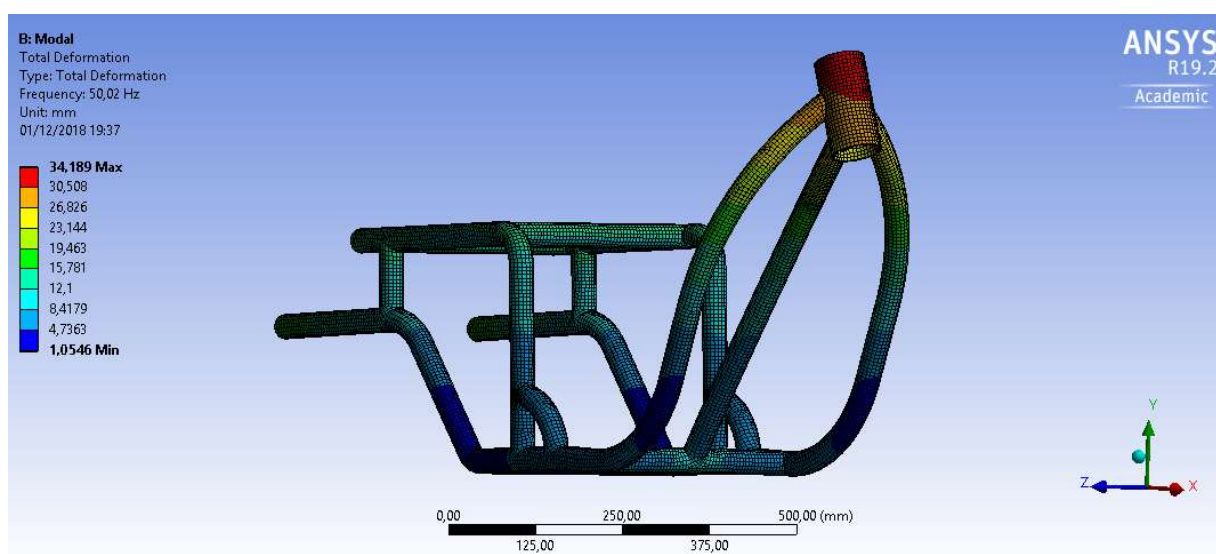
Fonte: Próprio Autor.

5.9.2 ANÁLISE MODAL-ELEMENTOS FINITOS

A análise modal é empregada para identificar as frequências naturais e os modos de vibrar de uma estrutura. De acordo com Marinho (2002), um modo de vibração é uma configuração do sistema segundo a qual este pode oscilar sem alterar a relação entre os deslocamentos dos elementos da estrutura. Nesse sentido, é possível identificar as alterações de quantidade de movimento em condições de deformação elástica quando uma estrutura é dinamicamente excitada por meios externos.

Na simulação dinâmica realizada com o software ANSYS 19.2 *Academic*, foram obtidos modos de vibrar nas frequências de 50,0, 75,7, 132,9 e 174,4 Hz, as quais são frequências mais baixas para este tipo de estrutura. A Figura 65 ilustra o modo de vibrar, em 50,0Hz predominante em flexão observado durante a simulação.

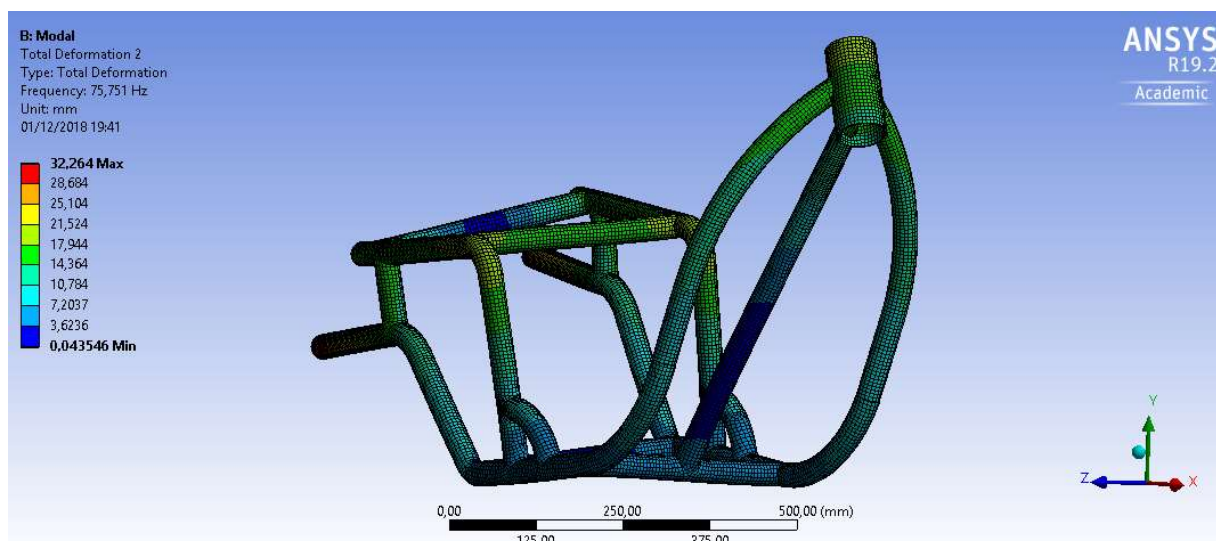
Figura 65 - Modo de vibrar em 50,02Hz



Fonte: Próprio Autor.

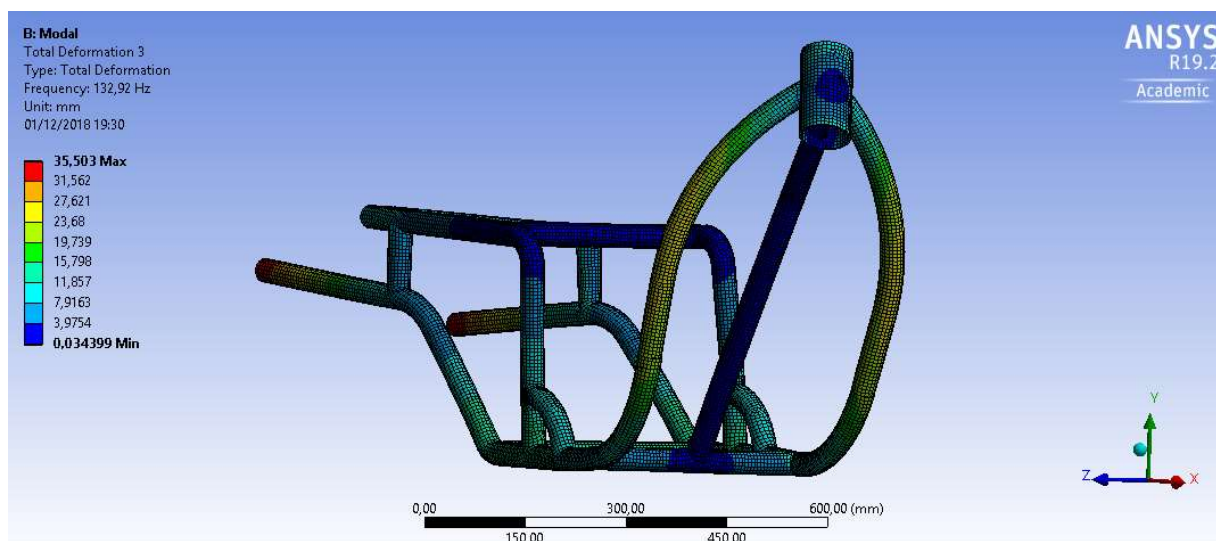
O modo de vibrar mais baixo encontra-se em aproximadamente 50 Hz. É importante observar que esse tipo de vibração pode induzir tensões na região central da estrutura onde tem maior quantidade de união por solda. Normalmente não se atinge níveis de frequências elevadas em condições de utilização do equipamento. Entretanto, o ANSYS 19.5 *Academic* gerou também os modos de vibrar em frequências de 75,7, 132,9 e 174,4Hz, que são apresentados respectivamente nas Figuras 66, 67 e 68 para efeito de comparação dos modos de vibrar predominantemente sob torção observados na simulação.

Figura 66 - Modo de vibrar em 75,7Hz



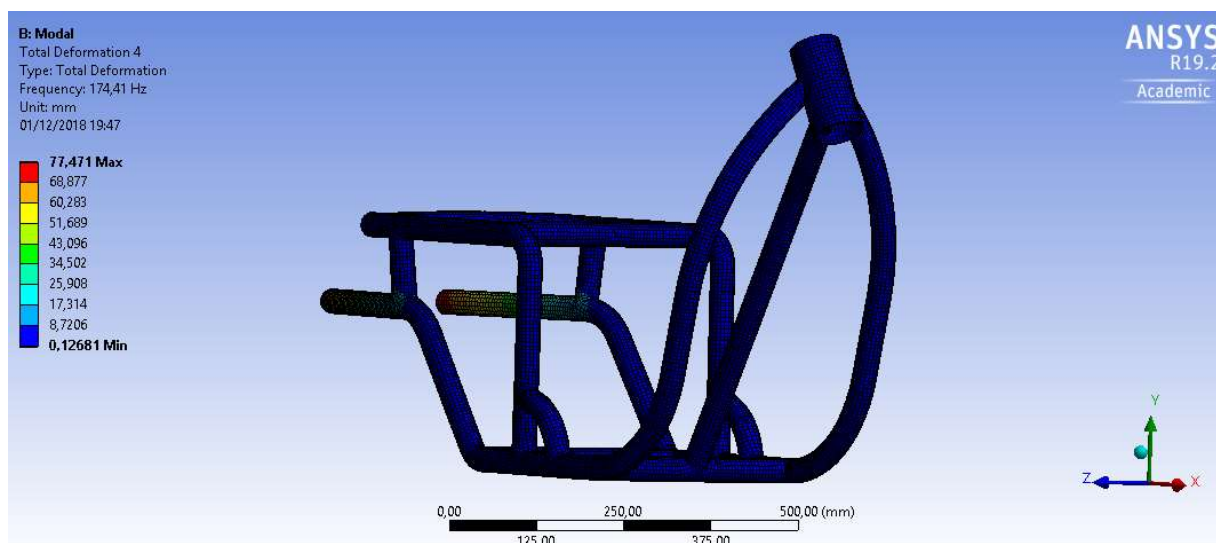
Fonte: Próprio Autor.

Figura 67 - Modo de vibrar em 132,9Hz



Fonte: Próprio Autor.

Figura 68 - Modo de vibrar em 174,4Hz



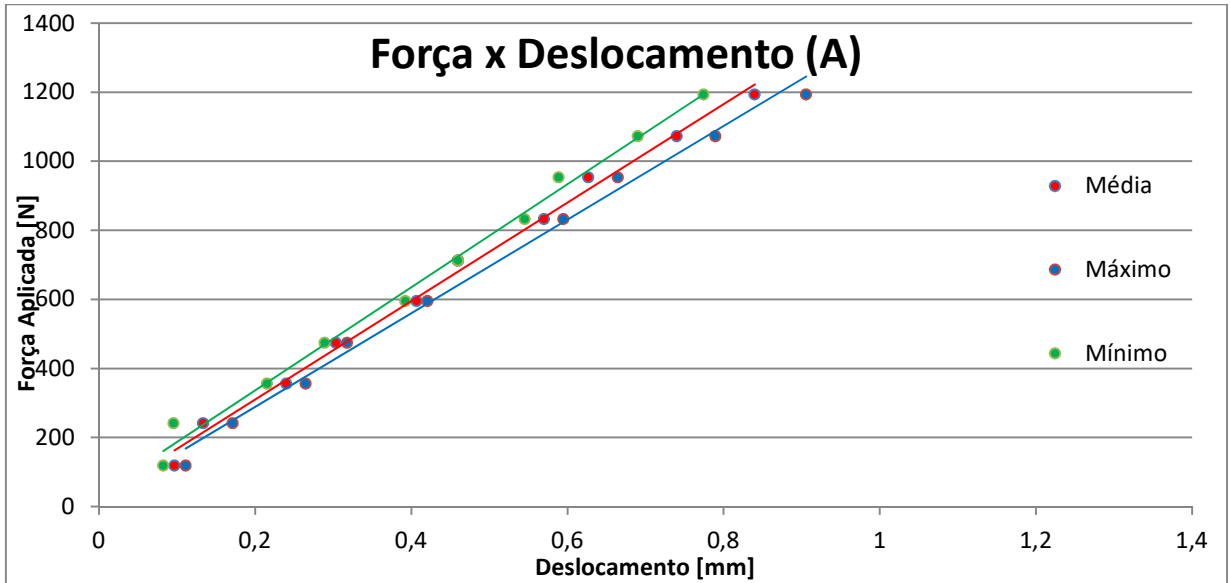
Fonte: Próprio Autor.

Os modos de vibrar apresentados nas frequências de 75,7, 132,9 e 174,4Hz, estão relacionados a torção da estrutura como descrito anteriormente. Essas frequências não são alcançadas em condições de utilização do equipamento, pois a velocidade de movimento do protótipo deve ser abaixo de 20 km/h, de acordo com a norma ABNT 9050 (2004), e que ficaria abaixo dessa frequência mesmo em pisos irregulares, tipo pavimento de paralelepípedo.

5.10 Carga e Deslocamento

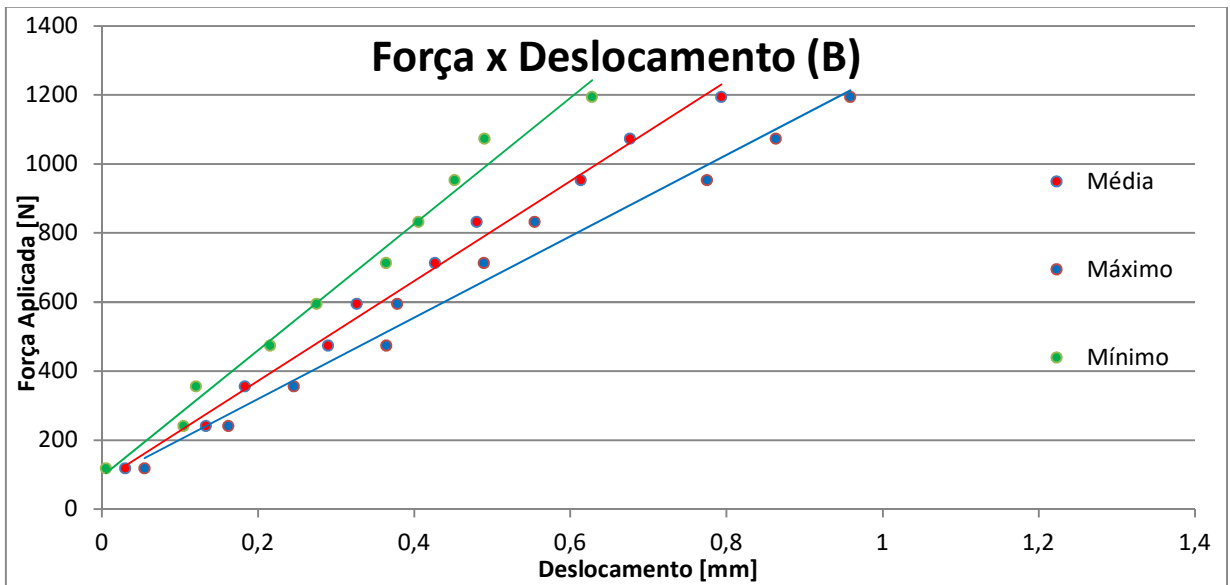
O ensaio de deslocamento foi realizado com objetivo de avaliar de forma experimental, o comportamento da estrutura do triciclo híbrido sob efeito de carregamento estático. As Figuras 69, 70, 71 e 72, ilustram as curvas de deslocamento respectivamente nos pontos A, B, C e D, localizados na plataforma de apoio dos pés no triciclo de acordo com o diagrama na Figura 36.

Figura 69 - Curva de deslocamento referente ao ponto A.



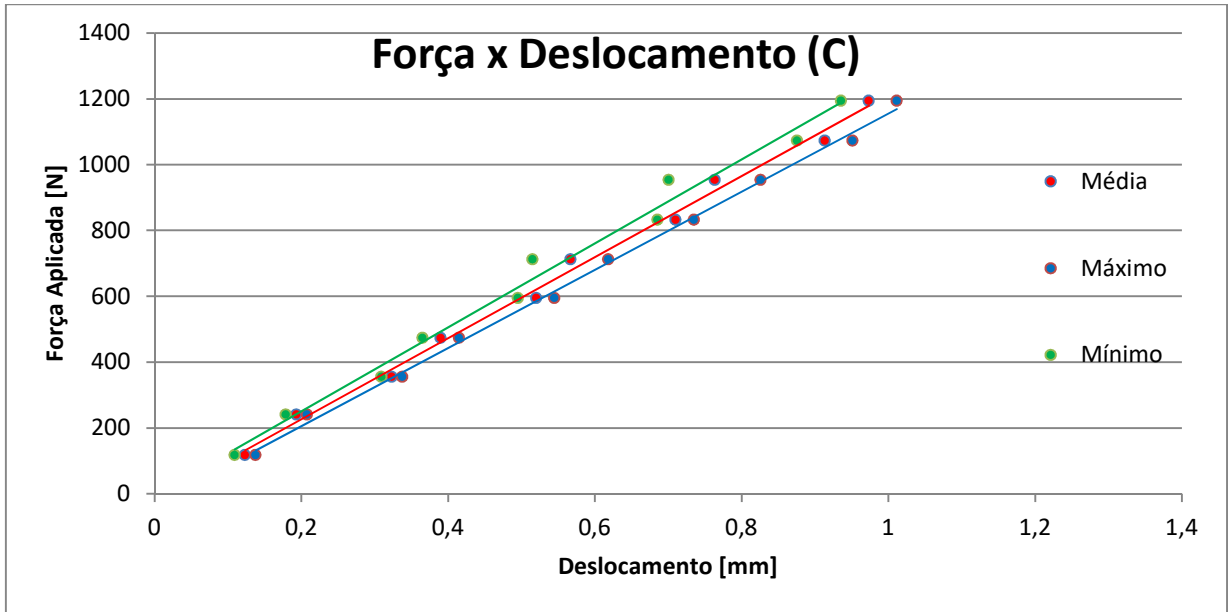
Fonte: Próprio Autor.

Figura 70 - Curva de deslocamento referente ao ponto B.



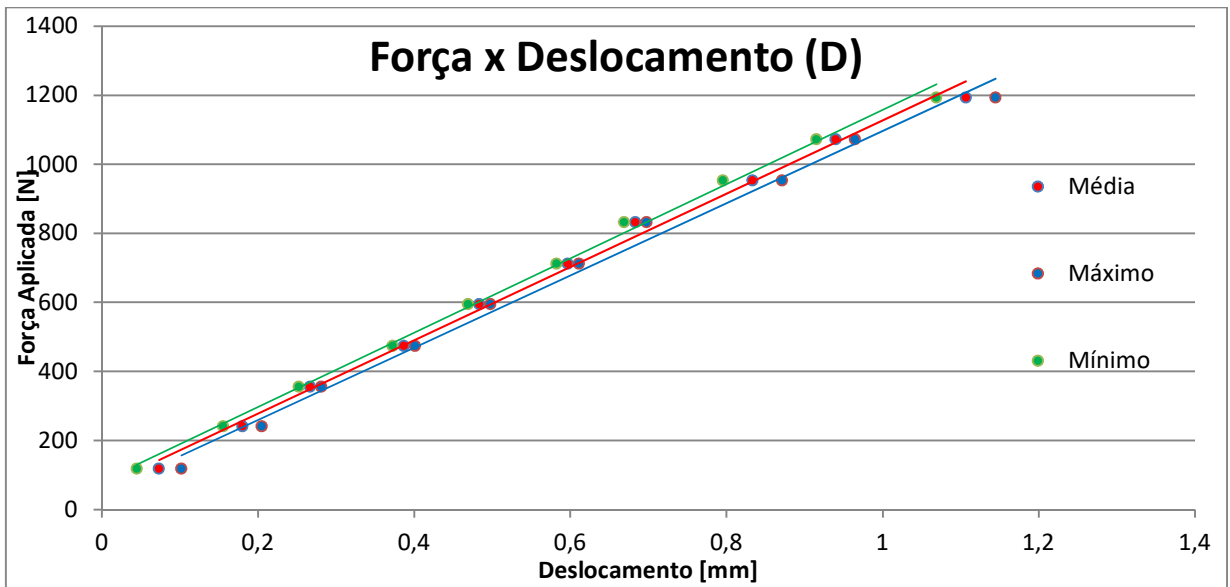
Fonte: Próprio Autor.

Figura 71 - Curva de deslocamento referente ao ponto C.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 72 - Curva de deslocamento referente ao ponto D.



Fonte: Próprio Autor.

A simulação de carga e deslocamento empregando técnicas de Elementos Finitos, indica um deslocamento de aproximadamente 1 mm para a região localizada na plataforma de apoio dos pés, considerando uma carga de 1000 N (usuário de aproximadamente 100kg) somada as baterias (192 N) - vide Figura 62 da simulação de deslocamento no ANSYS 19.2 *Academic*. No ensaio prático de carregamento estático, foi identificado um deslocamento médio máximo de 0,85, 0,88, 1,00 e 1,10 mm respectivamente aos pontos A, B, C e D localizados na região de apoio dos pés do usuário com carga de 1194 N. Dessa forma, a média simples de deslocamento dos quatro pontos, foi de 0,98 mm, divergindo cerca de 4% dos dados numéricos.

Em uma simulação numérica de tensão e deformação realizada por Molina e Calil Junior (2007), empregando MEF, foi elaborado um corpo de prova misto de concreto e madeira. O modelo numérico proposto, apresentou correspondência com os resultados experimentais para o carregamento não somente na fase elástica linear, mas também no início da fase não linear, com erro de 15%.

Soares *et al.* (2012) avaliou a rigidez de um chassi automotivo de pequeno porte. A estrutura foi elaborada com tubos de aço AISI 1020 e submetido a torção simples com o objetivo de identificar sua rigidez. Empregando MEF, a rigidez numérica obtida foi aproximadamente 22% maior do que a rigidez experimental. Os Autores atribuem parte desse erro às tensões residuais presentes nas regiões de união por solda.

Da mesma forma, Barbosa (2015) avaliou a rigidez do chassi de um Baja construído com tubos de aço AISI 1020. Na pesquisa foi identificado uma rigidez 8,7% superior na simulação numérica. O Autor atribui a diferença dos dados em razão das simplificações adotadas na construção do modelo numérico (dificuldade em simular todos fenômenos presente no modelo real), desconsiderando os efeitos das soldas nos pontos de união da estrutura.

É importante observar que a elaboração prática de um chassi envolve processos de fabricação com tolerâncias geométricas adequadas a cada etapa de fabricação. Dessa forma, erros dimensionais são inerentes aos processos de fabricação. Esse fator pode justificar a variação dos deslocamentos em cada ponto ensaiado. Além disso, conforme apresentado por Barbosa (2015) e Soares *et al.* (2012), existem variáveis que dificilmente serão idênticas/semelhantes nos processos, tais como pontos de união por solda, como é o caso do trabalho proposto.

Por outro lado, a região de maior desvio de deslocamento foi o ponto A, (14,5%) quando comparado ao método numérico, sendo inferior ao erro obtido por Soares *et al.* (2012) (22%) e Molina e Calil Junior (2007) (15%). Entretanto, os dados obtidos de deslocamento estão bem próximos dos resultados obtidos experimentalmente neste trabalho nos pontos analisados na plataforma de suporte dos pés.

6 CONCLUSÃO

O protótipo neste projeto de Doutorado, tem relevância social, tecnológica e científica, pois possibilita uma locomoção eficiente e segura para pessoas com paraplegia, favorecendo a inclusão social principalmente quando se considera pessoas com recursos financeiros limitados. Dessa forma, quando comparado a outros modelos motorizados comercializados, o valor se torna um atrativo considerando um valor aproximado de fabricação de R\$3.300,00.

Considerando o sistema cíclico de acionamento manual, é possível realizar uma subida de até 12°, aproximadamente considerando uma força de 420 N nas manivelas (força média de um adulto do sexo masculino) e um usuário de 80 kg. Por outro lado, empregando o acionamento elétrico, é possível realizar uma subida de até 20° considerando uma força de tração de aproximadamente 500 N fornecida pelo motor *brushless* de 1000 W.

O sistema de acionamento elétrico em percurso urbano, possibilita uma autonomia de até 40 km num tempo de 2,5 horas.

Em relação a estrutura soldada de tubos de liga de alumínio 6063-T5, é possível afirmar que o chassi suporta com segurança, uma carga de até 1000 N sem sofrer uma falha mecânica por escoamento plástico e acomoda com conforto e segurança, um usuário com estatura superior a 165,8 cm. O chassi construído em alumínio, além de tornar o equipamento mais leve, fornece uma maior deflexão elástica por apresentar uma menor rigidez, se comparado ao aço, o que torna o triciclo mais confortável quando em movimento.

De forma geral, a pesquisa apresenta um desenvolvimento de um produto que, por meio dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o triciclo híbrido para pessoas com deficiência motora dos membros inferiores, pode ser fabricado em escala industrial e comercializado.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, F. O.; RAMOS, R. A. R.; SILVA, A. N. R.; Cenários de avaliação das restrições à mobilidade dos pedestres em espaços públicos: o caso de um campus universitário. **Transportes**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 5-15, 2009.
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos**: a base da tecnologia CAE. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- ALVES, J. O. **Concepção de veículo motorizado elétrico modular de acoplamento universal em cadeiras de rodas mecanomanual**. 2017. 180 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/151433>. Acesso em: 02 abr. 2019.
- ALVES, L. M. **Introdução aos métodos aproximados em engenharia**: álgebra linear, geometria analítica, cálculo e equações diferenciais. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007.
- ALMARAZ, G. M. D.; AMBRIZ, J. L. A.; CALDERÓN, E. C. Fatigue endurance and crack propagation under rotating bending fatigue tests on aluminum alloy AISI 6063-T5 with controlled corrosion attack. **Engineering Fracture Mechanics**, Nova York, v. 93, n. 1, p. 119-131, 2012.
- AL-QURESHI, H. A. **Processos e mecanismos da conformação de metais**. São José dos Campos: ITA, 1991.
- ARAÚJO, M. S. **Design de vestuário para desportistas deficientes motores**. 2009. 174 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Minho, Braga, 2009. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/10805>. Acesso em: 02 abr. 2019.
- ARTIOLI, E.; CASTELLAZZI, G.; KRYSL, P. An enhanced linear tetrahedral element for plasticity. In: CONGRESSO ASSOCIAZIONE ITALIANA DI MECCANICA TEORICA E APPLICATA, 21, 2013, Torino. **Conference [...]**: Torino: [s.n.], 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281933713_An_enhanced_linear_tetrahedral_element_for_plasticity. Acesso em: 02 abr. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 9050**: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro, 2004.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2003. 258 p.
- ARNET, U.; HINRICHS, T.; LAY, V.; BERTSCHY, S.; FREI, H.; BRINKHOF, M. W. G. Determinants of handbike use in persons with spinal cord injury: results of a community survey in Switzerland. **Disability and Rehabilitation**, Abingdon, v. 38, n. 1, p. 81-86, 2016.

BARBOSA, L. F. F. M. **Avaliação da rigidez torcional do chassi de um protótipo Baja SAE através do método de elementos finitos e de ensaio experimental**. 2015. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

BÉLANGER, M.; STEIN, R. B.; WHELLER, G. D.; GONDON, T.; LEDUC, B. Electrical stimulation: can it increase muscle strength and reverse osteopenia in spinal cord injured individuals? **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, Reston, v. 81, n. 8, p. 1090-1098, 2000.

BRASIL. **Lei Nº 10.098 de 19 de dezembro de 2000**. Estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas portadoras de deficiência ou com mobilidade reduzida. Brasília, 2000.

BRAY, J. W. Properties of wrought aluminum and aluminum alloys. In: AMERICAN SOCIETY MATERIAL – ASM. **ASM handbook: properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials**. 4. ed. Material Park: American Society for Materials, 1995. p. 62-122.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 10. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2016. 1073 p.

BURR-BROWN CORPORATION. **Precision, lower power instrumentation amplifiers**. Dallas: Texas Instruments, 2005. All Datasheet. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/56692/BURR-BROWN/INA129.html>. Acesso em: 12 maio 2014.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAT - Comitê de Ajudas Técnicas. **Tecnologia assistiva**. Brasília: SEDH, 2009.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, Bookman, AMGH, 2012. 902 p.

CHARLES, J. A.; CRANE, F.A.A.; FURNESS, J. A. G. **Selection and use of engineering materials**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. 343 p.

CHAVES, E. S.; BONINGER, M. L.; COOPER, R.; FITZGERALD, S. G.; GRAY, D. B.; COOPER, R. A. Assessing the influence of wheelchair technology on perception of participation in spinal cord injury. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, Maryland Heights, v. 85, p. 1854-1858, 2004.

CONTINI, R. Body segment parameters. **Artificial Limbs**, v.16, n. 1, p. 1-19, 1972.

DALLMEIJER, A. J.; ZENTGRAAFF, I. D. B.; ZIJP, N. I.; VAN DER WOUDE, L. H.V. Submaximal physical strain and peak performance in handcycling versus handrim wheelchair propulsion. **Spinal Cord**, London, v. 42, p. 91-98, 2004.

DENATRAN - DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Manual de segurança de pedestres**. Brasília: DENATRAN/CONTRAN, 1987.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

DISABLED GEAR. Disponível em: <http://disabledgear.com/pages/handbikes>. Acesso em: 10 dez. 2016.

DRONGELEN, S. V.; GROOT, S.; VEEGER, H.; ANGELO, E.; DALLMEIJER, A.; POST, M. W. M.; WOUDE, L. H. V. Upper extremity musculoskeletal pain during and after rehabilitation in wheelchair-using persons with a spinal cord injury. **Spinal Cord**, London, v. 40, p. 152-159, 2006.

FIGUEIREDO, K. M. **Mapeamento dos modos de transferência metálica na soldagem MIG de alumínio**. 2000. 87 f. Mestrado (Dissertação) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000.

FLORIO, J.; ARNET, U.; GEMPERLI, A.; HINRICHS, T. Need and use of assistive devices for personal mobility by individuals with spinal cord injury. **The Journal of Spinal Cord Medicine**, Abingdon, v. 39, n. 4, p. 461-470, 2015.

GAMA, M. C. S.; FERNANDES, L. F. R. M.; BENITES, E. G.; RODRIGUES, S.; Avaliação de um treinamento de marcha com carga parcial de peso. **Acta Ortopédica Brasileira**, São Paulo, v. 16, n. 5, p. 301-304, 2008.

GARCIA JÚNIOR, A. F.; FELÃO, L. H. V.; LIMA FILHO, A. P.; CARVALHO, A. A. **Esqui ergométrico adaptado para pessoas com deficiência motora dos membros inferiores**. 2015. Disponível em: <http://200.145.6.205/index.php/congressoextensao/8congressoextensao/paper/viewFile/558/787>. Acesso em: 02 abr. 2019.

GARCIA JÚNIOR, A. F.; PAULA, I. A.; LIMA FILHO, A. P.; CARVALHO, A. A. Elevador ortostático para treinamento da marcha e integração sensorial para pessoas com deficiência motora. **Revista Ciência em Extensão**, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 199, 2013. Disponível em: . Acesso em: 02 abr. 2019. Disponível em: http://ojs.unesp.br/index.php/revista_proex/article/view/1009/924. Acesso em: 02 abr. 2019.

GARCIA JÚNIOR, A. F. **Adaptação e instrumentação de um esqui ergométrico para Pessoas com deficiência motora dos membros inferiores**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

GOMIDE, D. A.; SHINKAWA, D. Y.; RODRIGUES, T. J.; LIMA FILHO, A. P. **Cama hospitalar especial**. 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/142464>. Acesso em: 02 abr. 2019.

HETTINGA, F. J.; OLDENBURG, M.; DEL-BO, N. P.; SABEL, J.; FABER, A.; VAN DER WOUDE, L. H. V. Handcycling versus cycling: how do they relate? **Medicine & Science in Sports & Exercise**, Philadelphia, v. 43, n. 5, p. 772, 2011.

IDA, I. **Ergonomia**: projeto e produção. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2005. 614 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico**: características gerais da população, religião e pessoas com deficiência. Rio de Janeiro, 2010. 215 p. Disponível em: http://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Caracteristicas_Gerais_Religiao_Deficiencia/caracteristicas_religiao_deficiencia.pdf. Acesso em: 20 maio 2014.

JOHNEN, A.; WEILLB, J. C.; REMACLEA, J. F. Robust and efficient validation of the linear hexahedral element. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 203, p. 271-283, 2017.

JUVINALL, R.C. **Engineering consideration of stress, strain and strength**. New York: McGraw-Hill, 1967.

KIT LIVRE. Disponível em: <http://www.kitlivre.com>. Acesso em: 03 mar. 2017.

KWON, Y. W.; BANG H.C. **The finite element method using Matlab**. Boca Raton: CRC Press, 2000.

LAZUKA, M.; LAZUKA, E. Application of Ansys in teaching FEM on the example of a loaded mars rover chassis. **Advances in Science and Technology**, Pfaffikon, v. 10, n. 32, 6 p, 2015.

LASHER SPORT (2016). Disponível em: <http://www.lashersport.com/bikes.html>. Acesso em: 20 dez. 2016.

LIMA FILHO, A. P.; GIMENES, L. O. C.; PIANISSOLA, L. H. V. Triciclos personalizados feitos de bicicletas de alumínio reciclado para pessoas paraplégicas. CONGRESSO INTERNACIONAL DO ALUMÍNIO, 5, 2012, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABAL, 2012.

LIMA FILHO, A. P.; GARCIA JÚNIOR, A. F.; PAULA, I. A.; CARVALHO, A. A.; Equipamentos para promoção de melhor qualidade de vida de pessoas com deficiência motora. In: FUJITA, M. S. P. (org). **A inovação para o desenvolvimento social**: políticas públicas e internacionalização. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2014. p.155-177. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/126258/ISBN9788579835377.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 abr. 2019.

LIMA FILHO, A. P.; SHINKAWA, D. Y.; RODRIGUES, T. J.; GOMIDE, D. A.; VIEIRA, E. G.; GARCIA JÚNIOR, A. F. Custom bench for wheelchair of optical microscope. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 24, 2014, Uberlândia. **Anais [...]**. Uberlândia: SBEB, 2014. p. 248-251.

LIMA FILHO, A. P.; UEDA, B. K. S.; ISHIKAWA, B. K.; GIMENES, L. O. C. Fabricação e doação de triciclos para pessoas paraplégicas. In: CONGRESSO DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA DA UNESP, 6, 2011, Águas de Lindóia. **Anais [...]** Águas de Lindóia: Unesp/Proex, 2011. p.190. CD-ROM.

LIMA FILHO, A. P.; NAGEL, M.; SCHULZ, G.; YANIK, Y.; OLIVEIRA, R. A. N.; XAVIER, R. T. Bicycle-pushed tricycle promotes movement of the lower limbs of paraplegic people. **Rehabweek**, Londres, v. 1, n. 1, p. 16, 2017.

LIMA FILHO, A. P.; GARCIA JÚNIOR, A. F.; BUENO, D. D.; SOKEI, C. R.; GIMENES, L. O. C.; UEDA, B. K. S.; ISHIKAWA, B. K.; OLIVEIRA, R. A. N.; **Manufacturing hand bikes using recycled bicycle parts**. 2016. Disponível em: https://cooperation.epfl.ch/wp-content/uploads/2018/12/1133-Lima-Filho-SE16-HAB_Full-Paper.pdf. Acesso em: 02 abr. 2019.

MARINHO, I. J. P. **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis via ANSYS**. 2002. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Strategy for numeric modelling of composite systems considering different models of rupture for the materials. **Revista Chilena de Ingeniería**, Tarapacá, v. 17, n. 2, p. 256-266, 2009.

NETTER, F. H.; MACHADO, C. A. G. **Atlas interativo de anatomia humana**. 3. ed. New York: Icon Learning Systems, 2004. Versão 3.0 CD-ROM.

NORTON, R. L. **Cinemática e dinâmica dos mecanismos**. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2010. 800 p.

OCTAVIANI, C. V. **Simulação numérica de escoamentos incompressíveis pelo método de elementos finitos com esquema de separação baseado na característica (CBS)**. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

PIRES JUNIOR, L.; VITÓRIO, R.; GARCIA, V.D.; BICHUSKY, R.; LUCCHESI, F.; GARAVELLO, P. J.; ORLANDO, P.; NASCIMENTO, F. M.; LOPES, A. C.; NABEIRO, M.; ZONTA, A. F. Z. Aprendendo com o corpo deficiente. **Revista Ciência em Extensão**, São Paulo, v. 2, p. 51-52, 2006.

ROGATTO, G. P. **Força isométrica máxima de indivíduos fisicamente ativos: influência do envelhecimento e do sexo**. 2003. Disponível em: <http://www.efdeportes.com/efd67/ativos.htm>. Acesso em: 28 jun. 2011.

ROOZBAZAR, A.; BOSKER, G.W.; RICHERSON, M.E. A theoretical model to estimate some ergonomic parameters from age, height and weight. **Ergonomics**, Abingdon, v. 22, n. 1, p. 43-58, 1979.

- SANTOS, E. A. **Bicycle pushing tricycle that moving the lower limbs**. Ilha Solteira, 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=00wanK2q1gc&feature=youtu.be>. Acesso em: 17 set. 2017.
- SARRAJ, A. R.; MASSARELLI, R. Design history and advantages of a new lever-propelled wheelchair prototype. **International Journal of Avanced Robotic Systems**, Slavka Krautzeka, v. 8, n. 3, p. 12-21, 2011.
- SERON, B. B.; ARRUDA, G. A.; GREGUOL, M. Facilitadores e barreiras percebidas para a prática de atividade física por pessoas com deficiência motora. **Revista Brasileira de Ciências do Esporte**, Brasília, DF, v. 37, n. 3, p. 214-221, 2015.
- SIEBERT, M. Adjustable handbike-chassis for off Road-use (“Mountain handbike”). **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 2, n. 2, p. 3157-3162, 2010.
- SLAMAN, J.; ROEBROECK, M.; SLOT, W.; TWISK, J.; WENSINK, A.; STAM, H.; BERGEMONS, R.; Can a lifestyle intervention improve physical fitness in adolescents and Young adults with spastic cerebral palsy? A randomized controlled trial. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, Philadelphia, v. 95, n. 9, p. 1646-1655, 2014.
- SLOWIK, J. S.; REQUEJO, S. P.; MULROY, S. J.; NEPTUNE, R. R. The influence of wheelchair propulsion hand pattern on upper extremity muscle power and stress. **Journal of Biomechanics**, Amsterdam, v. 49, n. 9, p. 1554-1561, 2016.
- SOARES, F. S.; GERTZ, L. C.; CERVIERI, A.; AIRES, A. F. R.; SILVEIRA, M. A. Desenvolvimento de um chassis automotivo para um veículo elétrico de pequeno porte. **Revista de Iniciação Científica da ULBRA**, Canoas, v. 1, n. 10, p. 93-101, 2012.
- TEODORI, R. M. Avaliação de um treinamento de marcha com carga parcial de peso. **Acta Ortopédica Brasileira**, São Paulo, v. 16, n. 5, p. 301-304, 2008.
- VALENT, L. J.; DALLMEIJER, A. J.; HOUDIJK, H.; SLOOTMAN, H. J.; POST, M. W.; W.; WOUDE. L. H. V. Influence of hand cycling on physical capacity in the rehabilitation of persons with a spinal cord injury: a longitudinal cohort study. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, Maryland Heights, v. 89, n. 6, p. 1016-1022, 2008.
- VALENT, L. J.; DALLMEIJER, A. J.; HOUDIJK, H.; SLOOTMAN, H. J.; JANSSEN, T. W.; WOUDE. L. H. V. Effects of hand cycle training on wheelchair capacity during clinical rehabilitation in persons with a spinal cord injury. **Disability and Rehabilitation**, Abingdon, v. 32, n. 26, p. 2191-2200, 2010.
- VILELA, L. R. A formação de educadores na era digital. **Educação Temática Digital**, Campinas, v. 8, n. 2, p. 12-22, 2007.

ZUKOWSKI, L. A.; ROPER, J. A.; SHECHTMAN, O.; OTZEL, D. M.; BOUWKAMP, J.; TILLMAN, M. D. Comparison of Metabolic Cost, Performance, and Efficiency of Propulsion Using an Ergonomic Hand Drive Mechanism and a Conventional Manual Wheelchair. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation**, Maryland Heights, v. 95, n. 1, p. 546-551, 2014.

WOODS, B.; WATSON, N. The social and technological history of wheelchairs. **International Journal of Therapy and Rehabilitation**, London, v. 11, n. 9, p. 407-4016, 2004.

APÊNDICE A - Modelagem empregando técnica de elementos finitos para uma barra sujeito a esforços de tração.

A relação entre tensão e deformação elástica de um elemento de acordo com a Resistência dos Materiais, obedece a lei de Hooke (CALLISTER JR, 2012). Sendo assim, para a maioria dos materiais submetidos a uma tensão, a relação de deformação pode ser escrita como:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1)$$

σ : tensão [N/mm²];

E: Módulo de Elasticidade [GPa];

ϵ : Deformação.

A Equação 1 fornece a tensão a qual um corpo está sujeito em um carregamento por meio do produto entre a deformação e o Módulo de Elasticidade do material. A deformação pode ser calculada empregando a Equação 2:

$$\epsilon = \frac{d}{L} \quad (2)$$

ϵ : Deformação;

d: Deslocamento do material;

L: Comprimento do material sem solicitação de carga.

Considerando a Equação 3, é possível calcular a distribuição de forças por unidade de área de um material sujeito a um carregamento:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

σ : tensão [N/mm²];

F: Força aplicada [N];

A: Área da seção transversal [mm²].

Combinando a Equação 3 com a Equação 2, é possível obter:

$$F = \frac{E \cdot A}{L} \cdot d \quad (4)$$

F: Força aplicada ao elemento [N];

E: Módulo de Elasticidade [GPa];

L: Comprimento da barra sem solicitação de carga [mm];

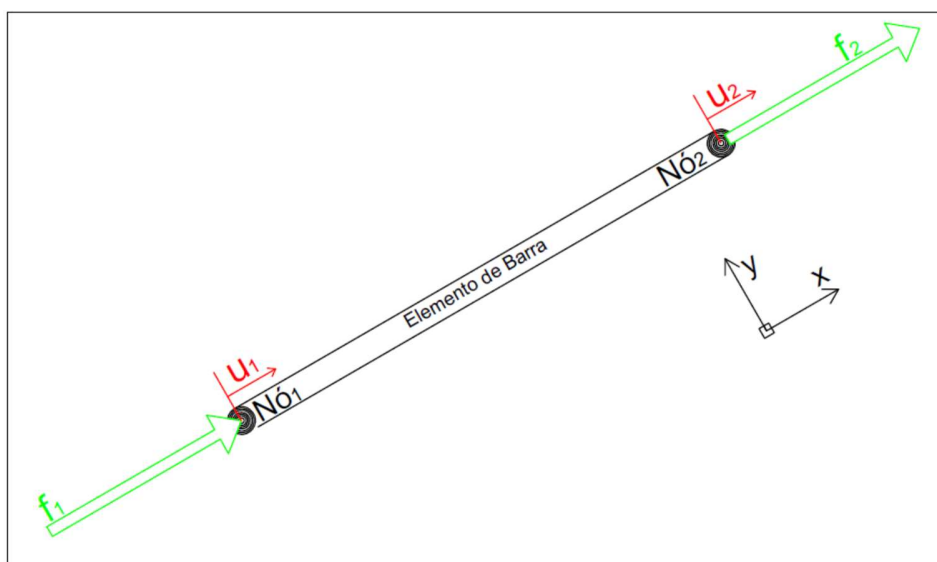
d: deslocamento da barra [mm];

A: Área da seção transversal [mm²].

O Módulo de Elasticidade (ou módulo de Young) pode ser interpretado como uma propriedade vinculada a resistência à deformação elástica de um determinado material.

Para uma barra sujeito a ação de forças em seu eixo axial (Figura 1), é possível elaborar o equacionamento matemático em forma de matrizes adotando um Sistema de Coordenadas Local (x,y).

Figura 1- Diagrama de corpo livre para um elemento de barra por efeito de forças (f_1 e f_2) e seus respectivos deslocamentos (u_1 e u_2) considerando o eixo longitudinal.



Fonte: Próprio Autor.

A Equação 5 apresenta a Lei de Hooke de acordo com o modelagem matricial expandido.

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = A \cdot E / L \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

A representação matricial em forma compacta pode ser definida pela Equação 6:

$$\{f\} = [k]^e \cdot \{u\} \quad (6)$$

Para ambas as equações têm-se que:

$\{f\}$: Forças aplicadas nos nós;

$[k]^e$: Matriz rigidez do elemento;

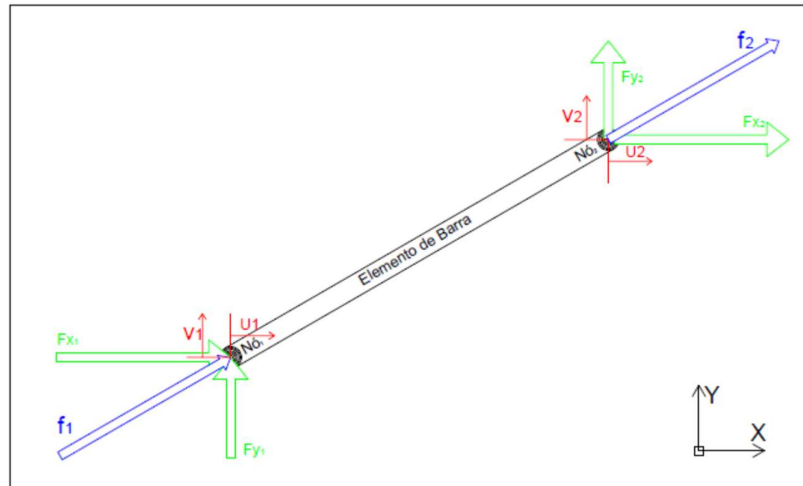
$\{u\}$: Deslocamentos nodais.

É importante observar que, para as Equações 5 e 6, as forças e os respectivos deslocamentos estão alinhados ao eixo longitudinal do elemento de barra. Nessa condição, o sistema é modelado empregando o Sistema de Coordenada Local. Porém, na maioria dos casos, essa condição idealizada não ocorre, já que uma estrutura é formada por uma infinidade de elementos que nem sempre compartilham um alinhamento comum. Para contornar essa condição, é necessário realizar a decomposição de forças que agem sobre cada elemento, tomando por base um sistema de eixo coordenado como referência.

Dessa forma, pode-se elaborar a discretização de um problema considerando ações de forças aplicadas nos elementos de barra, adotando um Sistema de Referência Global (as forças e os deslocamentos de cada elemento de uma estrutura associados a um Sistema de Referência Comum).

A Figura 2 ilustra um elemento de barra sujeito a ação de forças orientadas na direção longitudinal da barra (Sistema de Referência Local) e suas respectivas decomposições referenciadas nos eixos X e Y (Sistema de Coordenadas Global).

Figura 2 - Diagrama de Corpo Livre para um elemento de barra com as forças $(F_{x_1}, F_{y_1}, F_{x_2}, F_{y_2})$ e os respectivos deslocamentos (U_1, U_2, V_1, V_2) decompostos nos eixos X e Y, considerando um Sistema de Coordenadas Global.



Fonte: Próprio Autor.

Os cálculos de ação e reação para a barra no Sistema Local podem ser realizados segundo a Equação 7 (Representação Matricial Expandida), ou de forma compacta, por meio da Equação 8.

$$\begin{Bmatrix} f_{x_1} \\ f_{y_1} \\ f_{x_2} \\ f_{y_2} \end{Bmatrix} = \frac{A \cdot E}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\{f\} = [k]^e \cdot \{\delta\} \quad (8)$$

$\{f\}$: Matriz coluna contemplando as forças nodais no Sistema de Referência Local;

$[k]^e$: Matriz rigidez do elemento;

$\{\delta\}$: Matriz coluna contemplando os deslocamentos nodais no Sistema de Referência Local (u_1, v_1, u_2, v_2) .

A decomposição das forças para realizar a mudança de coordenadas (Sistema Local-Sistema Global) é realizado por meio das Equações 9, 10, 11 e 12.

$$f_{x_1} = F_{X_1} \cdot \cos\alpha + F_{Y_1} \cdot \sin\alpha \quad (9)$$

$$f_{y_1} = -F_{X_1} \cdot \sin\alpha + F_{Y_1} \cdot \cos\alpha \quad (10)$$

$$f_{x_2} = F_{X_2} \cdot \cos\alpha + F_{Y_2} \cdot \sin\alpha \quad (11)$$

$$f_{y_2} = -F_{X_2} \cdot \sin\alpha + F_{Y_2} \cdot \cos\alpha \quad (12)$$

Em forma matricial, as Equações 9, 10, 11 e 12 podem ser apresentadas pela Equação 13.

$$\begin{pmatrix} f_{x_1} \\ f_{y_1} \\ f_{x_2} \\ f_{y_2} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & \mu & 0 & 0 \\ -\mu & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & \mu \\ 0 & 0 & -\mu & \lambda \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_{X_1} \\ F_{Y_1} \\ F_{X_2} \\ F_{Y_2} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\lambda = \cos\alpha$$

$$\mu = \sin\alpha$$

A matriz 4x4 apresentada pela Equação 13, é denominada Matriz Transformação de Coordenadas.

De forma compacta, a Equação 13 se resume a:

$$\{f\} = [T] \cdot \{F\} \quad (14)$$

$\{f\}$: Matriz coluna contemplando as forças nodais no Sistema de Referência Local;

$[T]$: Matriz transformação de coordenadas;

$\{F\}$: Matriz coluna contemplando as forças nodais no Sistema de Referência Global;

É possível estabelecer a relação entre os componentes de deslocamentos no sistema local e global da mesma forma que foi realizado para as forças nodais, apresentado pela Equação 14. Dessa forma, a Equação 15 apresenta a relação entre os componentes de deslocamentos no sistema local e global.

$$\{\delta\} = [T] \cdot \{\Delta\} \quad (15)$$

$\{\delta\}$: Deslocamentos nodais no sistema de coordenada local;

$[T]$: Matriz transformação de coordenadas;

$\{\Delta\}$: Componentes de deslocamentos nodais no sistema de coordenadas global.

Substituindo as Equações 14 e 15 na Equação 8, é possível obter a relação entre as forças aplicadas em um elemento, com seus respectivos deslocamentos, ambos tendo como referência o sistema global (Eq. 16):

$$[T] \cdot \{F\} = [k]^e \cdot [T] \cdot \{\Delta\} \quad (16)$$

Multiplicando ambos os lados da Equação 16 pela Inversa da Matriz Transformação $[T]^{-1}$, tem se que:

$$[T]^{-1} \cdot [T] \cdot \{F\} = [T]^{-1} \cdot [k]^e \cdot [T] \cdot \{\Delta\} \quad (17)$$

Porém o cálculo de $[T]^{-1} \cdot [T]$ resulta em uma matriz identidade. A Equação 18 apresenta a Equação 17 de forma simplificada.

$$[I] \cdot \{F\} = [T]^{-1} \cdot [k]^e \cdot [T] \cdot \{\Delta\} \quad (18)$$

Matematicamente, a matriz $[F]$ não sofre alteração quando multiplicada pela matriz Identidade. Dessa forma, a Equação 18 pode mais uma vez simplificada.

$$\{F\} = [T]^{-1} \cdot [k]^e \cdot [T] \cdot \{\Delta\} \quad (19)$$

Uma propriedade importante em relação a mudança de coordenadas é que a Inversa da matriz transformação é igual a sua transposta, ou seja,

$$[T]^{-1} = [T]^T \quad (20)$$

Assim, a Equação 19 se resume a:

$$\{F\} = [T]^T \cdot [k]^e \cdot [T] \cdot \{\Delta\} \quad (21)$$

A Equação 21 apresenta a relação entre as forças nodais $[F]$ de um elemento e os respectivos deslocamentos $\{\Delta\}$, ambos descritos no sistema global.

Dessa forma, a matriz rigidez de um elemento de barra no sistema global, pode ser definida como:

$$[K]^e = [T]^T \cdot [k]^e \cdot [T] \quad (22)$$

$[K]^e$: Matriz rigidez de um elemento no sistema global;

$[T]^T$: Transposta da matriz transformação de coordenadas;

$[k]^e$: Matriz rigidez de um elemento no sistema local;

$[T]$: Matriz transformação de coordenadas.

Expandindo a Equação 22 em forma de matrizes, considerando um elemento de barra, tem-se que:

$$[K]^e = \begin{bmatrix} \lambda & -\mu & 0 & 0 \\ \mu & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & -\mu \\ 0 & 0 & \mu & \lambda \end{bmatrix} \frac{A \cdot E}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda & \mu & 0 & 0 \\ -\mu & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & \mu \\ 0 & 0 & -\mu & \lambda \end{bmatrix}$$

$$[K]^e = \frac{A \cdot E}{L} \begin{bmatrix} \lambda \cdot \lambda & \lambda \cdot \mu & -\lambda \cdot \lambda & -\lambda \cdot \mu \\ \lambda \cdot \mu & \mu \cdot \mu & -\lambda \cdot \mu & -\mu \cdot \mu \\ -\lambda \cdot \lambda & -\lambda \cdot \mu & \lambda \cdot \lambda & \lambda \cdot \mu \\ -\lambda \cdot \mu & -\mu \cdot \mu & \lambda \cdot \mu & \mu \cdot \mu \end{bmatrix}$$

Assim, por meio da matriz rigidez de um elemento no sistema local $[K]^e$, a relação entre as forças e os respectivos deslocamentos de um elemento de barra no sistema de referência global se resume a Equação 23:

$$\{F\} = [K]^e \{\Delta\} \quad (23)$$

$\{F\}$: Matriz coluna contemplando as forças nodais no Sistema de Referência Global;

$[K]^e$: Matriz rigidez de um elemento no sistema global;

$\{\Delta\}$: Componentes de deslocamentos nodais no sistema de coordenadas global.

Considerando uma estrutura complexa formada por diversos elementos, é necessário aplicar a lei de Hooke seguindo a Equação 8 adotando o sistema local de referência para cada elemento. Por outro lado, para se obter os deslocamentos no sistema global, é necessário utilizar a Matriz Transformação de Coordenadas [T]. Dessa forma, a mudança de coordenadas deve ser realizada para todos os elementos de uma estrutura.

É importante ressaltar que a modelagem apresentada é válida para um elemento de barra com dois nós e quatro graus de liberdade apenas. De acordo com a geometria e o número de graus de liberdade do elemento, as dimensões das matrizes envolvidas nos cálculos vão se tornando cada vez maiores, conforme apresentado em Material e Métodos (Capítulo 4) que aborda um elemento sólido hexaédrico linear empregado na simulação estrutural do triciclo desenvolvido.

APÊNDICE B – Etapas de fabricação do chassi do triciclo híbrido.

Montagem do chassi do triciclo híbrido realizado seguindo as etapas apresentadas pelas s a seguir.



Fonte: O Autor.

Objetivo:

Caracterizar a qualidade da solda em tubo de alumínio Extrudado Liga 6063, ensaios solicitados:

Composição química;

Ensaio Mecânicos LR LRT Alongamento;

Caracterização por microscopia Óptica (Metalografia);

Caracterização de Micro Dureza HV;

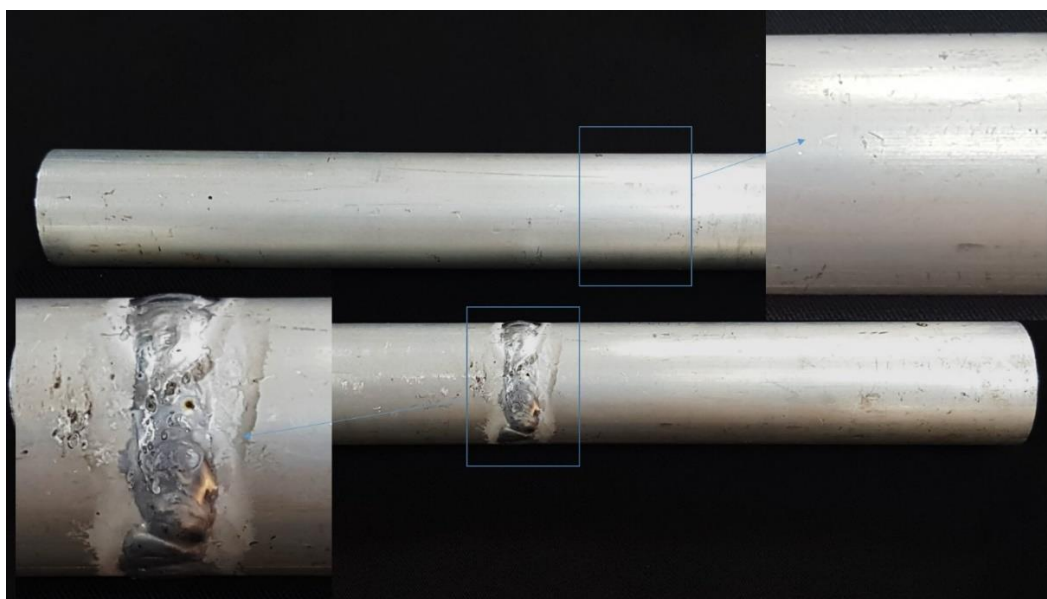


Imagem das amostras fornecidas para ensaio.

Resultados:

Micrografia, evidenciando a microestrutura região da solda, gráfico de perfil de dureza HV com profundidade 12mm. Notamos ligeira queda de dureza ao ponto que se afasta da região da solda, a microestrutura nesta região mostra a presença de precipitados grosseiro do composto Mg_2Si , a causa para esta condição foi o aquecimento pelo processo de solda. Ao ponto em que se aproxima da região da solda houve solubilização dos precipitados Mg_2Si mantendo-os e solução sólida gerando pequeno ganho de dureza. Material de preenchimento da solda mostra pico de dureza, condição típica. (Detalhes na Figura 2). Evidenciamos também falha no preenchimento da raiz da solda promovendo queda das propriedades mecânicas.

Amostra	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	B	Al
Tubo Perfil 6063	0,41	0,16	-	0,006	0,50	0,002	0,007	0,009	0,001	99,87

Tabela 1 – Composição química (%) para a amostra fornecida para ensaio.

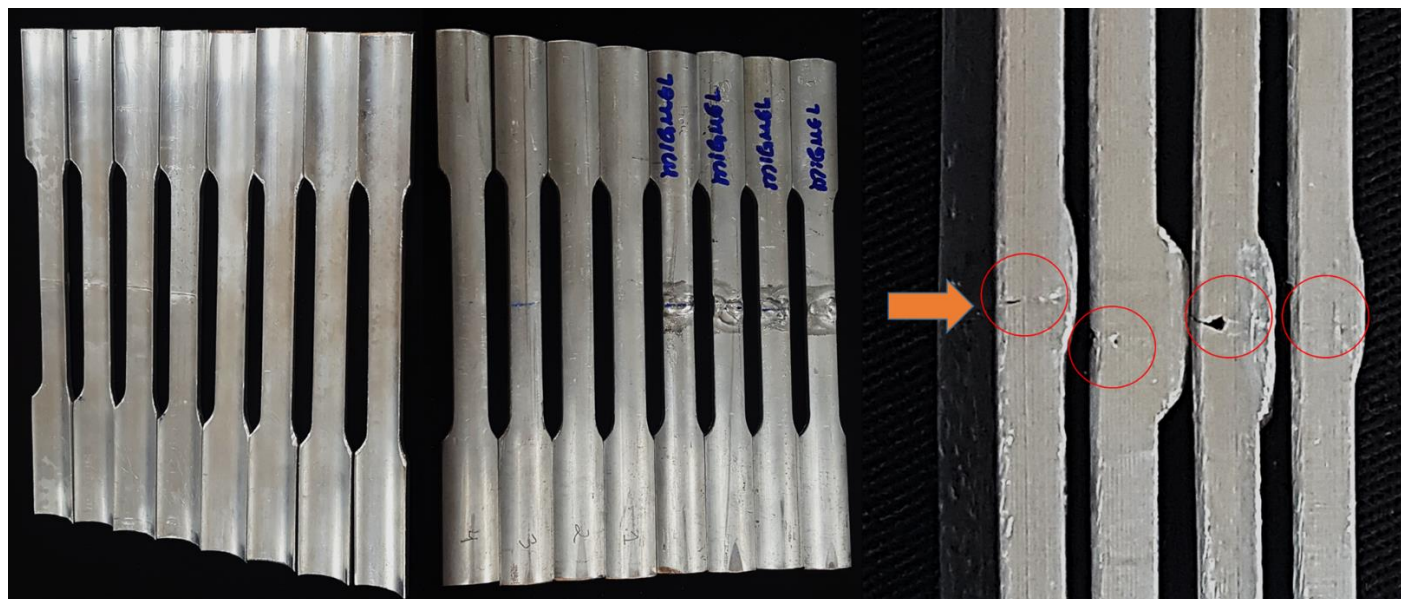


Figura 2 – Detalhes dos corpos de prova para ensaios mecânicos, podemos observar a falha na raiz da solda, resultados de propriedades mecânicas dos materiais soldado teve redução de 78,5% se comparado com o material sem solda.

Amostra	LE (MPa)	LRT (MPa)	Alongamento (%)	Espessura (mm)
CP 1 sem solda	167,3	217,8	17,7	3,0
CP 2 sem solda	166,6	215,9	17,6	3,0
CP 3 sem solda	168,2	219,4	18,5	3,1
CP 4 sem solda	167,2	218,1	18,0	3,0
CP 1 com solda	31,0	33,6	3,7	3,0
CP 2 com solda	46,0	48,3	1,7	3,1
CP 3 com solda	38,5	48,1	3,0	3,1
CP 4 com solda	54,2	57,3	1,9	3,1

Tabela 2 – Resultados das propriedades mecânicas realizadas no material com e sem solda.

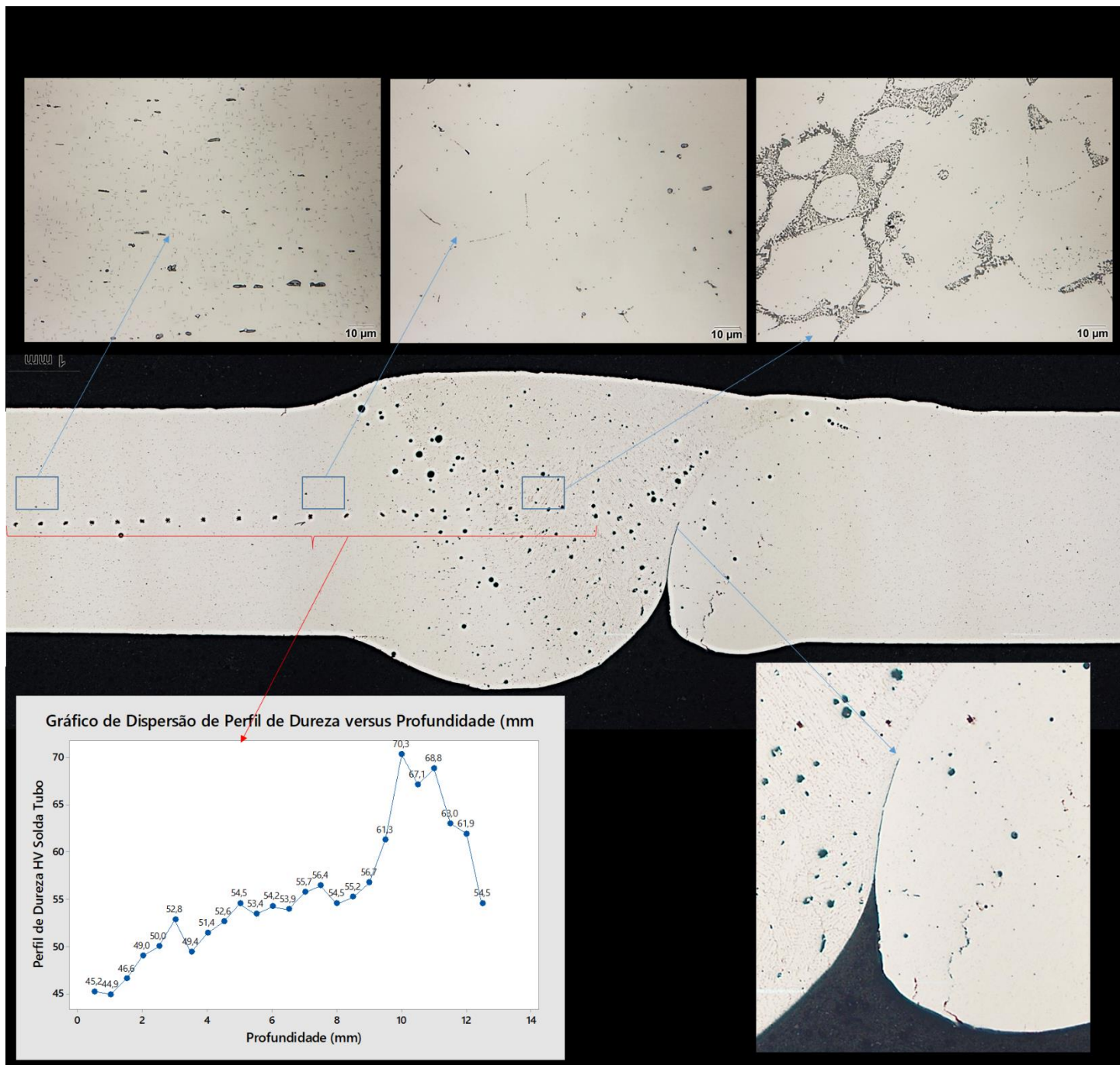


Figura 2 – Detalhes da caracterização da solda, perfil de dureza e detalhe da falha na raiz da solda, faltando preenchimento e comprometendo as propriedades mecânicas.

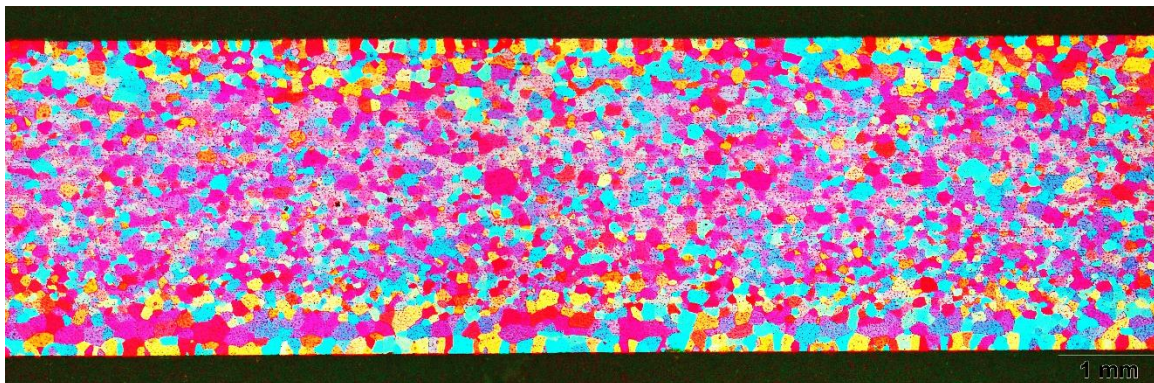


Figura 3 – Detalhes da estrutura granular recristalizada para o perfil sem Solda, distribuição homogênea de grãos, ensaio de dureza encontrado foi 84,5HV.



Figura 4 – Detalhes da microestrutura e distribuição homogênea das partículas de segunda fase α -AlFeSi, nota-se poucos precipitados Mg₂Si após envelhecimento artificial condição típica promovendo boas propriedades mecânicas.

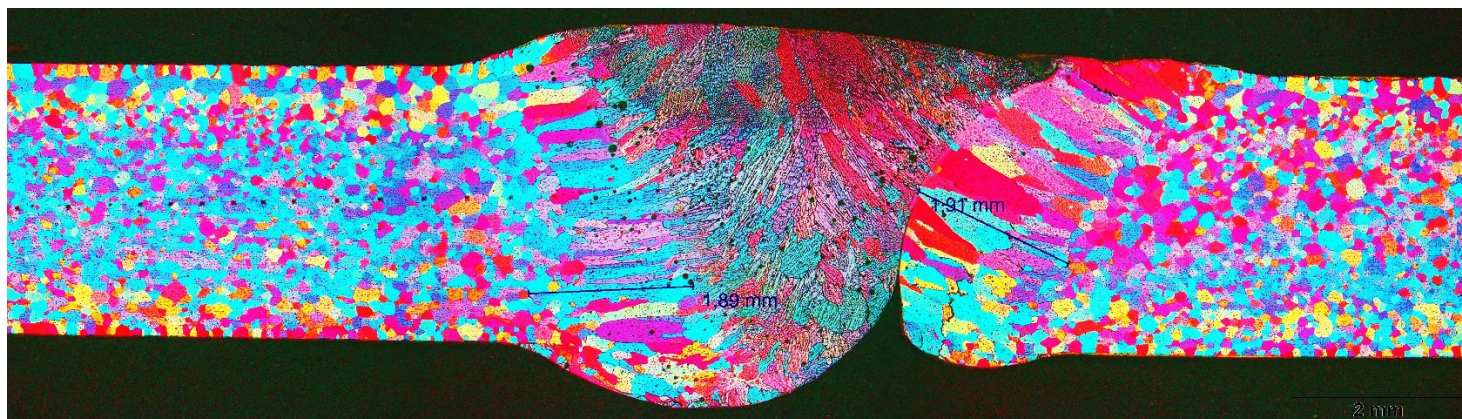


Figura 5 – Detalhes da estrutura granular região da solda e profundidade da ZTA < 2,0mm.

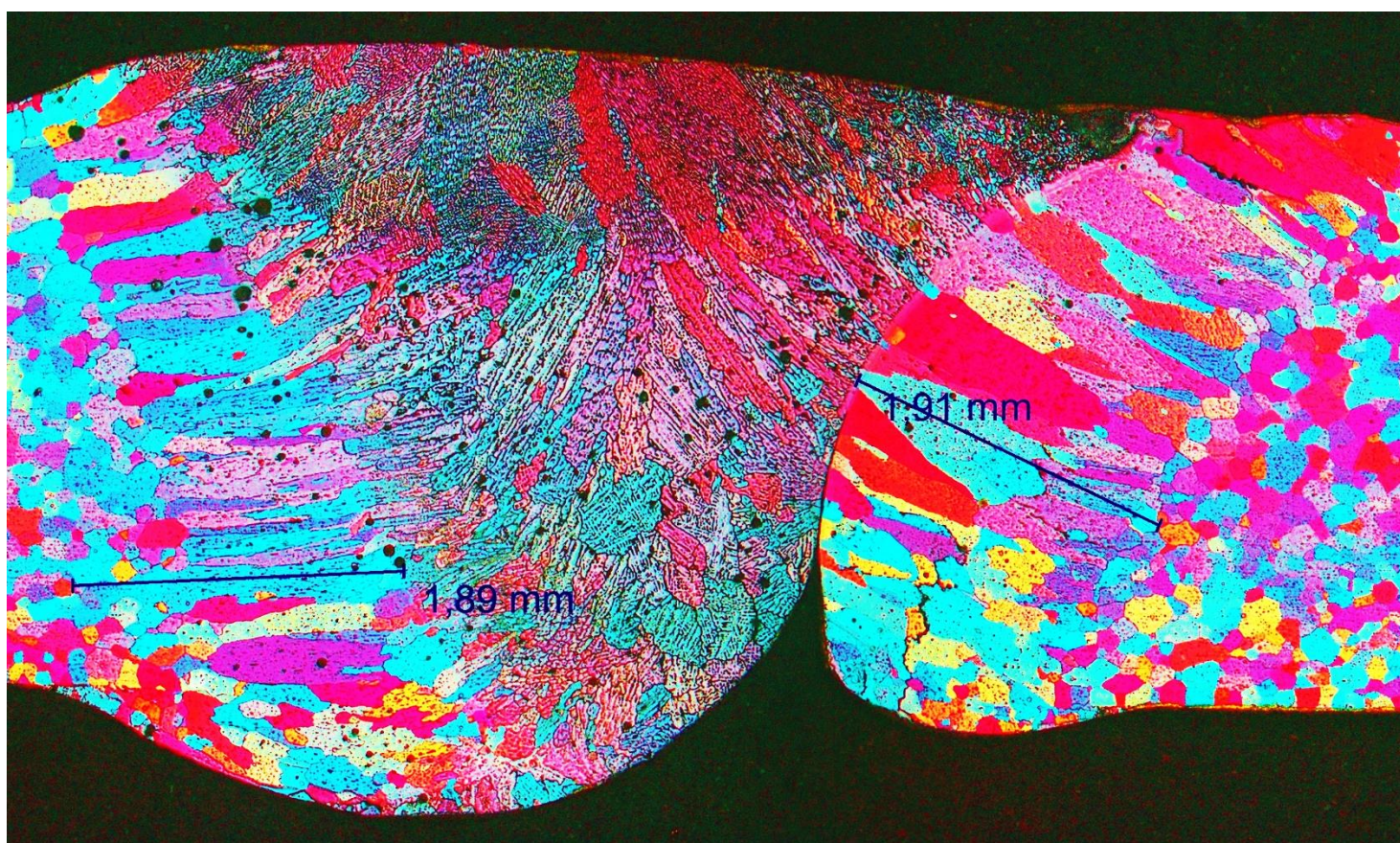


Figura 6 – Detalhe da raiz da solda mostrando a falta de penetração, gerando ponto de fadiga e queda de propriedades mecânicas, ZTA menor que 2,0mm.