

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, Mateus Piccin Duarte de Souza, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 15/02/2027.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MATEUS PICCIN DUARTE DE SOUZA

**ANÁLISE PARAMÉTRICA E OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO
SISTEMA DE AMORTECIMENTO DE UMA ESTEIRA
ERGOMÉTRICA UTILIZANDO MODELOS DE ELEMENTOS
FINITOS**

BAURU - SP

2025

MATEUS PICCIN DUARTE DE SOUZA

ANÁLISE PARAMÉTRICA E OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL
DO SISTEMA DE AMORTECIMENTO DE UMA ESTEIRA
ERGOMÉTRICA UTILIZANDO MODELOS DE
ELEMENTOS FINITOS

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, na Área de Projeto Mecânico, como parte das exigências à obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Edson Antônio Capello Sousa
Orientador

Prof. Dr. Bruno Agostinho Hernandez
Coorientador

BAURU – SP
2025

Souza, Mateus Piccin Duarte de.

Análise paramétrica e otimização estrutural do sistema de amortecimento de uma esteira ergométrica utilizando modelos de elementos finitos / Mateus Piccin Duarte de Souza. - Bauru, 2025

102 p. : il.


Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru

Orientadora: Edson Antonio Capello Sousa

1. Esteira Ergométrica. 2. Análise Paramétrica. 3. Método dos Elementos Finitos. 4. Análise Dinâmica, 5. DOE. 6. RSM. 7. Otimização. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MATEUS PICCIN DUARTE DE SOUZA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 14 dias do mês de fevereiro do ano de 2025, às 8h30min, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MATEUS PICCIN DUARTE DE SOUZA, intitulada **ANÁLISE PARAMÉTRICA E OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO SISTEMA DE AMORTECIMENTO DE UMA ESTEIRA ERGOMÉTRICA UTILIZANDO MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. PAULO JOSÉ PAUPITZ GONÇALVES (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Estadual Paulista Unesp Faculdade de Engenharia Câmpus Bauru, Prof. Dr. LUCIANO LUPORINI MENEGALDO (Participação Virtual) do(a) Engenharia Biomédica / Universidade Federal do Rio de Janeiro. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

 Documento assinado digitalmente
EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA
Data: 18/02/2025 23:37:09-0900
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, Mariana, aos meus pais, Mateus e Silvia, aos meus avós Carmem e Dionísio, Aparecida (*in memoriam*) e Mario (*in memoriam*), aos meus irmãos, Vinicius e Thiago e demais familiares e amigos que sempre me encorajaram, me apoiaram e acreditaram em mim durante esta jornada. Sou eternamente grato a todos vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado o dom da vida, por me guiar durante esta jornada e me dar força.

Sou eternamente grato a meus familiares, especialmente à minha esposa, Mariana, aos meus pais, Silvia e Mateus, meus irmãos, Vinicius e Thiago, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando, encorajando e dando forças para seguir em frente, principalmente durante momentos conturbados nos últimos anos. Sem vocês eu não teria conseguido.

Aos meu orientador, Prof. Dr. Edson Antônio Capello Sousa, e coorientador Prof. Dr. Bruno Agostinho Hernandez, por depositar confiança em mim, me incentivar, e sempre estar à disposição para me ajudar, me guiando mostrando o caminho para o desenvolvimento deste projeto.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Unesp de Bauru que me transmitiram conhecimento e me ajudaram durante a realização deste trabalho.

A todos os funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru e da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela prestatividade, sempre dispostos a me ajudar quando precisei.

Souza, M. P. D. **Análise paramétrica e otimização estrutural do sistema de amortecimento de uma esteira ergométrica utilizando modelos de Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2025.

RESUMO

Com o aumento da prática de exercícios físicos, como caminhada e corrida, observou-se uma crescente preocupação com lesões decorrentes do impacto entre o praticante e o solo. As esteiras ergométricas, amplamente utilizadas para esses exercícios, possuem sistemas de amortecimento que ajudam a dissipar a energia do impacto. O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise paramétrica e otimização do sistema de amortecimento de uma esteira, com o intuito de minimizar as forças de impacto durante o uso. Para isso, foi desenvolvido um modelo de elementos finitos, dividido em duas etapas. Na primeira, foram modelados dois tipos de coxins: um de borracha natural com geometria retangular e outro de poliuretano termoplástico (TPU) com geometria elíptica. A validação desses modelos foi feita através de simulações no software Ansys Workbench (v.2022 R2, Ansys Inc, EUA) e comparações com testes laboratoriais usando o método de Lin's para analisar as curvas de força por deslocamento. Após a validação dos coxins, foi construído o modelo completo do sistema de amortecimento da esteira. As simulações também foram comparadas com experimentos laboratoriais. Uma vez validado o modelo estático, iniciou-se o estudo do modelo dinâmico, onde um conjunto massa-mola-amortecedor foi acoplado à superfície de corrida da esteira para representar a força vertical de reação do impacto entre o usuário e a superfície. Para validar esse modelo dinâmico, uma comparação foi feita utilizando uma esteira configurada de forma rígida, e os resultados foram analisados com a metodologia *Root Mean Squared Error* (RMSE) e comparados com experimentos laboratoriais. Com o modelo rígido validado, para que a esteira se comportasse com a mesma rigidez do modelo estático, os materiais adequados foram aplicados novamente para cada componente, permitindo o início da análise paramétrica utilizando uma função matemática obtida a partir da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), que representa a força vertical de reação entre o usuário da esteira e sua superfície de corrida em função de parâmetros (rigidez do

coxim, rigidez do apoio traseiro do chassi e espessura do deck de corrida). Para a elaboração da função, foram utilizados os resultados de quinze modelos de Elementos Finitos, cujas combinações dos parâmetros foram determinadas utilizando a metodologia de Projeto por Experimentação (DOE). Com base na análise realizada por meio de uma regressão de segunda ordem, analisou-se a influência de cada parâmetro na força vertical de reação com o solo (FVRS) e desenvolveu-se um processo de otimização que visa reduzir e prever essa força através da variação da combinação dos parâmetros. Observou-se que, dentro do domínio estabelecido, a rigidez do coxim (entre 45 N/mm e 1000 N/mm) e a rigidez do suporte traseiro (de 500 N/mm a 40000 N/mm) afetam a FVRS de forma quadrática, enquanto a espessura do deck (variando de 19,05 mm a 25,4 mm) exerce uma influência linear. Com a otimização, a FVRS foi reduzida de 1763 N para 1244 N – uma diminuição de 29,4% – evidenciada por um coeficiente de determinação ajustado de $R^2 = 0,990$, o que reforça a eficiência e precisão do modelo.

Palavras-chave: Esteira Ergométrica, Análise Paramétrica, Método dos Elementos Finitos, Análise Dinâmica, DOE, RSM, Otimização.

Mateus, M. P. D. **Parametric analysis, and structural optimization of a damping system used in treadmill using Finite Element models.** Master of Science Dissertation (Master of Science in Mechanical Engineering) – Engineering College of Bauru, Post-graduating Program, São Paulo State University, 2025.

ABSTRACT

With the increasing prevalence of physical exercise, such as walking and running, there has been a growing concern regarding injuries resulting from the impact between the practitioner and the ground. Treadmills, widely utilized for these exercises, are equipped with damping systems that help dissipate the impact of energy. The objective of this study was to perform a parametric analysis and optimization of a treadmill's damping system, aiming to minimize the impact forces during use. To achieve this, a finite element model was developed in two stages. In the first stage, two types of cushions were modeled: one made of natural rubber with a rectangular geometry and another of thermoplastic polyurethane (TPU) with an elliptical geometry. These models were validated through simulations using Ansys Workbench (v.2022 R2, Ansys Inc., USA) and laboratory tests employing Lin's method to analyze force-displacement curves. Following the validation of the cushions, the complete model of the treadmill's damping system was constructed, and the simulation results were further compared with laboratory experiments. After validating the static model, the dynamic model was investigated by coupling a mass-spring-damper system to the treadmill's running surface, representing the vertical reaction force resulting from the impact between the user and the surface. To validate this dynamic model, comparisons were made using a treadmill configured as a rigid system, with the results analyzed by the Root Mean Squared Error (RMSE) methodology and subsequently compared to laboratory experiments. Once the rigid model was validated, appropriate materials were reapplied to each component so that the treadmill would exhibit the same stiffness as the static model, thus enabling the commencement of the parametric analysis. This analysis employed a mathematical function derived from Response Surface Methodology (RSM) that represents the vertical reaction force between the treadmill user and the running surface as a function of parameters—namely, cushion stiffness, chassis rear support stiffness, and running deck thickness. For the development of this function, the results from fifteen finite element models were used, with the parameter combinations

determined through the Design of Experiments (DOE) methodology. Based on the analysis conducted via a second-order regression, the influence of each parameter on the vertical reaction force was assessed, and an optimization process was developed to reduce and predict this force by varying the combination of parameters. It was observed that, within the established domain, cushion stiffness (ranging from 45 N/mm to 1000 N/mm) and rear support stiffness (from 500 N/mm to 40000 N/mm) affect the vertical reaction force in a quadratic manner, while running deck thickness (varying from 19.05 mm to 25.4 mm) exerts a linear influence. Through the optimization process, the vertical reaction force was reduced from 1763 N to 1244 N—a reduction of 29.4%—as evidenced by an adjusted coefficient of determination of $R^2 = 0.990$, thereby reinforcing the efficiency and precision of the model.

Keywords: Treadmill, Dynamic Analysis, Parametric Analysis, Finite Element Method, DOE, RSM, Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama do desenvolvimento do trabalho.	22
Figura 2.1 – Subdivisão do ciclo de corrida.....	24
Figura 2.2 – Comparativo dos tempos de apoio e balanço durante a corrida para o membro inferior ipsilateral (I) e contralateral (C)	24
Figura 2.3 – Forças de reação vertical com o solo. Sendo (a) a taxa de desenvolvimento [LR]; (b) pico de impacto; (c) pico de força ativa e (d) impulso.....	25
Figura 2.4 – Diagrama LPM para simular a FVRS.	27
Figura 2.5 – Diagrama esquemático do (a) Modelo de Zener e (b) Modelo de Zener Adaptado.	28
Figura 2.6 – Diagrama esquemático do MZA.	29
Figura 2.7 – Comparação dos três tipos de modelos centrais compostos.	39
Figura 2.8: Superfícies de restrição em um espaço de projeto hipotético bidimensional.	41
Figura 2.9: Superfícies de função objetivo de um problema hipotético bidimensional	42
Figura 3.1 – (a) Esteira X fabricada pela Movement e Esteira 95T fabricada pela Life Fitness.....	44
Figura 3.2 – Componentes do (a) sistema de amortecimento e (b) chassi.	45
Figura 3.3 – Sistema de amortecimento Esteira X.	45
Figura 3.4 – (a) Coxim da Esteira X e Coxim da esteira 95T	46
Figura 3.5 – Modelo Esteira X. Fonte - Do autor.	46
Figura 3.6 – Discretização da esteira em elementos finitos.	49
Figura 3.7 – Discretização do coxim (a) retangular (b) elíptico.	49
Figura 3.8 – Regiões de contato entre a superfície de corrida-coxim-chassi.	50
Figura 3.9 – Sistema de inclinação da esteira.....	50
Figura 3.10 – Regiões de articulação no eixo Z, vista isométrica.....	51
Figura 3.11 – Regiões de articulação no eixo Z, vista frontal.....	51
Figura 3.12 – Regiões de contrato entre o chassi e o solo.	52
Figura 3.13 – Zona preferencial de impacto.	52
Figura 3.14 – Área de aplicação da carga.....	53
Figura 4.1 – Dispositivo de teste de compressão.....	55
Figura 4.2 - Representação da atuação da carga.	56

Figura 4.3 - Deflexão do coxim retangular em milímetros utilizando o MEF (mm). ..	57
Figura 4.4 - Deflexão do coxim elíptico em milímetros utilizando o MEF (mm).	58
Figura 4.5 – Curva Força em função da Deflexão Experimental do (a) coxim retangular e (b) coxim elíptico.	58
Figura 4.6 – Comparativo da curva Força em função da Deflexão Experimental e Numérico do (a) coxim retangular e (b) coxim elíptico.	58
Figura 4.7 – Curva estatística do (a) coxim retangular e (b) coxim elíptico.	59
Figura 4.8 - Comparativo da curva Força em função da Deflexão Experimental da configuração (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4 do sistema de amortecimento da esteira ergométrica.	61
Figura 4.9 - Comparativo da curva Força em função da Deflexão Experimental e Numérico da configuração (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4 do sistema de amortecimento da esteira ergométrica.	62
Figura 4.10 – Comparação da deflexão do ensaio com a deflexão numérica da configuração (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4 do sistema de amortecimento da esteira ergométrica.	63
Figura 4.11 - Representação do deslocamento total.	64
Figura 5.1 – Sistema de amortecimento da esteira. Fonte - Do autor.	66
Figura 5.2- Sistema NLMZ.	66
Figura 5.3- Massas do sistema proposto com contato tipo MZA.	67
Figura 5.4 – Esteira ergométrica e sistema que descreve a dinâmica da corrida.	67
Figura 5.5 – Acoplamento entre o sistema massa mola e a esteira ergométrica.	70
Figura 5.6 – Condição de contorno do chassi.	71
Figura 5.7 – Aplicação das velocidades e aceleração da gravidade.	71
Figura 5.8 – Comparação entre as respostas de NLM e de MAS para (a) tenis com solado macio e (b) tenis com o solado duro.	72
Figura 5.9 - Comparação do MEF (esteira rígida) em relação ao modelo NLMZ teórico para o (a) solado macio e (b) solado duro.	73
Figura 5.10 - Comparação do MEF (esteira com as propriedades aplicadas) com a resposta do solado duro em relação ao modelo NLMZ teórico para o solado duro em contato com o solo.	74
Figura 6.1 – Representação das variáveis estudadas na análise paramétrica.	76
Figura 6.2 – Representação das variáveis estudadas na análise paramétrica.	80
Figura 6.3 – Correlação para a regressão de primeira ordem.	81

Figura 6.4 – Valores-p dos coeficientes da regressão de primeira ordem.	81
Figura 6.5 – Coeficientes normalizados da regressão de primeira ordem.	82
Figura 6.6 – Representação das variáveis estudadas na análise paramétrica.....	83
Figura 6.7 – Correlação para a regressão de primeira ordem.....	83
Figura 6.8 – Valores-p dos coeficientes da regressão de primeira ordem.	84
Figura 6.9 – Coeficientes normalizados da regressão de primeira ordem.	84
Figura 6.10 – Representação das variáveis estudadas na análise paramétrica.....	85
Figura 6.11 – Correlação para a regressão de primeira ordem.....	86
Figura 6.12 – Valores-p dos coeficientes da regressão de primeira ordem.	86
Figura 6.13 – Coeficientes normalizados da regressão de primeira ordem.	87
Figura 6.14 - Superfície de Resposta em função dos parâmetros de entrada.	89
Figura 6.15 - Influência dos parâmetros analisados sobre a resposta.	89
Figura 7.1 - FVRS em função de cada iteração.	92
Figura 7.2 - Convergência dos parâmetros de entrada.	92
Figura 7.3 - Configuração otimizada que minimiza a resposta.....	93
Figura 7.4 - Plotagem da convergência dos parâmetros de entrada.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:: Codificação de parâmetros do modelo CCF.....	39
Tabela 3.1: Propriedades mecânicas dos materiais isotrópicos do modelo.	47
Tabela 3.2: Propriedades mecânicas dos materiais hiperelásticos do modelo.	47
Tabela 3.3: Elementos utilizados para discretizar o modelo.	48
Tabela 4.1: Configurações de esteiras para validação.....	57
Tabela 4.2: Coeficiente de correlação de concordância dos coxins.....	59
Tabela 4.3: Coeficiente de correlação de concordância dos coxins.....	63
Tabela 5.1: Propriedades mecânicas sistema de Zener.	68
Tabela 5.2: Propriedades mecânicas do solado dos tênis.	68
Tabela 5.3: Fator de amortecimento.	69
Tabela 6.1: Valores mínimos e máximos de cada parâmetro de entrada.	76
Tabela 6.2: Combinações de parâmetros para o desenvolvimento dos modelos de elementos finitos.	77
Tabela 6.3: Resultados obtidos nos quinze Modelos de Elementos Finitos.....	79
Tabela 7.1: Combinação de parâmetros ótimos.....	93

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANOVA: Análise de Variância;
CAD: *Computer Aided Design*;
CCC: *Central Composite Circumscribed*;
CCD: *Central Composite Design*;
CCF: *Central Composite Face Centered*;
CCI: *Central Composite Inscribed*;
DOE: *Design of Experiments*;
FVRS: Força Vertical de Reação com o Solo
GDL: Grau(s) de Liberdade
LPM: *Lumped Parameter Model*
MZA: Modelo de Zener Adaptado
MEF: Modelo de Elementos Finitos
NLM: *Nigg and Liu's Model*
NLMZ: *Nigg and Liu's Model with Adaptated Zener Model*
TPU: Poliuretano Termoplástico

LISTA DE SÍMBOLOS

- c : Coeficiente de amortecimento;
- C_{xx} : Constante material do modelo Mooney-Rivlin;
- E : Módulo de elasticidade;
- f : Função resposta;
- FVRScalc: Força vertical de reação com o solo estimada pelo MEF
- FVRSeSt: Força vertical de reação com o solo estimada pela RSM
- F_{zen} : Força vertical de reação no modelo de Zener;
- $f(X)$: Função objetivo;
- G : Módulo de cisalhamento;
- $g_j(X)$: Restrições de desigualdade;
- I : Invariante do tensor de deformação de Green;
- k : Rigidez da Mola;
- m : massa;
- n : Ordem da equação;
- r : coeficiente de rigidez do coxim
- r_c : coeficiente de rigidez do coxim codificado;
- r_r : coeficiente de rigidez do pé traseiro real;
- R : coeficiente de rigidez do pé traseiro;
- R_c : coeficiente de rigidez do pé traseiro codificado;
- R_r : coeficiente de rigidez do pé traseiro real;
- R^2 : Coeficiente de determinação ajustado;
- t : espessura do deck;
- t_c : espessura do deck codificado;
- t_r : espessura do deck codificado real;
- W : Função energia-deformação;
- α_s : Nível de significância;
- $\beta_j, \beta_{i,j}$: Coeficientes reais;
- ϵ : erro estatístico;
- η : Resposta sem inclusão do erro estatístico;
- λ : multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade;
- λ' : Fator de extensão principal

π : multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade;

μ : parâmetro de barreira;

ν : Coeficiente de Poisson;

ζ : fator de amortecimento.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Objetivos.....	21
1.2	Organização do trabalho	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Biomecânica da corrida e a força vertical de reação com o solo	23
2.2	Modelos matemáticos da força vertical de reação com o solo	26
2.3	Esteiras ergométricas e sistema de amortecimento	30
2.4	Materiais hiperelásticos	31
2.5	Estudo de esteiras ergométricas utilizando o método dos elementos finitos	33
2.6	Metodologia de Superfície de Resposta e Projeto por Experimentação.....	34
2.7	Processo de otimização.....	40
3	CONSTRUÇÃO DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	44
3.1	Componentes do sistema de amortecimento da esteira ergométrica	44
3.2	Modelagem geométrica	46
3.3	Caracterização física do modelo.....	47
3.3.1	Aplicação das propriedades mecânicas	47
3.3.2	Discretização do modelo	47
3.3.3	Condições de contorno	49
3.3.4	Aplicação da carga	52
4	Validação do Modelo de Elementos Finitos	54
4.1	Procedimento de validação do modelo.....	54
4.1.1	Coxins.....	54
4.1.2	Sistema de Amortecimento.....	55
4.2	Resultados e Discussões: Validação do modelo	57
4.2.1	Coxim	57
4.2.2	Esteira Ergométrica	60

5	CONSTRUÇÃO DO MODELO DINÂMICO DE ELEMENTOS FINITOS.....	65
5.1	Componentes do modelo dinâmico da esteira ergométrica.....	65
5.2	Modelagem Geométrica	66
5.3	Caracterização física do modelo.....	68
5.3.1	Aplicação das propriedades mecânicas	68
5.3.2	Discretização do modelo	69
5.3.3	Condições de contorno.....	70
5.3.4	Aplicação das cargas.....	71
5.4	Resultados e Discussões: Análise do modelo de Elementos Finitos.....	72
5.4.1	Procedimento de validação	72
5.4.2	Avaliação da funcionalidade e validação do modelo	73
6	ANÁLISE PARAMÉTRICA	75
6.1	Parâmetros avaliados	75
6.2	Procedimento de execução da análise paramétrica	76
6.3	Resultados dos modelos de Elementos Finitos	79
6.4	Resultados das regressões	80
6.4.1	Regressão de primeira ordem	80
6.4.2	Regressão de primeira ordem com integração.....	82
6.4.3	Regressão de segunda ordem	85
6.5	Resultados e Discussões: Avaliação das regressões.....	87
7	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	90
7.1	O problema de otimização.....	90
7.2	Resultados e Discussões: Processo de otimização.....	92
8	CONCLUSÃO.....	96
	APÊNDICE A	102

1 INTRODUÇÃO

A esteira ergométrica configura-se como um instrumento importante no contexto das atividades físicas, encontrando-se disseminada em espaços como academias, centros de reabilitação e até mesmo no âmbito domiciliar. Este aparelho oferece uma alternativa prática e eficiente para a execução de exercícios aeróbicos em um ambiente controlado, desempenhando um papel fundamental na manutenção da saúde e no incremento da qualidade de vida dos indivíduos.

As práticas de caminhada e corrida em esteiras ergométricas, são caracterizadas por sua complexidade mecânica. Durante a execução dessas atividades, ocorre uma interação dinâmica entre o corpo do usuário e a superfície de corrida da esteira, diretamente ligado ao seu sistema de amortecimento. Tal interação origina um conjunto de forças e impactos que devem ser administrados com o propósito de prevenir possíveis lesões, assegurando, assim, uma prática esportiva segura e eficiente.

Lesões de natureza muscular, articular e decorrentes de impactos são riscos inerentes a essas práticas, podendo ser provocadas por fatores como sobrecarga em áreas específicas do corpo, postura inadequada e a repetição de impactos nas articulações. Logo, a adoção de estratégias para mitigar tais riscos é importante para promover a integridade física dos usuários.

Nesse panorama, o sistema de amortecimento das esteiras assume um papel central na prevenção de lesões, uma vez que possui capacidade de absorver e dissipar uma parcela significativa do impacto resultante da corrida e caminhada. Um sistema de amortecimento eficiente pode atenuar o estresse imposto às articulações, aos músculos e aos ossos, conferindo, portanto, maior segurança e conforto ao exercício.

A complexidade deste sistema está diretamente ligada à dinâmica de impacto e à presença de componentes com propriedades hiperelásticas. É neste contexto que se destaca o Método dos Elementos Finitos (MEF) como uma ferramenta robusta para a análise e otimização deste sistema, proporcionando simulações de alta fidelidade do comportamento estrutural da esteira sob diversas condições operacionais.

O MEF, reconhecido por sua versatilidade, é uma metodologia numérica relevante na engenharia mecânica, que permite avaliar o comportamento mecânico de sistemas complexos, como é o caso dos sistemas de amortecimento em esteiras ergométricas. Porém, a aplicação do MEF não exclui a necessidade de experimentação física, sendo necessária para a validação do modelo computacional para assegurar sua precisão e confiabilidade.

Após a validação do MEF, é possível realizar a sua parametrização e através de técnicas como Superfície de Resposta (RSM) e Design of Experiments (DOE), avaliar a influência que cada componente da esteira ergométrica e assim otimizá-lo, visando a excelência em segurança e conforto dos usuários durante a prática de exercícios na esteira.

1.1 Objetivos

Busca-se neste projeto de pesquisa desenvolver um processo de otimização que minimiza as forças entre o usuário e a superfície de corrida da esteira durante a prática da corrida ou caminhada. Tem-se como objetivo:

- Desenvolver e validar um modelo de Elementos Finitos de dois tipos de coxins utilizados na esteira ergométrica;
- Desenvolver e validar um modelo de Elementos Finitos do sistema de amortecimento completo da esteira;
- Utilizando-se da metodologia de Projeto por Experimentação (DOE), elaborar um modelo paramétrico e uma equação chamada de Superfície de Resposta, para o MEF do sistema de amortecimento;
- Avaliar do comportamento mecânico do sistema de amortecimento da esteira em termos de força vertical de reação com o solo, através da variação de parâmetros predeterminados que dão entrada na função;
- Identificar qual a influência de cada parâmetro na resposta;
- Desenvolver um procedimento mais ágil na estimativa da força de impacto durante a utilização da esteira utilizando a equação da superfície de resposta.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução, contextualização e objetivos;
- Capítulo 2: Fundamentação teórica e revisão bibliográfica abordando estudos importantes sobre a temática;
- Capítulo 3: Construção e validação do modelo estático de Elementos Finitos;
- Capítulo 4: Validação do Modelo de Elementos Finitos;
- Capítulo 5: Construção e validação do modelo dinâmico de Elementos Finitos;
- Capítulo 6: Análise Paramétrica
- Capítulo 7: Otimização Estrutural
- Capítulo 8: Conclusão e Trabalhos Futuros;

Apresenta-se também o diagrama de blocos que descreve as etapas de desenvolvimento deste trabalho na Figura 1.1.

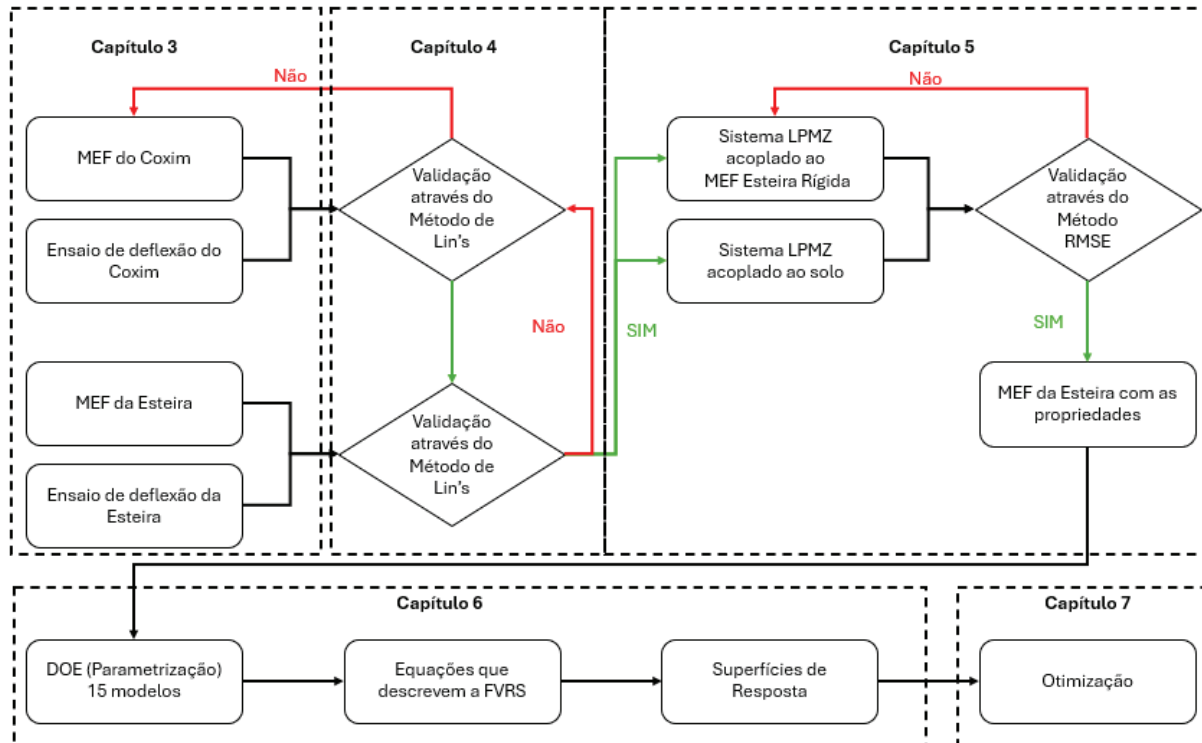


Figura 1.1 – Diagrama do desenvolvimento do trabalho.

Fonte: Do autor.

8 CONCLUSÃO

Realizou-se a validação dos coxins por meio de testes de compressão e modelagem com o Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o método de Lin's para comparação dos resultados, o que demonstrou a relação entre os modelos e os ensaios. Devido à não linearidade geométrica dos materiais hiperelásticos, optou-se pela substituição dos coxins por um sistema massa-mola-amortecedor equivalente, permitindo uma representação simplificada, mas adequada, do comportamento dinâmico do conjunto.

A integração do modelo NLMZ (massa-mola-amortecedor) com o modelo de esteira validado possibilitou a análise transiente do sistema, mantendo a coerência na representação da Força Vertical de Reação do Solo (FVRS), mesmo considerando as simplificações do modelo. Essa abordagem facilitou a comparação entre diferentes configurações de amortecimento, permitindo avaliar os efeitos das modificações dos parâmetros do sistema.

Na análise paramétrica, foram considerados os parâmetros de rigidez do coxim, do pé traseiro e a espessura do deck, o que possibilitou a construção de uma superfície de resposta que relaciona essas variáveis com a FVRS. Observou-se que os valores de FVRS obtidos pelo MEF estão em boa concordância com os previstos por essa função, permitindo a estimativa imediata do comportamento do sistema sem a necessidade de repetir simulações completas e, assim, agilizando o processo de projeto.

A aplicação de sistemas de amortecimento otimizados resultou em uma redução expressiva na Força Vertical de Reação do Solo (FVRS), contribuindo para a mitigação do risco de lesões e apoiando a reabilitação de indivíduos com histórico de problemas musculoesqueléticos. Ressalta-se que a análise foi realizada considerando um usuário com massa de 75 kg; portanto, variações na massa ou na velocidade de corrida inevitavelmente ocasionarão respostas distintas, o que requer ajustes na modelagem da FVRS para que se obtenha uma representação fiel sob diferentes condições operacionais.

Observou-se que, no domínio estudado, os valores de rigidez do coxim e do pé traseiro influenciam a FVRS de forma quadrática, enquanto a espessura do deck exerce influência linear na absorção de energia. Tais relações quantitativas

possibilitam a identificação dos pontos críticos do projeto, permitindo ajustes finos dos parâmetros para maximizar a eficiência do sistema de amortecimento.

O processo de otimização demonstrou que a melhor solução alcançada se aproxima da Configuração 4, que combina os componentes de menor rigidez – notadamente, o coxim elíptico e o pé flexível – proporcionando uma atenuação acentuada da FVRS.

Foram adotadas simplificações, como o emprego de valores de amortecimento de referência para o coxim, chassi e deck, o que impõe uma limitação à representatividade do modelo. Trabalhos futuros deverão incluir a determinação experimental dos coeficientes de amortecimento, o dimensionamento global do chassi considerando resistência, durabilidade e desgaste dos componentes, além da implementação de análises não lineares completas para os materiais hiperelásticos. A aplicação de técnicas de otimização topológica no projeto dos coxins também se apresenta como uma possibilidade para aprimorar a eficiência estrutural e a capacidade de absorção de impacto.

REFERÊNCIAS

ADAMS, V.; ASKENAZI, A. Building Better Products with Finite Element Analysis. Santa Fe, N.M.: OnWord Press, 1999.

AUSTRELL, P. Modeling of elasticity and damping for filled elastomers. 1997.

BACHMANN, H. et al. **Vibration Problems in Structures**. Berlin: Birkhäuser Verlag, 1995.

BIRTANE, Murat; TUNA, Hakan. The evaluation of plantar pressure distribution in obese and non-obese adults. **Clinical Biomechanics**, v. 19, n. 10, p. 1055-1059, 2004.

BLICKHAN, Reinhard. The spring-mass model for running and hopping. **Journal of biomechanics**, v. 22, n. 11-12, p. 1217-1227, 1989.

BUDYNAS, Richard Gordon et al. **Shigley's mechanical engineering design**. New York: McGraw-Hill, 2011.

BUSCARIOLO, M. F.. Validação de modelos CAD utilizando o método dos elementos finitos aplicado a esteiras ergométricas, 2022.

BUSCARIOLO, M. F.; SOUZA, M. P. D.; HERNANDEZ, B. A.; SOUSA, E. A. C.. Validation of treadmills shock absorption systems finite element models, 2023.

CHIU, Hung-Ta; SHIANG, Tzyy-Yuang. Effects of insoles and additional shock absorption foam on the cushioning properties of sport shoes. **Journal of applied biomechanics**, v. 23, n. 2, p. 119-127, 2007.

CLARK, Kenneth P.; RYAN, Laurence J.; WEYAND, Peter G. A general relationship links gait mechanics and running ground reaction forces. **Journal of Experimental Biology**, v. 220, n. 2, p. 247-258, 2017.

COLE, Gerald Kenneth. **Loading of the joints of the lower extremities during the impact phase in running**. 1995.

COSTA, Carlos Alberto et al. Analysis of pressure distribution in the foot using finite elements. **Journal of the Foot & Ankle**, v. 14, n. 2, p. 197-200, 2020.

FUKUCHI, Reginaldo K. et al. Flexibility, muscle strength and running biomechanical adaptations in older runners. **Clinical Biomechanics**, v. 29, n. 3, p. 304-310, 2014.

GILMANOVA, A. M. Computer-aided design systems for product life cycle stages. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2020. p. 012205.

GOVINDJEE, Sanjay; SIMO, Juan C. Mullins' effect and the strain amplitude dependence of the storage modulus. **International journal of solids and structures**, v. 29, n. 14-15, p. 1737-1751, 1992.

Gupta SD, Rajamohan V. Segment optimization of a rotating multilayer sandwich beam. **Journal of Sandwich Structures & Materials**. 2014;16(2):148-172.

HÅKANSSON, P. A. U. L. et al. Finite Element Modeling of a Rubber Block Exposed to Shock Loading. **Report TFHF-5087, Lund University, Department of Mechanics and Materials, Sweden**, v. 83, 2000.

HIGGINSON, Brian K. Methods of running gait analysis. **Current sports medicine reports**, v. 8, n. 3, p. 136-141, 2009.

International Organization for Standardization. ISO 20957-6:2021, Stationary training equipment – Part 6: Treadmills, additional specific safety requirements and test methods. Geneva: ISO, 2021.

ÍÑIGUEZ-MACEDO, Saúl et al. Finite element model updating combined with multi-response optimization for hyper-elastic materials characterization. **Materials**, v. 12, n. 7, p. 1019, 2019.

JOHNSON, Caleb D. et al. Impact-related ground reaction forces are more strongly associated with some running injuries than others. **The American journal of sports medicine**, v. 48, n. 12, p. 3072-3080, 2020.

KARTHIKEYAN, R. et al. Finite element analysis of elastomer used in automotive suspension systems. **Journal of Elastomers & Plastics**, v. 52, n. 6, p. 521-536, 2020.

KLUITENBERG, Bas et al. Comparison of vertical ground reaction forces during overground and treadmill running. A validation study. **BMC musculoskeletal disorders**, v. 13, p. 1-8, 2012.

KHURI, A. I.; MUKHOPADHYAY, S. Response surface methodology. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 2, n. 2, p. 128–149, 2010

Life Fitness. Esteira 95T. Disponível em: [<https://www.garagegymreviews.com/life-fitness-95t-inspire-review>]. Acesso em: 7 de abril de 2024.

LUO, Zhen et al. Changes in ground reaction forces, joint mechanics, and stiffness during treadmill running to fatigue. **Applied Sciences**, v. 9, n. 24, p. 5493, 2019.

MAKEITFROM. Data Sheet MakeltFrom, [s.d]. Disponível em <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Medium-Density-Fiberboard-MDF>

MATWEB. Data Sheet. MatWeb, [s.d]. Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9c95ae90f034430ca9c1461deb1cc1bb>>. Acesso em: 5 mar. 2021 às 19h.

McBRIDE, G. B. A proposal for strength-of-agreement criteria for Lin's concordance correlation. **National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd.**, 2005.

Movement. Esteira X. Disponível em: [<https://www.movement.com.br/produto/esteira-x-4-6-i/>]. Acesso em: 7 de abril de 2024.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COCK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design of Experiments**. 4. ed. New York, USA: Wiley, 2016.

NIGG, Benno M.; LIU, Wen. The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running. **Journal of biomechanics**, v. 32, n. 8, p. 849-856, 1999.

NIKOOYAN, Ali Asadi; ZADPOOR, Amir Abbas. Mass–spring–damper modelling of the human body to study running and hopping—an overview. **Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part H: Journal of engineering in medicine**, v. 225, n. 12, p. 1121-1135, 2011.

NIST/SEMATECH. **e-Handbook of Statistical Methods**. Disponível em: <<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>.

NOVACHEK, Tom F. The biomechanics of running. **Gait & posture**, v. 7, n. 1, p. 77-95, 1998.

QIAN, Zhihui et al. A dynamic finite element analysis of human foot complex in the sagittal plane during level walking. **Plos one**, v. 8, n. 11, p. e79424, 2013.

RAO, S. S. **Engineering optimization: Theory and practice**. 2009.

RIEMANN, Bryan L. et al. Effect of ankle taping and bracing on vertical ground reaction forces during drop landings before and after treadmill jogging. **Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy**, v. 32, n. 12, p. 628-635, 2002.

RILEY, Patrick O. et al. A kinematics and kinetic comparison of overground and treadmill running. **Medicine and science in sports and exercise**, v. 40, n. 6, p. 1093, 2008.

SOUZA, M. P. D.; HERNANDEZ, B. A.; LOUZADA JR., M. A.; SAITO, L. P.; SOUSA, E. A. C. Nonlinear finite element analysis and structural validation of shock absorbers used on treadmills, 2021.

Vibra-Stop. Linha Micro. Referência II. Disponível em: [<https://www.vibra-stop.com.br/produto/linha-micro>]. Acesso em: 7 de abril de 2024.

WHITTLE, Michael W. **Gait analysis: an introduction**. Butterworth-Heinemann, 2014.

YEOH, Oon H. Characterization of elastic properties of carbon-black-filled rubber vulcanizates. **Rubber chemistry and technology**, v. 63, n. 5, p. 792-805, 1990.

ZANETTI, Lucas Rhea. Lumped parameter and modal models to simulate ground reaction forces due to running. 2021.

ZENER, Clarence M.; SIEGEL, Sidney. Elasticity and Anelasticity of Metals. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 53, n. 9, p. 1468-1468, 1948.

APÊNDICE A

A fim de assegurar a qualidade dos resultados, calibrou-se a célula de carga conforme utilizada nos ensaios conforme as tabelas abaixo.

Tabela A: Tabelas de calibração da célula de carga de 10000 kgf.

Escala: 1(100%) - Primeira calibração.

Tipo de esforço: Tração

Célula de Carga em uso: 1

Faixa nominal da escala: 10000 kgf Valor de uma divisão: 5 kgf

F_i kgf	M. M. (VC) kgf (N)	q %	b %	a %	U kgf (N)	U %	k	V_{eff}
0	0,0	---	---	---	---	---	---	---
2000	1997,0 (19580)	0,15	0,07	0,25	6,0 (59)	0,30	2,00	Infinito
4000	3997,7 (39200)	0,06	0,01	0,13	5,9 (58)	0,15	2,00	Infinito
6000	5998,6 (58830)	0,02	0,04	0,08	6,3 (62)	0,11	2,00	Infinito
8000	7998,8 (78440)	0,01	0,01	0,06	8,0 (78)	0,10	2,00	Infinito
10000	9998 (98040)	0,02	0,01	0,05	10 (98)	0,10	2,00	Infinito
fo(%)	1a. Série = 0	2a. Série = 0	3a. Série = 0					

Escala: 2(50%) - Primeira calibração.

Tipo de esforço: Tração

Célula de Carga em uso: 1

Faixa nominal da escala: 5000,0 kgf Valor de uma divisão: 2,5 kgf

F_i kgf	M. M. (VC) kgf (N)	q %	b %	a %	U kgf (N)	U %	k	V_{eff}
0,0	0,0	---	---	---	---	---	---	---
1000,0	999,2 (9800)	0,08	0,20	0,25	3,3 (32)	0,33	2,03	76
2000,0	1999,2 (19610)	0,04	0,05	0,13	3,3 (32)	0,17	2,00	Infinito
3000,0	2998,9 (29410)	0,04	0,09	0,08	3,5 (34)	0,12	2,06	45
4000,0	3998,7 (39210)	0,03	0,03	0,06	4,0 (39)	0,10	2,00	Infinito
5000,0	4999,4 (49030)	0,01	0,02	0,05	5,0 (49)	0,10	2,00	Infinito
fo(%)	1a. Série = 0	2a. Série = 0	3a. Série = 0					

Escala: 3(20%) - Primeira calibração.

Tipo de esforço: Tração

Célula de Carga em uso: 1

Faixa nominal da escala: 2000 kgf Valor de uma divisão: 1 kgf

F_i kgf	M. M. (VC) kgf (N)	q %	b %	a %	U kgf (N)	U %	k	V_{eff}
0	0,0	---	---	---	---	---	---	---
400	399,9 (3920)	0,04	0,25	0,25	1,4 (14)	0,35	2,06	43
800	799,8 (7840)	0,03	0,09	0,13	1,3 (13)	0,16	2,01	207
1200	1200,2 (11770)	-0,02	0,05	0,08	1,9 (19)	0,16	2,00	Infinito
1600	1600,3 (15690)	-0,01	0,03	0,06	1,9 (18)	0,12	2,00	Infinito
2000	2001,1 (19620)	-0,06	0,03	0,05	2,0 (20)	0,10	2,00	Infinito
fo(%)	1a. Série = 0	2a. Série = 0	3a. Série = 0					

Escala: 4(10%) - Primeira calibração.

Tipo de esforço: Tração

Célula de Carga em uso: 1

Faixa nominal da escala: 1000,0 kgf Valor de uma divisão: 0,5 kgf

F_i kgf	M. M. (VC) kgf (N)	q %	b %	a %	U kgf (N)	U %	k	V_{eff}
0,0	0,00	---	---	---	---	---	---	---
200,0	199,85 (1959,9)	0,08	0,00	0,25	0,61 (6,0)	0,31	2,00	Infinito
400,0	399,55 (3918,2)	0,11	0,05	0,13	0,70 (6,8)	0,18	2,00	Infinito
600,0	599,10 (5875,2)	0,15	0,08	0,08	0,86 (8,4)	0,14	2,02	146
800,0	799,15 (7837,0)	0,11	0,01	0,06	0,80 (7,8)	0,10	2,00	Infinito
1000,0	999,9 (9810)	0,01	0,10	0,05	1,1 (11)	0,11	2,15	18
fo(%)	1a. Série = 0	2a. Série = 0	3a. Série = 0					