



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

FREDERICO SOUSA SANTOS

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UM TRICICLO ADAPTADO PARA FRAME
RUNNING (PETRA) PROJETADO COM MODELAGEM PARAMÉTRICA**

UBERLÂNDIA

2024

FREDERICO SOUSA SANTOS

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UM TRICICLO ADAPTADO PARA FRAME
RUNNING (PETRA) PROJETADO COM MODELAGEM PARAMÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibração

Orientador: Prof. Dr. Cleudmar Amaral de Araújo

Coorientadora: Profa. Dra. Juliana Cardoso Braga

UBERLÂNDIA

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S237 2024	<p>Santos, Frederico Sousa, 1996- Otimização estrutural de um triciclo adaptado para Frame Running (PETRA) projetado com modelagem paramétrica [recurso eletrônico] / Frederico Sousa Santos. - 2024.</p> <p>Orientador: Cleudmar Amaral de Araújo. Coorientadora: Juliana Cardoso Braga. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.322 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Araújo, Cleudmar Amaral de, 1963-, (Orient.). II. Braga, Juliana Cardoso, 1979-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 645, PPGEM				
Data:	31/01/2024	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	11h00
Matrícula do Discente:	12122EMC003				
Nome do Discente:	Frederico Sousa Santos				
Título do Trabalho:	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UM TRICICLO PARA FRAME RUNNING (PETRA) PROJETADO COM MODELAGEM PARAMÉTRICA				
Área de concentração:	Mecânica dos Sólidos e Vibrações				
Linha de pesquisa:	Engenharia Biomecânica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	"APOIO À MODERNIZAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DO CENTRO DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS EM ESPORTES PARALÍMPICOS - CINTEST.Br"				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Sidney Nicodemos da Silva - CEFET/MG; Rogério Sales Gonçalves - FEMEC/UFU e Cleudmar Amaral de Araújo - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Cleudmar Amaral de Araújo, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Cleudmar Amaral de Araujo**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/01/2024, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rogério Sales Gonçalves**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/01/2024, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sidney Nicodemos da Silva**, **Usuário Externo**, em 02/02/2024, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5144268** e o código CRC **47C983BE**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maria e Artur, e a minha irmã Júlia, por sempre me apoiarem em minha caminhada e não medirem esforços para promover o melhor em minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cleudmar Amaral de Araújo, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e estar sempre solícito para sanar dúvidas e oferecer bons conselhos.

À minha professora coorientadora Juliana Cardoso Braga, expresse minha sincera gratidão. Sua orientação cuidadosa e *insights* valiosos contribuíram significativamente para a qualidade e abrangência desta dissertação.

Estendo também meus agradecimentos ao Prof. Márcio Peres que, desde a iniciação científica, tem sido um mentor constante. Agradeço por sua orientação e conselhos valiosos ao longo dessa jornada.

Agradeço também a toda equipe do LPM e CINTESP.Br pelos momentos de descontração e terem de alguma forma contribuído durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao técnico do laboratório, Diego, por toda ajuda prestada ao longo de minha jornada acadêmica.

Ao Comitê Paralímpico Brasileiro, em especial o Professor Dr. Décio Roberto Calegari (*in memoriam*), por apresentarem a possibilidade do trabalho e cederem o equipamento utilizado.

Aos atletas, treinadores e equipe do SESI, FUTEL e APARU por toda ajuda prestada participando da pesquisa com validação e *feedbacks* de melhorias que foram essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela oportunidade de cursar o mestrado e aos órgãos de fomento CNPq e CAPES por proporcionar os recursos financeiros para realização desta pesquisa.

SANTOS, F. S. **Otimização Estrutural de um Triciclo Adaptado para *Frame Running* (PETRA) Projetado com Modelagem Paramétrica.** 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024, 100f.

RESUMO

O *Frame Running* (PETRA) é uma modalidade do paratletismo voltada para atletas com Paralisia Cerebral que utiliza em sua prática um equipamento semelhante a um triciclo, porém, no lugar de utilizar um sistema de pedais, os atletas se propulsionam com os próprios pés ao longo da pista. Esse esporte adaptado se encontra em fase de implementação no Brasil e, nesse contexto de difusão do esporte, representantes do Comitê Paralímpico Brasileiro entraram em contato com o Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner A. Gomide (LPM) e com o Centro Brasileiro de Referência em inovações Tecnológicas para Esportes Paralímpicos (CINTESP.Br) alegando que um dos modelos atualmente utilizado para iniciação ao esporte apresentava constantes quebras e instabilidade durante as corridas. Dessa forma, foi desenhado um modelo CAD da estrutura de referência e realizado simulações estruturais por meio do método de elementos finitos para investigação das causas dos problemas informados. Os resultados apontaram que a estrutura não estava de fato bem projetada e os pontos críticos coincidiram com os relatos de quebra. Em seguida, uma nova geometria totalmente parametrizada foi proposta e simulada em comparativo com a atual, implementando uma rotina de otimização com objetivo de redução de peso e aumento da resistência do equipamento, garantindo melhora na performance e segurança dos atletas. Por fim, um protótipo foi fabricado e testes de usabilidades com atletas da modalidade foram realizados para validação do projeto em ambiente relevante. Os principais resultados obtidos foram uma significativa melhoria na ordem de 70% nos níveis de tensão e deformação da estrutura em comparativo com a estrutura de referência e, na prática, a nova estrutura permitiu melhor desempenho resultando na melhora nos tempos de corridas dos atletas avaliados.

Palavras-chave: *Frame Running; PETRA; Esporte Adaptado; Biomecânica; Método dos Elementos Finitos; Otimização Estrutural.*

SANTOS, F. S. **Structural Optimization of an Adapted Tricycle for Frame Running (PETRA) Designed with Parametric Modeling**. 2024. Dissertation (Master Thesis in Mechanical Engineering) – Universidade Federal de Uberlândia, Brazil, 2024, 100p.

ABSTRACT

Frame Running (PETRA) is a para-athletics practiced by athletes with Cerebral Palsy. It involves using a tricycle-like equipment but instead of using a pedal system, athletes propel themselves with their feet along the track. This adapted sport still in the implementation phase in Brazil and in the context of sport dissemination, representatives from the Brazilian Paralympic Committee contacted the Professor Henner A. Gomide Mechanical Projects Laboratory (LPM) and the Brazilian Center of Reference in Technological Innovations for Paralympic Sports (CINTESP.Br), claiming that one of the models currently used for sport initiation presented constant breakages and instability during races. Thus, a CAD model of the current frame was built, and structural simulations were performed using the finite element method to investigate the causes of the reported problems. Results indicated that the frame was inadequately designed, and critical points coincided with reported breakages. Subsequently, a fully parameterized new geometry was proposed and compared with the current model through simulation, implementing an optimization routine to reduce weight and increase equipment resistance, thereby enhancing athlete performance and safety. Finally, a prototype was manufactured, and usability tests with athletes were performed to validate the project in a relevant environment. Key findings included a significant 70% improvement in stress and deformation levels compared to the reference structure, translating into enhanced race times for the evaluated athletes.

Keywords: *Frame Running; PETRA; Adapted sports; Biomechanics; Finite Element Method; Structural optimization.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Atletas em competição de Frame Running.....	15
Figura 2 - Mansoor Siddiqi e a primeira RaceRunner.....	23
Figura 3 - Paratletas brasileiros da modalidade PETRA.....	23
Figura 4 – Histórico de participação de atletas em competições nacionais.....	24
Figura 5 - Modelo de PETRA RaceRunner™ da fabricante By ConnieHansen.....	25
Figura 6 - Dimensões máximas permitidas no regulamento.....	26
Figura 7 - Distribuição de forças que agem sobre uma área seccionada de um corpo sujeito a forças externas.....	28
Figura 8 - Diagrama de tensão-deformação convencional para um material dúctil....	29
Figura 9 - Montagem CAD da bancada de testes.....	33
Figura 10 - Montagem das células de carga no suporte frontal (esquerda) e no suporte traseiro (direita).....	34
Figura 11 - Participante posicionado na esteira para execução dos testes.....	34
Figura 12 - Decomposição do vetor de força em sua componente vertical.....	36
Figura 13 - Leituras das células de carga durante um dos testes (Participante B - 10 km/h).....	37
Figura 14 - Análise do padrão periódico de passadas durante um dos testes (Participante B - 10 km/h).....	40
Figura 15 - Espectro de frequência de um sinal de forças da célula de carga 3 (Participante B - 10 km/h).....	41
Figura 16 - CAD do modelo PETRA utilizado.....	44
Figura 17 - CAD da estrutura tubular da PETRA.....	44
Figura 18 - Modelo CAD simplificado para a simulação.....	45
Figura 19 - Detalhe da malha final utilizada.....	46
Figura 20 - Condições de contorno para simulação do peso do atleta na estrutura.....	48
Figura 21 - Campo de deformação total para simulação do peso do atleta.....	48
Figura 22 - Tensão equivalente de von-Mises do modelo para o peso do atleta na estrutura.....	49
Figura 23 - Histórico de convergência para simulação do peso do atleta na estrutura.....	50
Figura 24 - Representação do momento aplicado para simulação da torção da estrutura.....	51

Figura 25 - Condições de contorno para simulação da torção da estrutura.....	51
Figura 26 - Campo de deformação total para a torção da estrutura	52
Figura 27 - Tensão equivalente de von-Mises do modelo para a torção da estrutura	52
Figura 28 - Histórico de convergência da simulação da torção da estrutura.....	53
Figura 29 - Prototipagem da nova estrutura com materiais de baixa fidelidade.....	56
Figura 30 - Comparativo entre as estruturas	58
Figura 31 - Modelo CAD da nova estrutura	58
Figura 32 - Dimensões parametrizadas no modelo CAD.....	59
Figura 33 - Tensão equivalente de von-Mises da nova estrutura para condição do peso do atleta.....	60
Figura 34 - Histórico de convergência para caso estático da nova estrutura.....	61
Figura 35 - Campos de deformação para a análise de torção da nova estrutura	61
Figura 36 - Tensão Equivalente de von-Mises da estrutura nova para análise de torção	62
Figura 37 - Histórico de convergência para caso de torção da nova estrutura	62
Figura 38 - Esquema da metodologia de otimização	64
Figura 39 - Identificação dos tubos parametrizados	65
Figura 40 - Número de amostras em função do número de parâmetros de entrada.....	68
Figura 41 - Simulações do DOE	68
Figura 42 - Sensibilidades dos parâmetros de entrada para a massa final da estrutura	70
Figura 43- Sensibilidades dos parâmetros de entrada para a Tensão Equivalente no caso de torção da estrutura.....	70
Figura 44 - Superfície de Resposta para Deformação Total (torção) em função dos raios interno e externo do tubo 3.....	71
Figura 45 - Critérios de convergência da otimização	73
Figura 46 - Comparativo dos parâmetros de entrada antes e após a otimização.....	75
Figura 47 - Montagem da PETRA com estrutura otimizada	76
Figura 48 - Registro dos testes na pista de corrida	79
Figura 49 - Atleta B utilizando o modelo de referência	81
Figura 50 - Atleta B utilizando o modelo CINTESP.Br	81
Figura 51 - Histórico de otimização da massa da estrutura	89

Figura 52 - Histórico de otimização do deslocamento máximo na análise de peso do atleta.....	89
Figura 53 - Histórico de tensão equivalente máxima na análise de peso do atleta....	90
Figura 54 - Histórico de otimização do deslocamento máximo na análise de torção	90
Figura 55 - Histórico de otimização da tensão equivalente máxima na análise de torção	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações dos modelos padrões para PETRA.....	27
Tabela 2 - Calibração da esteira.....	35
Tabela 3 - Resultados experimentais para 6 km/h.....	38
Tabela 4 - Resultados experimentais para 10 km/h.....	38
Tabela 5 - Resultados experimentais para 14 km/h.....	38
Tabela 6 - Resultados experimentais para frequências de passadas.....	41
Tabela 7 - Propriedades da liga de alumínio 6061-T6	45
Tabela 8 - Resultados da simulação da estrutura para o peso do atleta e estudo de convergência	49
Tabela 9 - Resultados da simulação da estrutura para caso de torção e estudo de convergência	53
Tabela 10 - Resultados da simulação da nova estrutura e estudo de convergência.....	60
Tabela 11 - Tabela de perfis comerciais de alumínio	66
Tabela 12 - Objetivos de otimização dos parâmetros de saída	72
Tabela 13 - Candidatos indicados pela otimização.....	74
Tabela 14 - Comparativo dos parâmetros de entrada antes e após a otimização	75
Tabela 15 - Comparativo dos resultados de simulação das estruturas.....	76
Tabela 16 - Perfil dos atletas participantes	77
Tabela 17 - Tempos registrados nos testes.....	79
Tabela 18 - Resultados para análise de velocidade linear.....	80

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos.....	16
1.2. Estrutura do trabalho.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE	18
2.1. Origem e evolução dos esportes adaptados	18
2.2. Sistema de classificação funcional	19
2.3. Paralisia Cerebral	20
2.3.1. Tipos de Paralisia Cerebral	21
2.4. <i>Frame Running</i> (PETRA).....	22
2.4.1. Equipamento e regulamento	24
2.5. Conceitos de Resistência dos Materiais	28
2.5.1. Tensão	28
2.5.2. Limite de escoamento.....	29
2.5.3. Critério de falha de von-Mises	30
3. ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO .31	
3.1. Desenvolvimento da bancada experimental	31
3.1.1. Materiais.....	32
3.1.2. Montagem da bancada.....	32
3.2. Metodologia de teste.....	34
3.2.1. Calibração da esteira	35
3.2.2. Correção do ângulo de inclinação da célula de carga.....	36
3.3. Resultados dos testes na bancada.....	36
3.3.1. Análise de forças	37
3.3.2. Análise da frequência de passadas.....	39
4. ANÁLISE DA ESTRUTURA DE REFERÊNCIA	43
4.1. Preparação do modelo CAD para as simulações	43
4.2. Designação do material	45
4.3. Preparação da malha	46
4.4. Simulação estática da estrutura de referência	47
4.4.1. Simulação da estrutura para condição de apoio do peso atleta....	47
4.4.2. Simulação da estrutura para condição de torção devido a passada	50
5. PROJETO E ANÁLISE DA NOVA GEOMETRIA DA ESTRUTURA	54
5.1. <i>Design Thinking</i>	54
5.1.1. Inspiração	54
5.1.2. Ideação e Implementação.....	55
5.2. Idealização da nova estrutura	56

5.3.	Modelagem paramétrica	58
5.4.	Simulação estática da nova estrutura proposta	59
5.4.1.	Simulação da nova estrutura para condição de apoio do peso atleta 60	
5.4.2.	Simulação da nova estrutura para condição de torção devido a passada 61	
6.	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS PERFIS TUBULARES.....	63
6.1.	Parametrização dos perfis de tubos.....	65
6.2.	Aplicação e análise do DOE (<i>Design of Experiments</i>)	67
6.3.	Sensibilidades locais e superfícies de resposta	69
6.4.	Otimização Multiobjetivo	72
6.5.	Comparativo das estruturas.....	74
7.	VALIDAÇÃO DE PROJETO EM PISTA.....	77
7.1.	Perfil dos participantes.....	77
7.1.1.	Análise quantitativa	78
7.1.2.	Análise qualitativa	80
8.	CONCLUSÕES.....	82
9.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	ANEXO.....	89
	APÊNDICE A – PROJETO DE PESQUISA SUBMETIDO AO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA (CEP).....	92
	APÊNDICE B – QUESTIONÁRIOS.....	93
	APÊNDICE C – PRODUÇÕES CIENTÍFICAS	98

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

O esporte é visto como uma poderosa ferramenta de promoção da saúde e inclusão social. Formação de valores, incentivo de hábitos saudáveis e fortalecimento de laços humanos são alguns dos princípios atrelados a prática de atividades físicas. Tais características são de grande relevância ao se tratar do esporte adaptado. A proposta de desafios a serem superados estimula o desenvolvimento da autoestima e maiores níveis de independência do deficiente, o que reflete em uma melhora na sua qualidade de vida.

Para inserção de pessoas com deficiência física no cenário esportivo são necessárias adaptações práticas para incorporação de corpos que se encontram fora dos padrões de normalidade (física, fisiológica, comportamental, social) para as demandas de cada atividade (MARQUES, 2009). Desde que o esporte adaptado passa a ser considerado como um instrumento de reabilitação, essas adaptações vêm evoluindo e pesquisas envolvendo diversos setores do conhecimento são cada vez mais difundidas.

Dentro das várias modalidades esportivas, uma categoria recente e que está em fase de implementação no cenário paralímpico nacional é o *Frame Running*, antigamente denominado *Race Running* e que ficou conhecido no Brasil como PETRA. Esse esporte é uma modalidade do para-atletismo na qual os atletas utilizam de uma espécie de triciclo sem pedal como apoio e se propulsionam pela pista com os próprios pés (Figura 1). É predominantemente praticada por pessoas com Paralisia Cerebral, mas também se adequa a pessoas com outras deficiências que afetam a mobilidade e o equilíbrio (VAN DER LINDEN et al., 2018). O esporte teve origem na Dinamarca em 1989 desenvolvido por Mansoor Siddiqi e Connie Hansen, ambos ex-paratletas de corrida em cadeira de rodas (SIDDIQI, 2016).

Figura 1 - Atletas em competição de Frame Running



Fonte: Paralympic.org

A PETRA veio para o Brasil apenas em 2009 por meio da Associação Nacional de Desportos para Deficientes (ANDE). Um dos principais problemas enfrentados por técnicos e paratletas no Brasil nessa etapa de implementação, e que tem atrapalhado a difusão do esporte no país, é o acesso ao equipamento. Os modelos importados são muito caros, e, mesmo que apresentem algumas variações de tamanho, para um melhor desempenho no esporte é fundamental ajustes de acordo com as dimensões e características de cada atleta. A solução mais viável economicamente até então tem sido a fabricação dos próprios equipamentos, porém estes nem sempre tem desempenho satisfatórios ou são bem projetados e apresentam problemas de resistência mecânica, funcionalidade ergonômica e instabilidade, colocando em risco a segurança e performance dos atletas.

Após os constantes problemas de quebra de um dos modelos utilizados para iniciação ao esporte, representantes do Comitê Paralímpico Brasileiro entraram em contato com o Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner A. Gomide (LPM) e com o Centro Brasileiro de Referência em Inovações Tecnológicas para Esportes Paralímpicos (CINTESP.Br) para que as causas destas falhas nos equipamentos fossem investigadas e um novo projeto fosse desenvolvido. O intuito é desenvolver esse novo protótipo do equipamento de *Frame Running* que apresente as melhorias

necessárias alcançando um Nível de Maturidade Tecnológica (TRL) adequado para sua validação com testes em ambientes relevantes.

1.1. Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é consolidar o projeto estrutural otimizado de um triciclo para *Frame Running* que apresente melhoria de desempenho e segurança dos atletas em comparação com o modelo atualmente utilizado no programa de iniciação ao esporte.

São objetivos específicos da pesquisa:

- Criação de um modelo CAD exato a estrutura atual para ser utilizado nas etapas simulações;
- Estimativa dos esforços atuantes e condições de contorno para serem utilizadas nas simulações;
- Análise estrutural do modelo atual por meio de simulações com o método de elementos finitos para identificação das principais falhas de projeto e causas de quebras relatadas pelos atletas;
- Idealização de uma nova geometria para a estrutura que ofereça maior resistência mecânica e rigidez torcional;
- Elaboração de uma rotina de otimização multiobjetivo para dimensionamento das seções tubulares utilizadas no novo projeto;
- Validação de projeto com testes de usabilidade com atletas em ambiente relevante (TRL 6).

1.2. Estrutura do trabalho

Para concretização dos objetivos do trabalho, a metodologia do trabalho foi organizada da seguinte forma:

Capítulo II – **Revisão bibliográfica:** Contextualização histórica do esporte adaptado desde sua origem até a atualidade, sistemas de classificação das modalidades paralímpicas com enfoque no *Frame Running* ao pontuar os regulamentos e individualidades desta categoria;

Capítulo III – **Análise e caracterização das condições de carregamento:** Desenvolvimento de uma análise experimental para estimar os dados reais das condições de carregamento a que a estrutura está sujeita.

Capítulo IV – **Estudo de projeto da estrutura de referência:** Análise da geometria e materiais utilizados, modelagem em CAD e posterior simulação pelo método dos elementos finitos de duas condições de carregamento a primeira sendo análise estática do peso do atleta e a segunda uma análise de torção;

Capítulo V – **Proposta da nova estrutura:** A partir dos resultados anteriores, propor uma nova geometria para a estrutura e realização das simulações para verificar os níveis de deformação e tensão equivalente em comparativo com a estrutura de referência;

Capítulo VI – **Otimização da nova estrutura:** Desenvolvimento de um modelo parametrizado e otimização multiobjetivo com ferramentas de *Design of Experiments* e Superfície de Resposta para seleção dos perfis tubulares da estrutura;

Capítulo VII – **Validação da nova estrutura:** Realização de testes experimentais em pista e avaliação de usabilidade do protótipo com atletas para coleta de *feedbacks* e validação do projeto;

Capítulo VIII – **Conclusões;**

Capítulo IX – **Sugestões para trabalhos futuros.**

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

2.1. Origem e evolução dos esportes adaptados

Define-se esporte adaptado como aquele que é designado ou praticado especificamente por atletas com deficiência (BLAUWET, 2012). Pode-se considerar como modalidades adaptadas de categorias comuns ou então criadas especialmente para atender as necessidades de cada caso envolvido. Vale ressaltar que essa adaptação deve ocorrer em dois sentidos: o atleta com deficiência para com o meio e as características do esporte e do ambiente para com o sujeito (MARQUES, 2009).

Embora hoje o esporte seja amplamente difundido como uma forma de reabilitação, por muito tempo essa vertente era considerada impraticável e até mesmo contraindicada (BLAUWET et Al., 2012). A literatura aponta que essa mentalidade foi superada na Europa após a 2ª Guerra Mundial quando práticas esportivas passaram a ser utilizadas como forma de reabilitação física e social de veteranos de guerra.

Em 1944 na Inglaterra o Hospital Stoke Mandeville se tornou um centro nacional para tratamento de lesionados medulares. Lá o neurocirurgião alemão Ludwig Guttmann foi pioneiro ao organizar competições esportivas entre os pacientes e em 1948 ocorreu a *Stokes Mandeville Games*, durante a mesma época dos Jogos Olímpicos. Esse primeiro evento contou com a participação de 16 atletas paraplégicos em uma disputa de arco e flecha (GOLD, 2007). Nos anos seguintes, o evento foi crescendo e contando com a participação de mais atletas e mais modalidades. Em 1952, foi fundada a *International Stokes Mandeville Games Federation* (ISMGF), instituição que foi base para a origem do esporte paralímpico atual.

Os primeiros Jogos Paralímpicos ocorreram em Roma no ano de 1960 contando com a participação de 400 atletas de 23 países. A partir de 1988 em Seul, os Jogos Paralímpicos passaram a ocorrer sempre na mesma cidade em que ocorrem os Jogos Olímpicos e aproveitando inclusive as mesmas instalações (MARQUES, 2009). A última edição dos Jogos Paralímpicos foi sediada no Japão em 2021 contando com a participação de 4300 atletas de 165 países competindo em 22 modalidades.

2.2. Sistema de classificação funcional

Com o crescimento do movimento paralímpico, novas modalidades surgiram e diferentes tipos de deficiências ganharam espaço dentro das práticas esportivas e para contemplar a individualidade de cada atleta, mantendo a competição justa, surgiram os sistemas de classificação. O objetivo é organizar os atletas em classes permitindo que atletas com maiores comprometimentos físicos tenham oportunidade de participar de competições, assim como atletas que apresentam um menor grau de comprometimento (CARDOSO, 2014).

O primeiro método de classificação utilizado foi desenvolvido na Inglaterra em 1940 por uma equipe de médicos e especialistas da área de reabilitação e ficou conhecido como sistema de classificação médica. A filosofia desse método baseia-se em atribuir uma classe única ao atleta de acordo com seu diagnóstico médico independente do esporte que irá competir (TWEEDY et Al., 2009). Entretanto, a classificação médica ficou rapidamente defasada pois se mostrou incapaz de englobar os diversos tipos de deficiências, resultando em um número excessivo de classes nas quais o atleta não utilizava todo o seu potencial muscular (SHERRILL, 1999).

Sendo assim, foi desenvolvido o sistema de classificação funcional que consiste em uma categorização que o atleta recebe em função do seu volume de ação. Ou seja, o atleta é classificado pela sua capacidade de realizar movimentos, colocando em evidência a potencialidade dos resíduos musculares de sequelas de algum tipo de deficiência, bem como músculos que não foram lesados (VERÍSSIMO et. al, 2006). A adoção desse método reduziu significativamente o número de classes e permitiu que cada modalidade esportiva aprimorasse os critérios de classificação conforme a especificidade do esporte e habilidades funcionais de seus praticantes.

As modalidades do atletismo seguem o sistema de classificação funcional formulado pelo Comitê Paralímpico Internacional (IPC). As classes são representadas por dois números precedidos por uma letra. Para as provas em pista se utiliza a letra T e para as de campo a letra F. O número da dezena indica o grupo da deficiência, e a unidade indica o grau de acometimento da deficiência.

O regulamento vigente foi publicado em 2022 e nele as classes são divididas da seguinte maneira: classes 11 a 13 (deficiência visual), classe 20 (deficiência intelectual), classes 31 a 38 (atetose, ataxia e/ou hipertonia), classes 40 e 41 (atletas

com baixa estatura), classes 42 a 47 (atletas com deficiência nos membros, como amputações), classes 51 a 57 (atletas que competem em cadeira de rodas), classes 61 a 64 (atletas que competem com próteses dos membros inferiores). Em relação ao grau de acometimento, quanto menor o número, maior o nível de limitação funcional do atleta. Atletas com Paralisia Cerebral que competem na modalidade PETRA se classificam nas classes de T31 a T38.

2.3. Paralisia Cerebral

A modalidade de esporte adaptado que é foco deste estudo tem como público-alvo atletas com Paralisia Cerebral, portanto é importante conhecer a definição e diagnóstico dessa condição. Ao compreender melhor quais são as necessidades desses usuários, mais assertivas serão as decisões de projeto para atendê-las e garantir o bem-estar dos atletas.

Essa patologia foi descrita pela primeira vez em 1843 pelo médico inglês William Little como encefalopatia crônica da infância. O termo Paralisia Cerebral (PC) passou a ser adotado em 1897 por sugestão do médico e psiquiatra alemão Sigmund Freud para se referir a um grupo de crianças que apresentavam transtornos motores mais ou menos severos devido à lesão do sistema nervoso central (LEITE, 2004).

A definição mais adotada pelos especialistas foi apresentada em 2006 por membros de um seminário internacional para a classificação da PC e a caracteriza como:

“Um grupo de desordens permanente do desenvolvimento do movimento e postura atribuídos a um distúrbio não progressivo que ocorre durante o desenvolvimento do cérebro fetal ou infantil, podendo contribuir para limitações no perfil de funcionalidade da pessoa. A desordem motora na PC pode ser acompanhada por distúrbios sensoriais, perceptivos, cognitivos, de comunicação e comportamental, por epilepsia e por problemas musculoesqueléticos secundários” (ROSENBAUM et al., 2007).

Nos últimos anos, os números referentes à prevalência demonstram que a PC representa a causa mais comum de deficiência física na infância, sendo em torno de 2,1 casos para 1000 nascidos vivos e mantém-se constante ao longo de décadas em diversos estudos (PEREIRA, 2018). No Brasil, não existem números oficiais em relação à prevalência, mas estudos sugerem que a incidência em países em desenvolvimento é maior devido aos problemas nos cuidados pré-natais e ao atendimento primário às gestantes (SILVA, 2021).

A PC é uma doença crônica, não existindo nenhum procedimento de cura. O paciente convive com os sintomas ao longo da vida e, portanto, necessita de tratamentos multidisciplinares, intensivos e coordenados com a finalidade de recuperar funções motoras ou ao menos adaptar a funcionalidade do indivíduo de forma independente (PEREIRA, 2018).

2.3.1. Tipos de Paralisia Cerebral

Os sintomas da PC variam bastante em níveis e características, resultando em quadros clínicos individuais para cada deficiente o que dificulta o diagnóstico. No entanto, a PC pode ser classificada em três subtipos de síndromes: Espástico, Atetósico e Atáxico (AFONSO, 2012).

- **Espástico:**

É a forma mais frequente e é caracterizada por rigidez do tônus muscular (espasticidade). Manifesta-se pela perda de movimentos que podem afetar várias partes do corpo. As pernas e braços afetados são pouco desenvolvidos, bem como são rígidos e fracos, o que dificultam o comer, o andar e outros movimentos coordenados.

- **Atetósico:**

É caracterizado por movimentos involuntários, irregulares, contínuos, lentos e variações na tonicidade muscular. Estes movimentos podem afetar apenas as extremidades ou prolongar-se pelo tronco, músculos faciais e língua o que pode levar a uma articulação deficitária da linguagem.

- **Atáxico:**

Ataxia é a dificuldade em controlar e coordenar os movimentos corporais, principalmente o caminhar. Esse tipo é o menos comum e manifesta-se por falta de equilíbrio, mau controle da cabeça e dificuldade em movimentos rápidos ou que precisem de coordenação fina.

- Mista:

Na maior parte dos casos os sintomas não aparecem isolados, devido a lesões múltiplas do sistema nervoso, podendo apresentar mais do que um quadro clínico.

2.4. *Frame Running* (PETRA)

O *Frame Running* é uma das modalidades do atletismo mais recentes e o foco desse trabalho. A modalidade surgiu em 1989 na Dinamarca como uma variação da corrida de cadeiras de rodas pois alguns atletas com Paralisia Cerebral não se adaptavam muito bem ao posicionamento necessário para participar nessa categoria. Mansoor Siddiqi é o precursor e o primeiro atleta de *Frame Running*, e relata que, devido a sua espasticidade, era necessário bastante esforço para competir com a configuração em que as cadeiras são projetadas o que atrapalhava os seus resultados.

Com esse pensamento, ele procurou a também ex-atleta de corrida de cadeira de rodas e terapeuta ocupacional Connie Hansen para auxiliar no desenvolvimento do novo esporte. Juntos eles reaproveitaram componentes de bicicletas para construir um primeiro protótipo do triciclo (Figura 2). Logo nos primeiros testes, essa nova forma de correr apresentou bons resultados, reduzindo consideravelmente os tempos registrados na categoria anterior (SIDDIQI, 2016).

Figura 2 - Mansoor Siddiqi e a primeira *RaceRunner*

Fonte: SIDDIQI, 2016.

No Brasil, o esporte começou a ser praticado em 2009 por intermédio da ANDE que enviou uma delegação do Rio de Janeiro para representar o país no Acampamento Técnico anual promovido pelos criadores da modalidade. A partir de 2018, com a inclusão do *Frame Running* como prova da competição internacional de paratletismo e possível inclusão da modalidade nas Paralimpíadas, a modalidade passa a ser gerida pelo Comitê Paralímpico Brasileiro (MARÇAL et. al., 2019). A Figura 3 mostra atletas brasileiros durante prova no Circuito Loterias Caixa de Atletismo de 2018.

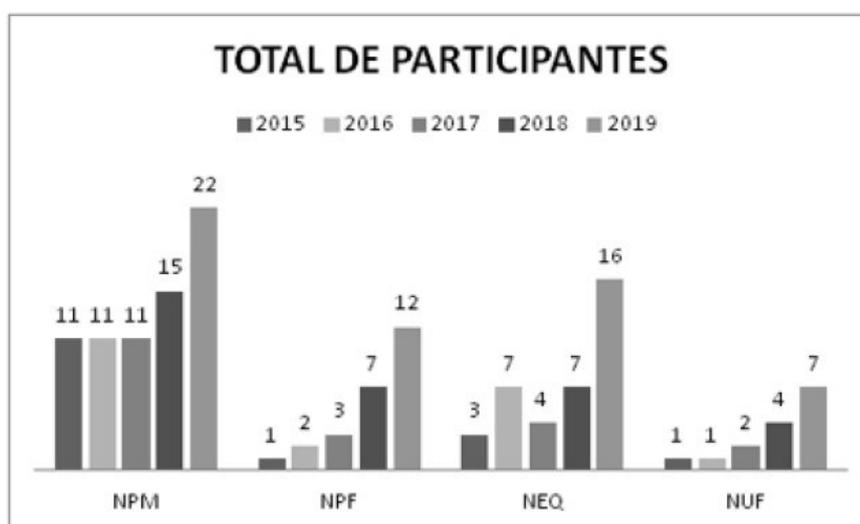
Figura 3 - Paratletas brasileiros da modalidade PETRA



Fonte: ANDE, 2018.

A Figura 4, apresenta a evolução no cenário brasileiro do número de participantes masculinos (NPM), o número de participantes feminino (NPF), o número de equipes (NEQ) e o número de unidades da federação (NUF) desde o primeiro campeonato catalogado pela ANDE em 2015 (MARÇAL et al., 2020). Em participações nas competições internacionais, destaca-se a conquista de 5 medalhas de prata no Campeonato Mundial de 2017 e 1 medalha de bronze no Mundial de Atletismo de Tóquio em 2019.

Figura 4 – Histórico de participação de atletas em competições nacionais



Fonte: MARÇAL et al., 2020.

2.4.1. Equipamento e regulamento

O equipamento utilizado consiste basicamente em uma estrutura tubular, uma roda dianteira, duas rodas traseiras, um assento de bicicleta e um apoio para o tronco no qual o usuário pode se sustentar em uma posição inclinada para frente enquanto controla a direção por meio de um guidão. Não há pedais conectados ao quadro, sendo que toda impulsão deve ser feita pelo atleta no contato dos pés com o solo.

A estrutura tubular tem a geometria de um arco com uma abertura na parte traseira para que o usuário tenha espaço para movimentar livremente os membros inferiores (CALVE et al., 2018). Um bom projeto de estrutura deve conciliar estabilidade com baixo peso para que se possa atingir maiores velocidades de forma

segura durante as provas (DOMÍNGUEZ, 2017). A Figura 5 mostra um exemplo de um modelo comercial importado utilizada por atletas atualmente.

Figura 5 - Modelo de PETRA *RaceRunner*TM da fabricante By ConnieHansen

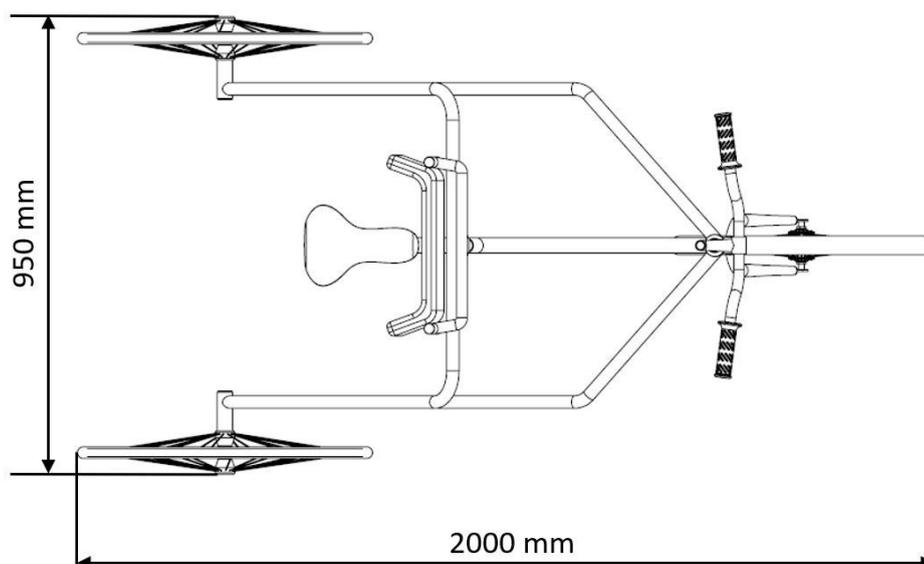


Fonte: <https://by-conniehansen.com/>

A regra 13 do regulamento da modalidade com ano de publicação de 2015 especifica quais as limitações técnicas em relação aos aspectos construtivos da *Race Runner*. O triciclo deve ter um comprimento máximo de até 200 cm, e uma largura máxima de até 95 cm (fora dos dois lados rodas) como representado na Figura 6.

Nenhuma parte do corpo principal (definida como o plano vertical da borda traseira e rodas, incluindo o banco) do corredor, podem estender-se para além do cubo da roda dianteira e ser mais largo do que o interior dos cubos das duas rodas traseiras. Nenhuma parte da estrutura pode se projetar atrás do plano vertical da borda traseira dos pneus traseiros. Em relação ao diâmetro das rodas, a única limitação é que não deve exceder 72 cm incluindo o pneu insuflado.

Figura 6 - Dimensões máximas permitidas no regulamento



Fonte: Autor.

Para as provas acima dos 800 metros, o triciclo deve obrigatoriamente ser equipada com um dispositivo funcional de manobrabilidade e deve ser capaz de virar a roda manualmente para ambos os lados. Em distâncias menores, um batente ligando o garfo ao quadro pode ser utilizado para impedir que o atleta vire o guidão involuntariamente e assim consiga manter uma trajetória em linha reta. O *Frame Runner* pode ser dirigido com qualquer parte do corpo de acordo com as individualidades de cada usuário. Se o atleta conseguir usar o freio, um freio dianteiro deve ser instalado a esquerda ou direita.

A placa de suporte do corpo pode ter uma forma individual para proporcionar maior estabilidade sendo que o corpo pode ser amarrado à placa com um cinto ou uma cinta ortopédica. Mãos também podem ser amarradas ao guidão para garantir maior firmeza ao atleta. Já o selim pode ter outras formas além do tipo tradicional de selim para corridas.

Qualquer tipo de carenagem ou dispositivos similares fixados na estrutura tubular projetados especificamente para melhorar o desempenho aerodinâmico do atleta não é permitido. Também são proibidos o uso de qualquer engrenagem mecânica ou artificial para impulsionar o *Frame Runner*, além de qualquer elemento de amortecimento nas rodas.

Um dos principais problemas enfrentados por treinadores e atletas no Brasil nesta fase de implantação, e que tem dificultado a difusão do esporte no país, é justamente o acesso aos equipamentos. Os modelos importados europeus são caros para a população latino-americana (DOMÍNGUEZ, 2017), e, mesmo que apresentem algumas variações de tamanho, para um melhor desempenho na modalidade é fundamental que o triciclo seja ajustado de acordo com as dimensões e características de cada atleta. Esse ajuste é extremamente desafiador, pois envolve diversos fatores, como força dos músculos do braço, tronco, pescoço e a resistência individual do atleta. Posições semelhantes podem resultar em diferentes formas de movimento (HUTZLER, 2007).

A solução mais viável tem sido a fabricação de equipamentos próprios adaptando peças de bicicletas e quadro soldado. Obedecendo as imposições do regulamento, um dos fabricantes do modelo nacional do triciclo oferece quatro modelos para contemplar atletas de diferentes estaturas. As dimensões gerais de cada um podem ser consultadas na Tabela 1. O modelo utilizado neste trabalho é o médio.

Tabela 1 - Especificações dos modelos padrões para PETRA

MEDIDA	PEQUENA	MÉDIA	GRANDE	MINI
ALTURA MÁX USUÁRIO	140cm	170cm	193cm	110cm
PESO MÁX USUÁRIO	50kg	65kg	100kg	30kg
SELIM	50-66cm	60-75cm	80-95cm	38-53cm
TRONCO	63-88cm	75-102cm	95-125cm	50-75cm
GUIDÃO	65-75cm	70-85cm	100-120cm	50-60cm
COMP.TOTAL	144cm	156cm	184cm	118cm
LARG.TOTAL	70cm	74cm	85cm	71cm
PESO	14kg	15kg	18kg	10kg
RODA FRENTE	20"	20"	20"	17"
RODA TRAS.	700cc	700cc	700cc	20"

Fonte: ANDE.

2.5. Conceitos de Resistência dos Materiais

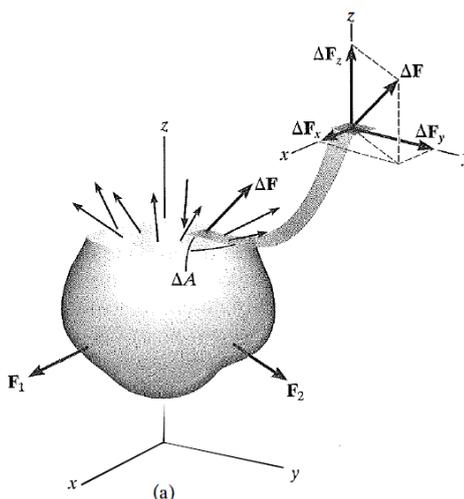
A Resistência dos materiais é o estudo das relações entre as cargas externas que agem sobre um corpo e a intensidade das cargas internas do corpo (HIBBELER, 2010). Ao dimensionar peças e equipamentos, é necessário analisar as forças atuantes e garantir que os níveis de tensão e deformação serão suportados.

2.5.1. Tensão

Ao seccionar um corpo sujeito a esforços externos, a força por unidade de área, ou intensidade das forças distribuídas sobre uma determinada seção, é chamada de tensão naquela seção (BEER, 1996). A distribuição de força em um ponto terá componentes nas direções normal e tangencial, dando surgimento a uma tensão normal e a tensão tangencial de cisalhamento (SHIGLEY, 2005).

Realizando a decomposição das componentes de uma força ΔF agindo sobre a área ΔA conforme a figura 7. Podemos fazer a análise de tensões no ponto.

Figura 7 - Distribuição de forças que agem sobre uma área seccionada de um corpo sujeito a forças externas



Fonte: HIBBELER, 2010

- **Tensão normal (σ):**

A intensidade da força que age perpendicularmente a área da seção. É obtida pela expressão:

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (1)$$

Se a direção de σ é para o exterior da superfície, ela é considerada uma tensão de tração, e caso seja na direção oposta, é considerada uma tensão de compressão.

- **Tensão de cisalhamento (τ):**

A intensidade da força que age tangente a área da seção. Suas componentes são obtidas pelas expressões:

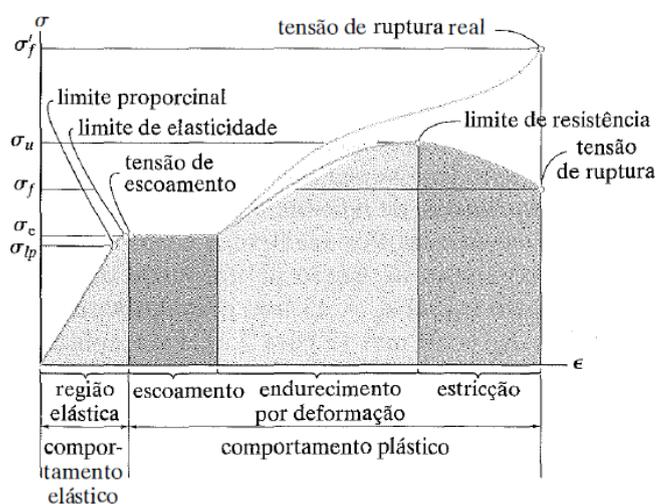
$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad (2)$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (3)$$

2.5.2. Limite de escoamento

O diagrama de tensão-deformação é muito importante na engenharia pois permite obter experimentalmente os dados sobre a resistência de um material sem considerar sua geometria (HIBBELER, 2010). Um dos parâmetros mais importantes obtidos desse diagrama para materiais dúcteis é o limite de escoamento. Este limite, associa uma tensão que a partir dela, o corpo migra da zona de deformação elástica para a zona plástica, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Diagrama de tensão-deformação convencional para um material dúctil



Fonte: HIBBELER, 2010

Quando um corpo sofre deformação elástica, ele é capaz de voltar a forma inicial sem deformação aparente. Já no caso de deformação plástica, ele mantém-se deformado mesmo após a retirada da tensão.

O diagrama tensão-deformação, para a maioria dos materiais de engenharia, exibe uma relação linear entre tensão (σ) e deformação (ε). Um aumento na tensão provoca um aumento proporcional na deformação conforme a lei de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

Nessa expressão, E representa o módulo de elasticidade ou módulo de Young que indica a rigidez de um material e também a inclinação da reta de tensão-deformação no limite elástico.

2.5.3. Critério de falha de von-Mises

Da necessidade de prever condições sob as quais um material falha quando submetido a cargas externas, surgiram as teorias de falhas utilizadas para dimensionamento de componentes mecânicos. Para materiais dúcteis, um dos critérios mais utilizados é a teoria da energia de distorção, também conhecida como critério de von-Mises.

O critério de von-Mises prevê que ocorre escoamento quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume alcança ou excede à energia de deformação por distorção por unidade de volume correspondente ao escoamento sob tração ou compressão do mesmo material (SHIGLEY, 2005). A tensão de von-Mises é calculada pela equação:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2}} \quad (5)$$

Quando a tensão de von-Mises ultrapassa o limite de escoamento do material, ocorrerá o escoamento.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

Como a PETRA é uma modalidade recente e ainda com poucos praticantes quando comparada com outras modalidades paralímpicas, a literatura ainda é escassa e não se encontrou dados experimentais suficientes para utilizar como condições claras de carregamento na estrutura. Considerando ainda que os esforços solicitantes na estrutura variam bastante ao depender da individualidade de cada atleta e existência de cargas dinâmicas desconhecidas, foi necessário elaborar uma bancada experimental utilizando células de cargas para melhor compreender os tipos de esforços envolvidos e, assim, usar esses dados para definir as condições de contorno do modelo das simulações e garantir o dimensionamento apropriado do novo projeto.

3.1. Desenvolvimento da bancada experimental

Uma preocupação primordial durante o desenvolvimento desta etapa foi assegurar que os dados obtidos experimentalmente se aproximem máximo das reais condições de operação do equipamento. A montagem da estrutura deveria proporcionar ao usuário uma sensação semelhante à sua utilização na pista. Para alcançar isso, o fator percebido como mais importante foi a restrição dos graus de liberdade da estrutura, visando garantir paridade experimento-realidade e a segurança ao longo dos testes, sem afetar os valores de força medidos pelas células de carga.

Durante a corrida, a estrutura está sujeita a diversas forças com diferentes orientações e intensidades. No entanto, as células de carga disponíveis para o experimento são do tipo "S", projetadas especificamente para medir forças na direção de tração/compressão. Portanto, é necessário que a montagem desses componentes direcione as forças para sua direção ideal de operação, evitando a introdução de graus indesejados de liberdade ao sistema. Ao atender a esses requisitos, assegura-se que as células de carga não serão danificadas, e os dados obtidos serão confiáveis.

3.1.1. Materiais

O modelo de tricicleta utilizado no estudo foi cedido ao Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner A. Gomide (LPM) e ao Centro Brasileiro de Referência em Inovações Tecnológicas para Esportes Paralímpicos (CINTESP.Br) pelo Comitê Paralímpico Brasileiro (CPB). É um modelo fabricado no Brasil sob pedido do CPB para atender as limitações do regulamento das competições e visando um baixo custo de produção.

Três células de carga modelo CKS-1 do fabricante Kratos® foram selecionadas para uso na bancada de testes. Elas possuem uma capacidade máxima de peso de 200 kg, com uma potência de saída classificada de 2 mV/V e apresentam uma incerteza de 0,03% de Fundo de Escala, sendo adequadas para medições de alta precisão.

O sistema de aquisição de dados utilizado para coletar os sinais transmitidos pelas células de carga foi o ADS1800 da Lynx®, que possui uma taxa de amostragem de 24.000 pontos de dados por segundo, uma resolução de 24 bits e 8 canais de medição. O ADS1800 atua como um microcontrolador, processando e transmitindo as medições obtidas dos sensores para o computador. O computador está equipado com o software AqDados, que realiza análises e cálculos nos dados coletados.

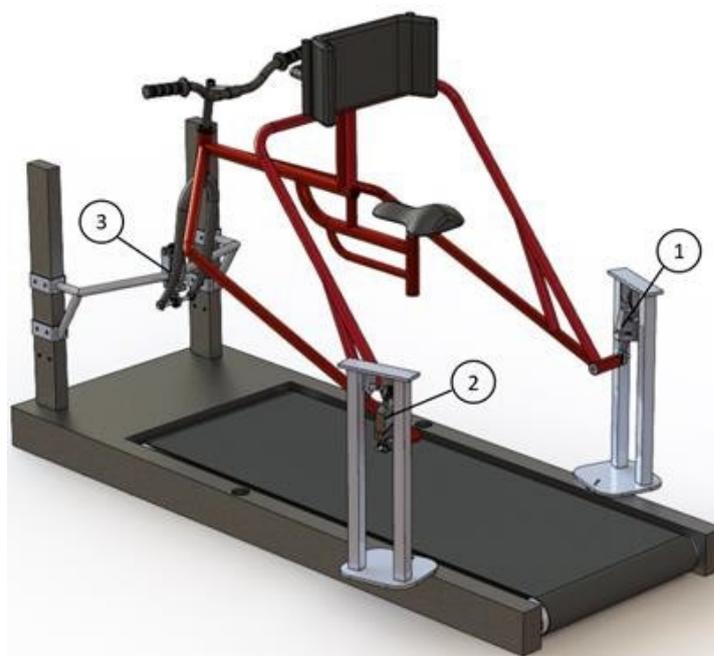
Com o propósito de simular a corrida, foi utilizada uma esteira ergométrica da marca ECAFIX®, modelo EG 700.1. Esta esteira possui uma largura útil de corrida de 515 mm, o que é suficiente para acomodar a instalação da PETRA. A esteira é controlada por meio do software ERGO PC 1.3, permitindo que o operador ajuste manualmente a velocidade do teste com uma resolução de 0,1 km/h.

3.1.2. Montagem da bancada

Para a montagem do triciclo sobre a esteira, foram projetados e construídos 3 suportes para fixação das células de carga conforme ilustrado na Figura 9. Com os suportes e as células de carga já montados, as rodas do triciclo foram desacopladas, deixando apenas a estrutura apoiada nas células de carga e suspensa sobre a esteira ergométrica. Todas as dimensões da esteira foram medidas para reconstruir sua base em CAD e servir como referência para o posicionamento adequado dos suportes. A

Figura 9 ilustra a montagem geral do conjunto de teste. Os balões indicam as células de carga: 1- Traseira Direita; 2- Traseira Esquerda; e 3- Frontal. Este sistema de numeração será utilizado ao longo do trabalho.

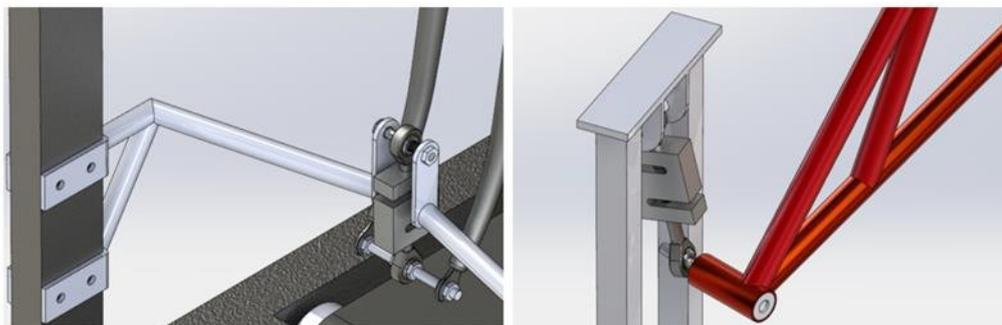
Figura 9 - Montagem CAD da bancada de testes



Fonte: Autor.

Para garantir que todas as forças capturadas pelas células de carga são direcionadas em sua direção de trabalho, elas são montadas na estrutura e na base usando dois terminais rotulares. Nessa configuração, os terminais se autoajustam garantindo que elas trabalhem apenas em tração. Outra situação crítica é assegurar que a montagem mantenha a estabilidade para garantir a segurança durante os testes e promover a confiança do usuário no equipamento. Portanto, decidiu-se montar as células de carga na direção de tração e com uma leve inclinação para garantir que o PETRA fosse suspenso de maneira estável, com folga mínima. A Figura 10 fornece uma visão detalhada da montagem das células de carga no suporte frontal (esquerda) e no suporte traseiro (direita).

Figura 10 - Montagem das células de carga no suporte frontal (esquerda) e no suporte traseiro (direita)

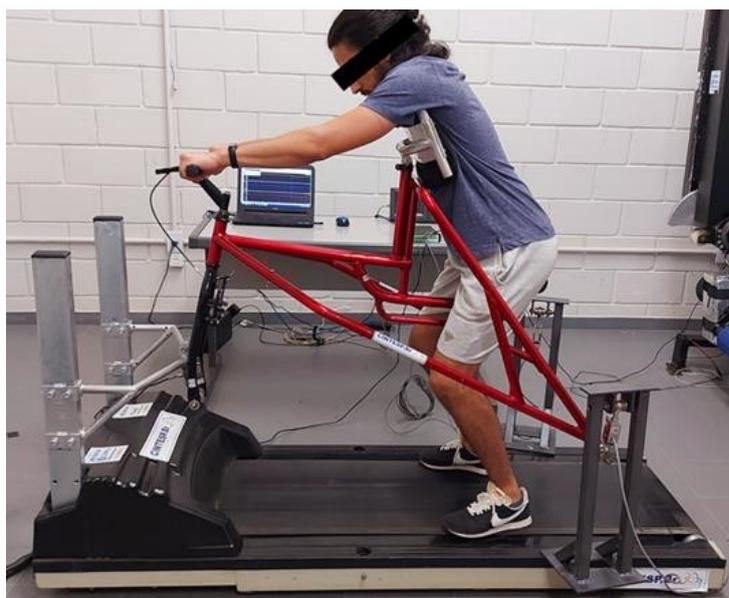


Fonte: Autor.

3.2. Metodologia de teste

Nesta fase inicial de teste, os experimentos foram realizados com a participação de dois voluntários da equipe de pesquisa. Na Figura 11, um dos pesquisadores envolvidos no estudo está posicionado na bancada de teste para conduzir os experimentos.

Figura 11 - Participante posicionado na esteira para execução dos testes



Fonte: Autor.

Para definição da velocidade foi utilizado como referência o trabalho de LOUSADA & PHILLIPS (2017), onde foi feito o acompanhamento de atletas durante sessões de treino e o valor de velocidade média observado foi de $9,8 \pm 3,8$ km/h. Dessa forma, três diferentes velocidades foram escolhidas para análise: 6 km/h, 10 km/h e 14 km/h. Para cada velocidade, foram realizados três ensaios separados. Antes dos testes, os participantes passaram por um breve período de aquecimento para se prepararem para as sessões de corrida. Durante cada ensaio, os participantes iniciaram o movimento de corrida e mantiveram um ritmo constante. Foram então registrados dados experimentais com a duração de 15 segundos para cada corrida. Durante esse período, foi obtido os parâmetros de força exercida nas células de carga e a velocidade da esteira. Após a conclusão de cada ensaio, foi fornecido um curto período de descanso para evitar a fadiga e garantir a confiabilidade dos resultados.

3.2.1. Calibração da esteira

A calibração da esteira foi realizada para garantir que os testes fossem executados nas velocidades corretas. Para este propósito, um pedaço de fita foi fixado na esteira, e o tempo total para cada volta foi registrado. Com o conhecimento do comprimento total da lona da esteira sendo de 3 metros, a velocidade real pôde ser calculada. A Tabela 2 apresenta os dados de calibração obtidos para as três velocidades. Pode-se observar que o maior erro relativo encontrado foi de 4,51%, um valor considerado pequeno e que não afeta significativamente o experimento.

Tabela 2 - Calibração da esteira

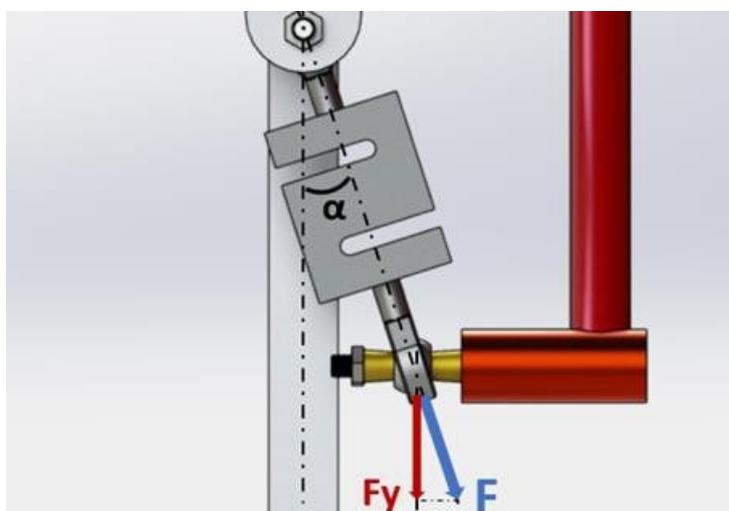
	6 km/h		10 km/h		14 km/h	
	Δt [s]	v [km/h]	Δt [s]	v [km/h]	Δt [s]	v [km/h]
1	1,87	5,78	1,13	9,56	0,81	13,42
2	1,88	5,76	1,10	9,82	0,81	13,33
3	1,88	5,74	1,17	9,23	0,82	13,17
4	1,89	5,71	1,13	9,56	0,79	13,67
5	1,83	5,9	1,13	9,60	0,82	13,25
Média	1,87	5,78	1,13	9,55	0,81	13,37
	Erro	3,68%	Erro	4,47%	Erro	4,51%

Fonte: Autor.

3.2.2. Correção do ângulo de inclinação da célula de carga

Como mencionado anteriormente, as células de carga foram montadas com uma leve inclinação. Portanto, uma vez que o componente vertical da força é de interesse primário, foi necessário realizar a decomposição do vetor de força. A Figura 12 ilustra esse passo. O ângulo α medido na parte frontal foi de $5,50^\circ$ e na parte traseira foi de $11,25^\circ$.

Figura 12 - Decomposição do vetor de força em sua componente vertical



Fonte: Autor.

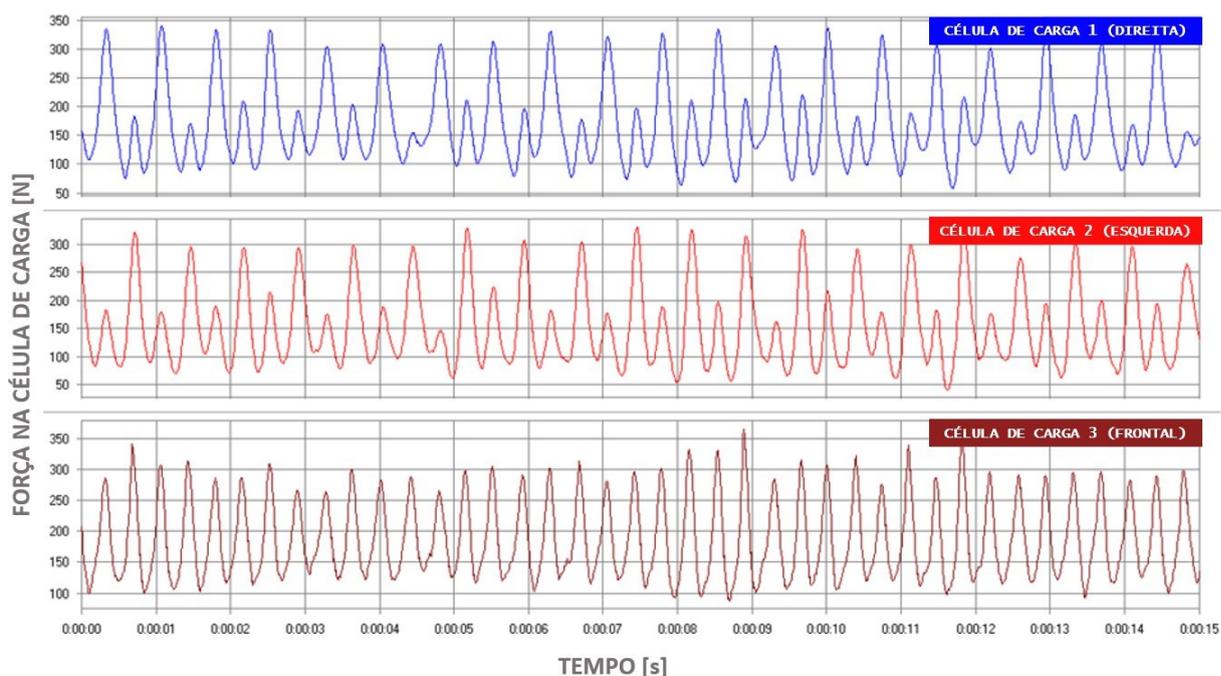
Durante os testes, foram observadas pequenas variações na posição angular das células de carga devido à montagem com os terminais rotulares. No entanto, para os fins desta dissertação, será assumido que a posição angular é fixa. Em trabalhos futuros, será necessária uma investigação mais aprofundada para abordar e mitigar completamente os efeitos dessas variações.

3.3. Resultados dos testes na bancada

Os testes foram conduzidos conforme mencionado na seção 3.2 e os dados foram coletados. A Figura 13 é uma captura de tela do gráfico do software AqDados para os valores de carga obtidos por cada uma das células de carga durante os 15 segundos de um dos ensaios (Participante B - 10 km/h) para servir como

exemplificação. No gráfico, pode-se observar um padrão periódico que se repetiu em cada ensaio. A partir dos dados de todos os ensaios, foi analisada a faixa de carga e sua correlação com a frequência de passada.

Figura 13 - Leituras das células de carga durante um dos testes (Participante B - 10 km/h)



Fonte: Autor.

3.3.1. Análise de forças

Os dados brutos coletados pelo sistema de aquisição e foram processados e convertidos em um arquivo de texto para exportação para o MatLab®, onde foram realizados cálculos e análises adicionais. Para compreender os níveis de força, os valores médios foram calculados para cada tomada, seguidos pela média geral das três tomadas para cada velocidade. Além disso, a força máxima observada para cada velocidade foi registrada. Os resultados experimentais foram organizados para cada velocidade: 6 km/h (Tabela 3), 10 km/h (Tabela 4) e 14 km/h (Tabela 5).

Tabela 3 - Resultados experimentais para 6 km/h

Participante	teste	Traseira Direita (1)			Traseira Esquerda (2)			Frontal (3)		
		média	MÉDIA	MAX	Media	MÉDIA	MAX	média	MÉDIA	MAX
A	1	141,72			92,22			154,88		
	2	109,70	118,75±16,36	360,10	61,09	75,98±12,74	293,32	136,99	143,50±8,08	319,26
	3	104,83			74,63			138,62		
B	1	163,21			149,07			189,74		
	2	154,66	163,36±7,16	344,65	142,56	148,81±5,00	317,40	183,29	188,24±3,59	333,56
	3	172,20			154,80			191,70		

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Resultados experimentais para 10 km/h

Participante	teste	Traseira Direita (1)			Traseira Esquerda (2)			Frontal (3)		
		média	MÉDIA	MAX	Media	MÉDIA	MAX	média	MÉDIA	MAX
A	1	105,24			71,91			142,47		
	2	114,04	106,35±5,87	256,30	81,60	76,28±4,01	212,29	136,94	139,33±2,32	253,62
	3	99,78			75,33			138,58		
B	1	167,73			152,39			188,19		
	2	167,14	166,92±0,77	367,02	148,69	150,45±1,52	338,47	186,41	186,80±1,02	363,87
	3	165,88			150,27			185,79		

Fonte: Autor.

Tabela 5 - Resultados experimentais para 14 km/h

Participante	teste	Traseira Direita (1)			Traseira Esquerda (2)			Frontal (3)		
		média	MÉDIA	MAX	Media	MÉDIA	MAX	média	MÉDIA	MAX
A	1	145,10			102,02			158,23		
	2	129,33	135,03±7,14	255,48	89,49	97,83±5,89	236,37	145,08	151,55±5,37	332,41
	3	130,66			101,97			151,55		
B	1	139,06			122,27			163,35		
	2	121,29	130,76±7,29	391,38	106,22	114,69±6,58	349,12	151,08	157,82±5,08	380,39
	3	131,93			115,57			159,04		

Fonte: Autor.

Como esperado, os resultados dos testes com o participante B, que tinha um peso corporal mais elevado, geraram níveis de força superiores em comparação com o participante A. Além disso, ambos os participantes apresentaram um desequilíbrio de carga, com a célula de carga 1 (traseira direita) recebendo mais força do que a célula de carga 2 (traseira esquerda). É importante notar que foram tomados cuidados

especiais para garantir que o equipamento estivesse devidamente alinhado durante os testes. Essas medidas minimizaram o impacto de fatores de montagem na distribuição de carga, e qualquer desequilíbrio restante pode ser atribuído a diferenças na forma de corrida, mecânica da marcha ou fatores biomecânicos individuais entre os participantes. Assimetria baixa a moderada é um fenômeno natural em corredores durante testes de exercício em esteira (OLIVIER et al., 2022), e também vale ressaltar que ambos os participantes são destros corroborando com os maiores valores de carga serem observados no lado direito.

Curiosamente, para ambos os participantes, o desvio padrão das forças médias foi menor durante os testes com velocidades intermediárias (Tabela 4). Essa observação sugere que correr em velocidades intermediárias pode resultar em uma exibição mais consistente de força no equipamento PETRA em comparação com correr em velocidades mais altas ou mais baixas.

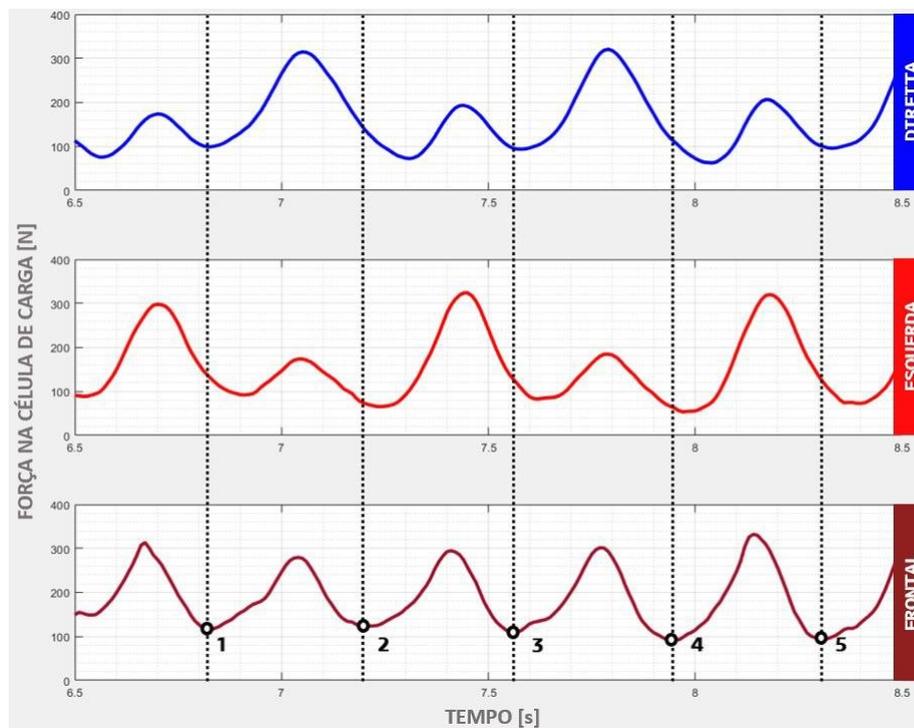
No entanto, o estudo enfrentou desafios ao estabelecer uma relação direta entre a velocidade e as forças devido à forte dependência das características individuais do usuário e à natureza altamente dinâmica da corrida. Embora fosse esperado que o aumento da velocidade resultasse em valores de força mais altos devido às maiores forças de impacto, essa relação não foi uniformemente observada para todos os participantes. Alguns testes mostraram aumento das forças em velocidades mais altas, enquanto outros não apresentaram uma correlação significativa entre a velocidade e os níveis de força.

3.3.2. Análise da frequência de passadas

Os dados obtidos a partir das medições de força apresentaram um padrão periódico claro, indicando um comportamento cíclico no movimento de corrida. Para ilustrar isso, a Figura 14 é um gráfico ampliado dos sinais de força da Figura 13 mencionada anteriormente, onde foram destacados os momentos distintos de cada passada. Ao examinar mais de perto, observou-se que os vales no sinal de força da célula de carga central coincidiram com o momento de cada impacto do pé, indicando a ocorrência de uma passada. Posteriormente, um pico de força mais alto foi observado na célula de carga no lado oposto ao pé que realizou a passada, sugerindo

que o participante deslocou o peso do corpo para o lado oposto durante o movimento de corrida.

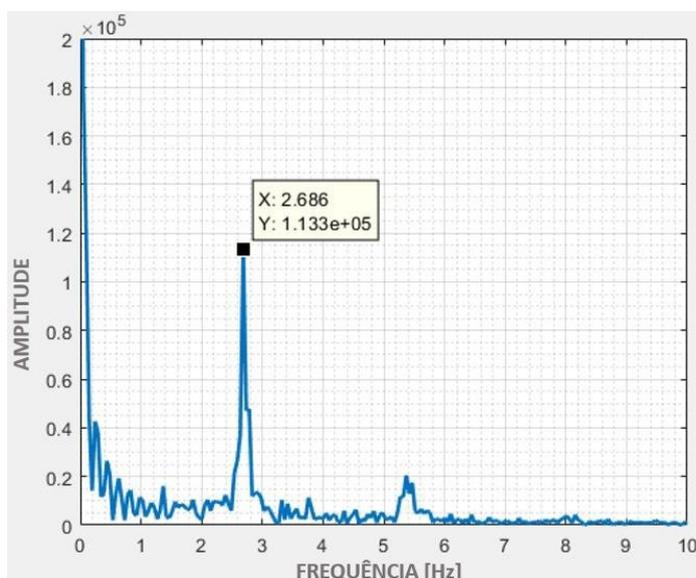
Figura 14 - Análise do padrão periódico de passadas durante um dos testes (Participante B - 10 km/h)



Fonte: Autor.

Para aprofundar a investigação sobre a frequência de passada durante os testes, os dados de força foram submetidos a uma análise de frequência utilizando a Transformada de Fourier (FFT). Este procedimento decompõe o sinal de força em seus componentes de frequência, permitindo identificar as frequências dominantes (INMAN, 2007) e relacioná-las à frequência de passada. A análise FFT revelou picos no espectro de frequência, os quais corresponderam à frequência de passada em cada velocidade de corrida (Figura 15).

Figura 15 - Espectro de frequência de um sinal de forças da célula de carga 3 (Participante B - 10 km/h)



Fonte: Autor.

Os valores de frequência foram extraídos do espectro de frequência dos sinais de força de cada teste. A média de frequência e o desvio padrão foram, então, calculados para cada velocidade de execução. Os resultados obtidos foram compilados para criar a Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados experimentais para frequências de passadas

Participante	teste	6 km/h		10 km/h		14 km/h	
		frequência	média	frequência	média	frequência	mean
A	1	2,539		2,979		3,125	
	2	2,637	2,669±0,122	2,979	2,963±0,023	3,223	3,158±0,046
	3	2,832		2,930		3,125	
B	1	2,539		2,783		3,271	
	2	2,490	2,458±0,083	2,832	2,767±0,061	3,516	3,369±0,106
	3	2,344		2,686		3,320	

Fonte: Autor.

Como era esperado, a frequência de passadas aumentou com velocidades de corrida mais elevadas, indicando que os participantes ajustaram sua cadência para manter um ritmo de marcha consistente em diferentes velocidades. Notavelmente, o

baixo valor do desvio padrão indicou a consistência dos participantes em manter um ritmo constante para sustentar a mesma velocidade. Além disso, os valores de frequência de passada estão próximos para ambos os participantes, indicando a estatura semelhante entre ambos.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISE DA ESTRUTURA DE REFERÊNCIA

O modelo cedido para o estudo foi fabricado no Brasil sob pedido do CPB para atender as limitações do regulamento das competições e visando um baixo custo de produção e é o mais comumente utilizado no país. O material majoritário são tubos de alumínio de perfil circular e são reaproveitados componentes de bicicletas comuns como as rodas, guidão, garfo e selim. Esse modelo é utilizado principalmente para servir o programa de iniciação ao esporte, não sendo um modelo específico de competição. Dessa forma, apresenta dimensões padronizadas e regulagens no assento e suporte de tronco para se ajustar a diferentes atletas.

Os atletas e técnicos que utilizam esse modelo alegaram constantes casos de quebra na estrutura e instabilidade durante as corridas. À medida que se percebia surgimento de trincas ou grande deflexão nos tubos, novos reforços eram adicionados à estrutura em tentativa de deixar o equipamento mais seguro. Entretanto, esses reforços se deram como medidas preventiva e de forma subjetiva sem nenhuma forma de análise estrutural.

Logo, a primeira etapa do trabalho consiste na realização de análise por meio de elementos finitos para identificação dos pontos críticos da estrutura e os resultados serão base para o desenvolvimento de uma nova geometria.

4.1. Preparação do modelo CAD para as simulações

Foram medidas todas as dimensões de tubos presentes na estrutura para que um modelo idêntico ao original fosse recriado em CAD no software SolidWorks®. As Figuras 16 e 17 mostram, respectivamente, o modelo da PETRA utilizada e o destaque para a estrutura tubular. A massa total da estrutura é de 3,7 Kg.

Figura 16 - CAD do modelo PETRA utilizado



Fonte: Autor.

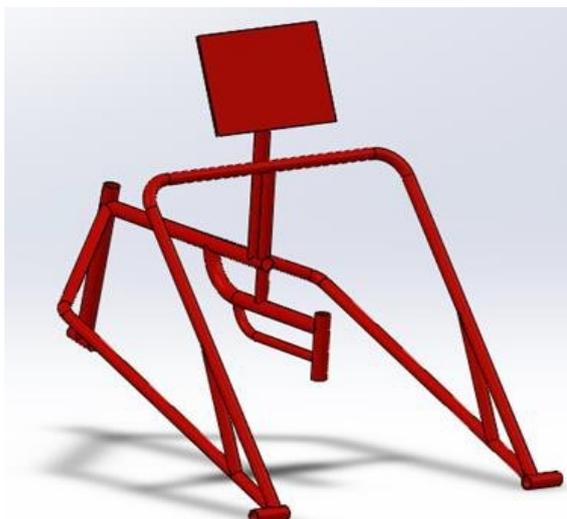
Figura 17 - CAD da estrutura tubular da PETRA



Fonte: Autor.

Para realização da simulação, o modelo em CAD foi modificado adicionando-se uma chapa para representar de maneira simplificada o suporte para tronco e facilitar a aplicação correta dos esforços durante a simulação. O tubo de suporte do guidão foi estendido para representar o ponto de fixação da roda dianteira. Esse modelo simplificado pode ser visto na Figura 18 a seguir.

Figura 18 - Modelo CAD simplificado para a simulação



Fonte: Autor.

Essa geometria foi exportada para o software de análise de elementos finitos para realização das simulações. A ferramenta utilizada foi a plataforma *Workbench* do ANSYS®.

4.2. Designação do material

O material designado para a estrutura foi a liga de alumínio 6061-T6 e suas propriedades são mostradas na Tabela 7. Por ser um material dúctil, utilizou-se o seu limite de escoamento como referência para o limite de tensão máxima que o material pode chegar e o critério de falha adotado foi o de von-Mises.

Tabela 7 - Propriedades da liga de alumínio 6061-T6

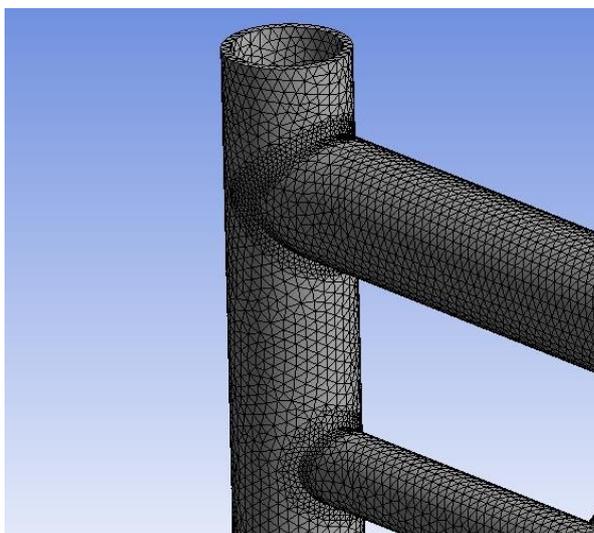
Propriedades	Liga de Alumínio 6061-T6
Densidade	2,71 g/cm ³
Módulo de Elasticidade	69 GPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Limite de Resistência a tração	310 MPa
Limite de Escoamento	276 MPa

Fonte: CALLISTER, 2008.

4.3. Preparação da malha

A malha utilizada foi do tipo tetraédrica pois esse tipo de elemento permite um bom preenchimento da geometria com pouco processamento computacional (WANG et al., 2004) e seu tamanho foi definido por análise de convergência, utilizando o parâmetro Skewness como fator de avaliação da qualidade de malha. Esse parâmetro indica o quão próximo o elemento de face está de um elemento com forma ideal, logo, quanto maior a assimetria dos elementos individuais, mais distorcida é a malha. De acordo com o guia do usuário do software ANSYS®, valores menores do que 0,5 indicam uma boa malha. Também foi utilizado o refinamento das regiões de solda dos tubos utilizando a ferramenta de refino automático, devido à maior probabilidade de pontos críticos acontecerem nesses contatos. A Figura 19 mostra o detalhe da malha final do modelo.

Figura 19 - Detalhe da malha final utilizada



Fonte: Autor.

No ambiente de simulação, as regiões de soldas dos tubos foram representadas como superfícies de contato do tipo *bonded*. Essa forma de definir o contato não é uma representação ideal de uniões soldadas (onde deve ser considerado a existência de tensões residuais e alterações microestruturais dos materiais) mas é uma prática adotada na metodologia de Elementos Finitos com intuito de reduzir demanda computacional.

4.4. Simulação estática da estrutura de referência

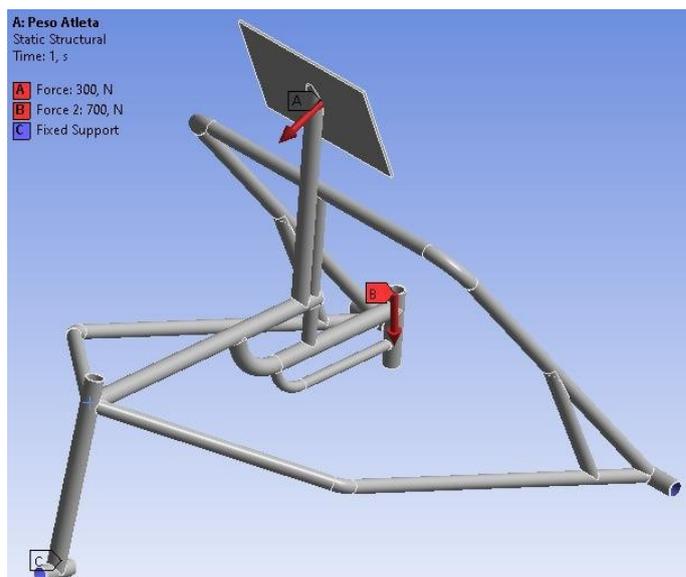
A simulação foi realizada utilizando-se duas condições de esforços: a primeira sendo a aplicação do peso do usuário e a segunda uma análise torcional do quadro como consequência da marcha do atleta.

4.4.1. Simulação da estrutura para condição de apoio do peso atleta

O primeiro cenário foi a avaliação de resistência estática ao peso do atleta sobre a estrutura. A simulação deste caso foi feita com a fixação das três rodas e a aplicação da carga distribuídas entre o suporte de tronco e o tubo do assento. A carga aplicada para avaliar o desempenho estrutural da geometria foi de 100 kg. Em condições normais de uso, o triciclo não receberia todo o peso do usuário sozinho pois o equipamento é apenas um apoio para a corrida e parte do peso estaria dividido nas pernas do atleta, mas para efeito de análise foi considerado a condição crítica de todo o peso diretamente na estrutura.

Dessa forma, a carga de 1000 N foi distribuída entre o apoio de tronco e o assento com proporção de 30% e 70% respectivamente, como mostrado na Figura 20. Esses valores foram estimados tendo como base o que foi encontrado no manual de um dos modelos importados como sugestão de distribuição para uma boa postura durante a prática do esporte (By ConnieHansen, 2015).

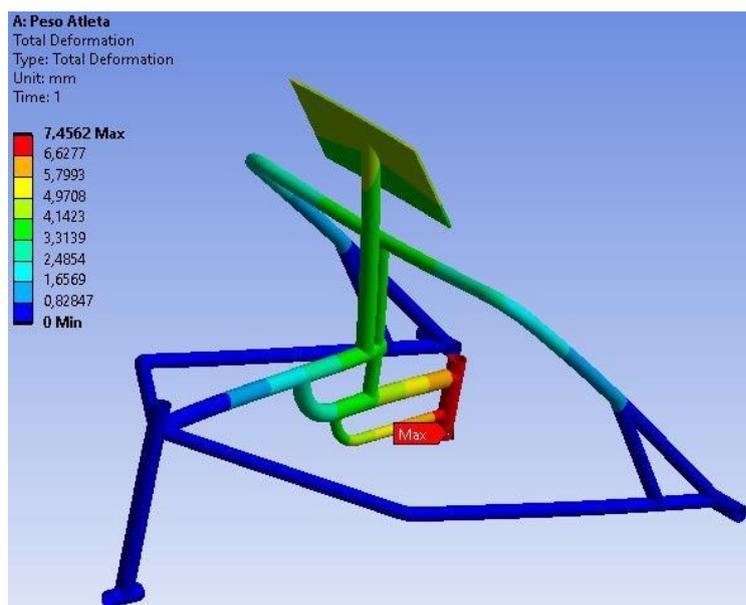
Figura 20 - Condições de contorno para simulação do peso do atleta na estrutura



Fonte: Autor.

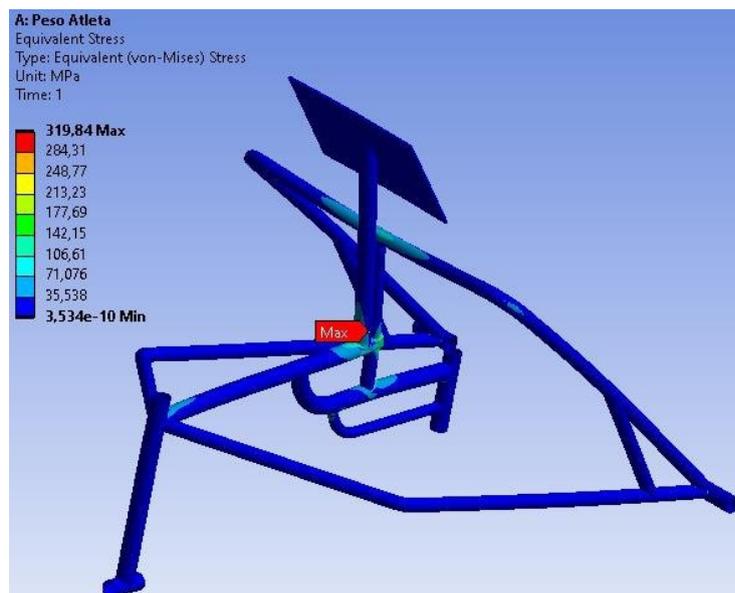
Os resultados da simulação estática (mostrados nas Figuras 21 e 22) indicaram um deslocamento máximo de 7,46 mm com tensão máxima equivalente de Von-Mises de 319,84 Mpa (16% superior ao valor da tensão de escoamento do alumínio).

Figura 21 - Campo de deformação total para simulação do peso do atleta



Fonte: Autor.

Figura 22 - Tensão equivalente de von-Mises do modelo para o peso do atleta na estrutura



Fonte: Autor.

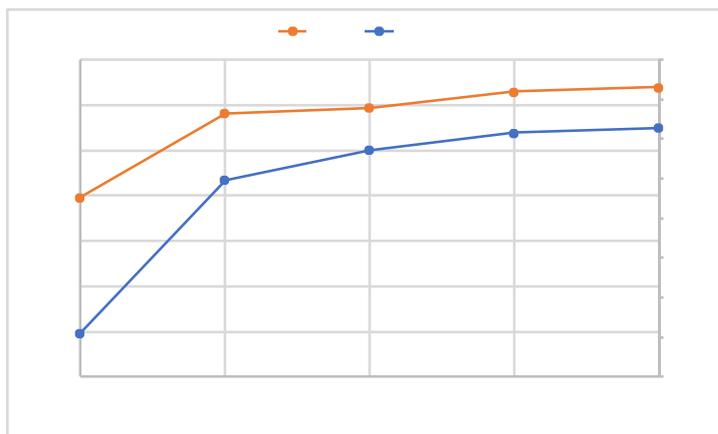
O ponto crítico foi encontrado na união do tubo de sustentação do suporte do tronco com o tubo de fixação do assento, como pode ser visto na Figura 22 acima. Os relatos de atletas e treinadores, indicam exatamente esta região como um ponto comum de quebras dessa estrutura, indicando que os resultados do modelo são coerentes com a realidade do equipamento. O estudo de convergência dos resultados pode ser visto na Tabela 8 e em gráfico na Figura 23.

Tabela 8 - Resultados da simulação da estrutura para o peso do atleta e estudo de convergência

Tamanho dos Elementos [mm]	Parâmetro Skewness	Peso do Atleta	
		Deslocamento Máximo [mm]	Tensão Equivalente de von-Mises [MPa]
10	0,8269 ± 0,1376	6,42	237,81
5	0,6639 ± 0,1343	7,19	349,49
4	0,5672 ± 0,1392	7,34	356,36
3	0,4392 ± 0,1332	7,43	378,18
2,5	0,3522 ± 0,1385	7,46	383,81

Fonte: Autor.

Figura 23 - Histórico de convergência para simulação do peso do atleta na estrutura



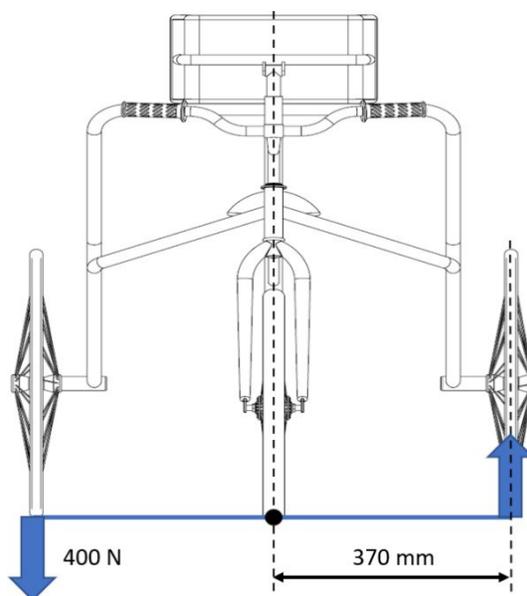
Fonte: Autor.

4.4.2. Simulação da estrutura para condição de torção devido a passada

Já no segundo caso, pretende-se avaliar a rigidez torcional da estrutura, simulando a transferência de carga do usuário durante a corrida a cada passada. Caso a deformação total encontrada seja grande, pode-se atribuir como consequência direta a instabilidade do triciclo ao longo da corrida.

Como condições de contorno foram utilizados como referência os dados experimentais obtidos na bancada de teste abordada no capítulo 3. Sendo assim, limitou-se apenas o ponto de fixação da roda dianteira, mantendo as rodas traseiras livres para se movimentarem, e para representar a alternância de esforços entre os lados, aplicou um momento binário com a carga de $\pm 400\text{N}$ na seção de simetria da estrutura como representado na Figura 24. Esse valor foi a força máxima registrada nos testes e, embora esteja acima do valor de força média, foi selecionado para servir como uma avaliação de situação crítica de solicitação estrutural.

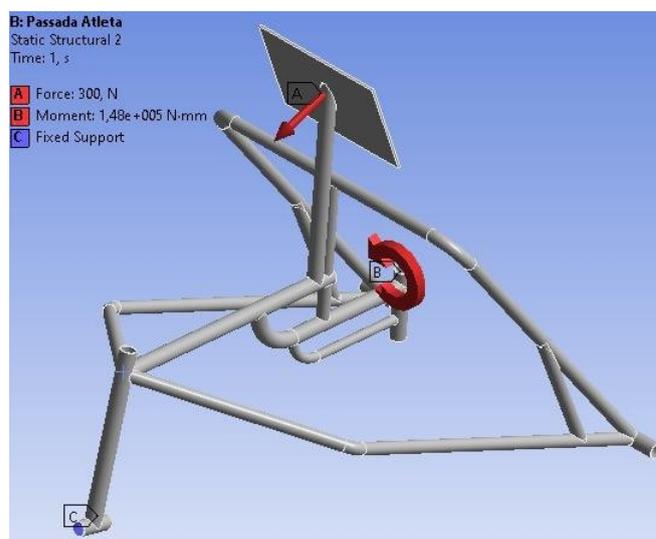
Figura 24 - Representação do momento aplicado para simulação da torção da estrutura



Fonte: Autor.

Considerando a distância da roda traseira de aproximadamente 370 mm, o valor do momento encontrado foi de ± 148000 N.mm. Além disso, manteve-se a carga de 300 N aplicada no apoio do tronco. As configurações das condições de contorno para esse caso no ANSYS® são mostradas na Figura 25.

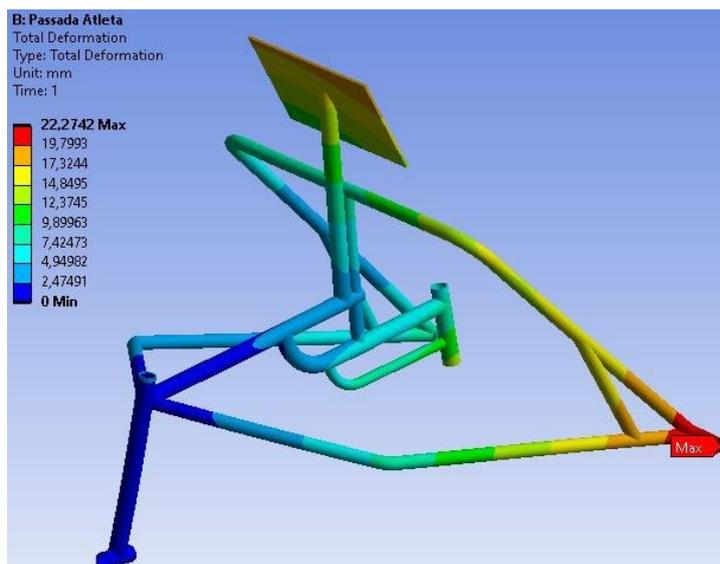
Figura 25 - Condições de contorno para simulação da torção da estrutura



Fonte: Autor.

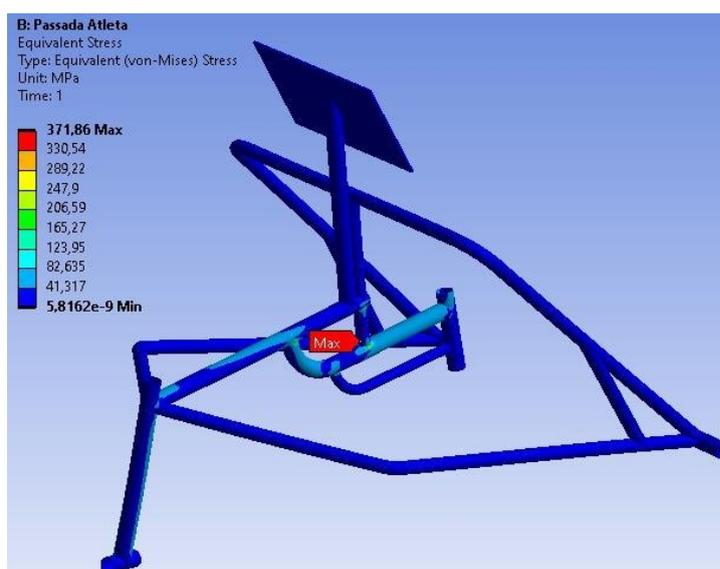
Os resultados para a torção da estrutura (mostrados nas Figuras 26 e 27) indicaram o deslocamento máximo de 22,2742 mm localizada no cubo da roda traseira e a máxima tensão equivalente de von-Mises foi de 371,56 MPa (35% acima da tensão de escoamento do alumínio).

Figura 26 - Campo de deformação total para a torção da estrutura



Fonte: Autor.

Figura 27 - Tensão equivalente de von-Mises do modelo para a torção da estrutura



Fonte: Autor.

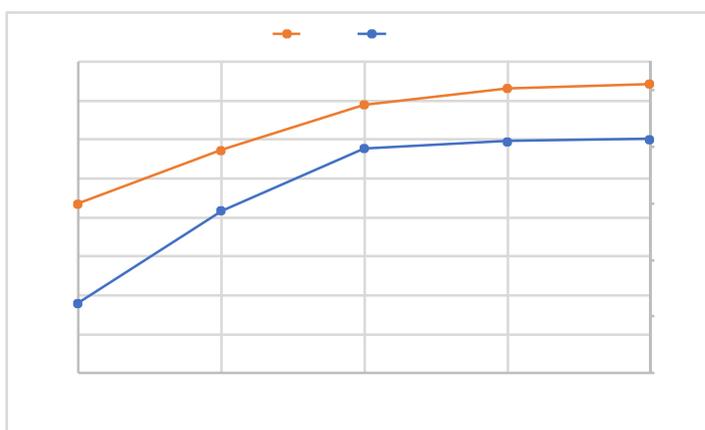
O ponto crítico de tensão foi encontrado na mesma região da análise estática, conforme indicado na Figura 27 e, novamente o resultado coincide com o que foi reportado como caso de quebra. O histórico de convergência dos resultados pode ser visto na Tabela 9 e em gráfico na Figura 28.

Tabela 9 - Resultados da simulação da estrutura para caso de torção e estudo de convergência

Tamanho dos Elementos [mm]	Parâmetro Skewness	Passada do Atleta	
		Deslocamento Máximo [mm]	Tensão Equivalente de von-Mises [MPa]
10	$0,8269 \pm 0,1376$	16,49	218,36
5	$0,6639 \pm 0,1343$	19,76	286,73
4	$0,5672 \pm 0,1392$	21,94	345,26
3	$0,4392 \pm 0,1332$	22,20	366,40
2,5	$0,3522 \pm 0,1385$	22,27	371,86

Fonte: Autor.

Figura 28 - Histórico de convergência da simulação da torção da estrutura



Fonte: Autor.

Uma vez confirmados qual o principal ponto crítico da estrutura, uma nova geometria foi proposta com o objetivo de corrigir tais falhas e aprimorar a segurança geral do equipamento para os atletas.

CAPÍTULO V

5. PROJETO E ANÁLISE DA NOVA GEOMETRIA DA ESTRUTURA

Para além do ponto de vista estrutural, o design de uma nova estrutura também deve ser pensado de forma empática e centrada no usuário para conciliar as necessidades dos atletas com o que é tecnologicamente viável. Karwowski, Soares e Stanton (2011) afirmam que a aplicação da ergonomia é essencial em tecnologias assistivas para facilitar o uso e aprendizado, aumentar eficiência, conforto, segurança, adaptabilidade e satisfação do usuário. Logo, o projeto foi efetuado de maneira multidisciplinar utilizando de metodologias do *Design Thinking* para orientar as decisões de desenho da nova geometria e se respaldando nas ferramentas de engenharia para garantir o correto dimensionamento do equipamento.

5.1. *Design Thinking*

O *Design Thinking* é caracterizado por um ciclo de investigação iterativo envolvendo três estágios fundamentais: inspiração, ideação e implementação (BROWN, 2008; BROWN e WYATT, 2010). Durante esses estágios, que podem ocorrer de maneira não linear, os problemas são questionados na tentativa de gerar novas ideias e verificar a viabilidade. A etapa de implementação envolve a prototipagem. No entanto, quando a prototipagem é aplicada apenas na fase final do processo de design, ou seja, após as fases de inspiração e ideação, o processo de design tende a demandar mais tempo, retrabalho e custos mais elevados. Logo, como solução, foi utilizada uma metodologia para aplicar a prototipagem com materiais de baixa fidelidade ainda no processo de ideação.

5.1.1. Inspiração

A etapa de inspiração exige a compreensão empática do problema por meio de uma combinação de vários métodos de pesquisa sobre a questão a ser resolvida. Para essa compreensão, foi aplicada uma metodologia mista, não intervencionista e intervencionista, de base qualitativa e quantitativa. A pesquisa bibliográfica, a análise

documental (busca por patentes nacionais e internacionais) e a análise de produtos semelhantes foram essenciais para entender o esporte *Frame Running* e as tecnologias existentes. A partir disso, entrevistas com usuários e reuniões com a equipe de designers e engenheiros permitiram traçar as necessidades dos usuários - atletas paralímpicos e pessoas com deficiência que praticam o *Frame Running* - contribuindo para o processo de compreensão do problema. A observação direta também foi realizada. Segundo Brown (2008), a observação permite capturar *insights* inesperados sobre o que os usuários realmente querem ou precisam, gerando inovação.

A partir da pesquisa, entrevistas e observações, foram identificados problemas ergonômicos causados pela ausência de um estudo antropométrico que considerasse o percentil dos atletas e posturas apropriadas como parâmetro para a produção. Nesse sentido, foram identificados problemas posturais devido à posição inadequada do suporte do tronco e à instabilidade do corpo durante os movimentos de corrida. Pode-se considerar que essas questões são agravantes diante da necessidade dos usuários de se sentirem estáveis, seguros e confortáveis.

5.1.2. Ideação e Implementação

Após a coleta de dados, um mapa mental foi aplicado como estratégia para visualização, análise de dados e ideação. O mapa sistematizou os diversos elementos que compõem o problema, com suas ramificações e relações, gerando os primeiros *insights*. Esboços, desenhos técnicos e modelagem 3D foram feitos para, a partir disso, propor alternativas para o redesenho.

No entanto, nesta etapa, a equipe percebeu que experimentar com ideias digitalmente simuladas exigiria muito tempo e retrabalho, uma vez que vários testes de modelagem digital deveriam ser realizados para identificar e solucionar possíveis falhas que interfeririam na durabilidade, usabilidade, conforto, segurança e desempenho do produto. Esse processo também exigiria testes com protótipos a cada readequação do projeto, comprometendo o prazo de entrega e aumentando os custos. Considerando as questões levantadas, a equipe decidiu realizar a etapa de ideação juntamente com a etapa de implementação por meio de prototipagem com materiais de baixa fidelidade.

De acordo com Brown e Wyatt (2010, p. 35), "uma cultura vibrante de *design thinking* incentivará a prototipagem - rápida, barata e rudimentar - como parte do processo criativo e não apenas como uma maneira de validar ideias finalizadas". Sob essa perspectiva, tubos flexíveis de polietileno preto foram fixados com fita adesiva na bicicleta fornecida pela CPB com o objetivo de tornar tangíveis as ideias iniciais. Além disso, uma nova roda foi adicionada à frente da bicicleta para simular o aumento no ângulo da suspensão dianteira, proporcionando maior estabilidade (Figura 29). As dimensões do limite de ocupação da bicicleta também foram marcadas no chão com fita adesiva em conformidade com o regulamento da categoria.

Figura 29 - Prototipagem da nova estrutura com materiais de baixa fidelidade



Fonte: Autor.

Testes realizados na bicicleta de referência usando o material de baixa fidelidade foram fotografados para análise. Para Martin (2012), a prototipagem é a ideação em forma tangível, realizando testes que garantem um melhor desenvolvimento e aprimoramento da ideia. Seu papel no *Design Thinking* é conduzir experimentação no mundo real a serviço da aprendizagem, identificando oportunidades de melhoria e criando novas soluções (LIEDTKA, 2018).

5.2. Idealização da nova estrutura

Como indicado pelos resultados do capítulo anterior, os pontos críticos da estrutura se encontram nos tubos da região central. Dentre esses tubos,

especialmente os reforços para o tubo do banco são os mais susceptíveis à quebra. Foi reportado pelo treinador que acompanhou a fabricação e evolução desse modelo que esses tubos de reforço foram sendo adicionados a geometria à medida que era identificado algum eventual problema como uma grande deflexão ou surgimento de trincas, mas nenhum estudo foi realizado para sugerir qual seria a melhor solução.

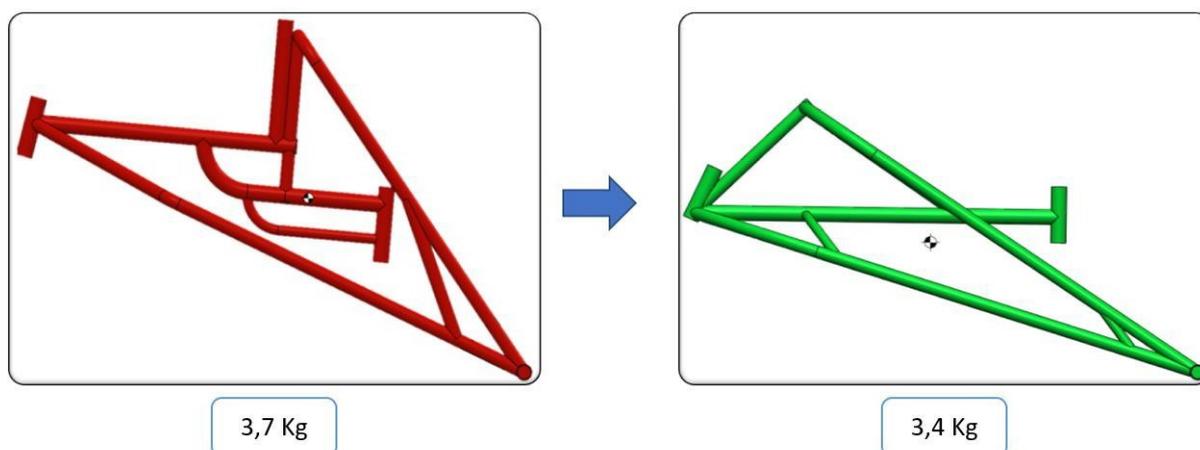
Outro ponto que foi notado é que, no modelo de referência, não há nenhum tipo de travamento no tubo vertical que serve de ponto de fixação para o apoio de tronco. Observa-se que a natureza dos carregamentos no banco e no apoio de tronco forçam os dois arcos da estrutura a se fecharem e um travamento entre eles reduziria a deformação e concentração de tensão nas regiões de solda dos tubos.

Dessa forma, esses fatores foram considerados para a elaboração de uma nova geometria. Os tubos de reforços do banco foram substituídos por apenas um tubo e foi adicionado um travamento triangular no tubo onde é fixado o apoio de tronco. Os pontos de fixação do guidão e dos cubos de rodas traseiras não foram alterados com intuito de manter as dimensões gerais do triciclo em conformidade com o regulamento da competição e a faixa de estatura dos usuários para essa categoria do modelo.

Em relação a alterações ergonômicas, o novo projeto foi pensado de forma que o usuário se posicione com uma maior inclinação para uma corrida mais facilitada e estável. Ainda para proporcionar uma maior estabilidade, o centro de gravidade geral do equipamento foi deslocado para uma posição mais centralizada e também mais abaixo do que o observado no modelo de referência.

A comparação entre as duas geometrias pode ser vista na Figura 30, indicando também a redução de 300 gramas no peso total. Nesse primeiro momento, as dimensões dos perfis de tubos utilizados foram mantidas. Já a Figura 31 mostra em destaque o modelo CAD da nova estrutura.

Figura 30 - Comparativo entre as estruturas



Fonte: Autor.

Figura 31 - Modelo CAD da nova estrutura



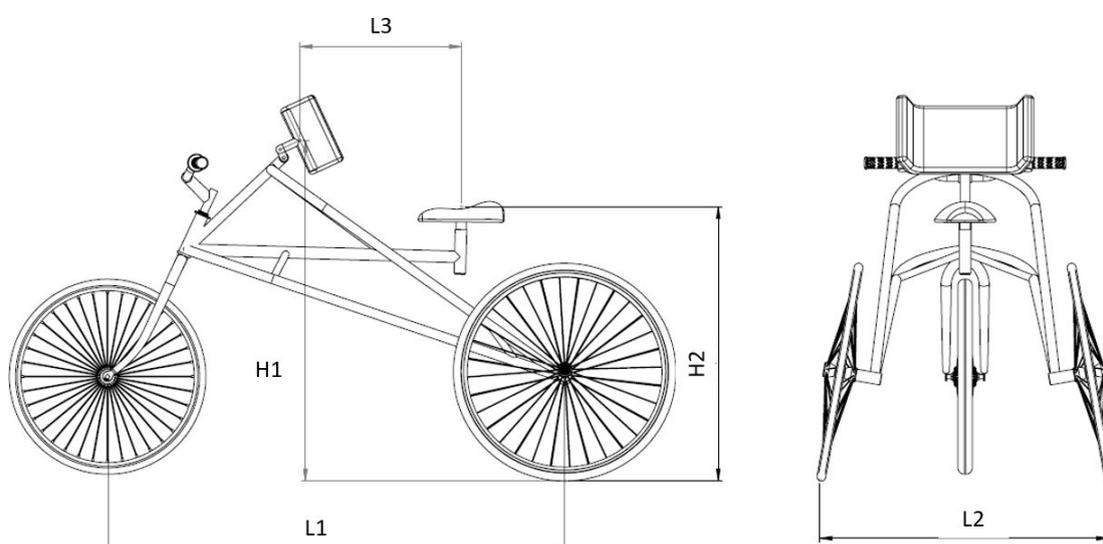
Fonte: Autor.

5.3. Modelagem paramétrica

No desenvolvimento da nova estrutura, foi levado em conta a importância de fazer um modelo CAD com dimensões parametrizadas para futura implementação de protocolos de prescrição. Ao levar em conta fatores antropométricos individuais como altura, peso corporal, comprimento dos membros e configuração postural, o modelo parametrizado facilita uma prescrição mais precisa e eficiente, otimizando não apenas o desempenho esportivo, mas também garantindo conforto e segurança.

As dimensões escolhidas para serem parametrizadas são ilustradas na Figura 32 sendo elas as alturas do apoio de tronco (H1) e do banco (H2) e os comprimentos entre eixos (L1), largura entre rodas traseiras (L2) e a distância entre o apoio de tronco e o banco (L3). Ao definir diferentes valores para cada parâmetro, o modelo do CAD se ajusta automaticamente para satisfazer as novas medidas e, assim, eliminando a necessidade de refazer o CAD manualmente para cada nova configuração de dimensões.

Figura 32 - Dimensões parametrizadas no modelo CAD



Fonte: Autor.

5.4. Simulação estática da nova estrutura proposta

Seguindo a mesma metodologia utilizada no capítulo anterior, uma geometria simplificada foi gerada no Solidworks® e posteriormente exportada para a plataforma *Workbench* do ANSYS® para realização das simulações por elementos finitos. Novamente o material designado foi a liga de alumínio 6061-T6.

As condições de contorno aplicadas foram as mesmas definidas para a estrutura anterior, realizando a análise para o peso estático do atleta e para o caso de torção. A convergência dos valores foi conferida com o aumento do refino da malha tendo como referência o parâmetro Skewness. A Tabela 10 foi construída com os

resultados máximos de Deformação Total e Tensão Equivalente de von-Mises para cada iteração de refino da malha.

Tabela 10 - Resultados da simulação da nova estrutura e estudo de convergência

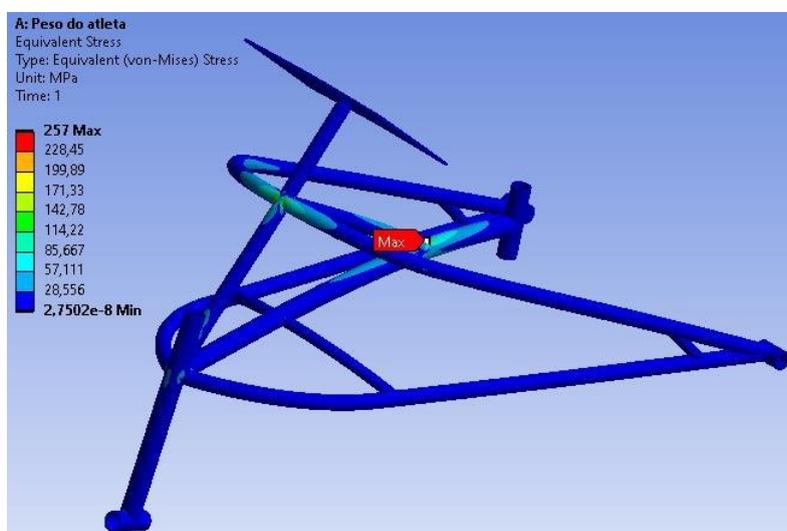
Tamanho dos Elementos [mm]	Skewness Médio	Peso do Atleta		Passada do Atleta	
		Deslocamento Máximo [mm]	Tensão Equivalente de von-Mises [MPa]	Deslocamento Máximo [mm]	Tensão Equivalente de von-Mises [MPa]
10	0,77 ± 0,16	3,05	161,90	4,12	155,02
5	0,66 ± 0,16	3,66	213,31	5,28	198,80
4	0,57 ± 0,16	4,06	239,42	6,18	232,64
3	0,44 ± 0,15	4,31	254,07	6,56	246,89
2,5	0,36 ± 0,15	4,32	257,00	6,68	251,64

Fonte: Autor.

5.4.1. Simulação da nova estrutura para condição de apoio do peso atleta

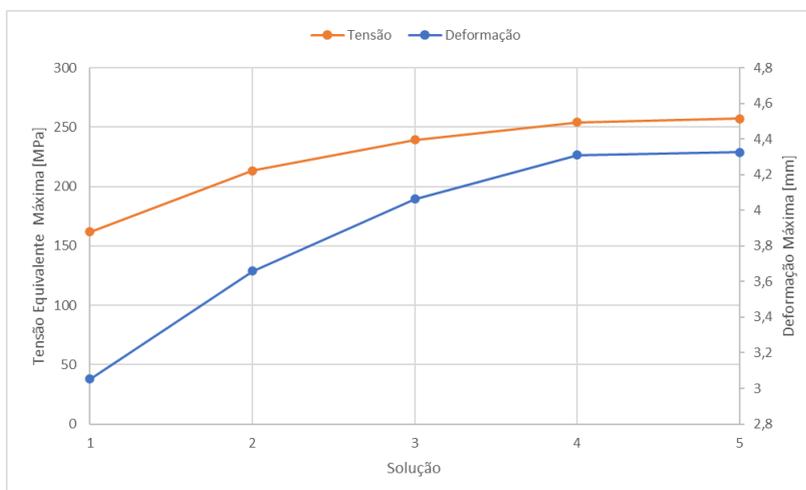
Na condição estática, o maior deslocamento encontrado é de 4,32 mm e ocorre no tubo de suporte para o banco (como mostrado na Figura 33). O ponto de maior tensão equivalente de von-Mises, localizado na região de contato entre o tubo horizontal de suporte do banco e o travamento inclinado, é de 257,00 MPa (Figura 33) estando abaixo do limite de escoamento do alumínio. O histórico de convergência desses resultados pode ser visualizado no gráfico da Figura 34.

Figura 33 - Tensão equivalente de von-Mises da nova estrutura para condição do peso do atleta



Fonte: Autor.

Figura 34 - Histórico de convergência para caso estático da nova estrutura

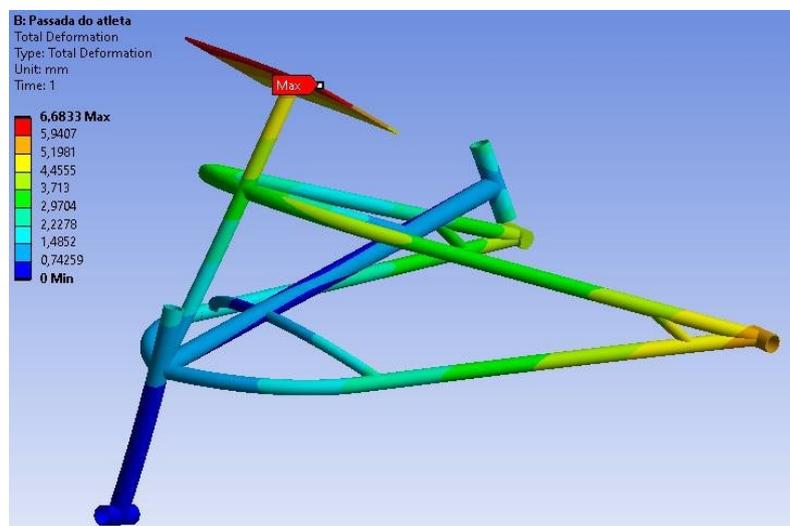


Fonte: Autor.

5.4.2. Simulação da nova estrutura para condição de torção devido a passada

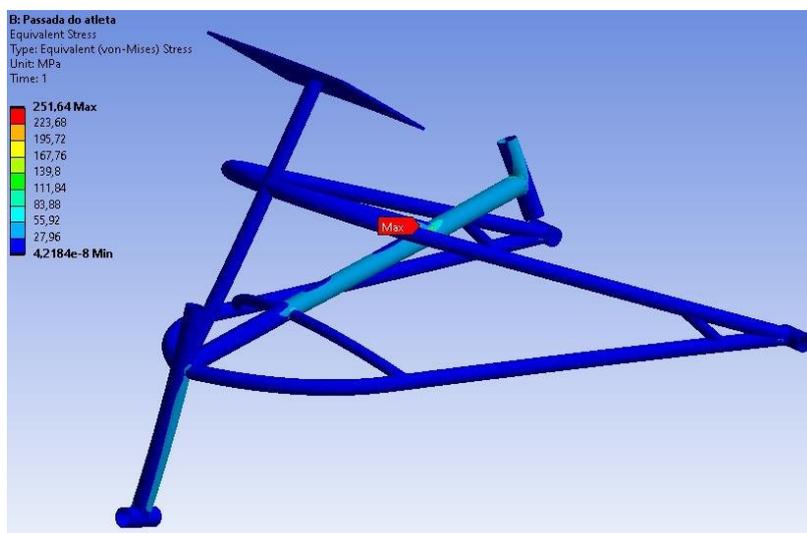
Na análise de torção, o maior deslocamento identificado foi de 6,68 mm estando localizado no suporte de tronco (Figura 35). Já a tensão equivalente de von-Mises máxima detectada foi de 251,64 MPa, localizado novamente na região de contato entre o tubo horizontal de suporte do banco e o travamento inclinado, (Figura 36). O gráfico com o histórico de convergência dessa simulação se encontra na Figura 37.

Figura 35 - Campos de deformação para a análise de torção da nova estrutura



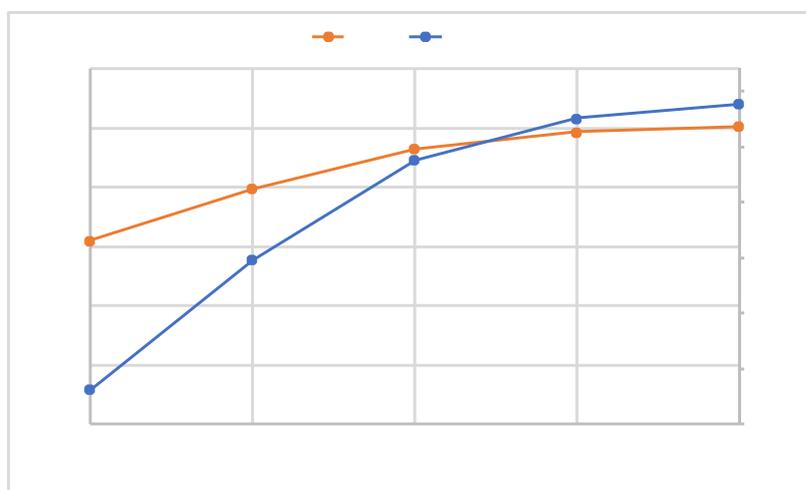
Fonte: Autor.

Figura 36 - Tensão Equivalente de von-Mises da estrutura nova para análise de torção



Fonte: Autor.

Figura 37 - Histórico de convergência para caso de torção da nova estrutura



Fonte: Autor.

CAPÍTULO VI

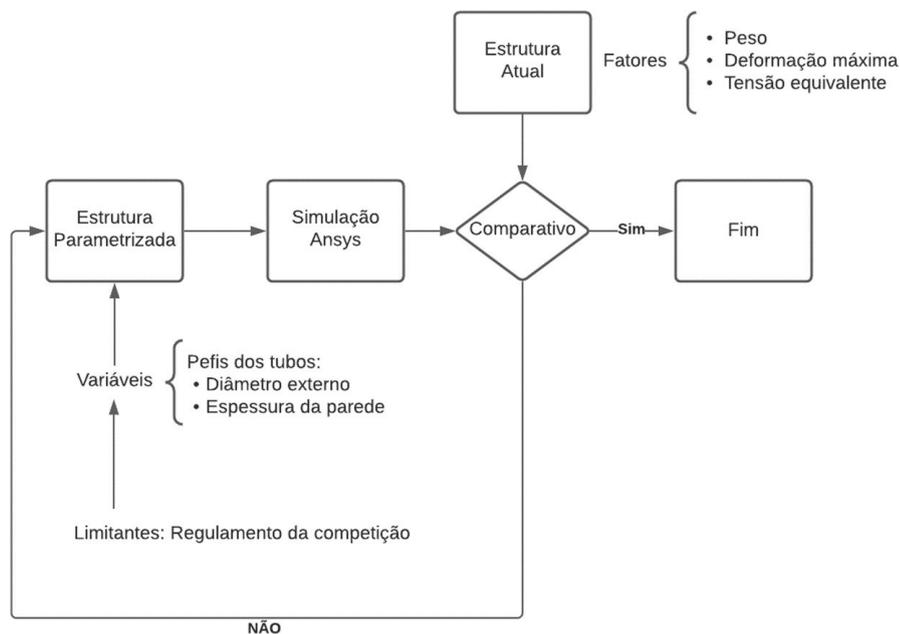
6. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS PERFIS TUBULARES

Na solução proposta no capítulo anterior foram realizadas alterações somente na geometria geral da estrutura, mantendo as dimensões dos perfis utilizados. Essa decisão foi tomada pois, inicialmente, o que estava sendo avaliado era como as modificações no projeto afetariam o desempenho final da estrutura nos dois cenários simulados. Como mostrado pelas simulações da nova estrutura, os resultados do novo modelo foram positivos na medida que se obteve uma estrutura mais leve e mais resistente.

No entanto, uma das propostas desse trabalho é o desenvolvimento de um modelo de otimização para realizar a seleção dos perfis de tubos utilizados na fabricação para obter uma combinação de tubos que se aproxime ao máximo de uma solução considerada ótima. Com esse fim, uma metodologia de otimização foi elaborada.

Uma vez que a simulação por elementos finitos foi preparada, deve-se então definir quais as variáveis de entrada, variáveis de saída e objetivos da rotina otimização. Para tanto, as cotas do modelo geométrico foram identificadas como os parâmetros de entradas a serem modificados durante as diversas iterações. Os parâmetros de saída foram identificados como o peso do modelo e os resultados das simulações. Por fim, como objetivo da otimização foi realizada a comparação dos parâmetros de saída com os resultados obtidos no capítulo 3 para a estrutura de referência. A Figura 38 é uma esquematização dessa metodologia.

Figura 38 - Esquema da metodologia de otimização



Fonte: Autor.

Na engenharia, alcançar um bom projeto geralmente envolve escolher entre diferentes soluções que apresentam objetivos conflitantes. Raramente será encontrada uma única solução que contemple todos os objetivos em seus pontos máximos. Deste modo, é necessário estabelecer quais as restrições a serem obedecidas e ajustar os parâmetros para encontrar uma solução que corresponda ao contexto de cada projeto (ARORA, 2004).

Em problemas mais simples e com poucos parâmetros de entrada, o método manual de otimização pode ser empregado e abordagens como “tentativa e erro” podem ser aplicadas para economia de tempo e recursos. Porém, à medida que mais variáveis são adicionadas ao projeto, mais complexo é prever qual a influência exata de cada parâmetro no desempenho final, e essa prática se torna inviável e pouco confiável. Por isso, foram desenvolvidos diferentes métodos matemáticos e computacionais para auxiliar o processo de otimização e tomada de decisões.

O programa de otimização escolhido neste trabalho foi o acoplamento *DesignXplorer* disponível na plataforma *Workbench* do ANSYS®. Essa ferramenta é nativa do próprio software e consiste em executar diversas iterações (cada uma sendo

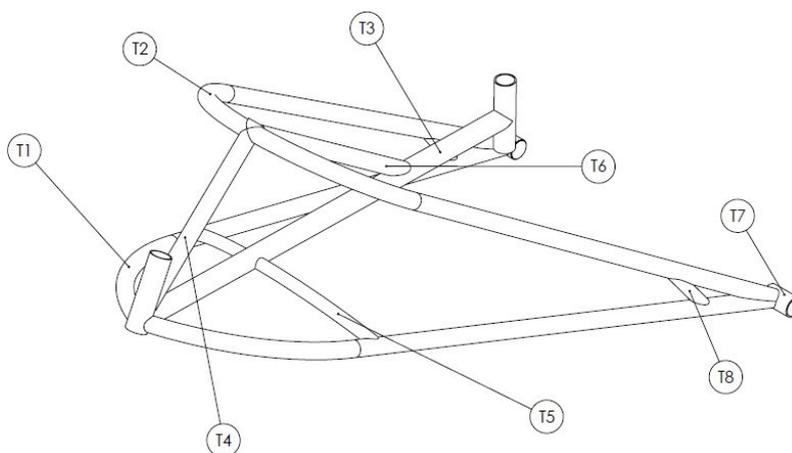
uma combinação dos parâmetros de entrada) para identificar a sensibilidade de cada variável e por interpolação dos resultados gerar uma superfície de resposta que se aproxime das soluções e consegue prever o comportamento de alterações pontuais dos parâmetros. Posteriormente esses dados são utilizados para alimentar uma rotina de otimização que indica configurações que satisfaçam as funções objetivos definidas.

6.1. Parametrização dos perfis de tubos

O próximo passo foi a determinação dos parâmetros de entrada a serem considerados na otimização. Como o modelo utilizado neste trabalho tem como fim atender principalmente o programa de iniciação ao esporte do CPB, o tipo de perfil definido foram tubos circulares de alumínio comerciais com o intuito de não elevar bastante os custos de produção. Em futuros trabalhos que atendam modelos de alto rendimento, perfis personalizados podem ser considerados.

Os tubos da estrutura foram então numerados para facilitar a identificação de acordo com a Figura 39 e em cada seção as suas respectivas cotas foram parametrizadas. Como foi utilizado o perfil de tubo circular disponível na biblioteca padrão do ANSYS®, as cotas parametrizadas foram os Raios Externos (R_e) e os Raios Internos (R_i). Destaca-se que os tubos para o fixação do guidão e selim não foram parametrizados e o tubo para acomodação do cubo de roda (T7) teve apenas o seu raio externo parametrizado uma vez que o cubo utilizado é de dimensões padrões. Desse modo, totalizaram-se 15 parâmetros de entrada.

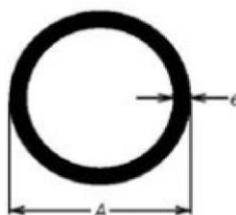
Figura 39 - Identificação dos tubos parametrizados



Fonte: Autor.

Para garantir que a otimização trabalhe com dimensões de tubos comerciais, foi habilitado a opção disponível no *DesignXplorer* de valores manufaturáveis. Nessa configuração, o usuário determina quais são as cotas permitidas para cada parâmetro e o *software* retorna apenas soluções que obedeçam a essas restrições. Sendo assim, foi consultado o catálogo de um fabricante de tubos de alumínio e a Tabela 11 foi construída com a faixa de perfis utilizadas nessa análise.

Tabela 11 - Tabela de perfis comerciais de alumínio



A [mm]	e [mm]	Re [mm]	Ri [mm]
19	1,25	9,5	8,25
	1,5		8
	2		7,5
22,22	1,58	11,11	9,53
	2		9,11
	2,38		8,73
	3,17		7,94
25,4	1,58	12,7	11,12
	2		10,7
	2,38		10,32
	3,17		9,53
28,57	1	14,285	13,285
	1,58		12,705
	3,17		11,115
31,75	1	15,875	14,875
	1,5		14,375
	2		13,875
	2,38		13,495

Fonte: ALCOA, 2010 (Adaptado).

Inicialmente o ANSYS® identifica cada parâmetro como independente e para evitar problemas na geração da geometria (um tubo com raio interno maior do que o externo, por exemplo) é preciso estabelecer as relações entre cada parâmetro. Considerando que as espessuras dos perfis selecionados variam entre 1 mm e 3,17 mm, as relações definidas foram:

$$Ri_n \geq Re_n - 3,17 \quad (6)$$

e

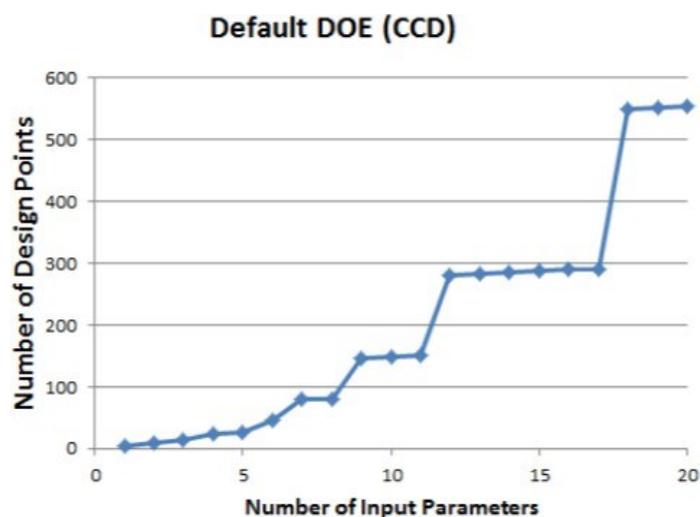
$$Ri_n \leq Re_n - 1 \quad (7)$$

6.2. Aplicação e análise do DOE (*Design of Experiments*)

Após a definição das variáveis do problema, é necessário gerar um conjunto de amostras que represente todo o espaço a ser explorado na etapa de otimização. Essa faixa de valores dos parâmetros de entrada é chamada de *Design of Experiments* (DOE). Segundo o guia do usuário do ANSYS® *DesignXPlorer*, existe uma ampla gama de algoritmos e métodos disponíveis para elaborar o DOE, porém todos eles têm a característica em comum de tentar localizar pontos de amostragem de forma que o espaço dos parâmetros de entrada aleatórios seja bem representado com o mínimo de simulações requeridas.

Neste trabalho, o método utilizado para popular o DOE foi o Planejamento Composto Central (CCD), que é a configuração padrão do ANSYS®. O software calcula automaticamente quais os pontos de amostra para cada parâmetro e quantas combinações são necessárias para uma boa aproximação dos resultados. Quanto maior o número de parâmetros de entrada, maior deve ser o número de amostras para se obter uma boa previsão da influência de cada parâmetro nos resultados da simulação. A Figura 40 (disponível no guia do usuário) indica a quantidade de pontos de acordo com a quantidade de parâmetros de entrada.

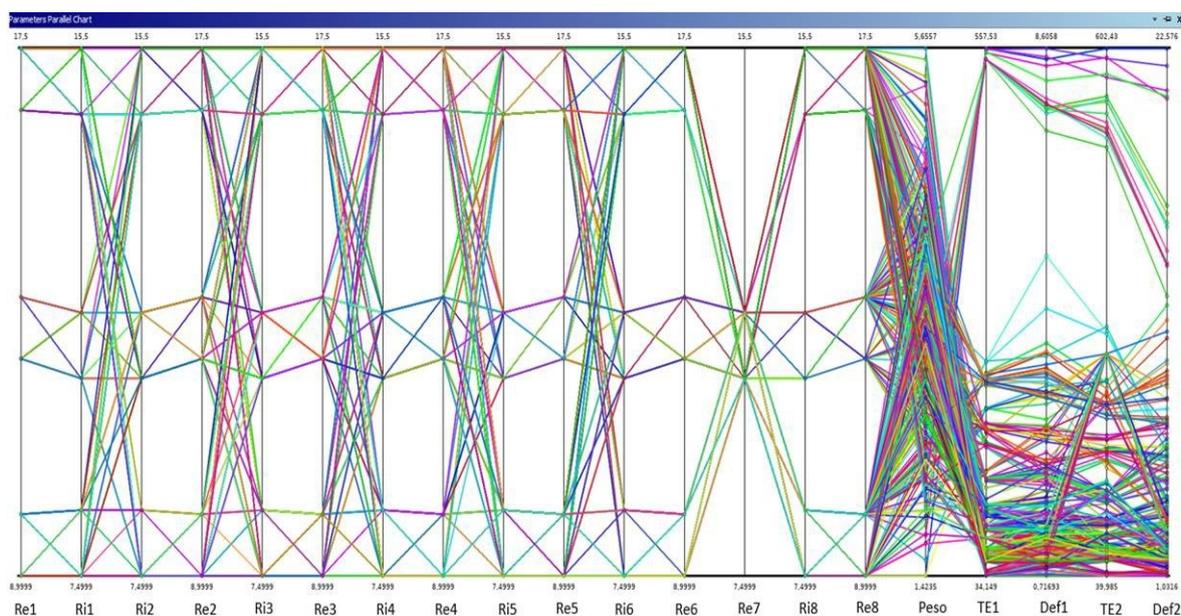
Figura 40 - Número de amostras em função do número de parâmetros de entrada



Fonte: ANSYS®, 2020.

Como indicado pelo gráfico acima, e considerando a existência de 15 parâmetros de entrada, o DOE foi organizado automaticamente com 287 diferentes combinações de parâmetros. O tempo total de simulação foi de aproximadamente 3 horas e 10 minutos. A Figura 41 mostra todas as simulações realizadas para gerar o DOE.

Figura 41 - Simulações do DOE



Fonte: Autor.

Na figura, cada linha representa uma combinação de parâmetros de entrada que foi simulada individualmente e, as últimas 5 colunas, seus respectivos resultados. Percebe-se que os pares de parâmetros de cada tubo da estrutura respeitaram as restrições impostas, não existindo nenhuma combinação fora dos limites de espessura estipulados na seção 5.2.

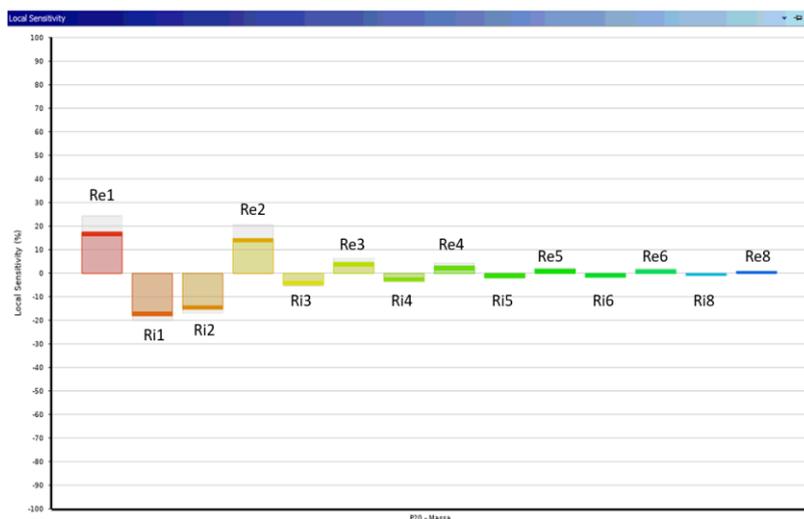
Quanto aos resultados, percebe-se que as geometrias mais leves foram as que apresentaram maiores valores de Tensão Equivalente e Deformação Total, condizendo com o esperado. Após a conclusão do DOE, o ANSYS® permite (por meio de interpolação) gerar os valores de sensibilidade de cada parâmetro e a superfície de resposta que será utilizada para a otimização.

6.3. Sensibilidades locais e superfícies de resposta

A sensibilidade local é um indicador que sinaliza qual a influência de cada parâmetro de entrada (mantendo os demais constantes) no valor final de algum dos parâmetros de saída. Valores positivos de sensibilidade significa que o impacto é direto, ou seja, com o aumento da variável também se dá o aumento da resposta ou então com a diminuição da variável também se dá a diminuição da resposta. Já valores negativos apontam uma relação inversa. A sensibilidade é uma propriedade interessante para análises qualitativas e ajuda a compreender quais os parâmetros de projeto são mais relevantes para alteração se desejável alguma modificação específica nos resultados de simulação.

A Figura 42 mostra os valores de sensibilidades obtidos para o peso da estrutura. Nota-se que as maiores sensibilidades são dos tubos correspondentes aos dois arcos (Tubos 1 e 2), o que é coerente pois são os que apresentam maior comprimento linear. Além disso, os raios externos de todos os tubos apresentaram sensibilidades positivas enquanto os raios internos são negativos. Isso é explicado pois o aumento do raio interno significa a diminuição da espessura da parede e consequente redução da massa.

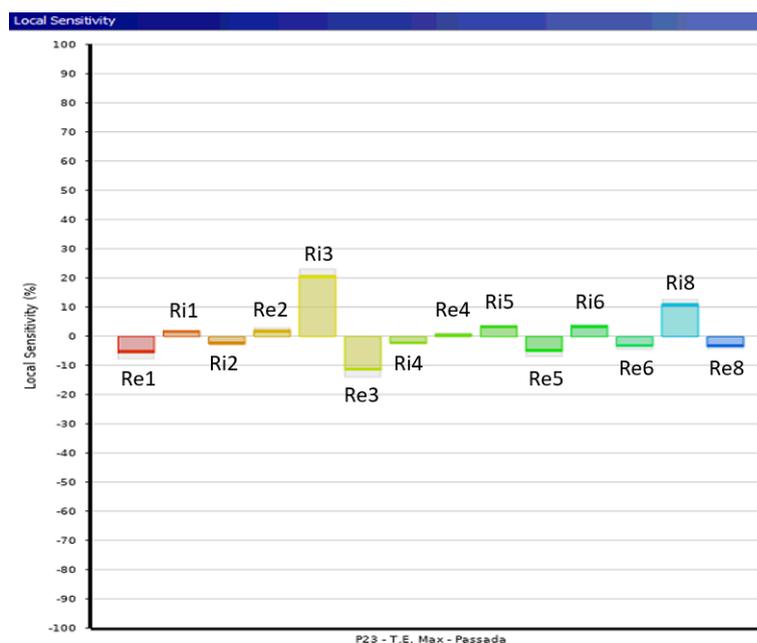
Figura 42 - Sensibilidades dos parâmetros de entrada para a massa final da estrutura



Fonte: Autor.

A Figura 43 é mais um exemplo de valores de sensibilidade, nesse caso para os resultados da Tensão Equivalente de von-Mises Máxima na análise de torção. Para esse parâmetro de saída, o tubo com maiores sensibilidades é o tubo horizontal da seção de simetria da estrutura (tubo 3) que serve de fixação para o banco.

Figura 43- Sensibilidades dos parâmetros de entrada para a Tensão Equivalente no caso de torção da estrutura



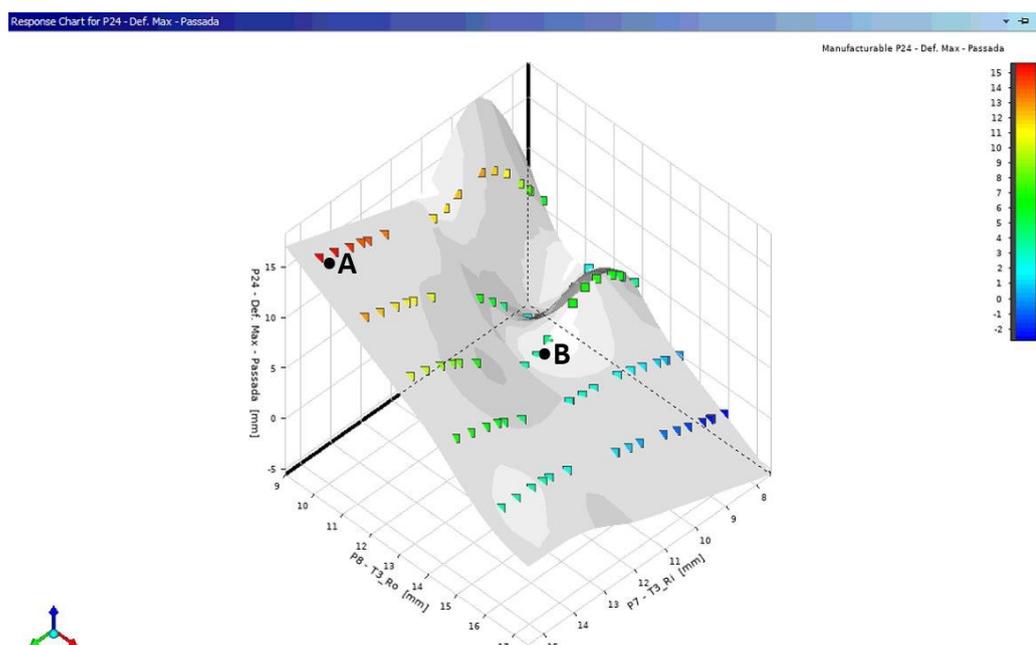
Fonte: Autor.

Depois de simulados todos os pontos do DOE também é possível obter a superfície de resposta. Esse procedimento consiste em construir um metamodelo por meio de aproximações que represente matematicamente a relação entre variáveis independentes para as respostas do sistema. No processo de otimização, esse modelo é utilizado para encontrar a configuração que melhor satisfaça as funções objetivos (ARORA, 2004).

Embora a superfície de resposta possa ser utilizada para visualizar o comportamento das variáveis, é necessário cautela durante a sua interpretação pois o resultado só é válido dentro das regiões de interesse do espaço de projeto (MENON, 2005).

A Figura 44 é um exemplo de uma das superfícies de respostas geradas com as simulações do DOE. Nela o resultado da Deformação Máxima na análise de torção é colocado em função dos raios interno e externo do tubo 3 (T3). Como dito anteriormente, as variáveis de entrada são consideradas independentes e a superfície de resposta é gerada para todo o intervalo definido entre os limites superior e inferior das variáveis, porém só são válidos aqueles pontos que obedeçam às restrições do modelo.

Figura 44 - Superfície de Resposta para Deformação Total (torção) em função dos raios interno e externo do tubo 3



Fonte: Autor.

No ponto A da Figura 44, temos um ponto de maior deformação, mas ao analisar os valores dos parâmetros, nota-se que o raio externo é menor do que o interno e, portanto, é uma região de extrapolação dos dados do DOE e então não deve ser considerado. Já o ponto B é um ponto de baixa deformação que satisfaz a faixa de espessura da parede estabelecida. Dessa forma, a principal finalidade dessa ferramenta é ser utilizada na rotina de otimização, onde as restrições de cada variável são definidas e apenas pontos válidos são levados em consideração.

6.4. Otimização Multiobjetivo

Como o problema de otimização apresenta mais de um critério a serem otimizados simultaneamente e que são conflitantes entre si, foi escolhido o método de otimização multiobjetivo e para sua solução foi utilizado o algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) do ANSYS®. Esse algoritmo fundamenta-se em, a cada iteração, gerar uma população de candidatos na qual são selecionados os que mais se aproximem das funções objetivos até que se atinja uma convergência dos resultados.

A Tabela 12 a seguir mostra quais foram os objetivos definidos e os seus limites. Foi definido como funções objetivos: minimizar o peso, minimizar a deformação e maximizar a tensão equivalente. A deformação e tensão equivalente foram definidas como objetivos conflitantes com o intuito de não obter uma geometria final muito robusta.

Tabela 12 - Objetivos de otimização dos parâmetros de saída

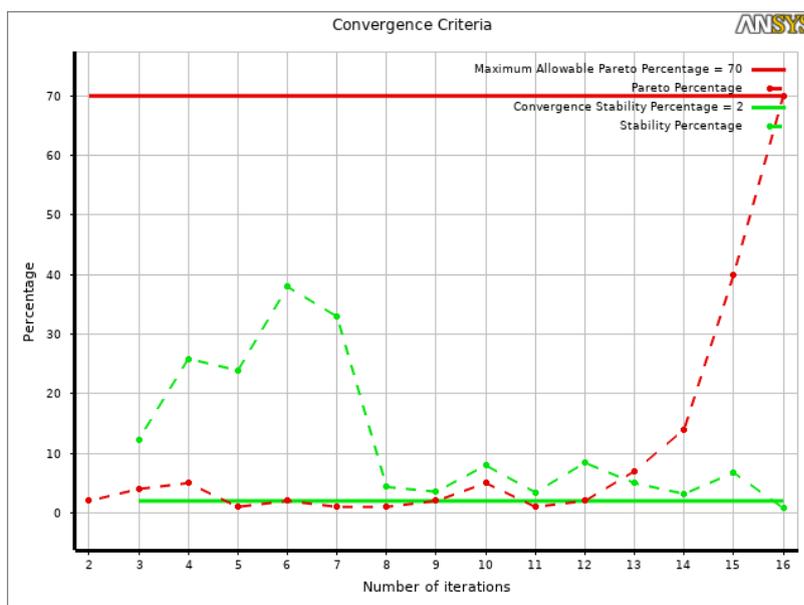
	Parâmetro	Objetivo	Limites
	Peso	Minimizar	$P \leq 3$ [kg]
Estatíca	Deformação Máxima	Minimizar	-
	Tensão Equivalente Máxima	Maximizar	$TE1 \leq 280$ [MPa]
Torção	Deformação Máxima	Minimizar	-
	Tensão Equivalente Máxima	Maximizar	$TE2 \leq 280$ [MPa]

Fonte: Autor.

Após definido os objetivos, foi configurado o MOGA para gerar 100 amostras por iteração e no final selecionar 3 candidatos. Os gráficos com os históricos de otimização para cada parâmetro de saída se encontram na seção de anexo (Figuras 51 a 55).

A otimização é parada quando se atinge a estabilidade de 2% entre a população ou a porcentagem de Pareto de 70%. A porcentagem de Pareto representa a quantidade de pontos na iteração que não podem ser melhorados sem prejudicar pelo menos um dos objetivos. Dessa forma, foram necessárias 16 iterações para atingir a convergência de resultados, totalizando 1600 pontos analisados. A Figura 45 apresenta o gráfico de convergência da otimização onde os dois critérios de parada foram atingidos.

Figura 45 - Critérios de convergência da otimização



Fonte: Autor.

Com a otimização completa, o ANSYS® indicou 3 candidatos e seus respectivos resultados e verificações se encontram na Tabela 13. O escolhido foi o candidato 3 pois foi o que mais compartilhava perfis iguais entre os tubos e isso facilita na etapa de fabricação. Os valores finais dos parâmetros de entradas são apresentados na próxima seção.

Tabela 13 - Candidatos indicados pela otimização

Candidatos	Massa [kg]	Análise Estática				Análise Torção				
		Deslocamento Máximo [mm]	Diferença	Tensão Equivalente [MPa]	Diferença	Deslocamento Máximo [mm]	Diferença	Tensão Equivalente [MPa]	Diferença	
1	Estimado	2,8232	2,048	-	93,64	-	1,3953	-	112,04	-
	Verificado	2,8232	2,0565	0,42%	94,38	0,79%	2,4182	73,31%	108,64	3,03%
2	Estimado	2,8389	2,0415	-	93,75	-	2,3991		107,46	-
	Verificado	2,8389	2,0565	0,73%	94,38	0,67%	2,4182	0,80%	108,64	1,10%
3	Estimado	2,9464	2,005	-	92,91	-	2,4188	-	105,78	-
	Verificado	2,9464	2,0235	0,92%	94,29	1,49%	2,4173	0,06%	108,59	2,66%

Fonte: Autor.

Como pode ser verificado na tabela, os resultados do deslocamento máximo na análise de torção tiveram uma significativa diferença percentual entre o valor estimado na otimização e o valor verificado. Isso se deve ao fato de que no método de otimização utilizado, o programa ajusta um modelo aproximado para descrever a relação entre as variáveis e esse modelo pode conter erros. Porém, como os valores verificados satisfazem às condições impostas, o modelo pode ser considerado aplicável em uma análise preliminar e posteriormente é possível refinar o resultado.

6.5. Comparativo das estruturas

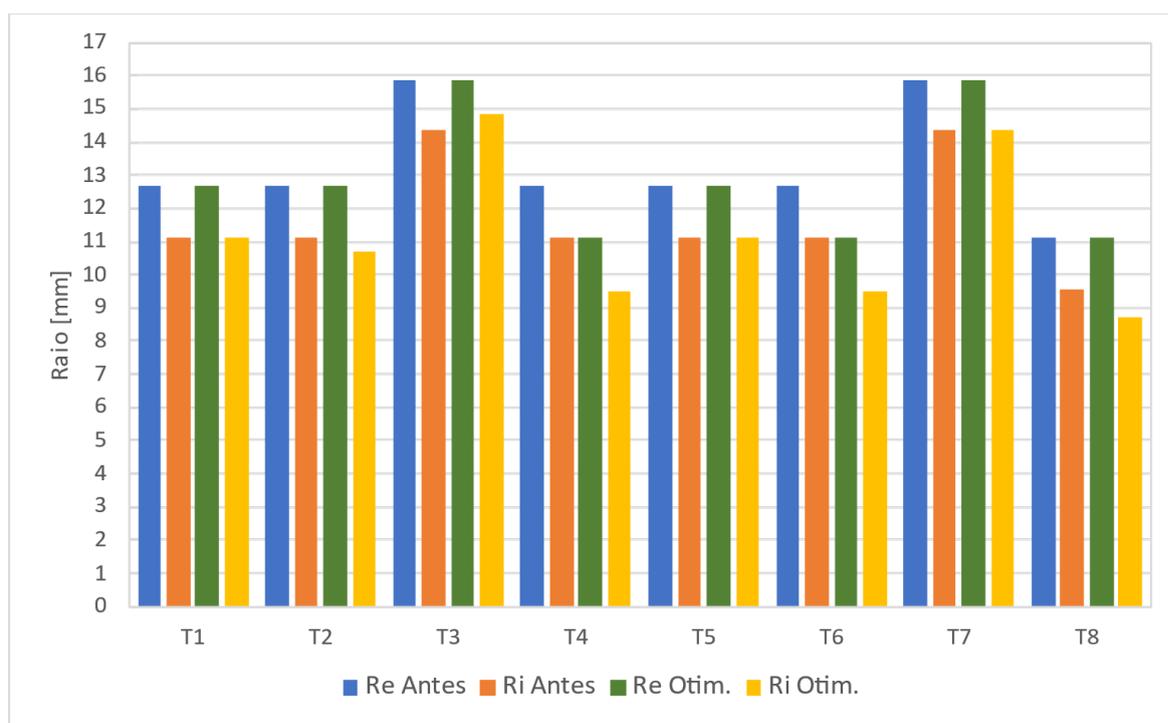
A Tabela 14 apresenta um comparativo com os valores dos parâmetros de entrada antes e após a otimização. Houve a redução do diâmetro ou da espessura dos tubos menos solicitados enquanto os mais solicitados foram reforçados. Na Figura 46 o comparativo dos parâmetros foi organizado em um gráfico de barras para melhor visualização.

Tabela 14 - Comparativo dos parâmetros de entrada antes e após a otimização

Tubo	Antes		Otimizado		Variação da Área
	Re Antes	Ri Antes	Re Otim.	Ri Otim.	
T1	12,7	11,12	12,7	11,12	0%
T2	12,7	11,12	12,7	10,7	24%
T3	15,875	14,375	15,875	14,875	-32%
T4	12,7	11,12	11,11	9,53	-13%
T5	12,7	11,12	12,7	11,12	0%
T6	12,7	11,12	11,11	9,53	-13%
T7	15,875	14,375	15,875	14,375	0%
T8	11,11	9,56	11,11	8,73	47%

Fonte: Autor.

Figura 46 - Comparativo dos parâmetros de entrada antes e após a otimização



Fonte: Autor.

Já a Tabela 15 foi construída com os valores dos resultados das simulações para as três estruturas avaliadas. Nota-se uma significativa melhoria dos parâmetros avaliados e, sendo assim, a metodologia de otimização desenvolvida foi vantajosa. Por fim, a Figura 47 mostra a montagem em CAD da PETRA com a estrutura otimizada.

Tabela 15 - Comparativo dos resultados de simulação das estruturas

	Estrutura	Referência	Nova	Otimizada	Melhora
	Peso [kg]	3,7	3,4	2,9	22%
Peso	Deformação Máxima [mm]	7,46	4,32	2,06	72%
	Tensão Equivalente Máxima [MPa]	319,84	257,00	94,38	70%
Torção	Deformação Máxima [mm]	22,27	6,68	4,42	80%
	Tensão Equivalente Máxima [MPa]	371,86	251,64	108,64	71%

Fonte: Autor.

Figura 47 - Montagem da PETRA com estrutura otimizada



Fonte: Autor.

CAPÍTULO VII

7. VALIDAÇÃO DE PROJETO EM PISTA

Para consolidar o projeto da PETRA e verificar se de fato apresenta melhorias de desempenho e segurança dos atletas, foi realizada uma avaliação de usabilidade e performance do novo design com atletas em ambiente relevante. A pesquisa foi realizada na pista de atletismo do SESI Gravatás em Uberlândia e passou por avaliação e aprovação pelo Comitê de Ética em Pesquisas (CEP) da Universidade Federal de Uberlândia com número de protocolo CAAE: 68326223.3.0000.5152.

7.1. Perfil dos participantes

Devido à grande individualidade da categoria e às necessidades únicas de cada usuário, não se espera resultados altamente repetíveis ou padronizados de forma global nos testes uma vez que cada atleta terá uma experiência diferente com o triciclo. Dessa forma, os critérios de comparação entre os modelos avaliados devem ser exclusivos para as diferenças de usabilidade do usuário com cada equipamento, não focando em comparações entre usuários.

Os atletas praticantes de PETRA no SESI de Uberlândia ainda não são numerosos o que impediu a realização da pesquisa com um maior número amostral nesse primeiro momento. Dentre os atletas disponíveis que atendiam aos critérios de inclusão, dois foram recrutados para participarem dos testes. O perfil de cada atleta se encontra na Tabela 16 abaixo.

Tabela 16 - Perfil dos atletas participantes

	ATLETA A	ATLETA B
Idade	43 anos	46 anos
Altura	1,70 m	1,85 m
Peso	51 kg	83 kg
Nível de prática	Amador	Amador
Diagnóstico Clínico	Paralisia Cerebral	Paralisia Cerebral

Fonte: Autor.

Em relação à comprometimento motor e fisiológico, os dois participantes apresentam perfis distintos. O Atleta A não faz uso de cadeira de rodas de vida diária, apresentando níveis mais baixos de espasticidade, ataxia e poucos e raros movimentos involuntários. Já o Atleta B utiliza de cadeira de rodas para locomoção na vida diária, apresentando maiores níveis de acometimentos em comparação com o outro participante e também apresenta frequentes espasmos involuntários. A participação desses dois atletas vai permitir a análise de usabilidade das tricicleta para dois usuários com classificações funcionais bem diferentes.

7.1.1. Análise quantitativa

A análise consistiu em duas etapas (reconhecimento e avaliação), no primeiro momento os atletas passaram por uma etapa experimental de reconhecimento do equipamento. Para isso, o equipamento PETRA otimizado ficou em posse da equipe do SESI por uma semana para ser empregado na rotina de treinos dos atletas. Durante essa semana de aclimatação, os treinos foram acompanhados pela equipe pesquisadora a fim de observação de qualquer adversidade e também para recolhimento dos *feedbacks* iniciais. Esse período de aclimatação é importante para que os atletas se acostumem com o novo equipamento e assim reduzir inconsistências nos resultados experimentas por conta de desconfiança ou falta de familiaridade com o equipamento.

Na semana seguinte ocorreu a avaliação que consistiu em 3 tomadas de tempo para cada modelo de PETRA com descansos entre cada tentativa. Duas câmeras foram utilizadas para registrar os testes. Uma câmera foi posicionada na lateral da pista para avaliação de tempo e velocidade dos atletas. Já a segunda câmera foi posicionada frontalmente para análise da estabilidade e alinhamento do atleta durante a corrida.

Durante as corridas, uma distância de 20 metros foi demarcada com 2 cones na pista de atletismo como a distância de avaliação à qual a câmera lateral ficou centralizada. Os atletas partiram do repouso à 10 metros antes do primeiro cone e encerravam a corrida à 10 metros depois do segundo cone. A Figura 48 ilustra como foram os testes.

Figura 48 - Registro dos testes na pista de corrida



Fonte: Autor.

As filmagens foram exportadas para o software de análise de movimento e biomecânica Kinovea®. No Kinovea® foi possível obter o tempo que cada atleta percorreu os 20 metros dos testes. Com os resultados foi construída a Tabela 17.

Tabela 17 - Tempos registrados nos testes

Modelo	Teste	ATLETA A			ATLETA B		
		Tempo [s]	Média	D. P.	Tempo [s]	Média	D. P.
Referência	1	5,24			11,88		
	2	5,89	5,51 s	0,34 s	12,46	12,18 s	0,29 s
	3	5,39			12,20		
CINTESP.Br	1	4,95			7,19		
	2	5,10	4,83 s	0,34 s	6,91	7,06 s	0,14 s
	3	4,45			7,09		

Fonte: Autor.

Com a utilização do modelo CINTESP.Br, o Atleta A teve uma melhora de 0,68 segundos (12,34%) no seu tempo médio enquanto o Atleta B abaixou o seu tempo médio em 5,12 s (42,04%).

No Kinovea® também foi obtido as curvas de velocidade dos atletas durante as corridas. Para isso, foi selecionado um ponto no capacete do atleta como referência e o software mapeia o movimento desse ponto realizando o cálculo de velocidade linear. Os resultados para as velocidades se encontram na Tabela 18. Ambos os atletas conseguiram alcançar maiores velocidades fazendo o uso do modelo CINTESP.Br.

Tabela 18 - Resultados para análise de velocidade linear

Modelo	Teste	Velocidade [km/h]			
		ATLETA A		ATLETA B	
		Média	Máx	Média	Máx
REFERÊNCIA	1	13,70	15,61	6,08	7,18
	2	12,12	13,50	5,72	8,92
	3	13,25	14,62	5,86	7,60
CINTESP.Br	1	14,31	15,51	9,99	11,66
	2	13,89	15,40	10,34	11,47
	3	16,01	17,56	10,05	11,08

Fonte: Autor.

7.1.2. Análise qualitativa

Para análise qualitativa foram utilizados questionários para obtenção de *feedbacks* dos usuários e também a análise das imagens, principalmente da câmera frontal.

As respostas dos questionários (Apêndice A) apontaram satisfação com o modelo CINTESP.Br em comparação com o modelo de referência. Ambos os atletas reportaram a melhora na estabilidade, se sentindo mais confortáveis e seguros com o modelo CINTESP.Br. Os pontos de melhoria elencados foram em relação aos acessórios como banco e apoio de tronco. De acordo com os participantes, acessórios mais personalizados de acordo com as características individuais de cada um são necessários.

Por fim, a análise das imagens corrobora que houve de fato a melhora na estabilidade do dispositivo de corrida. Como exemplo, as Figuras 49 e 50 ilustram frames do mesmo atleta (B) utilizando os dois modelos. No modelo de referência, o atleta demonstrou bastante dificuldade para se manter em linha reta e ocasionalmente perdia contato de uma das rodas com o solo da pista. Já no modelo CINTESP.Br, a maior rigidez da estrutura e a cambagem das rodas proporcionou uma maior estabilidade, garantindo mais facilidade e confiança para o atleta se manter alinhado.

Figura 49 - Atleta B utilizando o modelo de referência



Figura 50 - Atleta B utilizando o modelo CINTESP.Br



Fonte: Autor.

CAPÍTULO VIII

8. CONCLUSÕES

O foco deste trabalho foi a investigação dos principais problemas da estrutura de um equipamento utilizado para a prática do Frame Running no Brasil. Os resultados deste estudo indicaram que o Frame Runner utilizado de fato não é bem projetado. Além disso, o fato de os pontos críticos dos modelos de simulação coincidirem com os pontos relatados pelos atletas e técnicos como as principais incidências de falha corrobora a validade dos resultados encontrados. Para os resultados da deformação total, o deslocamento máximo encontrado na simulação da marcha justifica a instabilidade enfrentada pelos atletas durante a corrida como consequência da baixa rigidez torcional daquela estrutura.

Em seguida, foi proposto alterações na disposição dos tubos para corrigir as limitações identificadas. O modelo da estrutura que foi avaliada é um modelo padrão que atende diferentes estaturas de atletas e que é destinado principalmente para a iniciação ao esporte. Sendo assim, não foram consideradas grandes alterações construtivas do equipamento e o objetivo foi aprimorar a estrutura para corrigir as falhas encontradas.

Como a literatura para esse esporte ainda é escassa em relação a trabalhos de engenharia, deparou-se com a dificuldade de encontrar dados para se utilizar como condições de contorno claras para as análises e então foi necessário elaborar uma bancada de testes para caracterização dos tipos de esforços à qual a estrutura está sujeita. A análise da distribuição de forças ofereceu insights valiosos sobre os aspectos biomecânicos do Frame Running indicando relações claras entre os padrões de força e a frequência de passada do usuário.

Foi desenvolvida uma metodologia para otimizar o modelo e selecionar os perfis tubulares utilizados em cada seção da estrutura. Os objetivos designados para a otimização foram atendidos, observando a redução de peso na ordem de 20% e para os níveis de deformação e tensão uma significativa melhoria na ordem de 70% em comparativo com a estrutura de referência. Destaca-se também que todo o modelo desenvolvido é totalmente parametrizado e, dessa forma, a metodologia de otimização

também poderá ser aplicada em futuras análises e prescrição de diferentes modelos personalizados.

Por fim, foi fabricado o modelo com a estrutura otimizada o qual foi validado em testes de usabilidades comparativos com o modelo de referência do estudo. Os testes serviram para obtenção de *feedbacks* iniciais com atletas e treinadores da modalidade e apontaram uma satisfação geral dos usuários em relação a melhora da estabilidade garantida com o uso do triciclo projetada.

Quantitativamente, a nova estrutura permitiu melhor desempenho e maiores velocidades resultando na melhora nos tempos de corridas dos atletas avaliados. Para o atleta com maior comprometimento motor, a melhoria foi de grande impacto, uma vez que o controle do equipamento foi facilitado.

CAPÍTULO IX

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A principal sugestão de trabalho futuro seria em desenvolver a bancada de avaliação de forças durante a corrida. O primeiro modelo apresentado nesse trabalho serviu como uma prova de conceito e representou análises promissoras que podem ser melhor estudadas servindo também como uma ferramenta que auxilie na avaliação de performance e treinamento de atletas. Uma sugestão é a incorporação de protocolos de prescrições em conjunto com o sistema da esteira, podendo ser estudado o efeito de diferentes posições ergonômicas no desempenho do corredor.

Em relação ao modelo PETRA projetado neste trabalho, mais testes em pistas com atletas devem ser continuados para construção de um maior banco de dados que auxiliem no desenvolvimento de pesquisas e coleta de mais *feedbacks*. Para além do ponto de vista estrutural, melhorias devem ser projetadas também nos acessórios como banco e apoio de tronco.

Além do modelo de estrutura padrão, sugere-se desenvolver o projeto de uma estrutura personalizável de acordo com individualidades de cada atleta voltada para o nível de competição em alto rendimento.

Por fim, é fundamental o estudo em conjunto com profissionais da área da educação física e fisioterapia de outros parâmetros de performance como ergonomia e técnicas de passada adotada por cada atleta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, Â. M. T. S. O ensino e a paralisia cerebral. 2012. 105f. Dissertação (Mestrado em Educação Especial) – Escola Superior de Educação Almeida Garrett, Lisboa, 2012.

ALCOA, Perfis Standard: Perfis extrudados de alumínio, 2015.

ANSYS®, ANSYS® DesignXplorer User's Guide, 2020.

ANSYS®, ANSYS® Workbench User's Guide, 2020.

ARORA, J. S. Introduction to optimum design. 2. ed. Amsterdam; Boston: Academic Press, 2004. 728 p.

BEER, F. P. Resistência dos materiais. 3. ed. São Paulo, Makron Books, 1996. 1255 p.

BLAUWET, C., WILLICK, S. E. The Paralympic Movement: using sports to promote health, disability rights, and social integration for athletes with disabilities. *PM&R*, v. 4, n. 11, p. 851-856., 2012. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.pmjr.2012.08.015> >

BROWN, T. Design thinking. *Harvard Business Review*, 86(6), pp. 84–92., 2008.

Brown, T., Wyatt, J. Design thinking for social innovation. *Stanford Social Innovation Review*, (Winter), pp. 30–35., 2010. Disponível em: < https://doi.org/10.1596/1020-797X_12_1_29 >

BY CONNIEHANSEN®, PETRA & Cross Runner Manual, 2015. Disponível em: < <https://www.corksports.ie/contentfiles/Kate/Manual%20Petra%20Race%20Runner.pdf> > Acesso em: 06 de maio de 2022.

CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p.

CALVE, T., JÚNIOR, D. V. R., BARELA, A. M. F. Strategies adopted by younger and older adults while operating a non-pedal tricycle. *Brazilian journal of physical therapy*, v. 22, n. 1, p. 64-69, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2017.10.008> >

CARDOSO, V. D., GAYA, A. C. A classificação funcional no esporte paralímpico. *Conexões*, v. 12, n. 2, p. 132-146, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.20396/conex.v12i2.2173> >

CPISRA, RaceRunning Rules and Regulations, Cerebral Palsy International Sports and Recreation Association, 2015. Disponível em < <https://cpisra.org/racerunning> >. Acesso em: 27 de janeiro de 2023.

DOMÍNGUEZ, B. M. S. Papalani, Tricycle for sport and rehabilitation development of people with Cerebral Palsy. *RESNA Annual Conference*, 2017.

GOLD, J. R., GOLD, M. M. Access for all: the rise of the Paralympic Games. *Journal of the Royal Society for the Promotion of Health*, v. 127, n. 3, p. 133-141, 2007. Disponível em < <https://doi.org/10.1177/1466424007077348> >

HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. 7. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010. 637 p.

HUTZLER, Y. A systematic ecological model for adapting physical activities: Theoretical foundations and practical examples. *Adapted Physical Activity Quarterly*, v. 24, p. 287-304, 2007. Disponível em < <https://doi.org/10.1123/apaq.24.4.287> >

INMAN, D. J., "Engineering Vibration". 3. ed. Pretince Hall. 688 p, 2007.

IPC, World Para athletics classification rules and regulations. Bonn (Germany): International Paralympic Committee, 2018. Disponível em: < <https://www.paralympic.org/athletics/classification/rules-and-regulations> >. Acesso em: 06 de junho de 2023.

KARWOWSKI, W., STANTON, N., SOARES, M. Human factors in consumer product design: methods and techniques. Boca Raton, FL: CRC Press. 2011.

LEITE, J. M. R. S., DO PRADO, G. F. Paralisia cerebral aspectos fisioterapêuticos e clínicos. *Revista Neurociências*, v. 12, n. 1, p. 41-45, 2004. Disponível em: < <https://doi.org/10.4181/RNC.2004.12.41> >

LIEDTKA, J. Why design thinking works. *Harvard Business Review*, 96(5), pp. 72–79, 2018.

LOUSADA, H., PHILLIPS, S. The physiological and metabolic responses of individuals with Cerebral Palsy to habitual race running training. Poster session presented at *British Association of Sport and Exercise Sciences Annual Conference*, Burton Upon Trent, United Kingdom. 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1260807> >

MARÇAL, L. C. B., DA SILVA, F. G., CALEGARI, D. R., et al. Ranking brasileiro de Petra Race Running–2015 a 2019. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 12, p. 98749-98755. 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.34117/bjdv6n12-385> >

MARQUES, R. F. R., DUARTE, E., GUTIERRES, G. L., ALMEIDA, J. J. G. D., & MIRANDA, T. J. Esporte Olímpico e Paralímpico: Coincidências, Divergências e Especificidades numa Perspectiva Contemporânea. *Revista Brasileira de Educação Física e Esporte*, v. 23, n. 4, p. 365-377, 2009.

MARTIN, B., HANINGTON, B. *Universal Methods of Design*. Beverly: Rockport. 2012.

MENON, A. Structural optimization using ANSYS and regulated multiquadric response surface model. 2005. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – University of Texas, Arlington, 2005.

OLIVIER, G., et al. “Constant low-to-moderate mechanical asymmetries during a treadmill graded exercise test” *European Journal of Sport Science*, Vol. 22, p. 530-538, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/17461391.2021.1922504> >

PEREIRA, H. V. Paralisia cerebral. *Revista Residência Pediátrica*, v. 8, n. 1, p. 49-55, 2018.

ROSENBAUM, P., BAXTER, P., MORRIS, C., et Al. The definition and classification of cerebral palsy. *Development Medicine & Child Neurology Journal*, v. 49, n. s109, p. 1-44, 2007.

SHERRILL, C. Disability sport and classification theory: A new era. *Adapted Physical Activity Quarterly*, v. 16, n. 3, p. 206-215, 1999. Disponível em: < <https://doi.org/10.1123/apaq.16.3.206> >

SHIGLEY, J. E. Projeto de engenharia mecânica. 7 ed. Porto Alegre, Bookman, 2005. 960 p.

SIDDIQI, M. “The History of Frame Running”; 2022. Disponível em: < <https://framerunning.org/media/1207/the-historyof-frame-running-2022.pdf> >. Acesso: 27 de Abril 2023.

SILVA, L. T. B. Avaliação funcional e de habilidades sociais de adolescentes com paralisia cerebral. 2021. 106f. Dissertação (Mestrado em Educação Especial) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

TWEEDY, S. M., VANLANDEWIJCK, Y. C., International Paralympic Committee position stand—background and scientific principles of classification in Paralympic sport. *British journal of sports medicine*, v. 45, n. 4, p. 259-269, 2011. Disponível em : < <https://doi.org/10.1136/bjism.2009.065060> >

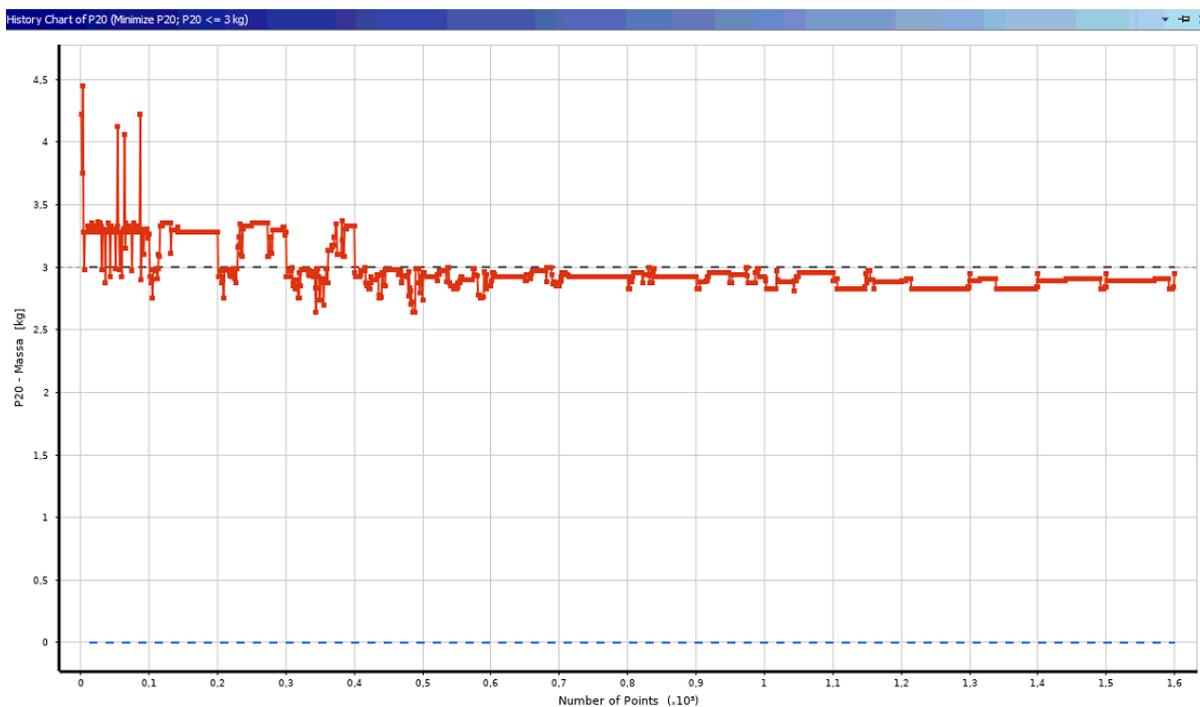
VAN DER LINDEN, M. L., JAHED, S., NICOLA, T., VERHEUL, M. The influence of lower limb impairments on RaceRunning performance in athletes with hypertonia, ataxia or athetosis. *Gait & Posture*, Vol. 61, p. 362-367, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.02.004> >

VERÍSSIMO, A. W., RAVACHE, R. Atletismo Paralímpico. - Brasília: *Comité Paralímpico Brasileiro*, 2006.

WANG, E., NELSON, T., RAUCH, R. Back to Elements – Tetrahedra vs. Hexahedra, *ANSYS International Conference*, 2004.

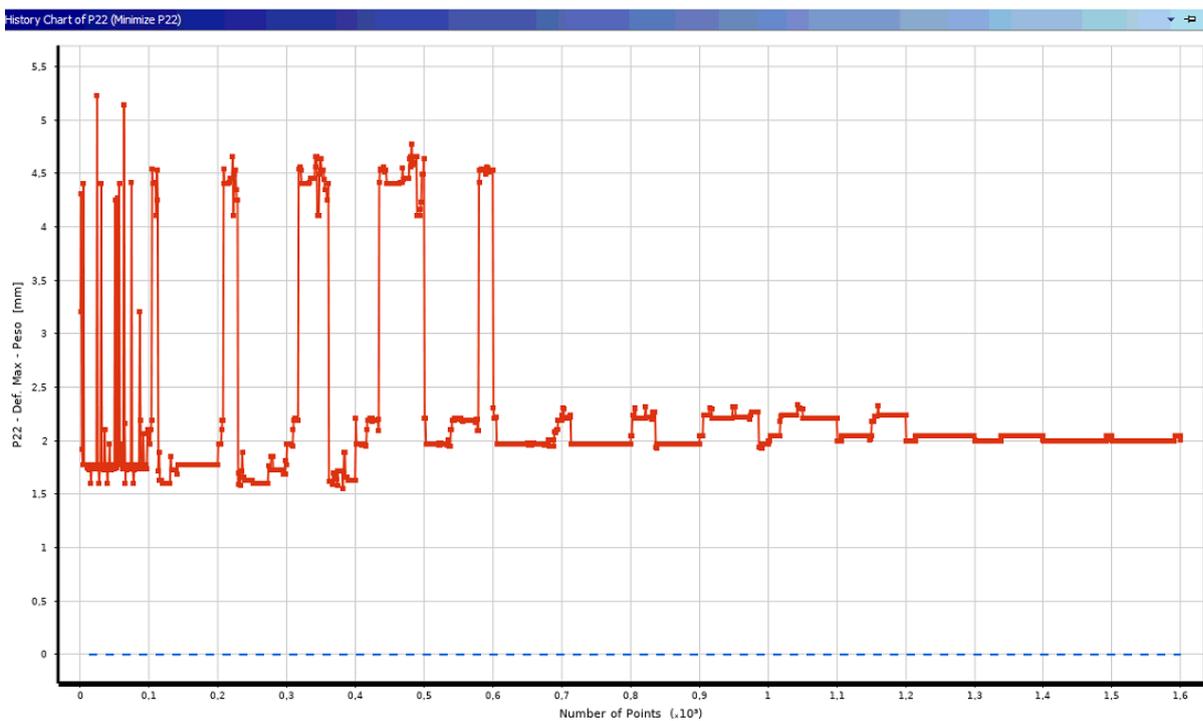
ANEXO

Figura 51 - Histórico de otimização da massa da estrutura



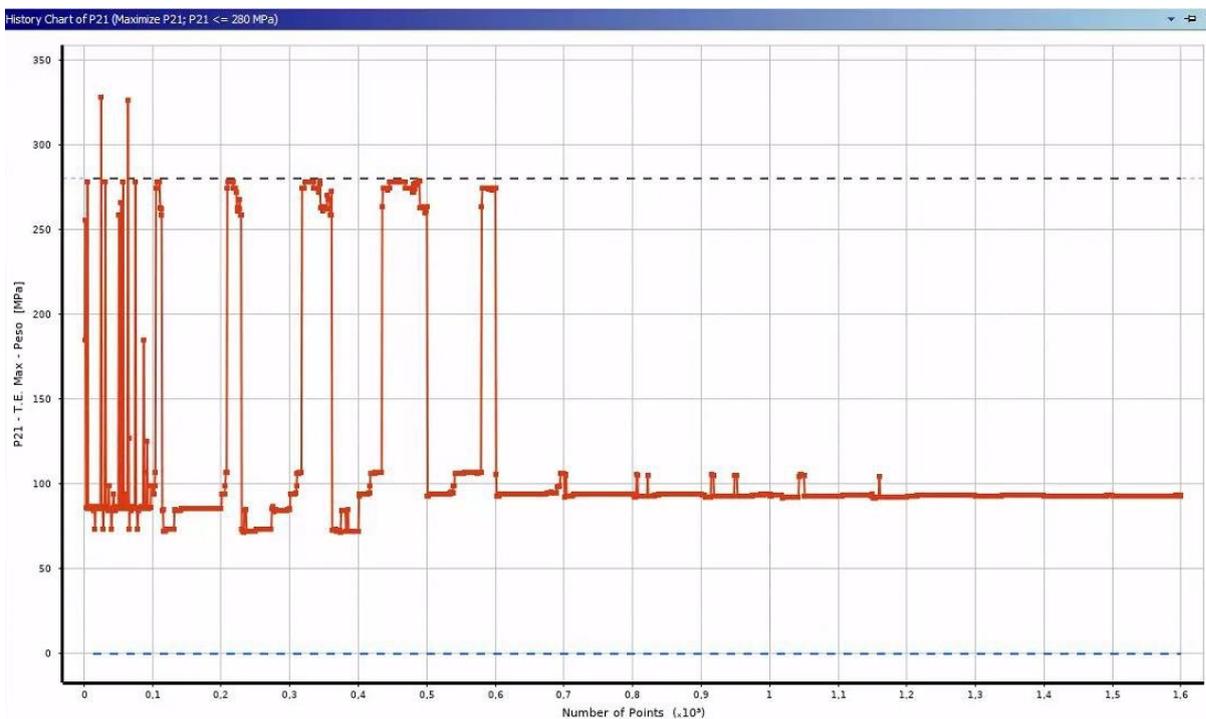
Fonte: Autor.

Figura 52 - Histórico de otimização do deslocamento máximo na análise de peso do atleta



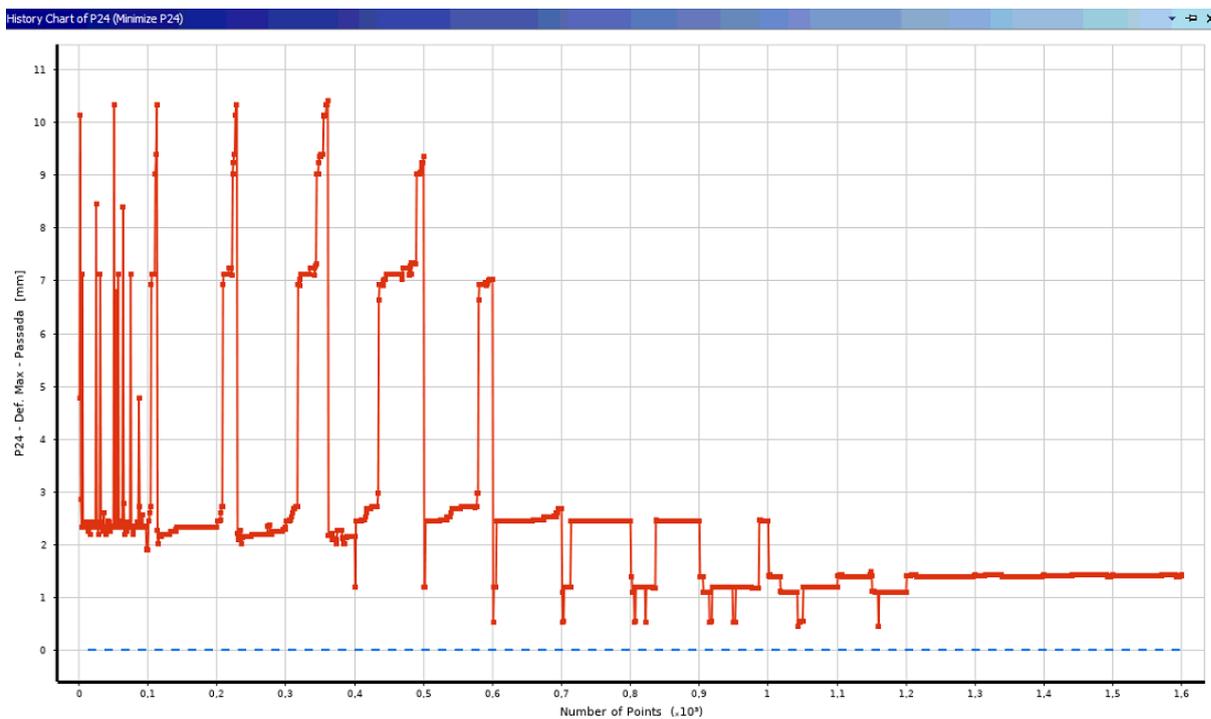
Fonte: Autor.

Figura 53 - Histórico de tensão equivalente máxima na análise de peso do atleta



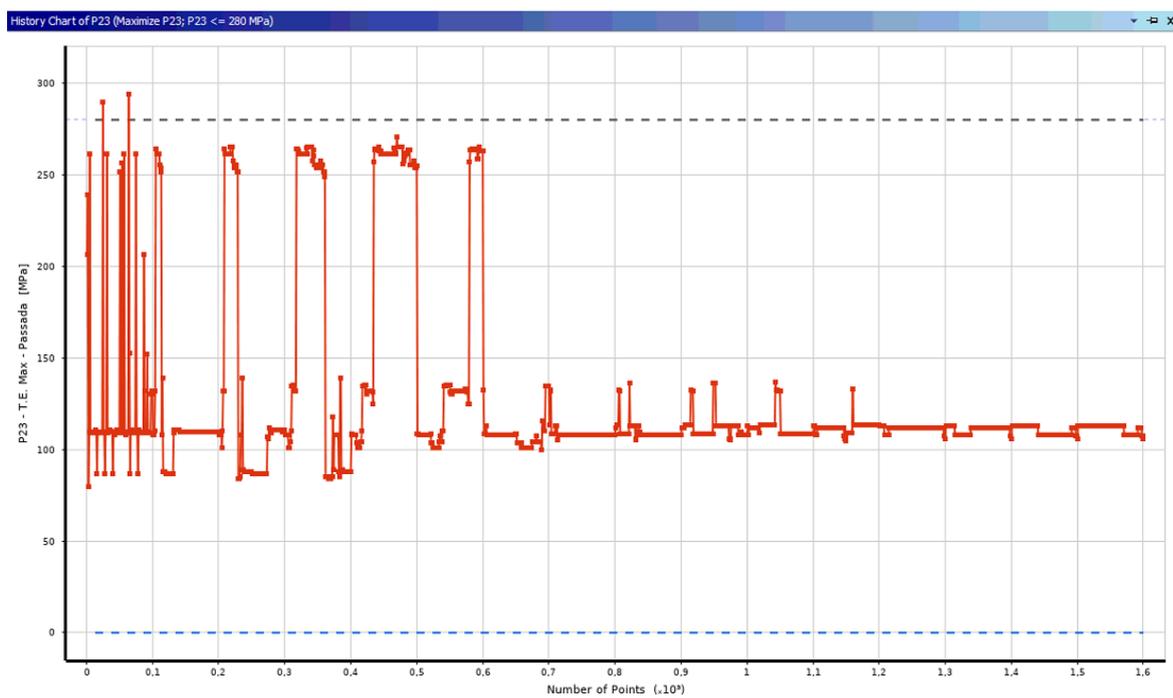
Fonte: Autor.

Figura 54 - Histórico de otimização do deslocamento máximo na análise de torção



Fonte: Autor.

Figura 55 - Histórico de otimização da tensão equivalente máxima na análise de torção



Fonte: Autor.

APÊNDICE A – PROJETO DE PESQUISA SUBMETIDO AO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA (CEP)

DADOS DA VERSÃO DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: Projeto otimizado e parametrizado de um triciclo adaptado para prática de Frame Running (PETRA)

Pesquisador Responsável: Cleudmar Amaral de Araújo

Área Temática:

Versão: 2

CAAE: 68326223.3.0000.5152

Submetido em: 17/04/2023

Instituição Proponente: Faculdade de Engenharia Mecânica

Situação da Versão do Projeto: Aprovado

Localização atual da Versão do Projeto: Pesquisador Responsável

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIOS

Código do participante: _____ Data: ___/___/___

Entrevista com participante

Idade: _____ Altura: _____ Peso: _____

1. Qual nível de prática?

Iniciação

Lazer

Amador

Alto rendimento

2. Há quanto tempo é praticante da PETRA?

3. Possui classificação IPC?

4. Diagnóstico clínico:

5. Comprometimento motor:

Hemiplegia

Paraplegia

Diplegia

Quadriplegia

6. Acometimento fisiológico:

Tônus Muscular

Distonia

Hipertonia

Hipotonia

Atetose

Ataxia

Espasticidade

Membros

Superiores

Inferiores

Superiores

Inferiores

Superiores

Inferiores

Superiores

Inferiores

Superiores

Inferiores

Superiores

Inferiores

7. Comprometimento de estruturas osteo-articulares

Hiperlordose

Escoliose

Sub-luxação no quadril

Hipercifose

Luxação no quadril

Patela alta

Outros:

8. Técnica de corrida:

Borboleta

Galope

Corrida clássica

Galope hemiplégico

Corrida clássica atetóide

Comentários:

9. Necessita de acessórios?

Cinta torácica

Faixa para fixar as mãos

Trava direção

Freios adaptados

Outros:

Observações adicionais:

Código do participante: _____ Data: ___/___/_____

Avaliação de satisfação e usabilidade da tecnologia

O objetivo do questionário é avaliar o grau de satisfação com o equipamento que você usou.

Instruções:

- Circule ou marque a alternativa que melhor descreve a sua satisfação com cada item avaliado.
 - Não deixe nenhuma pergunta sem resposta.
 - Se houver algum item com o qual você não tenha ficado “totalmente satisfeito”, comente na seção comentários.
 - Em caso de qualquer dúvida, consulte o pesquisador para esclarecimento.
-

Perguntas:

1. Como você se sentiu utilizando o triciclo PETRA?
 - a. Muito confortável
 - b. Confortável
 - c. Neutro
 - d. Pouco confortável
 - e. Desconfortável

2. Em sua opinião, qual a facilidade de uso do triciclo PETRA?
 - a. Muito fácil de usar
 - b. Fácil de usar
 - c. Neutro
 - d. Pouco fácil de usar
 - e. Difícil de usar

3. Você sentiu alguma dificuldade ao usar o triciclo? Se sim, qual?
 - a. Nenhuma
 - b. Controle de direção
 - c. Ajuste de altura do assento
 - d. Ajuste de altura do suporte de tronco
 - e. Outra: _____

4. Em sua opinião, o triciclo é seguro?
 - a. Muito seguro
 - b. Seguro
 - c. Neutro
 - d. Pouco seguro
 - e. Não seguro

5. Você teve problemas para manter o equilíbrio enquanto usava o triciclo?
 - a. Nenhum
 - b. Pouco
 - c. Neutro
 - d. Moderado
 - e. Muito

6. Como você avaliaria o design geral do triciclo?
 - a. Muito atraente
 - b. Atraente
 - c. Regular
 - d. Pouco atraente
 - e. Não atraente

7. O triciclo atendeu às suas características físicas e dimensões do seu corpo?
 - a. Sim, completamente
 - b. Sim, parcialmente
 - c. Não

Comentários:

8. Você recomendaria o triciclo para outras pessoas com paralisia cerebral?
 - a. Sim
 - b. Talvez
 - c. Não

9. Você tem alguma sugestão de melhoria?

10. Existe algum problema ou dificuldade que você enfrentou e não foi abordado neste questionário?

Código do participante: _____ Data: ___/___/_____

Escala de Usabilidade do Sistema

Instruções: Para cada uma das seguintes afirmações, marque uma caixa que melhor descreva suas reações ao triciclo PETRA utilizado hoje.

		Discordo totalmente			Concordo totalmente	
1	Achei este triciclo de fácil utilização	<input type="checkbox"/>				
2	Achei este triciclo muito seguro	<input type="checkbox"/>				
3	Achei este triciclo muito estável durante a corrida	<input type="checkbox"/>				
4	O triciclo se adequou bem as minhas dimensões e características físicas	<input type="checkbox"/>				
5	Achei este triciclo confortável	<input type="checkbox"/>				
6	A regulagem do suporte de tronco é de fácil ajuste	<input type="checkbox"/>				
7	A regulagem do assento é de fácil ajuste	<input type="checkbox"/>				
8	O guidão do triciclo oferece estabilidade, dirigibilidade e conforto	<input type="checkbox"/>				
9	A inclinação das rodas tem efeito positivo na estabilidade durante a corrida	<input type="checkbox"/>				
10	Achei a estética do design do triciclo muito atraente	<input type="checkbox"/>				
11	O design do triciclo transmite uma ideia de velocidade	<input type="checkbox"/>				

APÊNDICE C – PRODUÇÕES CIENTÍFICAS

Desenho Industrial – RPI 2701 de 11 de Outubro de 2022

290/374



(15) 11/10/2022

(45) 11/10/2022

(52) 12-11

(54) CONFIGURAÇÃO APLICADA A/EM TRICICLO PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA

(73) UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (BR/MG)

(72) CLEUDMAR AMARAL DE ARAÚJO; FREDERICO SOUSA SANTOS; JULIANA CARDOSO BRAGA; MÁRCIO PERES DE SOUZA; MARIA FERNANDA SALAMANCA CARVALHO; LUCAS DE SOUZA CARDOSO; DIEGO AUGUSTO COSTA ALVES

10 (dez) anos contados a partir de 18/08/2022, mediante o recolhimento da taxa quinquenal de manutenção (Artigos 119 e 120 da LPI) e observadas as demais condições legais.



COBEM
2021
26th International Congress
of Mechanical Engineering



STRUCTURAL ANALYSIS OF A THREE WHEELED FRAME FOR RACE RUNNING (PETRA) USING FINITE ELEMENT METHOD

Frederico Sousa Santos¹, fredericosantos@ufu.br
Márcio Peres de Souza¹, marcioperes@ufu.br
Diego Augusto Costa Alves¹, diegoaugusto@ufu.br
Cleudmar Amaral de Araújo¹, cleudmar@ufu.br

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Projetos Mecânicos Professor Henner Alberto Gomide (LPM-FEMEC), Centro Brasileiro de Referência em Inovações Tecnológicas para Esportes Paralímpicos (CINTESP.Br).

Abstract. Race Running (PETRA) is a para-athletics modality predominantly suited to those with Cerebral Palsy but also suitable for those with other disabilities that affect mobility and balance. The device used for its practice is called Race Runner and consist of a three wheeled frame, with handlebars, a saddle and a trunk support, similar to a tricycle. Rather than using a pedaling system, the athletes propel themselves along the racetrack by stepping their feet on the ground. This adapted sport was invented in Denmark in 1989 and is under analysis for inclusion in the 2024 Paralympic games. PETRA was taken to Brazil in 2009 as an initiative of the Associação Nacional de Desportos para Deficientes (ANDE), the organization responsible for holding the events and championships at the country. In this context of promoting this sport and provide support to athletes, the Comitê Paralímpico Brasileiro (CPB) approached the authors proposing the design of an affordable and reliable Race Runner. One of the models that is being currently used presents constant cases of breakage and instability during the race, as reported by them. This initial study aims to identify the existing limitations in the frame to better understand the points to be improved in a new design. Therefore, a CAD model of the evaluated frame was made, and a structural simulation was carried out using the finite element method. Two load conditions were simulated: the first being the application of the user's weight and the second a torsional analysis of the frame as a consequence of the athlete's gait. The results of the analysis revealed that the frame is in fact not well designed, and the critical points found coincided with the most common reports of breakage cases. Such results will serve as a basis for an optimization of the frame aiming to improve the athlete's performance and safety.

Keywords: Race Running, PETRA, Adapted Sports, Finite Element Method

COB-2023-2263

DEVELOPMENT OF A TEST BENCH FOR FRAME RUNNING (PETRA): LOAD CONDITIONS ANALYSIS AND CHARACTERIZATION

Frederico Sousa Santos^{1,2,4,5}, fredericosantos@ufu.br
 João Marcos Xavier^{1,2,4,5}, jmcxavier@ufu.br
 Márcio Peres de Souza^{1,2,4,5}, marcioperes@ufu.br
 Diego Augusto Costa Alves^{1,2,4,5}, diegoaugusto@ufu.br
 Cleudmar Amaral de Araújo^{1,2,4,5}, cleudmar@ufu.br
 Juliana Cardoso Braga^{1,3,4,5}, juliana.braga@ufu.br

¹Universidade Federal de Uberlândia, ²Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC/UFU), ³Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e Design (FAUeD/UFU), ⁴Laboratório de Projetos Mecânicos Professor Henner Alberto Gomide (LPM), ⁵Centro Brasileiro de Referência em Inovações Tecnológicas para Esportes Paralímpicos (CINTESP.Br).

Abstract. This paper presents the development of a test bench to analyze the loads applied to Frame Runners, a device used in the para-athletic modality known as Frame Running (PETRA). PETRA is an adapted sport suitable for athletes with disabilities that affect mobility and balance, such as Cerebral Palsy. The device used in PETRA is a tricycle-like three-wheeled frame which allows athletes to propel themselves along the track by stepping their feet on the ground. In 2009, PETRA was taken to Brazil as an initiative of the Associação Nacional de Desportos para Deficientes (ANDE), the organization responsible for holding the events and championships in the country. In this context of promoting the sport and providing support to athletes, the Comitê Paralímpico Brasileiro (CPB) approached the authors proposing the design of an affordable and reliable Frame Runner. As PETRA is a relatively new modality, there is limited literature on the subject, which posed a challenge during the design stages as no clear load conditions were found. To overcome this challenge, the research team developed a test bench by instrumenting the structure with load cells in each one of the three wheel hubs and mounting it over an ergometric treadmill. The developed apparatus aimed to obtain data that closely resembled the real operating conditions of the equipment and provide the user with a similar feeling of use as on the track. The tests carried out on the test bench allowed the identification of the behavior and magnitude of the loads applied to the Frame Runner. The results showed that the loads have dynamic characteristics that vary depending on factors such as the user's stride technique and weight distribution on the equipment. The data obtained from the test bench will be used in the structural simulations of the new designed frames, ensuring optimal safety and performance for athletes. Additionally, the test bench can be used as a complementary tool in athletes' training routines. The research presented in this paper contributes to the development of Frame Running as a para-athletic modality and promotes the inclusion of athletes with disabilities in sports.

Keywords: Adapted Sports, Frame Running, PETRA, Load Analysis, Instrumentation, Biomechanics.

Low-Fidelity Model as a Redesign Tool for Frame Running

Juliana Cardoso Braga^{1,2}, Maria Fernanda Salamanca Carvalho², Frederico Souza Santos², Gabriel Henrique Cruz Bonfim², Diego Augusto Costa Alves², and Cleudmar Amaral de Araújo²

¹CIAUD, Research Centre for Architecture, Urbanism and Design, Lisbon, 1349-063, Portugal

²CINTESP.Br, Brazilian Reference Center on Technological Innovations for Paralympic Sports, Uberlândia, MG 38408-157, Brazil

ABSTRACT

The conception stage of the design project aims to help the comprehension of the problem to be worked on, seeking to provide the best possible experience for the users. Prototyping stage is essential to make the ideas tangible for the validation of usability, functionality, ergonomics, aesthetics, among others. However, this whole process can take a lot of time and rework. This article presents a case study of the application of the Design Thinking methodology for the redesign of an Assistive Technology - the bike for Frame Running - with the objective of demonstrating the benefits of using a low-fidelity model as a tool for generating insights and optimizing the time required for digital testing in 3D software and design conception. The development of this project sought to integrate theory and practice through a mixed non-interventionist and interventionist methodology with a qualitative basis, acting in a cyclical and non-linear way, through bibliographic and documentary research, use of low-fidelity models, case study, direct observation, structural simulation, ergonomic study and prototyping. The results obtained, using alternative low-cost materials, favored the reduction of the time of the design process, allowing the interaction and agile identification of critical points of performance, ergonomics, aesthetics, functionality, strength and analysis of the appropriate construction processes, contributing to the redesign of the Frame Running bike, the dissemination of the sport, the quality of life and inclusion of disabled people.

Keywords: Frame running, Assistive technology, Redesign, Low-fidelity prototyping