



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

EPI para Motociclistas: Design Parametrizado e Fabricação por Manufatura Aditiva

Autor: Allecsander Lélis Silva
Orientador: Professor Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos
Júnior

Brasília, DF
2023



Allecsander Lélis Silva

EPI para Motociclistas: Design Parametrizado e Fabricação por Manufatura Aditiva

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Professor Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior

Coorientador: Professor Dr. Mateus Rodrigues Miranda

Brasília, DF

2023

Allecsander Lélis Silva

EPI para Motociclistas: Design Parametrizado e Fabricação por Manufatura Aditiva/ Allecsander Lélis Silva. – Brasília, DF, 2023-

153 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Professor Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. EPI para motociclistas. 2. Manufatura aditiva. I. Professor Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. EPI para Motociclistas: Design Parametrizado e Fabricação por Manufatura Aditiva

CDU LS586e

Allecsander Lélis Silva

EPI para Motociclistas: Design Parametrizado e Fabricação por Manufatura Aditiva

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 19 de Dezembro de 2023:

**Professor Dr. Manuel Nascimento
Dias Barcelos Júnior**
Orientador

**Professor Dr. Emmanuel Pacheco
Rocha Lima**
Convidado 1

**Professor Dr. Sérgio Henrique da
Silva Carneiro**
Convidado 2

Brasília, DF
2023

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que, durante minha vida, apoiaram meus sonhos e ambições de criar algo capaz de transformar o mundo.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho, tornando este percurso acadêmico ainda mais significativo.

Aos meus pais, Vilma e Ailton, agradeço por serem a base sólida que sustentou e alimentou todos os meus sonhos. O apoio incondicional, amor e orientação foram a luz que me guiou em todos os momentos.

À minha namorada, Laura Milena, expresso minha profunda gratidão pela compreensão, paciência, incentivo e amor constante. Sua parceria e seu companheirismo foram fundamentais para superar os desafios, e sua presença trouxe equilíbrio e alegria aos dias mais intensos.

Ao meu irmão e à minha cunhada, Allancaster e Taciana, agradeço pelo apoio, parceria e por sempre estarem presentes nos momentos desafiadores. Suas palavras de estímulo e apoio foram um combustível essencial para minha jornada.

Aos pais da minha namorada, Rejany e Magno, agradeço por prover um ambiente confortável, de apoio e carinho nessa longa caminhada.

A todos os meus amigos e colegas que passaram por minha vida nesse ciclo, compartilhando risos, desafios e momentos inesquecíveis, agradeço por serem a rede de apoio que transformou os obstáculos em oportunidades de crescimento.

Aos professores e demais profissionais que tornaram essa graduação possível, despendendo de horas e esforço para permitir a propagação de contínua de conhecimento, agradeço pela oportunidade que me foi concedida. Em especial aos meus orientadores Manuel Barcelos e Mateus Miranda.

Aos demais familiares, amigos e pessoas que fazem parte da minha vida e que, de alguma forma, contribuíram para eu chegar até aqui, agradeço imensamente.

Cada um de vocês desempenhou um papel vital na minha jornada acadêmica, e por isso, expresso minha sincera gratidão. Este trabalho não seria possível sem o suporte e a inspiração que recebi de todos vocês.

“A simplicidade é o mais alto grau de sofisticação” (Leonardo da Vinci)

Resumo

Os Equipamentos de Proteção Individual (EPI), em tese, têm como objetivo reduzir a gravidade de ferimentos em decorrência de acidentes. No caso de motociclistas, esses acidentes variam entre pancadas por quedas, colisões e ralados do corpo em alta velocidade sobre o asfalto. Dessa maneira, os EPI devem ser projetados de forma a proteger os motociclistas com mais eficiência, sem tirar a sua mobilidade e, também, sem prejudicar o conforto de seus usuários. Assim, este trabalho propõe avaliar, de forma numérica e experimental, protetores para motociclistas feitos por manufatura aditiva (impressão 3D), incluindo a seleção de materiais e um projeto com dimensões parametrizadas, ou seja, que possam variar de forma a se adaptar às medidas corporais de diversos usuários. Essa modularidade das dimensões permite um aumento da proteção e do conforto na utilização desses equipamentos. Teve-se como objetivo o desenvolvimento de protótipos ergonômicos, confortáveis e eficientes quanto à redução da magnitude das tensões transmitidas para o corpo. O projeto avalia, ainda, a eficácia do emprego de materiais compósitos (fibra carbono com matriz de epóxi) ao modelo obtido por impressão 3D para o aumento da eficácia da proteção de seu usuário. Sendo assim, foi conduzido um estudo da resistência mecânica e transmissão de esforços desses protótipos através de simulações numéricas pelo método dos elementos finitos (MEF), além de propor uma forma de avaliar esse resultados através do ensaio de flexão de três pontos. Todo esse desenvolvimento visa demonstrar uma metodologia para o projeto desses equipamentos com um design parametrizado, fabricação e teste de estruturas de EPI aplicando técnicas de impressão 3D e de laminação para satisfazer requisitos de proteção, usabilidade e segurança para motociclistas. As características dos modelos são inspiradas em soluções existentes no mercado, e sua modelagem é realizada por meio de CAD. Referências especializadas são utilizadas para a obtenção das propriedades dos materiais a serem empregados, das estruturas do corpo humano e dos esforços esperados em diferentes tipos de acidentes motociclísticos, de modo a estimar corretamente os parâmetros de análise que os modelos numéricos e experimentais serão submetidos. Isto posto, o estudo desenvolvido nesse trabalho e os resultados alcançados têm como objetivo gerar conhecimento para aprimorar o projeto de EPI eficazes, seguros, confortáveis e viáveis, utilizando métodos não-convencionais de fabricação.

Palavras-chaves: Equipamento de Proteção Individual (EPI), Equipamentos para motociclistas, *Design* parametrizado, Manufatura Aditiva.

Abstract

Personal Protective Equipment (PPE) generally aims to reduce the severity of injuries resulted from accidents. In the case of motorcyclists, these accidents range from falls and collisions. Therefore, PPE should be designed to protect motorcyclists more efficiently, without compromising their mobility or comfort. This work proposes to numerically and experimentally evaluate motorcycle protection gears made by additive manufacturing (3D printing), including material selection and a project with parametric dimensions, meaning that dimensions can be changed to adapt to different types of body measurements. This modularity of dimensions allows for an increased protection and comfort in the use of these equipments. The objective of this study is to develop prototypes that are ergonomic, comfortable, and effective in reducing the magnitude of stresses transmitted to the body in motorcycle accidents. The project also evaluates the effectiveness of using composite materials (carbon fiber with an epoxy matrix) aggregated to the 3D printed model to increase the effectiveness of protection of the user. Thus, a study of the mechanical resistance and transmission of forces of these prototypes was conducted through numerical simulations using the finite element method (FEM), as well a proposed methodology to validate numerical results through experiments in a three-points bending test with models. All of this development aims to demonstrate a methodology for designing parametric parts, manufacturing, and testing PPE structures using 3D printing and lamination techniques to reach the protection, usability, and safety requirements for motorcyclists. The models characteristics are inspired by existing solutions on the market, and their modeling is made with support of CAD softwares. Specialized references are used to obtain the properties of the materials used in the prototype, the structures properties of the human body, and the expected stresses in different types of motorcycle accidents, in order to correctly estimate the analysis parameters of the numerical and experimental models. Therefore, the study developed in this work and the results achieved aim to generate knowledge to improve the design of effective, safe, comfortable, and viable PPE using unconventional manufacturing methods.

Key-words: Personal Protective Equipment (PPE), motorcycle gear, parametric design, Additive Manufacturing.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Equipamentos de proteção para motociclistas – Fonte: (2E4RODAS, 2021)	24
Figura 2 – Processo de manufatura aditiva – Fonte: (MECALUX, 2021)	26
Figura 3 – Traje de proteção do MotoGP em ação durante acidente – Fonte: (MCLAREN, 2022)	36
Figura 4 – Certificado de proteção CE – Adaptado de: (RACERED, 2020)	38
Figura 5 – Algumas variações de tipos e formatos corporais humanos – Fonte: (HURREN; VARNSEY; ROME, 2022)	40
Figura 6 – Tipo de medidas corporais que podem ser extraídas de um escaneamento corporal – Adaptado de: (SMITH et al., 2019)	42
Figura 7 – Formas de medir braços e pernas de pessoas – Fonte: autor	43
Figura 8 – Visualização gráfica da distribuição de dimensões considerando percentis – Fonte: autor	44
Figura 9 – Esquemático do método de extrusão: 1 - polímero sólido, 2 - funil, 3 - barril, 4 - fuso, 5 - aquecedores, 6 - matriz, 7 - peça extrudada – Adaptado de: (WILCZYŃSKI et al., 2019)	47
Figura 10 – Esquemático de uma moldagem por compressão – Adaptado de: (GOODSHIP, 2017)	48
Figura 11 – Esquemático de uma moldagem por transferência – Adaptado de: (GOODSHIP, 2017)	48
Figura 12 – Esquemático de uma moldagem por injeção – Adaptado de: (GOODSHIP, 2017)	49
Figura 13 – Esquemático de uma moldagem por sopro – Adaptado de: (GOODSHIP, 2017)	49
Figura 14 – Esquemático de criação de uma peça por Manufatura Aditiva	50
Figura 15 – Esquemático de fabricação por FDM – Fonte: autor	53
Figura 16 – Vazios em peças impressas por FDM – Adaptado de: (REHMANI; JAYWANT; ARIF, 2020)	54
Figura 17 – Impressora Creality CR-30 – Fonte: (3DLAB, 2021)	54
Figura 18 – Esquemático da manufatura por SLS – Adaptado de: (CHEN et al., 2017)	55
Figura 19 – Esquemático da manufatura por SLA – Adaptado de: (NEGI; DHIMAN; SHARMA, 2014)	55
Figura 20 – Esquemático da manufatura por BJ – Adaptado de: (ZIAEE; CRANE, 2019)	56

Figura 21 – Diagrama do processo de criação de uma peça por Manufatura Aditiva – Fonte: autor	57
Figura 22 – Esquemático do reforço de peça impresso por FDM utilizando material compósito – Fonte: autor	60
Figura 23 – Molde para fabricação de capacetes motociclísticos – Fonte: (MOLD, 2014)	61
Figura 24 – Capacete impresso em 3D da empresa Hexr – Adaptado de: (HEXR, 2020)	62
Figura 25 – Figura 2D com dimensões parametrizadas e restrições definidas – Fonte: autor	64
Figura 26 – Ferramenta <i>Knowledge</i> no espaço de trabalho do CATIA – Fonte: autor	64
Figura 27 – Tipos de elementos mais comuns em análises estruturais do ANSYS – Adaptado de: (DUFOUR, 2003)	66
Figura 28 – Diferença entre elementos de primeira ordem (à esquerda) e de segunda ordem (à direita) – Adaptado de: (DUFOUR, 2003)	66
Figura 29 – Referência de malha bem estruturada para simulações estruturais estáticas – Adaptado de: (GOUASMI et al., 2015)	69
Figura 30 – Métrica do ANSYS para qualidade da malha – Fonte: (ANSYS, 2015) .	70
Figura 31 – Força estática \mathbf{P} que aproxima os efeitos decorrentes da colisão de um objeto \mathbf{W} em queda – Fonte: (AKIN, 2019)	72
Figura 32 – Exemplo de protetor de perna para motociclistas – Fonte: (TRADEINN, 2023)	76
Figura 33 – Exemplo de protetor de braço para motociclistas – Fonte: (MXPARTS, 2023)	77
Figura 34 – Protótipo base do conjunto protetor de braço para motociclistas – Fonte: (ARAUJO, 2023)	78
Figura 35 – Protótipo base do conjunto protetor de perna para motociclistas – Fonte: (ARAUJO, 2023)	78
Figura 36 – Fluxo de modelagem do protetor de perna – Fonte: autor	80
Figura 37 – Fluxo de modelagem do protetor de braço – Fonte: autor	81
Figura 38 – Modelos finais dos protetores - a) Protetor de perna b) Protetor de braço – Fonte: autor	82
Figura 39 – <i>Scanner</i> 3D passível de ser utilizado acoplado a um <i>tablet</i> - Modelo iSense™ 3D Scanner – Fonte: (3DSYSTEMS, 2014)	83
Figura 40 – Dummies usando protetores adaptados as suas dimensões - a) Percentil 5 feminino b) Percentil 50 masculino c) Percentil 95 masculino – Fonte: autor	84
Figura 41 – Tamanho dos EPI adaptados para cada percentil – Fonte: autor	85

Figura 42 – Impressora CR-30 da Creality realizando a impressão de um protótipo de protetor – Fonte: autor	86
Figura 43 – Parâmetros de impressão – Fonte: autor	86
Figura 44 – Protótipos fatiados (tamanho médio) – Fonte: autor	87
Figura 45 – Protótipos impressos (pequeno) – Fonte: autor	88
Figura 46 – Protótipos impressos (médio) – Fonte: autor	88
Figura 47 – Protótipos impressos (grande) – Fonte: autor	88
Figura 48 – Ensaio de flexão 3 pontos de painel sanduíche – Adaptado de: (CARVALHO, 2019)	90
Figura 49 – Protetores integrados a modelos corporais – Fonte: autor	90
Figura 50 – Fluxo de simulação adotado para a análise dos EPI – Fonte: autor	93
Figura 51 – Condições de contorno e carregamento do Cenário Experimental - a) protetor de perna b) protetor de braço – Fonte: autor	94
Figura 52 – Alteração na geometria dos equipamentos para a simulação do Cenário Experimental - a) protetor de perna b) protetor de braço – Fonte: autor	95
Figura 53 – Condições de contorno e carregamento do Cenário Real 1 – a) protetor de perna b) protetor de braço – Fonte: autor	95
Figura 54 – Condições de contorno e carregamento do Cenário Real 2 – a) protetor de perna b) protetor de braço – Fonte: autor	96
Figura 55 – Qualidade da malha do protetor de perna e modelo de membro – Fonte: autor	97
Figura 56 – Qualidade da malha do protetor de braço e modelo de membro – Fonte: autor	97
Figura 57 – Esquemático de aplicação de forças - a) no ensaio de flexão 3 pontos - e b) no ensaio de flexão 4 pontos – Adaptado de: (ASTM, 2016)	99
Figura 58 – Máquina de ensaio de flexão Universal Instron 8801 – Fonte: autor	100
Figura 59 – Forças que geram tensões de escoamento e ruptura para o protetor feito de cada um dos materiais – Fonte: autor	104
Figura 60 – Forças que geram tensões de escoamento e ruptura para o protetor com cada uma das espessuras – Fonte: autor	106
Figura 61 – Comparativo do EPI com reforço em relação a mudança de espessura – Fonte: autor	107
Figura 62 – Tensões resultantes da força de - a) 2100 N – b) 2500 N para o protetor de perna – Fonte: autor	109
Figura 63 – Tensões no protetor de perna para uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 – Fonte: autor	111
Figura 64 – Gráfico das tensões no modelo de membro corporal de perna com e sem protetor para o Cenário Real 1 – Fonte: autor	111

Figura 65 – Comparativo do modelo de membro corporal sob uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 – a) Com EPI – b) Sem EPI – Fonte: autor	112
Figura 66 – Gráfico das tensões no modelo de membro corporal de perna com e sem protetor para o Cenário Real 2 – Fonte: autor	114
Figura 67 – Tensões no protetor de perna para uma força de 8.681 N (pressão de 2,55 MPa) para o Cenário Real 2 – Fonte: autor	115
Figura 68 – Comparativo do modelo de membro corporal de perna uma força de 8.681 N (pressão de 2,55 MPa) para o Cenário Real 2 – a) Com EPI – b) Sem EPI – Fonte: autor	115
Figura 69 – Tensões resultantes da força de – a) 470 N – b) 570 N para o protetor de braço – Fonte: autor	116
Figura 70 – Tensões no protetor de braço para uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 – Fonte: autor	118
Figura 71 – Gráfico das tensões no modelo de membro corporal de braço com e sem protetor para o Cenário Real 1 – Fonte: autor	118
Figura 72 – Comparativo do modelo de membro corporal de braço sob uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 – a) Com EPI – b) Sem EPI – Fonte: autor	119
Figura 73 – Gráfico das tensões no modelo de membro corporal de braço com e sem protetor para o Cenário Real 2 – Fonte: autor	121
Figura 74 – Tensões no protetor de braço para uma força de 8.681 N (pressão de 1,08 MPa) para o Cenário Real 2 – Fonte: autor	121
Figura 75 – Comparativo do modelo de membro corporal de braço para uma força de 8.681 N (pressão de 1,08 MPa) para o Cenário Real 2 – a) Com EPI – b) Sem EPI – Fonte: autor	122
Figura 76 – Tensões resultantes da força de - a) 530 N - b) 600 N – Fonte: autor	140
Figura 77 – Tensões no protetor de perna de referência para uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 – Fonte: autor	142
Figura 78 – Comparativo do modelo de membro corporal sob uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 - a) Com EPI - b) Sem EPI – Fonte: autor	142
Figura 79 – Tensões no protetor de perna para um força de 8.681 N para o Cenário Real 2 – Fonte: autor	144
Figura 80 – Comparativo do modelo de membro corporal uma pressão de 181.994 Pa para o Cenário Real 2 - a) Com EPI - b) Sem EPI – Fonte: autor	145
Figura 81 – Ilustração de astronautas em marte – Fonte: (NASA, 2020)	147
Figura 82 – Tabela para predição de aspectos financeiros da fabricação dos EPI por Manufatura Aditiva – Fonte: autor	148

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades caracterizadas dos materiais impressos – Adaptado de: (SILVA, 2018)	58
Tabela 2 – Propriedades de impressão dos materiais – Adaptado de: (3DLAB, 2017)	58
Tabela 3 – Propriedades do EVA – Adaptado de: (QUEIROZ et al., 2014)	59
Tabela 4 – Propriedades caracterizadas de uma estrutura Carbono-Epóxi – Adaptado de: (DATA), 2008)	60
Tabela 5 – Características dos protótipos indicadas pelo software	87
Tabela 6 – Espessura dos protótipos fabricados	88
Tabela 7 – Condições de carregamento consideradas	92
Tabela 8 – Quantidade de nós e de elementos por objeto de análise do protetor de perna	97
Tabela 9 – Quantidade de nós e de elementos por objeto de análise do protetor de braço	98
Tabela 10 – Forças e tensões de escoamento e ruptura referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1	103
Tabela 11 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1	104
Tabela 12 – Dados mecânicos numéricos referentes ao modelo corporal da perna no Cenário Real 1	104
Tabela 13 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1 – Espessura: 2 <i>mm</i>	105
Tabela 14 – Dados mecânicos numéricos referentes ao modelo corporal da perna no Cenário Real 1 – Espessura: 2 <i>mm</i>	105
Tabela 15 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1 – Espessura: 4 <i>mm</i>	106
Tabela 16 – Dados mecânicos numéricos referentes ao modelo corporal da perna no Cenário Real 1 – Espessura: 4 <i>mm</i>	106
Tabela 17 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1 – Com reforço	107
Tabela 18 – Dados mecânicos numéricos referentes ao modelo corporal da perna no Cenário Real 1 – Com reforço	107
Tabela 19 – Forças para cada uma das condições de carregamento	108
Tabela 20 – Dados mecânicos numéricos do núcleo impresso do protetor de perna – Cenário Experimental	109
Tabela 21 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1	110

Tabela 22 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 1 com a presença do protetor de perna	110
Tabela 23 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 1 com a ausência do protetor de perna	110
Tabela 24 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal com e sem protetor para o Cenário Real 1	111
Tabela 25 – Pressão equivalente para cada força no protetor de perna	113
Tabela 26 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 2	113
Tabela 27 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a presença do protetor de perna	113
Tabela 28 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a ausência do protetor de perna	113
Tabela 29 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal com e sem protetor de perna para o Cenário Real 2	114
Tabela 30 – Dados mecânicos numéricos do núcleo impresso do protetor de braço – Cenário Experimental	116
Tabela 31 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de braço no Cenário Real 1	117
Tabela 32 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 1 com a presença do protetor de braço	117
Tabela 33 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 1 com a ausência do protetor de braço	117
Tabela 34 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal com e sem protetor de braço para o Cenário Real 1	118
Tabela 35 – Pressão equivalente para cada força no protetor de braço	119
Tabela 36 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de braço no Cenário Real 2	120
Tabela 37 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a presença do protetor de braço	120
Tabela 38 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a ausência do protetor de braço	120
Tabela 39 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal com e sem protetor de braço para o Cenário Real 2	120
Tabela 40 – Dados mecânicos numéricos referentes ao Cenário Experimental do protetor de perna de referência	140
Tabela 41 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna de referência no Cenário Real 1	141

Tabela 42 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal de referência no Cenário Real 1 com a presença do protetor de perna	141
Tabela 43 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal de referência no Cenário Real 1 com a ausência do protetor de perna	141
Tabela 44 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal de referência com e sem protetor para o Cenário Real 1	142
Tabela 45 – Pressão equivalente para cada força	143
Tabela 46 – Dados mecânicos numéricos referentes à caneleira no Cenário Real 2 . .	143
Tabela 47 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a presença do protetor de perna	143
Tabela 48 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a ausência do protetor de perna	144
Tabela 49 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal com e sem protetor para o Cenário Real 2	144

Lista de abreviaturas e siglas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CE	<i>Conformité Européenne</i> (Francês para Conformidade Europeia)
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
Dp	Desvio padrão
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
HH	Hora Homem
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade
MEF	Método dos Elementos Finitos
OMS	Organização Mundial da Saúde
OPAS	Organização Pan-Americana de Saúde
PC	Polycarbonato
PETG	Polietileno Glicol
PLA	Ácido Polilático
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
TPU	Poliuretano Termoplástico
UnB	Universidade de Brasília
WHO	<i>World Health Organization</i>

Lista de símbolos

T_i	Temperatura de impressão
T_m	Temperatura da mesa de impressão
V_i	Velocidade de impressão
E	Módulo de elasticidade
σ_e	Tensão de escoamento
σ_r	Tensão de ruptura
ρ	Densidade volumétrica
ν	Coefficiente de Poisson
n	Fator de Impacto
h	Altura;
η	Eficiência da colisão;
$\delta_{estático}$	Deflexão do corpo devido a uma força estática
v	Velocidade.
F_{media}	Força média de impacto
x, y e z	Eixos do espaço cartesiano
AR	Razão de Aspecto
r	Raio
VR	Razão de volume
V	Volume
S	Simetria
V_{ideal}	Volume ideal
$V_{célula}$	Volume da célula
ϵ	Deformação adimensional

σ	Tensão
σ_{vN}	Tensão de von Mises
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais da estrutura
F_s	Fator de segurança
max	Valor máximo
min	Valor mínimo
F_{ci}	Força da condição de carregamento i (i = 1, 2, 3 e 4)
σ_{max}	Tensão máxima
σ_{min}	Tensão mínima
ϵ_{max}	Deformação máxima
ϵ_{min}	Deformação mínima
$\sigma_{comprotetor}$	Tensão máxima com o protetor
$\sigma_{semprotetor}$	Tensão máxima sem o protetor
F_{ce}	Força de escoamento
F_{cr}	Força de ruptura
Δ_{max}	Deslocamento máximo
A	Área da superfície do EPI

Sumário

I	INTRODUÇÃO	23
1	INTRODUÇÃO	24
1.1	Contextualização	24
1.2	Motivação	26
1.3	Objetivos	27
1.3.1	Objetivo Geral	27
1.3.2	Objetivos Específicos	27
1.3.3	Resultados Esperados	28
1.4	Organização dos Capítulos	28
II	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2	SEGURANÇA NO TRÂNSITO E UTILIZAÇÃO DOS EPI	30
2.1	Considerações iniciais	30
2.2	Normas e recomendações de uso de EPI por motociclistas	30
2.2.1	Normas e recomendações no Brasil	30
2.2.2	Normas e recomendações no resto do mundo	32
2.3	Estatísticas sobre acidentes	33
2.3.1	Estatísticas de acidentes No Brasil	33
2.3.2	Estatísticas de acidentes no resto do mundo	34
2.4	Acidentes motociclísticos	34
2.5	Eficiência de proteção	35
2.6	Certificação da proteção	37
2.6.1	Certificação no Brasil	37
2.6.2	Certificação no resto do mundo	38
3	ANÁLISE CORPORAL HUMANA	39
3.1	Biotipos	39
3.2	Ergonomia	40
3.3	Conforto	40
3.3.1	Conforto de usabilidade	41
3.3.2	Conforto térmico	41
3.4	Dimensões do corpo	42
3.4.1	Aquisição de dimensões corporais	42
3.4.2	Percentis	43

3.5	Propriedades do corpo humano	44
4	MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS POLIMÉRICAS	46
4.1	Métodos tradicionais	46
4.1.1	Moldagem por extrusão	47
4.1.2	Moldagem por compressão	48
4.1.3	Moldagem por transferência	48
4.1.4	Moldagem por injeção	49
4.1.5	Moldagem por sopro	49
4.2	Fabricação por Manufatura Aditiva	50
4.2.1	Vantagens da Manufatura Aditiva	50
4.2.2	Desvantagens da Manufatura Aditiva	51
4.2.3	Tipos de Manufatura Aditiva polimérica	52
4.2.3.1	Modelagem por Deposição Fundida	52
4.2.3.2	Sinterização a Laser Seletiva	55
4.2.3.3	Estereolitografia	55
4.2.3.4	<i>Binder Jetting</i>	56
4.2.4	Etapas da fabricação por Manufatura Aditiva	56
4.2.5	Materiais de impressão	57
4.2.6	Reforço estrutural através do emprego de material compósito	59
4.3	EPI Motociclísticos no Mercado	60
5	ASPECTOS DA MODELAGEM 3D E ANÁLISE NUMÉRICA	63
5.1	<i>Design</i> Parametrizado	63
5.1.1	Introdução ao <i>design</i> parametrizado	63
5.1.2	Ferramenta <i>Knowledge</i> do CATIA	64
5.2	Elementos estruturais	65
5.3	Características da malha	67
5.4	Tipos de Resultados	70
5.5	Modelagem Estática dos Esforços	71
III	METODOLOGIA	75
6	MODELAGEM E PROTOTIPAGEM DOS EPI	76
6.1	Referências do mercado	76
6.1.1	Protetor de perna	76
6.1.2	Protetor de braço	77
6.2	Modelos de referência	77
6.3	Criação dos modelos	78
6.4	Sugestão de modelagem de protetores de tórax e costas	82

6.5	Dimensões Corporais	83
6.5.1	Escaneamento 3D	83
6.5.2	Uso de Dummies	84
6.6	Protótipos fabricados	85
6.6.1	Impressora	85
6.6.2	Setup de impressão	86
6.6.3	Peças impressas	87
7	ANÁLISE NUMÉRICA	89
7.1	Cenários de simulação	89
7.1.1	Cenário Experimental	89
7.1.2	Cenário Real 1	90
7.1.3	Cenário Real 2	90
7.2	Definição das forças	91
7.2.1	Condição de carregamento 1	91
7.2.2	Condição de carregamento 2	91
7.2.3	Condição de carregamento 3	92
7.2.4	Condição de carregamento 4	92
7.3	Materiais	92
7.4	Variáveis de estudo	92
7.5	Tipo de elemento para análise numérica	94
7.6	Condições de contorno e de carregamento	94
7.6.1	Condições de Contorno do Cenário Experimental	94
7.6.2	Condições de Contorno do Cenário Real 1	95
7.6.3	Condições de Contorno do Cenário Real 2	95
7.6.4	Condições de Contorno da Interface protetor com o membro corporal	96
7.7	Malha	96
7.8	Modelo de análise	98
7.9	Etapas do estudo	98
8	CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL	99
8.1	Caracterização mecânica	99
8.2	Ergonomia e Conforto	100
IV	RESULTADOS E CONCLUSÕES	102
9	RESULTADOS	103
9.1	Seleção do material	103
9.2	Avaliação da espessura	105
9.3	Análise do reforço	107

9.4	Análise completa	108
9.4.1	Protetor de perna	108
9.4.1.1	Cenário Experimental	108
9.4.1.2	Cenário Real 1	109
9.4.1.3	Cenário Real 2	112
9.4.2	Protetor de braço	115
9.4.2.1	Cenário Experimental	116
9.4.2.2	Cenário Real 1	117
9.4.2.3	Cenário Real 2	119
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
10.1	Primeira iteração	123
10.2	Segunda iteração	124
10.3	Sugestões de melhorias e estudos futuros	125
10.3.1	Otimização e novos modelos de EPI	126
10.3.2	Melhoria na caracterização numérica	126
10.3.3	Caracterização experimental	127
10.3.4	Análise de material de impressão reforçado	127
	REFERÊNCIAS	128
	APÊNDICES	139
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DO PROTE- TOR DE REFERÊNCIA	140
A.1	Cenário Experimental	140
A.2	Cenário Real 1	141
A.3	Cenário Real 2	143
	APÊNDICE B – COLONIZAÇÃO DE MARTE	146
	APÊNDICE C – CUSTOS DE FABRICAÇÃO	148
	ANEXOS	149
	ANEXO A – QUESTIONÁRIO DE UTILIZAÇÃO	150

Parte I

Introdução

1 Introdução

Este capítulo de introdução possui como objetivo apresentar todo o desenvolvimento dessa dissertação. Inicialmente, é promovido o contexto ao se discutir os elementos principais do trabalho, sua base e estudos anteriores que estejam dentro do contexto em questão. Por conseguinte, são apresentados os objetivos, plano de trabalho e a estruturação desse trabalho.

1.1 Contextualização

Os Equipamentos de Proteção Individual (EPI), entendidos como ferramentas que evitam acidentes e, em casos mais extremos, evitam e reduzem traumas provenientes desses durante a realização de atividades laborais, são essenciais para garantir a segurança das pessoas que estão submetidas em locais e/ou situações que representam riscos a sua saúde e integridade física (ROCHA et al., 2022).

No que tange ao mundo das motocicletas, alguns dos EPI usuais para os condutores e passageiros são: capacete, jaqueta, luva, bota, joelheira, cotoveleira, caneleira, protetor de tórax e bota (GLOBO, 2016). Porém, dentre os equipamentos listados anteriormente, de acordo com o Código de Trânsito Brasileiro (CTB), apenas o capacete (portado de viseira ou óculos de proteção) é obrigatório¹ (BRASIL, 1997). Esses itens, se usados em conformidade, podem evitar ou, ao menos, diminuir a severidade de lesões e traumas decorrentes dos diferentes tipos de acidentes envolvendo motociclistas e passageiros (KIM et al., 2018).



Figura 1 – Equipamentos de proteção para motociclistas – Fonte: (2E4RODAS, 2021)

¹ O CTB prevê também um vestuário obrigatório padronizado pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), entretanto, até o momento que esse trabalho foi publicado, ainda não existia um relatório indicando qual seria essa padronização.

De acordo com dados da Organização Mundial de Saúde (OMS), cerca 1,35 milhão de pessoas vêm a óbito por ano em decorrência de acidente de trânsito no mundo, sendo que 28% desses são de usuários de veículos com duas ou três rodas (WHO, 2018). Já no Brasil, cerca de 12 mil pessoas faleceram em decorrência de acidente de trânsito estando em motocicletas no ano de 2020 (DATASUS, 2020) e outras 175.371 foram indenizados por invalidez permanente pelo mesmo motivo nesse período (LÍDER, 2020). Esses números indicam os riscos inerentes a utilização desses veículos e a importância de buscar o aumento da segurança e proteção de seus usuários.

Além disso, o uso de EPI por motociclistas não só ajuda a diminuir a severidade de lesões em caso de acidentes, mas também são capazes de proteger o condutor contra intempéries como chuva, frio ou calor excessivo, e até mesmo evitar a exposição a agentes poluentes presentes no ar, como poeira e gases tóxicos (MAPFRE, 2023). É importante lembrar, considerando o que foi exposto, que os EPI para motociclistas não devem ser encarados como gastos desnecessários, e sim como um investimento na própria segurança.

Devido a sua importância e eficácia, os EPI para motociclistas têm evoluído significativamente nos últimos anos, oferecendo mais conforto e proteção aos usuários (NATARAJAN; T, 2022). Porém, ainda existem diversos casos de motociclistas que, mesmo com as recomendações e leis que regem a utilização dessas ferramentas de segurança, recusam-se ou evitam sua utilização e, dentre as várias justificativas, consta-se o fato do pouco conforto na utilização dessas ferramentas (TEIXEIRA et al., 2014). Sendo assim, é importante destacar que a escolha dos EPI corretos para cada situação, e que estejam em conformidade com as normas locais, é fundamental para garantir uma proteção eficiente e a usabilidade na utilização desses equipamentos.

No entanto, é importante considerar a disponibilidade de EPI no mercado adequados às dimensões dos diferentes possíveis corpos dos motociclistas, já que muitos afirmam que as opções disponíveis têm formatos e dimensões inadequadas para o seu uso, o que pode prejudicar a manobrabilidade da moto pelo piloto, além de ocasionar outros desconfortos (NORRIS; MYERS, 2013). Essa inadequação é causada, em grande parte, pelo método de fabricação desses, já que sua maioria (como joelheiras, caneleiras, protetor de tórax...) são estruturas de forma com elevada complexidade feitas de polímeros², o que demanda o método de fabricação pelo método de moldagem por injeção (POLÍMEROS, 2018). Isso significa que é necessário a utilização de um molde metálico com a sua cavidade com o formato da peça a ser fabricada, o que representa uma parcela considerável dos custos do produto (LANZER; STEFFANI; GONÇALVES, 2018). Logo, fabricar moldes diferentes para atender toda a variedade de tamanhos corporais humanos pode se tornar economicamente inviável, o que resulta em uma disponibilidade limitada de tama-

² Outros materiais também podem compor esses EPI, porém, usualmente, a parte solicitada mecanicamente é polimérica.

nhos para esses produtos, justificando a reclamação dos potenciais consumidores desses equipamentos.

Contudo, existem outros métodos de fabricação de polímeros. Dentre esses, pode-se listar: extrusão, sopro e manufatura aditiva (também conhecido como impressão 3D) (TECNOLOGIES, 2019), sendo esse último um método de fabricação emergente e promissor que vem evoluindo fortemente nas últimas décadas, tornando-se cada vez mais eficiente, versátil e acessível, e que tem sido cada vez mais utilizado em diversos setores industriais, como aeroespacial, automotivo, médico, arquitetônico, design, entre outros (MAZZALI, 2022).

Ao contrário dos métodos tradicionais de fabricação, que envolvem a remoção de material de uma peça bruta para chegar à forma desejada, ou de outros processos que demandam a inserção da matéria prima em um molde/matriz, a manufatura aditiva constrói a peça em questão com a inserção do material camada por camada a partir de materiais como plástico, metal, cerâmica ou até mesmo biológicos (RODRIGUES et al., 2017). Esse processo permite a criação de formas complexas com grande precisão, somando uma elevada liberdade de design, além de economizar tempo e custos de produção em comparação com os métodos tradicionais, já que não demanda algumas ferramentas específicas e moldes para seu processo de fabricação (FORD; DESPEISSE, 2016).

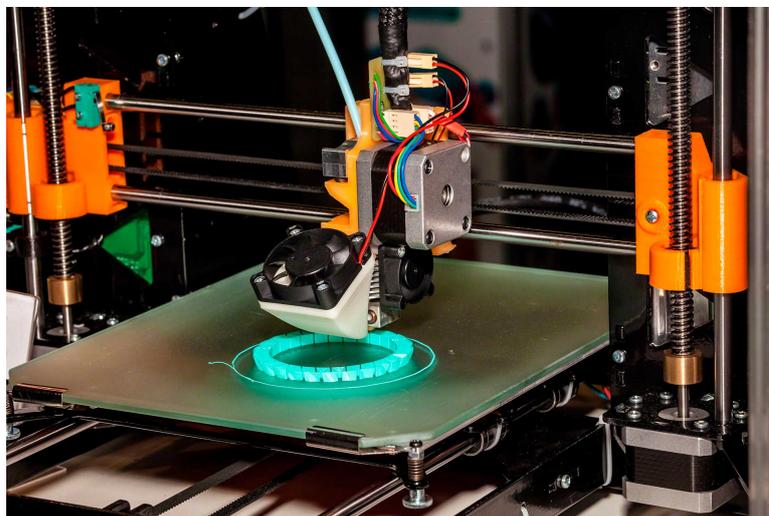


Figura 2 – Processo de manufatura aditiva – Fonte: (MECALUX, 2021)

1.2 Motivação

As características supracitadas conferem vantagens ao método de fabricação por manufatura aditiva quando comparado aos métodos de fabricação tradicionais, capacitando-o como uma solução possivelmente relevante para o problema de baixa variedade de tamanhos para EPI. Isso reduz conforto e usabilidade dos EPI por motociclistas, além de

também permitir que esses produtos sejam feitos com mais facilidade, aumentando a disponibilidade no mercado.

Isto posto, a produção de peças personalizadas para EPI pode ser viabilizada quando se considerado um design parametrizado dessas. Esse tipo de projeto é um processo de design que utiliza parâmetros ou variáveis para definir e controlar as dimensões, forma, estrutura e outras características de um objeto ou sistema. Sendo que esses parâmetros são geralmente definidos em um modelo ou software de design paramétrico, e podem ser ajustados ou modificados para criar diferentes variações ou soluções (SILVA; CHANG, 2002). Portanto, peças de segurança projetadas seguindo essa metodologia podem ser modificadas e fabricadas para atender às necessidades e dimensões específicas do usuário, tornando-as, possivelmente, mais confortável e eficiente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de EPI para motociclistas, mais especificamente um protetor de perna e um protetor de braço, eficientes na diminuição das cargas transmitidas ao seu usuário, com *designs* parametrizados e que sejam passíveis de serem fabricados nas mais diversas impressoras 3D disponíveis no mercado.

1.3.2 Objetivos Específicos

De forma mais específica, foi estudada a questão da ergonomia e possibilidade de um design de peças parametrizado feitas, inicialmente, por *Computer Aided Design* (CAD), buscando-se um produto com a capacidade de se adaptar aos diferentes biotipos corporais.

Juntamente, será analisada a técnica de impressão, somada à escolha do material que será usado na criação dos protótipos e modelos, considerando os requisitos dos diferentes cenários que esse EPI pode estar inserido, como condições de operação e as exigências da dinâmica dos acidentes e incidentes. Além das análises das impressões e da viabilidade de laminação de fibra de carbono com epóxi como ferramenta para melhorar as propriedades mecânicas dos dispositivos de segurança.

Além disso, também fica a cargo deste estudo realizar simulações numéricas usando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para avaliar a eficiência de proteção dos usuários desses EPI nos mais diferentes tipos de carregamentos que poderão ocorrer em eventuais acidentes motociclísticos.

Como conclusão, também se tem como objetivo a criação de um material legado que servirá como referência para a continuação e aprimoramento dessa área de estudo.

1.3.3 Resultados Esperados

Há o objetivo que esses equipamentos projetados cumpram os requisitos de serem, ao mesmo tempo, eficientes nas questões de segurança dos motociclistas, parametrizados para permitir personalização conforme dimensões corporais do usuário, confortáveis de se utilizar, passíveis de serem fabricados pelo método de manufatura aditiva e, se necessário, reforçados por material composto a fim de obter maior resistência mecânica.

1.4 Organização dos Capítulos

Este trabalho está estruturado em seis blocos principais, de forma a primeiro, comentar sobre a dinâmica de utilização dos equipamentos de proteção individual para motociclistas, apresentando as normas nas utilizações desses equipamentos no Brasil e no mundo, passando pela sua importância, eficácia e validação. Em um segundo momento, é demonstrado a premissa de modelagem estática dos esforços envolvidos em acidentes motociclísticos. No terceiro bloco, são apresentadas as questões corporais humanas, sendo que essas servem para a consideração de conforto e ergonomia do produto, tornando-se parâmetros das análises a serem feitas. No quarto momento foi apresentado os métodos tradicionais de fabricação de materiais poliméricos e comparados esses ao método da manufatura aditiva, trabalhando suas características e vantagens. O quinto bloco conta com a definição de design parametrizado como ferramenta de superar os problemas relacionados a ergonomia e como a manufatura aditiva é uma aliada a essa questão. Para concluir, são apresentadas também as características principais de uma análise numérica.

Além disso, na parte de metodologia, no qual é citado o desenvolvimento dos modelos dos equipamentos e os tipos e a estrutura das análises que serão feitas para validação e otimização desses equipamentos, além de demonstrar o processo de fabricação e as características dos modelos fabricados.

Por fim, são apresentados os resultados encontrados, além de uma discussão dessas informações e as sugestões de próximos estudos.

Parte II

Referencial Teórico

2 Segurança no Trânsito e Utilização dos EPI

2.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem caráter de demonstrar a relevância deste estudo no âmbito de segurança e saúde pública, além de apresentar informações sobre a importância e regulamentação na utilização dos equipamentos descritos, não tendo, portanto, relação com engenharia, assim ficando em caráter optativo sua leitura.

Como já introduzido neste trabalho, os EPI desempenham um papel fundamental na promoção de segurança, saúde e bem-estar para trabalhadores e, em especial para o caso deste estudo, para os motociclistas. Ao utilizar esses equipamentos de forma apropriada, como capacetes, viseiras, luvas, botas, protetores de joelho e braço, os pilotos e passageiros de veículos motociclísticos estarão mais protegidos contra perigos físicos, químicos e biológicos, garantindo a integridade de sua saúde e possibilitando que desempenhem suas funções de forma mais segura e eficiente.

Motociclistas e passageiros estão sujeitos a diversas situações que podem causar riscos a integridade física (DINIZ; ASSUNÇÃO; LIMA, 2005). Devido a isso, acidentes são relativamente recorrentes a esse grupo¹ e, dessa forma, torna-se relevante considerar a mitigação dos efeitos decorrentes desses.

2.2 Normas e recomendações de uso de EPI por motociclistas

2.2.1 Normas e recomendações no Brasil

No cenário nacional, existem órgãos públicos que, através de relatórios, códigos e normas, padronizam e regulamentam a utilização dos itens de proteção individual com o objetivo de promover mais segurança e evitar possíveis danos ao pilotos e passageiros de motocicletas. O principal objeto do estado que determina essas regras é a Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997: o Código de Trânsito Brasileiro (CTB). Por definição, o CTB é um conjunto de normas e regras que define atribuições das diversas autoridades e órgãos ligados ao trânsito, fornece diretrizes para a Engenharia de Tráfego e estabelece normas de conduta, infrações e penalidades para diversos usuários deste sistema (BRASIL, 1997).

Aos motociclistas, no que tange aos equipamentos de proteção obrigatórios, tem-se o Art. 54 (BRASIL, 1997), que diz que os condutores de motocicletas, motonetas e ciclomotores só poderão circular nas vias:

¹ Ocorreram, em média, 507 acidentes envolvendo motociclistas por dia no Brasil apenas no ano de 2022 (INFRAESTRUTURA, 2023).

- I. Utilizando capacete de segurança, com viseira ou óculos protetores;
- II. Segurando o guidom com as duas mãos;
- III. Usando vestuário de proteção, de acordo com as especificações do CONTRAN.

A norma descrita anteriormente se estende aos passageiros, com os mesmos itens, no Art. 55 (BRASIL, 1997).

Os artigos citados anteriormente legislam a necessidade de usar um vestuário padronizado para condutores e passageiros de motocicletas, motonetas e ciclomotores de acordo com especificações do Conselho Nacional de Trânsito. Entretanto, até o momento de finalização deste estudo, um relatório formal não foi redigido pelos membros competentes do CONTRAN, havendo apenas uma resolução, de número 940/22 (BRASIL, 2022), que disciplina o uso de capacete para condutor e passageiro de motocicletas, motonetas, ciclomotores, triciclos motorizados e quadriciclos motorizados.

Art. 2º É obrigatório, para circular nas vias públicas, o uso de capacete motociclístico pelo condutor e passageiro de motocicleta, motoneta, ciclomotor, triciclo motorizado e quadriciclo motorizado, devidamente afixado à cabeça pelo conjunto formado pela cinta jugular e engate, por debaixo do maxilar inferior.

§ 1º O capacete motociclístico deve estar certificado por organismo acreditado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), de acordo com regulamento de avaliação da conformidade por ele aprovado.

Art. 3º Para fiscalização do cumprimento desta Resolução, as autoridades de trânsito ou seus agentes devem observar:

- I. Se o capacete motociclístico utilizado é certificado pelo INMETRO;
- II. Se o capacete motociclístico está devidamente afixado à cabeça;
- III. A aposição de dispositivo retrorrefletivo de segurança nas partes laterais e traseira do capacete motociclístico, conforme especificado no item I do Anexo;
- IV. A existência do selo de identificação da conformidade do INMETRO, ou etiqueta interna com a logomarca do INMETRO, especificada na norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7.471 (ABNT, 2015), podendo esta ser afixada no sistema de retenção; e
- V. O estado geral do capacete, buscando avarias ou danos que identifiquem a sua inadequação para o uso;

Art. 4º O condutor e o passageiro de motocicleta, motoneta, ciclomotor, triciclo motorizado e quadriciclo motorizado, para circular na via pública, deve utilizar capacete com viseira, ou na ausência desta, óculos de proteção, em boas condições de uso.

§ 1º Entende-se por óculos de proteção aquele que permite ao usuário a utilização simultânea de óculos corretivos ou de sol.

§ 2º Fica proibido o uso de óculos de sol, óculos corretivos ou de segurança do trabalho (EPI) de forma singular, em substituição aos óculos de proteção.

§ 3º Quando o veículo estiver em circulação, a viseira ou óculos de proteção devem estar posicionados de forma a dar proteção total aos olhos.

Assim, é possível notar que, nacionalmente, apenas o capacete e a viseira (e suas variáveis) são observadas e reguladas por essa resolução, não havendo, portanto, qualquer indicação da padronização de jaquetas, luvas, botas e, especialmente, protetores de cotovelo, de canela, de joelho e de tórax. Também não há, muito menos, qualquer obrigação da utilização desses.

Porém, para motociclistas profissionais² existem regras mais rígidas quanto ao uso de EPI conforme regras do ministério de segurança do trabalho. De acordo com a Lei nº 12.009, de 29 de julho de 2009 (BRASIL, 2009), o motociclista profissional deve estar vestido com colete de segurança dotado de dispositivos retrorreflexivos, nos termos da regulamentação do CONTRAN.

2.2.2 Normas e recomendações no resto do mundo

Apesar da ausência de uma vestimenta de segurança padrão para condutores e passageiros de motocicletas no Brasil, no resto do mundo essa regulamentação pode ser ainda mais branda, havendo a exigência de capacete apenas em 19 dos 48 Estados Unidos contíguos³, por exemplo. Em outros locais, como China e Tailândia, o uso de capacete também não é obrigatório e não é incomum o trânsito de mais de duas pessoas sobre esses veículos, excedendo a capacidade máxima (GLOBO, 2014).

Todavia, a *World Health Organization* (WHO) divulgou, com o objetivo de elevar a segurança de operações por motociclistas, um novo manual para autoridades dos países-membros com o objetivo de reduzir as mortes no trânsito com informações sobre a utilização do capacete (WHO, 2023). Esse relatório possui diversas informações a respeito da eficiência em proteção de piloto e passageiro de motocicletas em caso de acidente.

Segundo (WHO, 2022), capacetes podem reduzir o risco de morte em acidentes com

² Motociclistas profissionais são aqueles que desempenham papel de transporte de passageiros (mototaxistas) e de mercadorias (motofretistas) (BRASIL, 2009).

³ Estados Unidos contíguos são os 48 estados americanos excluindo Alasca e Havaí (MERRIAM-WEBSTER, 2004).

esses veículos em até 6 vezes e, também, é capaz de reduzir danos cerebrais em até 74% dos casos. Entretanto, novamente esse manual é focado em capacetes, não trabalhando a importância dos demais EPI para o caso em questão.

2.3 Estatísticas sobre acidentes

Apesar das normas e recomendações no que diz respeito à segurança no trânsito, ainda sim ocorre um elevado número de acidentes, sendo que esses representam um problema significativo de saúde pública não só no Brasil, como no resto do mundo, causando inúmeras lesões permanentes, perdas de vidas e impactos socioeconômicos relevantes (SILVA, 2017). Esta parte tem como objetivo analisar o número de acidentes de trânsito no Brasil e no mundo e apontar o quanto se faz relevante estudos e ações que visem o aumento da segurança e, por consequência, a redução dos danos causados por esses, especialmente para os motociclistas, figuras potencialmente mais frágeis no tráfego viário (GLOBO, 2014).

2.3.1 Estatísticas de acidentes No Brasil

O trânsito brasileiro enfrenta desafios complexos que contribuem para um alto número de acidentes. Fatores como infraestrutura inadequada, comportamento inadequado dos motoristas, falta de fiscalização e deficiências no sistema de educação de trânsito desempenham papéis importantes para ocorrência desses acidentes, que resultam em inúmeros problemas e prejuízos de diferentes magnitudes (BLUME, 2016).

De acordo com estudos, considerando aspectos de custo de manutenção de veículos em relação a renda, nível de congestionamento, qualidade das estradas e a taxa de mortalidade no trânsito, o Brasil é o segundo pior local do mundo para se dirigir (DREHMER, 2023). Essa colocação indica o quão preocupante e problemático é a situação do trânsito brasileiro, trazendo perigos e prejuízos para a população e para o Estado. Dessa forma, toda essa estrutura inadequada e deficitária brasileira ocasiona números elevados de acidentes, fazendo com que o Brasil seja o terceiro país no mundo em número de mortes no trânsito (WHO, 2018).

Sabendo então que o trânsito brasileiro é precário e perigoso, deve-se notar que essa realidade se torna ainda mais preocupante quando se considera os acidentes que envolvem motociclistas. Com a combinação de infraestrutura inadequada, como ausência de faixas exclusivas e sinalizações deficientes, e o desrespeito às normas de trânsito por parte de condutores, tanto de outros veículos, quanto das motos, os motociclistas enfrentam um ambiente hostil. Essa conjuntura resulta em um elevado número de colisões, quedas e atropelamentos, com consequências graves, como ferimentos sérios e até mesmo óbitos.

Como comparação, a população brasileira, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é de mais 215 milhões de pessoas (IBGE, 2022a), enquanto a sua frota de veículos é de mais de 115 milhões (IBGE, 2022b), representado, aproximadamente, 1 veículo para cada 2 pessoas. Esse número, que pode ser considerado elevado, permitiu o acontecimento de 978.878 acidentes no ano de 2022 (média de 2.682 acidentes por dia), sendo que desses, 222.254 envolveram motos ou motonetas, cerca de 22% do total. Enquanto isso, 7.267 óbitos ocorreram envolvendo os mesmos veículos, o que representa 35% do total (INFRAESTRUTURA, 2023). Esse valor proporcionalmente maior no número de óbitos, quando comparado ao número de acidentes, pode indicar a maior fragilidade dos ocupantes de motocicletas no trânsito, indicando que ações rígidas e objetivas devem ser tomadas a fim de proteger esse grupo.

2.3.2 Estatísticas de acidentes no resto do mundo

Apesar da qualificação negativa do Brasil no ranking de trânsito, existem outros países que sofrem de problemas semelhantes, tornando esse uma questão global. Um relatório da OMS também afirma que pedestres, motociclistas e ciclistas são as principais vítimas, em quase todas as regiões⁴, representando 49% das mortes no trânsito no mundo e, além disso, no espectro americano, 15% das mortes são de motociclistas (WHO, 2018).

Já no cenário dos Estados Unidos, de acordo com dados da *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA, 2022), 82.528 motociclistas sofreram lesões provenientes de acidente de trânsito no ano de 2020, sendo que outros 5.579 motociclistas faleceram nesse mesmo contexto. Esses números fazem com que os usuários de motocicletas representem 14% do número de mortes no trânsito, apesar de representarem apenas 3% dos veículos registrados no país. Novamente, essa proporção maior no número de mortes, dessa vez considerando os EUA, indica a fragilidade desse grupo no âmbito do trânsito.

2.4 Acidentes motociclísticos

As condições de um acidente motociclístico são altamente variáveis, dependendo de uma série de fatores. A velocidade da motocicleta, o estado da via, as condições climáticas, a presença de obstáculos ou veículos próximos e o comportamento do motociclista, são apenas algumas das variáveis que podem influenciar o resultado de um acidente. Além disso, as características individuais da motocicleta, como seu design, peso e sistema de freios, também desempenham um papel importante nas condições de um acidente.

Um acidente motociclístico pode causar uma variedade de lesões graves no corpo humano devido à velocidade envolvida e à exposição direta a impactos e arrastamentos, sendo que essas variam, por exemplo, entre traumas, entorses, quebras, queimaduras e

⁴ Exceto América do Norte

cortes (WICK et al., 1998). Dessa forma, para se modelar e validar um EPI para a redução desses danos, necessita-se conhecer a magnitude das forças envolvidas nessas situações e a forma como elas interagem com o envolvido.

Todavia, as variáveis que devem ser consideradas são inúmeras, como: tipo de impacto, velocidade, condições das superfícies de contato, condições de apoio dos objetos, entre outros. Além disso, também se sabe que, apesar de serem eficientes em reduzir a gravidade das lesões em alguns acidentes, EPI não são capazes de eliminar os danos em 100% (ROME, 2006). Assim, essa análise depende de diversos cenários e variáveis, portanto, uma forma de analisar seria ponderando aqueles que o equipamento é realmente capaz de trazer uma segurança maior, sabendo que nem sempre será capaz de evitar completamente danos e lesões.

Isto posto, pode ser considerado acidente motociclístico desde uma leve colisão do braço do motociclista com um retrovisor de outro veículo enquanto trafega no corredor, até colisões frontais em alta velocidade com outros veículos e estruturas. Porém, nesse caso mais extremo não haveria diferenças significativas se o condutor estivesse usando equipamentos como protetor de braço ou joelhos, podendo haver lesões de alto grau mesmo com a presença desses itens (ANKARATH et al., 2002). Apesar disso, para o primeiro caso, que representa um menor índice de dano, equipamentos de proteção elevam a proteção substancialmente (ROME et al., 2011).

2.5 Eficiência de proteção

Apesar da pouca ou quase nenhuma obrigatoriedade do uso de certos itens de segurança visto anteriormente, somado ao elevado número de acidentes fatais envolvendo motocicletas não só no Brasil, quanto no resto do mundo, torna-se importante compreender como são eficientes para a segurança de seu usuário para, dessa forma, incentivar seu uso e ações que aumentem sua presença no trânsito.

Especialmente em esportes motociclísticos, faz-se presente a obrigatoriedade de os competidores utilizarem diferentes EPI. Em corridas de MotoGP⁵, pilotos competidores são obrigados a usar diferentes itens, como: armadura torácica, joelheiras para deslizamento, cotoveleiras e outras partes de segurança para trajes de pilotagem (Fig. 2.5) (REPSOL, 2021). Para a prática de MotoRally⁶, usualmente também se recomenda os mesmos tipos de equipamentos descritos anteriormente (KFT, 2022).

⁵ Competição automobilística que utiliza motocicletas para praticar corridas em autódromos e circuitos por todo o mundo.

⁶ Competições automobilísticas que utilizam motocicletas para praticar corridas em regiões de trilha.



Figura 3 – Traje de proteção do MotoGP em ação durante acidente – Fonte: (MCLAREN, 2022)

Esse tipo de obrigatoriedade em esportes automobilísticos já indicam a importância da utilização de equipamentos para elevar a proteção individual e evitar ou, ao menos, reduzir a severidade de lesões em casos de acidentes. Apesar desses atletas estarem, comumente, em situação de mais elevado risco de acidentes, isso não deve desestimular o uso de equipamentos de proteção quando se considera a integridade física de motociclistas, pois há a indicação de que esses são eficazes.

Apesar dessa constatação que tange às competições de motocicletas, diversos estudos se propõem a verificar o quão eficientes são esses equipamentos em acidentes cotidianos. O estudo de (ROME et al., 2011) demonstrou, ao entrevistar pessoas envolvidas em acidentes e observar as condições⁷ e os resultados⁸ desses, que roupas e uma variedade de equipamentos de proteção individual (como protetor de joelhos protetor de braços) foram capazes de reduzir a severidade de lesões e até o número de internações hospitalares, especialmente quando esses itens estão bem ajustados ao corpo do usuário. Também afirma que esse tipo de resultado observado em estudos deve ser considerado pelos órgãos competentes para criação de campanhas de incentivo e recomendação ao uso de equipamentos de proteção individual por pessoas que utilizam motos.

Já o outro estudo de (ROME, 2006), em que novamente ele avalia a eficiência de proteção de equipamentos no que tange a existência, localidade e grau de lesões por usuários de motocicletas e equivalentes em relação a utilização de determinados itens de proteção e, novamente, os resultados indicam uma vantagem considerável do nível de le-

⁷ As condições em questão são, principalmente: velocidade, existência e condição dos equipamentos de proteção, tipo de veículo, gênero e idade do motorista e tipo de acidente.

⁸ Os resultados em questão são, principalmente: existência e nível da lesão, extensão e tipo de dano ao equipamento e necessidade de internação.

são daqueles que utilizaram de equipamentos de segurança em comparação àqueles que não utilizaram. Ademais, como conclusão, afirma também que metade dos acidentes motociclísticos estudados poderiam ter as lesões decorrentes desses reduzidas ou até mesmo evitadas caso os envolvidos estivessem usando equipamentos de proteção de forma adequada, novamente incentivando a existência de políticas que visem incentivar e recomendar o uso de EPI por motociclistas.

O relatório da WHO descrito anteriormente (WHO, 2018) também afirma que itens de segurança, como capacetes e cintos de segurança, são capazes de reduzir as mortes no trânsito em até 42%.

Não obstante, o potencial de redução de danos e lesões em acidentes por motociclistas pela correta utilização de roupas e equipamentos de proteção é um assunto já bem observado e estudado há mais de 4 décadas (ZETTAS; ZETTAS; THANASOPHON, 1979), (OTTE; MIDDELHAUVE, 1987) e (OTTE; SCHROEDER; RICHTER, 2002), em que todos chegam à conclusões semelhantes, reafirmando a eficácia de proteção dos usuários de equipamentos de proteção individual durante acidentes motociclísticos, deixando como legado a relevância do incentivo de se utilizar equipamentos regularmente.

2.6 Certificação da proteção

Os certificados desempenham um papel fundamental na garantia da qualidade, segurança e eficácia dos Equipamentos de Proteção Individual motociclísticos. Os requisitos e parâmetros de cada um podem variar conforme o país/continente de referência, mas, a existência desses pode indicar um equipamento que tem maior eficiência, tornando esse mais adequado para o uso de motociclista e passageiros.

2.6.1 Certificação no Brasil

No Brasil, a certificação é respectiva aos capacetes, não havendo muitas referências para os demais equipamentos motociclísticos de proteção. Assim, esses capacetes destinados ao uso em motociclismo devem ser certificados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade (INMETRO), e devem incluir uma etiqueta com a data de fabricação. Embora a legislação não estabeleça um prazo de validade específico para os capacetes, a maioria dos fabricantes recomenda substituí-los após três anos de fabricação, independentemente do uso, argumentando que, ao longo do tempo, os materiais perdem a capacidade de proporcionar a segurança necessária (INBRAEP, 2019).

2.6.2 Certificação no resto do mundo

Na Europa, há a certificação Conformité Européene (CE), sendo esse um padrão de conformidade obrigatório para diversos produtos comercializados no Espaço Econômico Europeu (EEE) e foi estabelecida para garantir que os produtos atendam a requisitos de segurança, saúde e proteção ambiental estabelecidos pela legislação europeia (UE, 2022). No contexto de equipamentos motociclísticos, essa certificação é especialmente relevante para itens como capacetes, luvas, jaquetas com proteção, calças, botas e protetores de corpo, indicando que esses passaram por testes rigorosos e atendem aos padrões de segurança estabelecidos.

Para obter a certificação CE, os fabricantes de equipamentos motociclísticos devem submeter seus produtos a uma série de testes conduzidos por laboratórios independentes e autorizados. Tais testes avaliam diversos aspectos, como resistência ao impacto, à abrasão, ao desgaste, à perfuração e propriedades mecânicas. Os equipamentos são classificados de acordo com diferentes níveis de proteção, que são indicados por um código, sendo esses AAA, AA e A⁹, B¹⁰ e C¹¹, estando esses símbolos indicados em etiquetas anexadas aos produtos (REV'IT!, 2020).

Somado a isso, há uma recomendação dos tipos de proteção que cada área do corpo deve receber, baseado no nível de exposição e grau de sensibilidade dessa região. Esse padrão sofreu alterações recentemente para se adequar aos estudos e análises que foram feitas sobre acidentes motociclísticos e como elevar a proteção, e servem como referência para o desenvolvimento de novos produtos e equipamentos (RACERED, 2020).

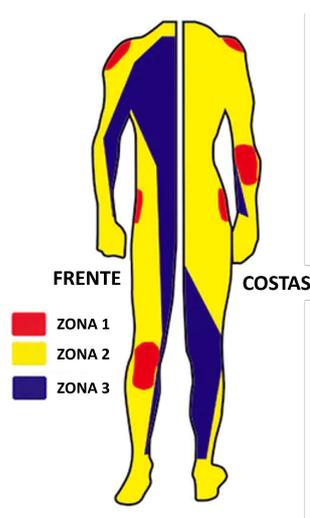


Figura 4 – Certificado de proteção CE – Adaptado de: (RACERED, 2020)

⁹ Os códigos com a letra A indicam que o equipamento protege contra impacto e abrasão, sendo AAA a melhor classificação e A, a pior.

¹⁰ O código B indica proteção apenas contra abrasão.

¹¹ Os códigos com a letra C indicam proteção apenas contra impactos.

3 Análise Corporal Humana

É indicado por (TEIXEIRA et al., 2014) que, dentre outros motivos, os motociclistas evitam utilizar equipamentos de proteção individual pois esses se apresentam em pouca variedade de dimensões no mercado, o que pode causar um desconforto na utilização desses por parte das pessoas que possuem um tipo corporal diferente daquele padrão utilizado para projetar o equipamento. Assim, faz-se relevante considerar em estudos sobre esses equipamentos a questão do conforto de seu uso.

Para analisar a usabilidade e o conforto na utilização de equipamentos de proteção, deve-se considerar, portanto, questões de biotipo corporal das partes interessadas, ou seja, as diferentes formas e dimensões que um corpo humano pode ter.

Além disso, o padrão de medidas para peças e produtos de vestuário utilizado nos Estados Unidos da América¹ foi criado nos anos 1940 e não leva em consideração possíveis mudanças corporais humanas devido à alimentação, à rotina diária e outros aspectos (SIMMONS, 2002). Essa desatualização de padronização das medidas pode trazer desconforto para os usuários, justificando a afirmação anterior.

3.1 Biotipos

Biotipo corporal é uma definição que corresponde ao modelo de corpo, que é influenciado pela constituição óssea, metabolismo, massa muscular e quantidade de gordura (D'OR, 2023). Dessa forma, pessoas podem ter uma variedade de tamanhos e formatos de corpos, fazendo com que equipamentos, roupas e outros recursos devam possuir uma variedade de tamanhos para se adaptar a essa gama de opções. A Figura 5 demonstra algumas dessas variedades.

À vista disso, essa variação de corpos pode ser definida de acordo com algumas classificações, sendo uma delas que divide as pessoas em três principais grupos: Ectomorfo, Endomorfo e Mesomorfo. Sendo o primeiro o tipo que engloba pessoas que possuem corpo mais magro e esguio, ombros estreitos e membros compridos; o segundo, pessoas de baixa estatura, corpo mais arredondado e mais largo; e o terceiro, pessoas que possuem o corpo magro e musculoso (D'OR, 2023).

Além disso, existem padrões de medidas para roupas e outros tipos de vestimenta, como o da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (ABNT, 2021), que define as dimensões para peças de roupas e podem, de certa forma, definir também características corporais das pessoas.

¹ País com inúmeras empresas que produzem produtos de EPI (PAVLOVSKY, 2022).

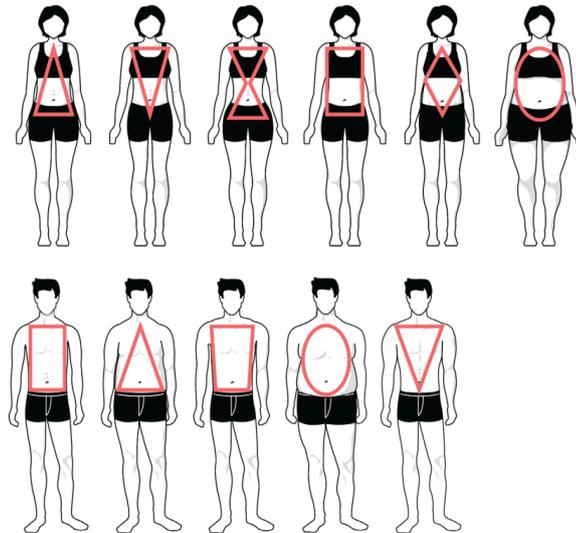


Figura 5 – Algumas variações de tipos e formatos corporais humanos – Fonte: (HURREN; VARNSEY; ROME, 2022)

3.2 Ergonomia

A ergonomia pode ser definida como o estudo científico das interações entre os seres humanos e os elementos de um sistema. Esses elementos podem ser o ambiente de trabalho, ferramentas, equipamentos e produtos. Seu objetivo principal é permitir o projeto de sistemas que sejam seguros, eficientes e confortáveis para os usuários (VIDAL et al., 2000).

Ela propõe entender as capacidades, limitações e necessidades dos seres humanos, levando em consideração fatores como anatomia, fisiologia, psicologia, antropometria e biomecânica. Dessa forma, essa ferramenta pode otimizar as condições de operação, buscando minimizar os riscos de lesões, doenças ocupacionais, desconfortos, fadiga, além de melhorar a eficiência, a produtividade e o bem-estar dos indivíduos (VIDAL et al., 2000).

Logo, os aspectos relacionados a ergonomia são elementos importantes e que devem ser fortemente considerados em projetos, especialmente quando esses estão diretamente ligados a questões de usabilidade e aceitação, e são capazes de prover mais segurança para as pessoas e, também, reduzir custos.

3.3 Conforto

O conforto pode ser definido como a comodidade física satisfeita. Na utilização de equipamentos de proteção individual, é um aspecto que deve ser considerado relevante na hora de seu projeto, pois equipamentos desconfortáveis prejudicam a liberdade corporal de movimento, o conforto térmico, a sensação tátil, entre outros, inviabilizando certas atividades e servindo de desincentivo para seu uso, aumentando, assim, a insegurança das

pessoas (VEIGA; ALMEIDA; DUARTE, 2016) e (MENEGUCCI et al., 2012). Portanto, considerar o conforto na escolha e uso de EPI é essencial para garantir que os trabalhadores se sintam à vontade e possam desempenhar suas funções de maneira adequada e segura.

3.3.1 Conforto de usabilidade

O conforto de usabilidade está relacionado diretamente a interface humano-objeto, ou seja, como o ser humano se relaciona ao utilizar determinado objeto. Assim, ele é dependente de diversas propriedades do item e da pessoa, como material de revestimento e dimensões, e pode ser dividido em três partes fundamentais, sendo elas:

- **Conforto sensorial-tátil:** Definido conforme a sensação que um objeto provoca ao estar em interface com a pele de seu usuário, e está relacionado com as tensões geradas sobre o tecido e da forma como elas são transmitidas a pele (MENEGUCCI et al., 2012). Essa sensação está ligada a forma como essa interface é interpretada, fazendo-se importante compreender como essa relação se dá ao projetar produtos para serem utilizados por pessoas.
- **Peso:** O peso elevado de um objeto junto ao corpo pode levar a dificuldade na movimentação, cansaço acelerado e até mesmo dores e consequentes lesões ao usuário (MENDES; SILVA, 2021).
- **Ergonomia:** O encaixe ergonômico de um objeto que vai estar em contato com o corpo é fundamental, pois regiões apertadas e/ou regiões mais largas que a medida do membro podem ocasionar dificuldades de movimentação, movimentos indesejados do item usado entre outros problemas (AKBAR-KHANZADEH; BISESI; RIVAS, 1995).

3.3.2 Conforto térmico

Assim como o conforto de usabilidade, o conforto térmico também é relevante nas considerações de design e projeto de um produto. Esse está relacionado com as trocas térmicas normais que um corpo humano realiza e deve ser analisado de forma que essa troca não seja muito prejudicial. Faz-se importante, então, que um equipamento projetado permita a circulação de ar para evitar o acúmulo de calor e umidade, ou, caso o ambiente seja frio, que ele mantenha a temperatura corporal estável, evitando trocas térmicas da pessoa com o meio (HURREN; VARNSVERRY; ROME, 2022).

3.4 Dimensões do corpo

3.4.1 Aquisição de dimensões corporais

É inevitável falar sobre conforto e ergonomia de um EPI sem considerar as dimensões dos membros da pessoa específica que irá utilizar esse equipamento. Como já explicitado, o corpo humano pode possuir diversas formas e dimensões, logo, uma análise que imponha limites inferiores e superiores pode ser ineficiente por ser, ou excludente, ou ampla demais a ponto de não impor realmente um limite.

Contudo, apesar de definir limites para as dimensões corporais aparentarem, a princípio, ser ineficientes, ainda sim necessita conhecer as dimensões dos membros em questão que um equipamento de proteção seria utilizado. Sendo assim, uma das formas de conseguir essa informação, seria utilizando instrumentos de medição como trenas, régua e outros produtos semelhantes.

No entanto, métodos manuais podem ser considerados rudimentares e simplistas, por não permitirem a extração de geometrias complexas, exigindo ainda que um operador interprete essas dimensões para escolher aquelas que sejam adequadas para o produto. Assim, uma solução para essa situação seria a utilização de máquinas de escaneamento 3D, sendo esta potencialmente relevante para aquisição de dimensão e forma de corpos humanos e que pode ser beneficiada pela utilização de produtos diversos² (BARTOL et al., 2021).

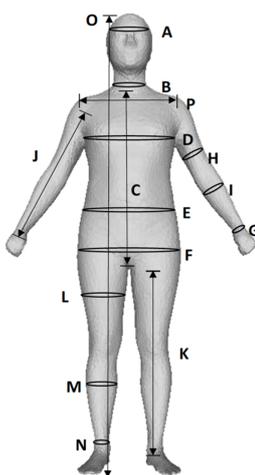


Figura 6 – Tipo de medidas corporais que podem ser extraídas de um escaneamento corporal – Adaptado de: (SMITH et al., 2019)

Através do escaneamento corporal é possível importar, por exemplo, um modelo 3D do membro da pessoa em questão para um software de design e modelagem, e verificar

² Como escaneadores portáteis, escaneadores estacionários e até aplicativos de escaneamento para celulares (BARTOL et al., 2021).

a interface do equipamento de proteção com o corpo, fazendo modificações conforme necessário a fim de obter o modelo otimizado.

Além disso, considerando os tipos de equipamentos que almeja desenvolver, buscou-se também demonstrar maneiras de conseguir extrair medidas dos membros que os equipamentos devem proteger de forma a usar essas na modelagem parametrizada do equipamento, tendo um padrão de obtenção ao escanear o corpo de um potencial usuário, permitindo a modelagem com base nessas dimensões, visível a seguir (Fig. 7).

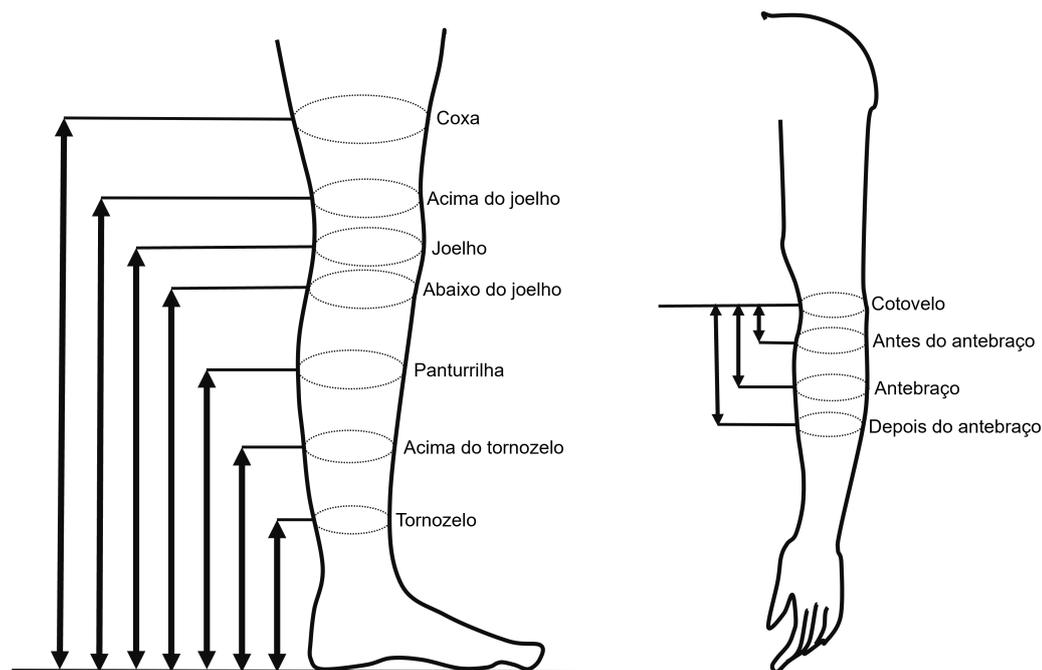


Figura 7 – Formas de medir braços e pernas de pessoas – Fonte: autor

3.4.2 Percentis

Outra forma de observar as dimensões corporais de um grupo de pessoas são os percentis. Estes são medidas estatísticas utilizadas para avaliar a distribuição de uma variável em uma determinada população. Quando aplicados às dimensões corporais, os percentis indicam a posição relativa de uma pessoa em relação à altura, peso ou outras medidas físicas em comparação com a população em geral. Essas referências percentis são frequentemente utilizadas em pediatria para monitorar o crescimento e o desenvolvimento das crianças, oferecendo uma maneira de avaliar se uma criança está dentro de uma faixa considerada normal para sua idade (PAPANÉK, 2011).

Porém, para a engenharia, essas medidas servem para o *design* de produtos que atendam um determinado grupo de pessoas. Ao se projetar um item que possa ser utilizado por uma grande parcela da população, é importante observar que esse limite deve ser abrangente. Por exemplo, caso seja desejado que, pelo menos, 90% da população utilize

determinado produto com conforto, é necessário que esse seja funcional, tanto para o percentil 5, quanto para o percentil 95 (SERRE et al., 2006). Uma demonstração gráfica dessa consideração pode ser vista a seguir (Fig. 8). Dessa forma, avaliar o produto para esses valores extremos e para valores intermediários pode garantir um bom aspecto ergonômico ao produto, assim, essa abordagem contribui para a criação de *designs* mais inclusivos e funcionais, considerando a diversidade nas dimensões corporais da população-alvo.

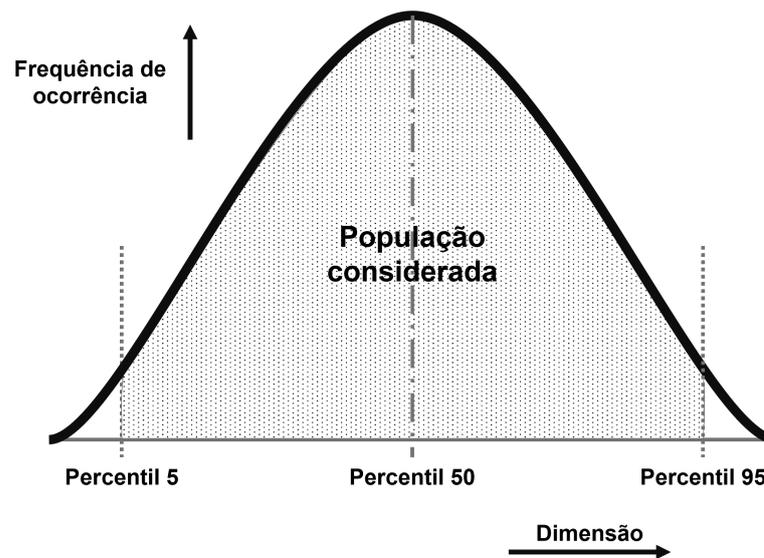


Figura 8 – Visualização gráfica da distribuição de dimensões considerando percentis –
Fonte: autor

Quando se trata do CATIA, um *software* de *design* assistido por computador amplamente utilizado na indústria de engenharia, os percentis são aplicados para modelar o tamanho de manequins virtuais. Esses manequins representam características antropométricas médias ou específicas de uma população e, ao utilizar sua base de dados de dimensões, é possível personalizar o tamanho e as proporções do manequim com base nessas medidas, garantindo que os produtos projetados sejam ergonomicamente adequados para uma ampla gama de usuários. Uma vantagem é que esse programa ainda conta com percentis por gênero para diferentes etnias, permitindo uma avaliação ainda mais completa de aspectos ergonômicos.

3.5 Propriedades do corpo humano

O corpo humano é um objeto complexo e alvo de estudo há séculos. Ele possui uma variedade de sistemas, mecanismos e soluções engenhosas para desempenhar diversos papéis necessários na vida humana. Em contrapartida, em situações intensas, como acidentes motociclísticos em alta velocidade, ele pode ser frágil e suscetível a danos em uma variedade de intensidades (ROME, 2006). Dessa forma, faz-se importante compreender as

suas características mecânicas ao se ponderar o projeto de um equipamento de proteção individual, especialmente para análises, testes e validações por simulações numéricas e por métodos experimentais.

Apesar de se encontrar nas partes internas dos corpos humanos, o osso é a parte mais rígida de um membro e é o responsável por dar estrutura e resistência. Assim, conhecer suas propriedades mecânicas se faz necessária para realizar essas análises de forma condizente. Contudo, os ossos do corpo não são todos iguais e, ainda, variam conforme aspectos como a idade da pessoa. Portanto, não existe apenas um único valor, e sim intervalos. Porém, em um estudo que verificou os módulos de elasticidade de 38 fêmures humanos, foi encontrado um valor médio de 17,1 *GPa*, podendo esse ser usado como referência para análises. Além disso, verificou-se também um Coeficiente de Poisson na ordem de 0,3 (REILLY; BURSTEIN; FRANKEL, 1974).

Outras estruturas, como músculos, pele e gordura tem magnitudes de módulo de elasticidade várias ordens de grandeza inferior ao osso, permitindo usar como premissa, então, como partes negligenciáveis no aspecto da resistência mecânica e rigidez de um membro corporal.

4 Métodos de Fabricação de Estruturas Poliméricas

Os polímeros, tanto sintéticos, quanto naturais, são materiais amplamente utilizados na fabricação de uma variedade de produtos, indo desde embalagens e dispositivos eletrônicos, até componentes usados na medicina e peças automotivas (WNEK; BOWLIN, 2008). Assim, a escolha do método de processamento desses polímeros para a fabricação de peças é um fator crítico que influencia as propriedades mecânicas do conjunto, sua eficiência de produção, seu custo e outros fatores (LOTTI, 2004). Neste capítulo de revisão bibliográfica, serão discutidos os principais métodos de fabricação dessas peças poliméricas, incluindo extrusão, moldagem por injeção e/ou sopro e, especialmente, Manufatura Aditiva, além de suas vantagens e desvantagens. A revisão em questão busca fornecer, dessa maneira, uma compreensão desses métodos de fabricação, que é essencial para a escolha do processo de fabricação mais eficiente conforme os requisitos e demandas do projeto.

4.1 Métodos tradicionais

Previamente, ao se estudar os diferentes métodos de processamento de peças poliméricas e escolher aquele mais adequado para a fabricação de um determinado produto, deve-se analisar e compreender a gama de opções e, especialmente, aqueles que são mais tradicionais, já que eles também são os mais amplamente utilizados na indústria e que possuem maior fundamentação e estruturação (GOODSHIP, 2017). Assim, estes são os diferentes tipos de moldagem.

A moldagem é o processo mais utilizado em polímeros e pode ser dividida em cinco tipos: por extrusão (Fig. 9), por compressão (Fig. 10), por transferência (Fig. 11), por injeção (Fig. 12) e por sopro (Fig. 13). Esses cinco processos, apesar de suas distinções, possuem, em sua base, características em comum, entre elas se tem: utilizam-se moldes, são capazes de produzir uma variedade de formas e tamanhos, são usados para processos em larga escala e requerem equipamentos especializados (GOODSHIP, 2017). Assim, esses métodos são mais capazes e eficientes em fabricar elementos que possuem geometria relativamente mais complexas em relação ao processamento por extrusão, já que se utilizam de matrizes que tem o formato final (ou muito aproximado) da peça (PEARSON, 1985).

É importante considerar que, para obter peças de alta qualidade e precisão, é necessário controlar cuidadosamente os parâmetros do processo de moldagem, incluindo a

pressão, a temperatura e o tempo de resfriamento. Esse processo é, usualmente, feito utilizando técnicas de controle de processo avançadas. Além disso, as técnicas de moldagem são versáteis, permitindo utilização de uma ampla variedade de materiais e aditivos para aprimorar diferentes propriedades da peça (CHEN; TURNG, 2005).

4.1.1 Moldagem por extrusão

O processo de extrusão (Fig. 9) é o mais importante e amplo processo de fabricação de materiais poliméricos. Ele envolve o derretimento do polímero em um barril aquecido e a forçagem do material derretido através de uma matriz em forma de um perfil contínuo, sendo que essa matriz determina a forma final da peça produzida. Esse processo é bem usual por ser uma técnica de produção eficiente e econômica, permitindo a fabricação de peças em grande escala e com uma boa reprodutibilidade dimensional, sendo extensamente utilizado para fabricar diversas peças poliméricas como tubos, perfis, filmes e folhas (WILCZYŃSKI et al., 2019).

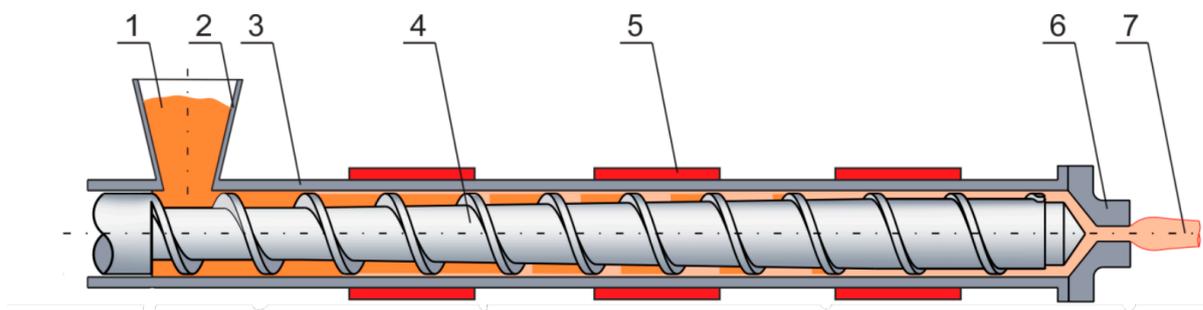


Figura 9 – Esquemático do método de extrusão: 1 - polímero sólido, 2 - funil, 3 - barril, 4 - fuso, 5 - aquecedores, 6 - matriz, 7 - peça extrudada – Adaptado de: (WILCZYŃSKI et al., 2019)

Assim, é possível dividir esse processo em três etapas principais e sequenciais: alimentação, aquecimento e extrusão. Na primeira etapa, o polímero é adicionado ao funil do extrusor, seguindo para a parte de aquecimento sendo transportado por um fuso que gira lentamente enquanto derrete o material, comprimindo-o e alimentando-o em direção à matriz. A forma final da peça é determinada pela geometria dessa matriz, que deve ser projetada a fim de produzir peças com diferentes tamanhos e formatos. Assim, é possível fabricar peças de elevado comprimento e de forma, basicamente, ininterrupta. Após a saída da matriz, a peça é resfriada e cortada nos comprimentos desejados (WILCZYŃSKI et al., 2019).

Esse processo permite, de forma eficiente e acelerada, a criação de peças e produtos que possuem a seção transversal constante e comprimentos variados, sendo incapaz de

produzir peças muito mais complexas, exigindo métodos de fabricação mais refinados (PEARSON, 1985).

4.1.2 Moldagem por compressão

No processo de moldagem por compressão, o polímero é aquecido até sua temperatura de amolecimento, colocado no molde e, então, comprimido com a atuação de prensas hidráulicas, pesos ou outros mecanismos. Com a aplicação de pressão e temperatura necessárias, após o fim do processo, o molde é aberto e extraído com a ajuda dos pinos de remoção (GOODSHIP, 2017).

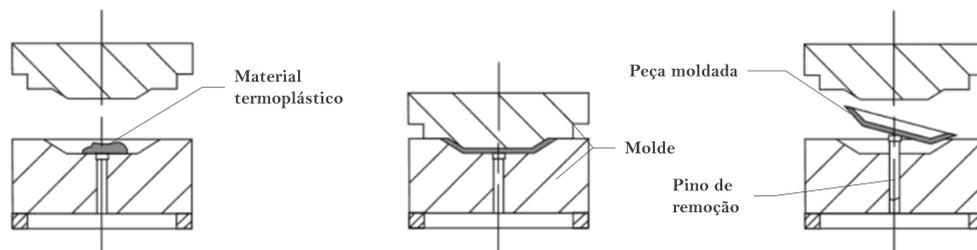


Figura 10 – Esquemático de uma moldagem por compressão – Adaptado de: (GOODSHIP, 2017)

4.1.3 Moldagem por transferência

A moldagem por transferência é um processo de fabricação de peças plásticas de polímeros termofixos que envolve a transferência de um material fundido de um reservatório para um molde fechado. Esse processo é semelhante à moldagem por compressão, com a diferença de que o material é transferido para o molde a partir de um reservatório externo através de cavidades (GOODSHIP, 2017). Assim como o processo anterior, o molde é aberto e extraído com o auxílio dos pinos de remoção.

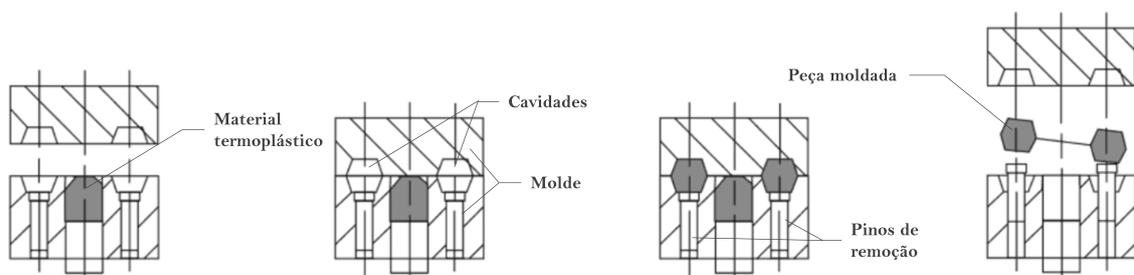


Figura 11 – Esquemático de uma moldagem por transferência – Adaptado de: (GOODSHIP, 2017)

4.1.4 Moldagem por injeção

A moldagem por injeção é um processo em que um polímero termoplástico é aquecido e injetado em um molde sob alta pressão, sendo esse composto por duas metades que se fecham para formar a cavidade que possui a forma final da peça. Quando o material é injetado em sua forma fundida, ele se solidifica após um tempo e adota sua forma, gerando assim a peça final. Após a solidificação, o molde é aberto e a peça é retirada (DÁVILA et al., 1997).

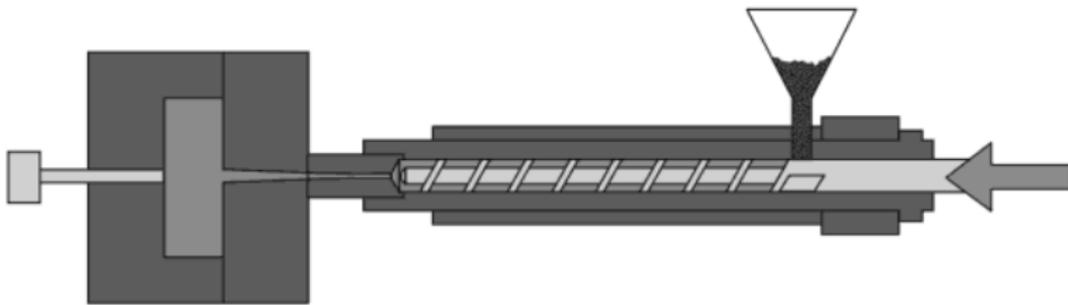


Figura 12 – Esquemático de uma moldagem por injeção – Adaptado de: (GOODSHIP, 2017)

4.1.5 Moldagem por sopro

A moldagem por sopro é um processo utilizado para a produção de peças plásticas ocas, como garrafas, potes, tanques e embalagens. Nele, um tubo ou parison (tubo pré-formado) é aquecido e esticado com o auxílio de um gás pressurizado em um molde que define a forma final da peça. O molde, após a conformação do material, é resfriado para ajudar a solidificar o polímero. Esse método é amplamente utilizado na indústria de embalagens devido à sua eficiência, baixo custo e alta produtividade (GOODSHIP, 2017).

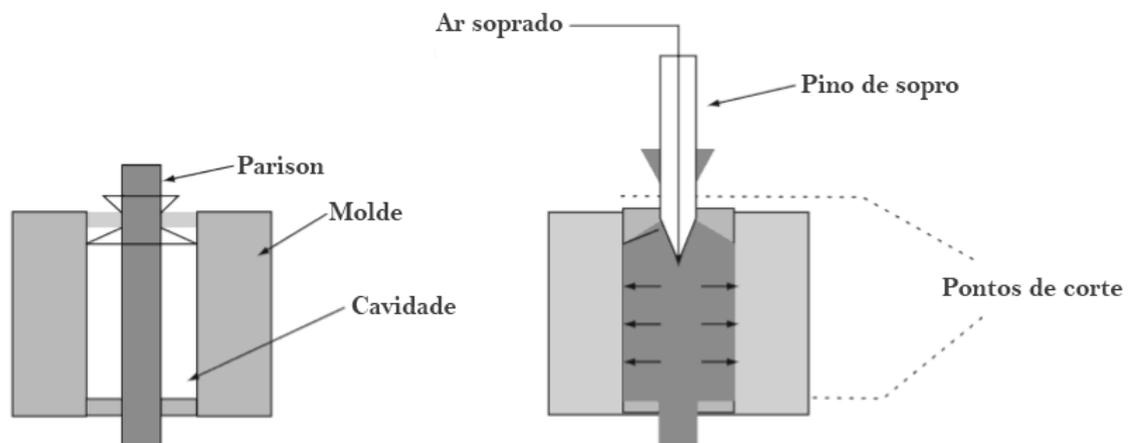


Figura 13 – Esquemático de uma moldagem por sopro – Adaptado de: (GOODSHIP, 2017)

4.2 Fabricação por Manufatura Aditiva

A partir do momento que há a compreensão geral dos mais tradicionais métodos de produção de peças de materiais poliméricos e das vantagens e desvantagens de cada um deles, é possível buscar propostas alternativas que sejam capazes de mitigar os problemas dos anteriores, possibilitando fabricar peças antes não possíveis, ou propor novas filosofias de mercado. Assim, entra como proposta o emergente método de manufatura chamado de Manufatura Aditiva.

A Manufatura Aditiva, também conhecida como impressão 3D (Fig. 14), é um processo de manufatura automatizado e altamente eficiente da chamada Indústria 4.0. Esse processo consiste, usualmente, na deposição de um material fundido de forma sequencial (semelhantemente ao que foi descrito no processo de extrusão) em uma bancada, sendo que essa deposição se dá com a movimentação da matriz de acordo com uma série de códigos numéricos chamados de Código G¹ (VOLPATO, 2021).

Os materiais usados na Manufatura Aditiva, a depender da tecnologia de impressão, também podem estar na forma semi-fundida e em pó (WICKRAMASINGHE; DO; TRAN, 2020). Esse tópico será melhor conversado mais adiante no estudo.

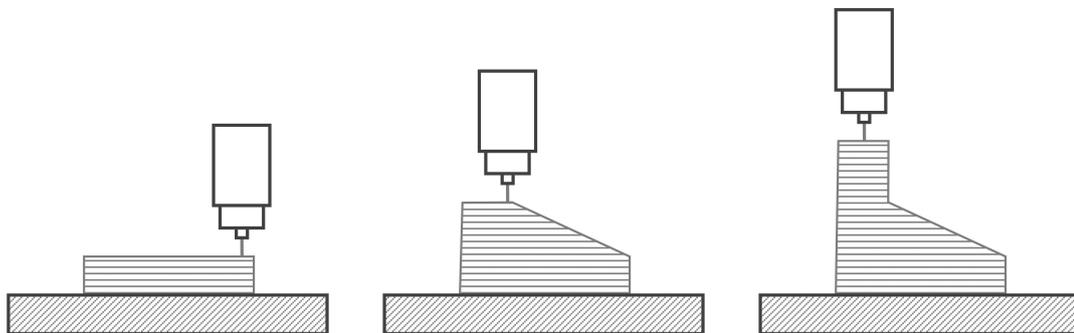


Figura 14 – Esquemático de criação de uma peça por Manufatura Aditiva

4.2.1 Vantagens da Manufatura Aditiva

A tecnologia de Manufatura Aditiva se torna vantajosa, dentre outras razões, por permitir que os fabricantes otimizem o uso de matérias primas, já que apenas o material necessário é usado para construir a peça, diminuindo o desperdício² (ABREU, 2015).

Outra característica que traz valor para a Manufatura Aditiva é que ela permite aos projetistas e engenheiros criarem protótipos e testarem novos designs rapidamente e

¹ O Código G, do inglês *G-Code*, é uma linguagem de programação para ordenar máquinas a executarem certas ações criado devido a necessidade da indústria de padronizar os sistemas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) (LATIF et al., 2021).

² Apesar disso, ainda há o desperdício de material quando se considera a criação de suportes e apoios para a impressão. Todavia, em alguns casos, assim como nos processos tradicionais, é possível reciclar e reutilizar esses suportes em novas impressões (JURISATO et al., 2017).

com menor custo (ZIER et al., 2019). Dessa forma, os profissionais podem realizar análises e fazer ajustes antes de investir em ferramentas de produção em massa, o que pode resultar em economia de tempo e de capital.

Esse método de fabricação também é capaz de fabricar peças com geometria mais complexa do que outros métodos tradicionais, já que ela produz em camadas sucessivas e não demanda a utilização de um molde com o formato da peça e das cavidades ou a utilização de métodos de manufatura subtrativa (WONG, 2016).

Ademais, outro aspecto positivo desse método é a existência de máquinas de menor complexidade e custo em comparação aos usualmente utilizados na indústria. Enquanto outras tecnologias de fabricação exigem grandes investimentos em equipamentos de alta precisão, a impressora 3D é uma solução mais acessível e, relativamente, de mais fácil operação (ANTONELLI, 2019). Isso permite que pequenas empresas e empreendedores possam ter acesso à tecnologia de ponta sem precisar investir em maquinários industriais.

Por fim, essa tecnologia também oferece maior flexibilidade em termos de personalização, possibilitando a produção de peças customizadas em pequenas quantidades, o que é especialmente importante em áreas como a medicina e outros serviços relacionados a ergonomia (FIGUEIREDO; CESAR, 2022). Ou seja, com a Manufatura Aditiva, não há necessidade de produzir quantidades tão grandes de peças para justificar os custos de fabricação, tornando a produção sob demanda viável.

4.2.2 Desvantagens da Manufatura Aditiva

Apesar das vantagens descritas previamente, também existem aspectos negativos que devem ser considerados no processo de Manufatura Aditiva. O primeiro deles é o problema na qualidade superficial do produto. Objetos impressos em 3D podem apresentar superfícies mais rugosas ou ásperas do que os produtos fabricados pelos métodos descritos anteriormente (DELFS; TOWS; SCHMID, 2016).

Além disso, a velocidade de produção também é um aspecto que pode ser problemático. O processo de fabricação por impressora 3D é substancialmente mais lento que outros processos, já que o produto é construído camada por camada de forma sequencial, podendo levar horas (ou até mesmo dias) para a fabricação de uma única peça. Isso se torna ainda mais intenso quando se considera uma camada de impressão mais fina, buscando melhora em propriedades geométricas ou de acabamento (PANDEY; REDDY; DHANDE, 2007).

Outro aspecto é a limitação do tamanho máximo da peça a ser fabricada, já que impressoras 3D possuem um limite físico do volume disponível para impressão, sendo necessários equipamentos mais complexos (e, conseqüentemente, mais caros) em certos casos, podendo inviabilizar esse método para a fabricação de determinados produtos (XIAO et

al., 2021).

A modelagem de peças por fabricação aditiva ainda exigem um cuidado especial pois, por vezes, faz-se necessária a utilização de suportes para impressão, necessitando um conhecimento do projetista ainda mais elevado quanto a essas possíveis restrições. Os apoios de impressão também poderão demandar o pós-processamento das estruturas criadas para sua remoção (JIANG; XU; STRINGER, 2018).

Ademais, pode-se haver também a necessidade de comprometer as propriedades mecânicas devido a questão dos materiais a serem utilizados na impressão. Embora exista uma gama de materiais disponíveis, algumas propriedades, como resistência mecânica, térmica e a sua durabilidade podem ser reduzidas em comparação com os produtos fabricados pelos métodos tradicionais (PRPIĆ et al., 2020). Porém, existem métodos para superar esse prolema, como o uso de material composto (melhor trabalhado na Seção 4.2.6).

Contudo, apesar dessas desvantagens, a Manufatura Aditiva continua evoluindo e superando essas limitações conforme a tecnologia avança, fazendo que essas possam ser mitigadas e novas vantagens sejam adquiridas em um futuro próximo (GAO et al., 2015).

4.2.3 Tipos de Manufatura Aditiva polimérica

São diversos os materiais que podem ser submetidos a Manufatura Aditiva, como metais, cerâmicas e polímeros (BOURELL et al., 2017), sendo esse último o mais importante para o caso em questão e objeto de análise deste estudo. Sabendo disso, faz-se importante, então, compreender as características de cada um deles, entendendo seus pontos positivos e negativos, e considerações que devem ser feitas conforme a necessidade de projeto.

4.2.3.1 Modelagem por Deposição Fundida

O *Fused Deposition Modeling* (FDM) (Fig. 15), do português Modelagem por Deposição Fundida, é um processo de Manufatura Aditiva onde um fino filamento (geralmente de 0,25 mm) de um polímero termoplástico alimenta um cabeçote que o deposita em forma de camadas sucessivas sobre uma bancada ou mesa de impressão (WONG; HERNANDEZ, 2012). Os elementos primordiais das máquinas que utilizam esse processo incluem: um sistema de alimentação de material, um aquecedor para fundir o material, o cabeçote de impressão, a estrutura dos controladores e uma mesa de impressão (TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

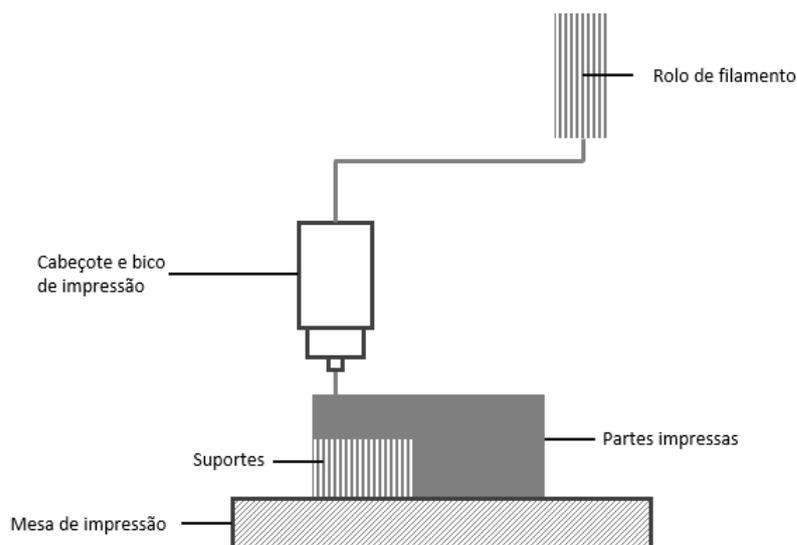


Figura 15 – Esquemático de fabricação por FDM – Fonte: autor

Observa-se que, como na maioria dos métodos de Manufatura Aditiva que consiste na fabricação da peças por camadas planas sucessivas, a depender da geometria da peça a ser fabricada e do sentido de fabricação³, faz-se necessária a utilização de suportes de impressão. Esses suportes são estruturas temporárias também impressos no momento de fabricação para permitir a criação dessas partes que ficariam "flutuando" e são, geralmente, feitos de forma que sua remoção seja facilitada após o término da manufatura (JIANG; XU; STRINGER, 2018).

Tratando-se de Manufatura Aditiva de materiais poliméricos, considerando o método FDM, tem-se como principais materiais de impressão o ácido polilático (PLA) e acrilonitrila butadieno estireno (ABS) (NGO et al., 2018). Porém, materiais como tereftalato de polietileno glicol (PETG), náilon, poliuretano termoplástico (TPU) e policarbonato (PC) são também candidatos viáveis e utilizados no método em questão (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

Esse método se faz vantajoso, dentre outras coisas, pois não há a necessidade de processos químicos, sem cura de resina, maquinário com custo reduzido (especialmente pela ausência de moldes), variedade de materiais impressos e um custo-benefício maior no processo de fabricação (WONG; HERNANDEZ, 2012).

Já uma das principais desvantagens dessa tecnologia é a resolução de impressão, que por vezes pode gerar vazios entre camadas e rugosidades (Fig. 16). Para mitigar esse tipo de efeito, faz-se necessário reduzir a velocidade de impressão, contudo, isso pode elevar o tempo de fabricação das peças, chegando a dias para estruturas mais complexas (REHMANI; JAYWANT; ARIF, 2020).

³ Especialmente se houverem vazios, concavidades, saliências ou protuberâncias.

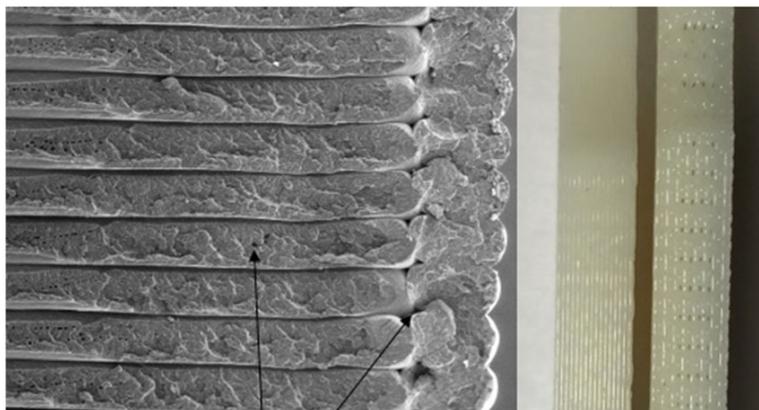


Figura 16 – Vazios em peças impressas por FDM – Adaptado de: (REHMANI; JAYWANT; ARIF, 2020)

Outra questão a ser observada é a orientação de impressão de estruturas por FDM. Nota-se que existem camadas de material com divisões bem distintas entre essas regiões, sendo formadas pelas sucessivas camadas impressas (Fig. 16). Essas interfaces entre as regiões poderiam indicar a existência de uma característica anisotrópica no material, todavia, a diferença das propriedades mecânicas conforme o sentido de impressão podem ser desconsideradas, usando a aproximação por isotropia, principalmente em materiais que podem ter um fator de segurança elevado⁴ e impressos de forma chapada usando $[\pm 45]$ no sentido das linhas de preenchimento do material⁵ (WERNKE, 2019).

Esse é o método utilizado na impressora da empresa Creality de nome CR-30 (Fig. 17). Um aspecto positivo e vantajoso dessa impressora é a presença do Z-infinito. Essa característica diz respeito à ausência da limitação de dimensão em um dos 3 eixos de impressão, dando-se através da utilização de uma esteira como mesa de impressão, isso permite, portanto, imprimir peças com comprimentos mais elevados ou, também, uma sucessão de peças em linha de montagem (3DLAB, 2021).



Figura 17 – Impressora Creality CR-30 – Fonte: (3DLAB, 2021)

⁴ Que é o caso desses EPI motociclísticos, que podem ser superdimensionados sem elevados prejuízos.

⁵ Considerando os eixos principais da peça.

4.2.3.2 Sinterização a Laser Seletiva

O *Selective Laser Sintering* (SLS) (Fig. 18), traduzido como Sinterização a Laser Seletiva, é um método de fabricação de Manufatura Aditiva que se utiliza um raio laser passando sobre finas camadas sucessivas de um pó feito de um material termoplástico (MAZZOLI, 2013). Diferentemente do FDM, este não deposita o material fundido na bancada, assim, possui as vantagens de ser um processo rápido, econômico, durável, funcional, capaz de produzir peças pequenas, não dependente de suportes na impressão, capaz de produzir excelentes acabamento e vedação, acurado as dimensões do modelo, entre outros fatores (WONG; HERNANDEZ, 2012).

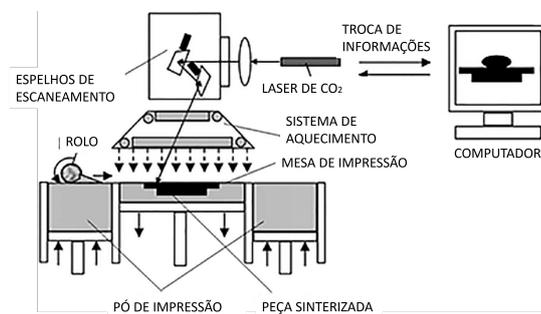


Figura 18 – Esquemático da manufatura por SLS – Adaptado de: (CHEN et al., 2017)

4.2.3.3 Estereolitografia

Estereolitografia (SLA) (Fig. 19) é a técnica em que a impressora 3D funde e solidifica seletivamente a seção transversal de cada camada de uma resina líquida através de feixes de laser ultravioleta. Há a vantagem, nesse método, do reaproveitamento da resina não-utilizada, além desse método ser capaz de produzir peças com excelente acabamento superficial e precisão dos modelos impressos (RENAP; KRUTH, 1995).

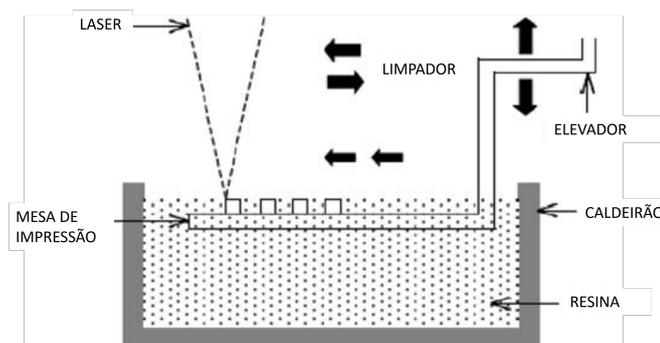


Figura 19 – Esquemático da manufatura por SLA – Adaptado de: (NEGI; DHIMAN; SHARMA, 2014)

4.2.3.4 Binder Jetting

O *Binder jetting* (BJ) (Fig. 20) é um método de Manufatura Aditiva no qual finas e sucessivas camadas de um pó são depositadas sobre uma bancada e solidificadas pela ação de uma resina que é colocada apenas nas partes que formam a seção transversal da camada em construção. Após a finalização da impressão, a peça é retirada do meio de um bloco de pó, que pode ser armazenado e reutilizado em impressões futuras. Não é necessário a criação de suportes de impressão para esse caso, já que o próprio pó serve de apoio para as camadas superiores (ZIAEE; CRANE, 2019).

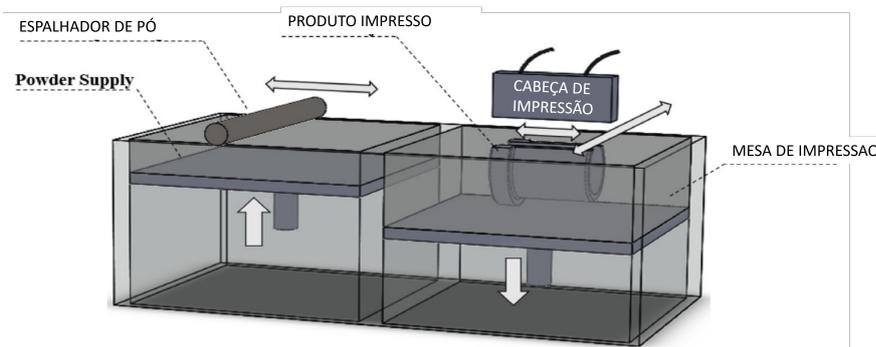


Figura 20 – Esquemático da manufatura por BJ – Adaptado de: (ZIAEE; CRANE, 2019)

4.2.4 Etapas da fabricação por Manufatura Aditiva

Para um produto ser fabricado pelo método de Manufatura Aditiva, ele primeiro precisa ser projetado em um software de desenho computadorizado e, após isso, ser digitalmente fatiado em camadas sucessivas para que a impressora seja capaz de realizar a manufatura (MUELLER, 2012). Esse projeto deve ser feito conforme requisitos do produto e observar as limitações e pontos de atenção levantados anteriormente (como propriedades mecânicas, necessidade de suporte, variedade de materiais). O diagrama a seguir (Fig. 21) conta com a sequência de ações e processos para fabricação de uma peça por impressão 3D.

A sequência para a concepção e fabricação de um produto por Manufatura Aditiva pode ser explicada da seguinte forma (MUELLER, 2012) e (WIBERG; PERSSON; ÖLVANDER, 2019):

1. **Concepção da ideia:** A ideia é concebida conforme necessidade de um determinado produto ou solução;
2. **Modelo 3D:** O modelo 3D deve ser feito conforme requisitos de projeto em um software de desenho computadorizado (CAD) ou através do escaneamento de um objeto existente;

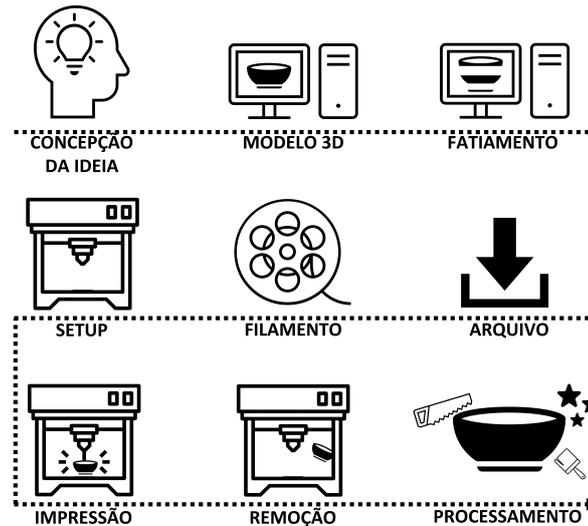


Figura 21 – Diagrama do processo de criação de uma peça por Manufatura Aditiva –
Fonte: autor

3. **Fatiamento:** O fatiamento deve ser feito por software especializado e consiste na informação de forma da seção transversal das diferentes camadas do objeto a ser impresso em forma de Código-G;
4. **Transferência do arquivo para impressora:** O arquivo de Código-G é carregado na impressora;
5. **Filamento:** Escolha do filamento⁶ de impressão conforme necessidades mecânicas, térmicas, estéticas e outros requisitos do projeto;
6. **Setup:** Preparação da impressora 3D (nivelamento da mesa, configuração da temperatura da mesa e do bico, velocidade de impressão, entre outros);
7. **Impressão:** A impressora executa uma série de comandos para realizar a impressão da peça em questão;
8. **Remoção:** Retirada da peça da mesa de impressão;
9. **Processamento:** Ação de remoção dos suportes de impressão, polimento, pintura, aparos e qualquer outro tratamento necessário para a finalização do produto.

4.2.5 Materiais de impressão

Como já citado anteriormente, diversos são os materiais possíveis de se utilizar na impressão por FDM. Essa variedade de materiais também produz uma variedade de soluções para determinados produtos. Portanto, uma escolha coerente do material a ser

⁶ O filamento pode ser a resina ou o pó polimérico, por exemplo, para os outros métodos de fabricação por Manufatura Aditiva.

utilizado, ponderando, entre outras coisas, propriedades mecânicas, custo-benefício, disponibilidade e requisitos do projeto, faz-se fundamental.

Contudo, por este projeto se tratar de uma solução disruptiva e não corriqueira, as propriedades esperadas e que serão observadas quando o equipamento de proteção estiver em uso podem não ser triviais. Dessa forma, torna-se importante analisar as opções de materiais disponíveis no mercado e como essas alteram as variáveis de um protetor. Assim, buscou-se observar o comportamento dos produtos a serem desenvolvidos para três dos materiais citados anteriormente que são utilizados no FDM (ABS, PLA e PETG). Porém, para correta avaliação, faz-se necessário, portanto, conhecer as propriedades mecânicas desses.

Por se tratar de produtos fabricados por Manufatura Aditiva, é importante considerar que as propriedades de peças fabricadas dessa maneira têm propriedades diferentes daquelas que são fabricadas por moldagem por injeção (SILVA, 2018). Assim, buscou-se as propriedades de impressão desses materiais. Também foi observada a escolha de materiais que tiveram suas propriedades bem catalogadas em estudo. Dessa forma, escolheu-se o ABS, o PLA e o PETG da 3DLab. Essas propriedades podem ser observadas na Tabela 1⁷. Além disso, também se buscou caracterizar as propriedades de impressão desses filamentos para correto uso da máquina, sendo essas propriedades visíveis na Tabela 2.

Material	ρ [g/cm^3]	E [GPa]	σ_e [MPa]	σ_r [MPa]	ν
ABS	0,26	2,24	20,59	32,58	0,25
PLA	0,33	3,51	47,65	57,00	0,33
PETG	0,29	1,67	23,35	39,34	0,29

Tabela 1 – Propriedades caracterizadas dos materiais impressos – Adaptado de: (SILVA, 2018)

Material	T_i [$^{\circ}C$]	T_m [$^{\circ}C$]	V_i [mm/s]
ABS	220 - 240	90 - 100	≤ 60
PLA	190 - 220	60 - 70	≤ 150
PETG	235 - 255	80 - 90	≤ 50

Tabela 2 – Propriedades de impressão dos materiais – Adaptado de: (3DLAB, 2017)

Onde:

- ρ : Densidade;

⁷ Considerou-se os valores encontrados no estudo das peças impressas no sentido horizontal, sentido esse equivalente ao sentido de impressão que as peças deste estudo foram submetidas.

- E : Módulo de elasticidade;
- σ_e : Tensão de escoamento;
- σ_r : Tensão de ruptura;
- ν : Coeficiente de poisson;
- T_i : Temperatura de impressão;
- T_m : Temperatura da mesa;
- V_i : Velocidade de impressão.

Essas propriedades podem ser utilizadas para análise numérica de produtos impressos e, também, para permitirem sua prototipação e fabricação conforme necessidade. Dessa forma, esses valores serão utilizados a seguir para análise e seleção do material a ser utilizado pelo protetor.

Além disso, também foi avaliado as propriedades mecânicas do EVA, um material polimérico macio e suave ao toque comumente utilizado na indústria de calçados e materiais esportivos e que pode servir como camada de interface entre o usuário e a peça impressa, aumentando assim o conforto (BUZZATTI et al.,). Suas propriedades são visíveis na Tabela 3.

Material	ρ [g/cm^3]	E [MPa]	σ_e [MPa]	σ_r [MPa]	ν
EVA	0,09	3 - 5	1 - 3	14 - 16	0,45

Tabela 3 – Propriedades do EVA – Adaptado de: (QUEIROZ et al., 2014)

4.2.6 Reforço estrutural através do emprego de material compósito

Materiais fabricados por Manufatura Aditiva são passíveis de terem uma resistência mecânica e outras propriedades relacionadas aos materiais, inferiores em relação aos produtos fabricados por métodos mais tradicionais (PRPIĆ et al., 2020). Todavia, uma forma de superar essa questão é com a utilização de material compósito como estrutura de reforço.

Os materiais compósitos consistem na combinação de uma matriz polimérica com outros materiais, como fibras ou partículas⁸. O resultado é um material que possui propriedades superiores⁹ aos materiais que o compõe isoladamente (HSISSOU et al., 2021).

Um estudo feito por (WICKRAMASINGHE; DO; TRAN, 2020) indicou que a execução de uma laminação de fibras feita sob um material impresso por FDM promoveu

⁸ Essas fibras de reforço podem ser de vidro e carbono, por exemplo.

⁹ Por superiores, entende-se que são mais adequados para determinada aplicação.

melhoras nas características, incluindo, resistência e rigidez, aumentando o leque de possibilidades de produtos feitos por esse método de fabricação, tornando-as mais adequadas para processos nos quais há maior exigência mecânica. Outro estudo que evidenciou bem essa possibilidade foi o de (CHAUDHRY et al., 2022), no qual também foram observados melhorias nas propriedades de peças impressas ao realizar uma laminação com fibras.



Figura 22 – Esquemático do reforço de peça impresso por FDM utilizando material compósito – Fonte: autor

Dessa maneira, pode ser viável a utilização dessa ferramenta para agregar características mecânicas superiores a materiais feitos em FDM, porém, devido aos custos de produção, deve-se ponderar sua necessidade, analisando se o caso sem o reforço já não é funcional e o custo-benefício dessa aplicação. Assim, buscou-se as propriedades mecânicas que uma camada de carbono-epóxi teria, conforme propriedades médias observadas na base de dados de propriedades de materiais, sendo essas visíveis na Tabela 4.

Material	ρ [g/cm^3]	E [GPa]	σ_e [MPa]	σ_r [MPa]	ν
Carbono-Epóxi	1,8	100	741	1090	0,28

Tabela 4 – Propriedades caracterizadas de uma estrutura Carbono-Epóxi – Adaptado de: (DATA), 2008)

Outro ponto que pode ser considerado para o reforço de produtos fabricados por Manufatura Aditiva é o uso de filamentos reforçados. Esses filamentos de impressão 3D reforçados são materiais que contêm adições de fibras ou partículas para melhorar suas propriedades mecânicas e térmicas, sendo que essas adições podem incluir fibras de carbono, fibras de vidro, partículas metálicas ou outros materiais de reforço (DICKSON; ABOURAYANA; DOWLING, 2020). Contudo, esse tipo de tecnologia não será avaliada no estudo em questão, tornando-se uma possibilidade de análise para estudos futuros.

4.3 EPI Motociclísticos no Mercado

Os EPI feitos de material polimérico são o tipo mais comum no que tange a proteção de seus usuários contra impactos mecânicos e situações correlatas (BARRERA, 2007), apesar de haver também produtos que são feitos de materiais metálicos ou processos de

laminação, esses são menos tradicionais e costumam atender a um nicho específico. Essa característica dos equipamentos de proteção serem de polímeros se dá, principalmente, pelas vantagens conferidas por esse tipo de material, sendo algumas dessas: variedade de propriedades mecânicas possíveis, custo reduzido, baixa densidade específica e, especialmente para o caso em questão, a facilidade de fabricação de peças usando essa técnica (GORNI, 2003).

Como já apresentado, peças poliméricas que possuem geometrias mais complexas são, tradicionalmente, feitas por moldagem por transferência e injeção. Assim, essa regra se aplica aos equipamentos de proteção individual para motociclistas, incluindo capacetes (Fig. 23), e outros, já que tem formas variadas para atender os diferentes formatos dos membros humanos.



Figura 23 – Molde para fabricação de capacetes motociclísticos – Fonte: (MOLD, 2014)

Apesar disso, a proposta de utilizar impressão 3D para fabricar itens de proteção individual já é uma ideia explorada por empresas *startups*, como a Hexr, britânica que fabrica e comercializa capacetes impressos em 3D com estrutura *honeycomb* (Fig. 24), sendo que essa estrutura confere um aumento da eficiência de absorção da energia proveniente de impactos. Somado a isso, a Manufatura Aditiva permite modelos personalizados e fabricados sobre medida conforme o formato e dimensões da cabeça do cliente (WHEELER, 2020), demonstrando a viabilidade dessa tecnologia aplicada à criação de equipamentos de proteção.



Figura 24 – Capacete impresso em 3D da empresa Hexr – Adaptado de: ([HEXR, 2020](#))

Outra empresa que se beneficia dessa tecnologia é a Dainese, fabricante italiana de equipamentos para motociclistas, aproveitando-se das vantagens antes citadas para fabricar uma variedade de EPI para esse grupo. Assim, esses permitem serem modelados conforme dimensões corporais do cliente, além de viabilizar a redução do tempo e dos custos de fabricação ([3NTR, 2022](#)).

5 Aspectos da Modelagem 3D e Análise Numérica

As análises mecânicas de EPI desempenham um papel crucial na segurança dos motociclistas. Com o avanço da tecnologia e a crescente preocupação com a redução dos danos decorrentes de acidentes de trânsito, a utilização de técnicas computacionais e de simulações numéricas se destacam como uma abordagem eficiente para modelar prever o desempenho desses. Dessa forma, esta seção tem como objetivo apontar aspectos inerentes as questões numéricas e os métodos utilizados no desenvolvimento, tendo como referência que essa modelagem foi feita no CATIA e a análise numérica foi feita exclusivamente no *software* de análises ANSYS.

5.1 *Design* Parametrizado

5.1.1 Introdução ao *design* parametrizado

Na etapa do projeto 3D de uma nova solução de engenharia, mudanças são comuns. Para evitar a necessidade de um retrabalho de todas as ações, é possível usar o conceito de *design* parametrizado (Fig. 25), permitindo alterar dimensões e propriedades de um modelo 3D com muito mais facilidade. Sendo essa uma abordagem que utiliza conhecimentos de projeto somados a geometria e topologia, além das restrições, também conhecidas como *constraints* (ANDERL; MENDGEN, 1995).

Esse conceito pode ser aplicado à arquitetura, *design* e, especialmente, engenharia, permitindo a criação de modelos que sejam adaptáveis conforme restrições e necessidades, tornando-se vantajoso ao oferecer a capacidade de explorar uma gama de possibilidades de *design* de forma eficiente, considerando variáveis, como: materiais, geometria, carga aplicada, restrições de fabricação, desempenho desejado e demanda do cliente (MYUNG; HAN, 2001).

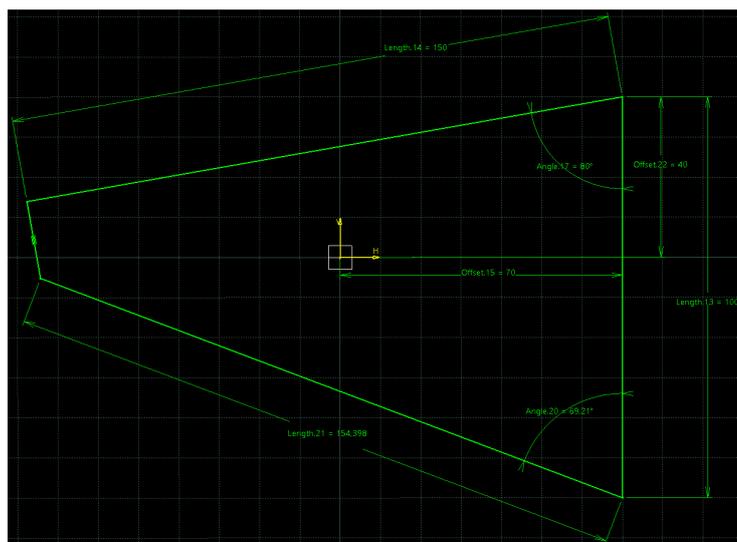


Figura 25 – Figura 2D com dimensões parametrizadas e restrições definidas – Fonte: autor

Esse método pode ser utilizado na realização de análises automatizadas e em simulações computacionais em larga escala. Os modelos parametrizados podem ser utilizados em *softwares* de elementos finitos para simulações de diferentes configurações de geometria, viabilizando a avaliação rápida de várias alternativas de projeto, o que pode levar a melhorias de desempenho e de eficiência nessa etapa (ANDERL; MENDGEN, 1995).

Uma outra aplicação interessante do *design* parametrizado na engenharia, sendo essa extremamente relevante para o problema levantado sobre o conforto dos equipamentos de proteção individual, é a personalização em massa. A capacidade de gerar projetos de forma adaptável permite atender às necessidades específicas de cada cliente, possibilitando o ajuste da geometria conforme as dimensões, formas, preferências estéticas e requisitos funcionais (HIEU et al., 2017), possuindo a impressão 3D como uma forte aliada dessa questão, já que ela permite criação de produtos sem a necessidade de moldes.

5.1.2 Ferramenta *Knowledge* do CATIA

Uma ferramenta vantajosa no escopo de *design* parametrizado é a *Knowledge* do CATIA. Essa ferramenta permite aos usuários incorporar o *design* paramétrico aos seus modelos 3D, utilizando-se de valores tabelados em um programa externo, como exemplo o Excel, para controlar valores paramétricos e, conseqüentemente, influenciar geometrias das mais diversas complexidades.



Figura 26 – Ferramenta *Knowledge* no espaço de trabalho do CATIA – Fonte: autor

No CATIA, é possível inicialmente criar um modelo parametrizado, no qual os parâmetros (comprimentos, raios, ângulos, *part numbers*, *constraints* etc.) são definidos de forma a tornar o modelo sensível a mudanças. A seguir, a ferramenta *Knowledge* permitiria a integração com tabelas do Excel, sendo que essas tabelas conteriam valores específicos que estariam relacionados aos parâmetros do modelo no CATIA. Assim, quando os valores tabelados são alterados, a ferramenta atualizaria automaticamente os parâmetros associados, resultando em mudanças automáticas na geometria do modelo de acordo com os novos valores da tabela. Essa ferramenta pode, ainda, incorporar lógica adicional para controle mais avançado, podendo, por exemplo, adicionar condicionais nas células para controlar diferentes estados do modelo com base em certas condições.

Essa capacidade de ajustar rapidamente valores na tabela permite a análise rápida de diferentes configurações do modelo, facilitando a otimização do *design* ou criando modelos que variam conforme condições.

A vantagem principal seria a flexibilidade e eficiência no ajuste de geometrias sem a necessidade de alterar manualmente cada dimensão no ambiente de modelagem. Dessa maneira, em um cenário mais alinhado com o caso em questão, o projeto de produtos com variados tamanhos baseado em medições corporais prévias de potenciais usuários, permite a criação de modelos 3D para fabricação rapidamente com base em um único arquivo pai.

Contudo, cuidados precisam ser tomados ao usar essa ferramenta. Ao criar um modelo no CATIA, é fundamental começar com um plano claro, identificando as principais dimensões e restrições. Deve-se organizar hierarquicamente o modelo, utilizando montagens e submontagens para uma estrutura mais gerenciável, além de ser necessário aplicar cuidadosamente as restrições geométricas e dimensionais para manter a integridade do *design*, evitando dimensões redundantes ou conflitantes, utilizando-se de parâmetros lógicos e documentando o modelo de maneira adequada e contínua. Outro aspecto é a importância da testagem de diferentes cenários para garantir um comportamento consistente do modelo.

5.2 Elementos estruturais

No contexto de análises estruturais no software ANSYS, existem vários elementos 3D disponíveis para modelar e analisar as mais diferentes estruturas. Esses elementos permitem uma representação do corpo de análise e sua resposta mecânica, levando em consideração diferentes carregamentos e condições de contorno. A escolha deles pode ser desafiadora, sendo importante conhecer pelo menos alguns para escolher um que possa trazer os melhores resultados conforme as condições da análise em questão (DUFOUR, 2003).

Ordem do elemento	Sólido 2D	Sólido 3D	Casca 3D	Elementos de linha
Linear	 PLANE42 PLANE182	 SOLID45 SOLID185	 SHELL63 SHELL181	 BEAM3/44  BEAM188
Quadrático	 PLANE82/183  PLANE2	 SOLID95/186  SOLID92/187	 SHELL93	 BEAM189

Figura 27 – Tipos de elementos mais comuns em análises estruturais do ANSYS – Adaptado de: (DUFOUR, 2003)

É possível observar que os elementos podem ser classificados conforme sua ordem (Fig. 27). Os exemplos em questão são de elementos de primeira ordem e elementos de segunda ordem (Fig. 28). A principal diferença se dá pelos de segunda ordem possuírem sua função de interpolação com funções de expoente de ordem 2, o que permite melhor caracterização de seus contornos (mais suavizados) e exigindo um nó intermediário. Enquanto os de primeira ordem tem função de interpolação linear, o que permite variação linear entre as arestas e não havendo a necessidade de nós intermediários (DUFOUR, 2003).

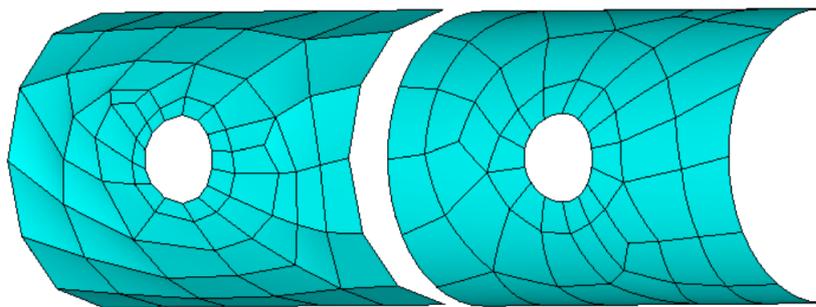


Figura 28 – Diferença entre elementos de primeira ordem (à esquerda) e de segunda ordem (à direita) – Adaptado de: (DUFOUR, 2003)

Além disso, também se observa na Figura 27 uma distinção entre a geometria do elemento: 2D, 3D, casca e linear. Essa distinção tem relação com as aproximações e considerações que podem ser feitas, tendo objetivo de representar a estrutura com maior eficiência. Resumindo, as principais características desses são (DUFOUR, 2003):

- **Elemento 2D:** É um elemento linear que se torna um sólido ao considerar ele como um eixo de uma peça e, somando a seção transversal de cada parte e as demais propriedades necessárias, faz-se útil para calcular estruturas como vigas ou outras estruturas que possuem uma simetria de eixo. O elemento *PLANE183* é a

versão mais complexa desse modelo, tendo oito nós para melhor interpolação e útil para deformação quase-incompressíveis e para materiais hiper-elásticos.

- **Elemento 3D:** Elementos desse tipo possuem sua geometria completamente definida pelos nós e são usados para modelar malhas volumétricas das mais diferentes formas e complexidades nos softwares dedicados para isso. O elemento *SOLID186* tem 20 nós para melhor interpolação, além de ser o mais qualificado para cálculos hiper-elásticos.
- **Elemento de casca:** O elemento de casca é do tipo superfície (entende-se que é, portanto, 2D), sendo que, com essa casca, é possível atribuir uma espessura constante para representar o objeto de análise, fazendo-se possível calcular tensões no plano, momentos fletores e torções, também conhecido como elemento de placa. O *SHELL181* é capaz de calcular longas deflexões e deformações plásticas, sendo útil também para materiais compósitos laminados e painéis sanduíche.
- **Elemento linear:** São simplificações ainda mais intensas que o elemento do tipo casca, e servem para representar estruturas longas e esbeltas, podendo retornar informações de carregamentos axiais, fletor, torsões e de cisalhamento, utilizando dos valores a respeito das seções transversais equivalentes a cada elemento.

5.3 Características da malha

Ao realizar uma simulação no ANSYS, a qualidade da malha é um fator importante a ser considerado, pois pode afetar diretamente a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos. Portanto, faz-se importante conhecer e considerar os fatores que influenciam essa qualidade, sendo alguns desses (STOLARSKI; NAKASONE; YOSHIMOTO, 2018) e (LIU; GLASS, 2013):

- **Tamanho adequado dos elementos:** A malha deve ser refinada o suficiente para capturar bem a geometria, assim, áreas com formas mais complexas devem ser bem modeladas. Por outro lado, regiões menos críticas podem ter elementos maiores para otimização da simulação.
- **Elementos com formas adequadas:** Os elementos da malha devem ter formas regulares e não devem ser excessivamente distorcidos, caso contrário, podem levar a imprecisões nos resultados ou até mesmo a falhas nas simulações. O ANSYS fornece várias métricas para avaliar a qualidade dos elementos, como a razão de aspecto, que é a relação entre o maior e o menor comprimento de um elemento.
- **Conexões e transições suaves:** A malha deve ter transições suaves entre diferentes regiões da geometria, sendo isso particularmente importante em áreas onde

ocorrem mudanças bruscas de tamanho, forma ou propriedades do material. Conexões adequadas entre os elementos garantem uma transmissão correta dos efeitos físicos e evitam resultados não-realistas.

- **Considerações de fronteira:** A malha deve ser refinada próxima às fronteiras ou interfaces onde ocorrem condições de contorno significativas, como forças, temperaturas ou fluxos. Isso garante que os efeitos dessas condições sejam adequadamente capturados e evita erros numéricos decorrentes da má resolução dessas.

Outro aspecto fundamental, no que tange a qualidade da malha, é o Fator de Qualidade. Esse fator é uma métrica que determina o quão longe a célula em questão está de uma forma de célula ideal, utilizando de alguns parâmetros para definir essas propriedades, sendo os principais desses parâmetros: razão de aspecto, não-ortogonalidade, razão de volume e simetria (SIMSCALE, 2020).

A razão de aspecto é uma razão entre o maior e o menor comprimento da célula, possuindo seu valor ótimo quando igual a 1 e seu cálculo é realizado de acordo com o tipo de elemento da análise (SIMSCALE, 2020).

Para hexaedro:

$$AR = \frac{\max(l_1, l_2, \dots, l_{12})}{\min(l_1, l_2, \dots, l_{12})} \quad (5.1)$$

Para tetraedro:

$$AR = \frac{\max(l_1, l_2, \dots, l_{12})}{2 \cdot \sqrt{6} \cdot r} \quad (5.2)$$

Onde r é o raio da maior esfera interna do elemento.

A não-ortogonalidade refere-se ao ângulo formado entre o vetor que conecta os centros de duas células adjacentes e a normal da face compartilhada por essas células. A medida de não-ortogonalidade varia de 0 (ideal) à 90 (pior). Um valor de 0 indica que a malha é perfeitamente ortogonal. Um elevado nível de ortogonalidade deve ser evitado, pois esse pode causar instabilidade numérica e até divergência, recomendando-se valores abaixo de 70 (SIMSCALE, 2020).

A razão do volume é a relação entre o volume das células adjacentes, sendo que, quanto menor, melhor tende a ser a simulação, possuindo valor mínimo igual a 1. Ela é computada por (SIMSCALE, 2020):

$$VR = \frac{\max(V_1, V_2)}{\min(V_1, V_2)} \quad (5.3)$$

A assimetria é o desvio entre o tamanho de célula ideal e o tamanho de célula existente, variando sua faixa de 0 (ideal) à 1 (pior), sendo que células altamente distorcidas não são preferidas devido à baixa precisão que causam nas regiões interpoladas. Seu equacionamento varia conforme o tipo de célula (SIMSCALE, 2020).

Para hexaedro:

$$S = \max\left(\frac{\theta_{max} - 90}{90}, \frac{90 - \theta_{min}}{90}\right) \quad (5.4)$$

Para tetraedro:

$$V_{ideal} = \frac{8 \cdot \sqrt{3} \cdot R^3}{27} \quad (5.5)$$

$$S = \frac{V_{ideal} - V_{célula}}{V_{célula}} \quad (5.6)$$

Também há relações entre o comprimento dos vértices e dos ângulos entre as células adjacentes. Todas essas relações são utilizadas para a criação do fator de qualidade da malha, distinguindo aquelas que podem ter bons resultados (mais próximos da realidade) daquelas que podem ter problemas numéricos, convergências para valores irrealis e até divergências.

A seguir, é possível visualizar uma malha que é considerada, de acordo com os aspectos antes descritos, estruturada. Dessa forma, essa é mais adequada para simulações estruturais, entregando resultados possivelmente mais realistas e de maior qualidade (Fig. 29).

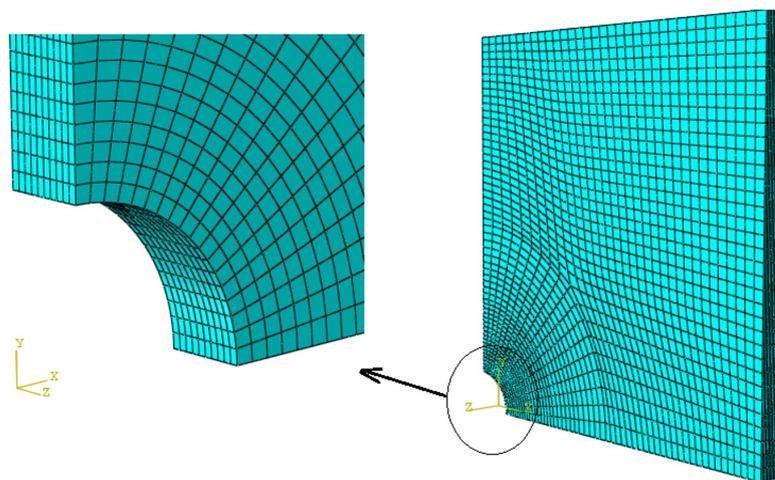


Figura 29 – Referência de malha bem estruturada para simulações estruturais estáticas – Adaptado de: (GOUASMI et al., 2015)

Além disso, o software provém a própria métrica para a qualidade dos elementos conforme sua ortogonalidade e simetria, visível na Figura 30.

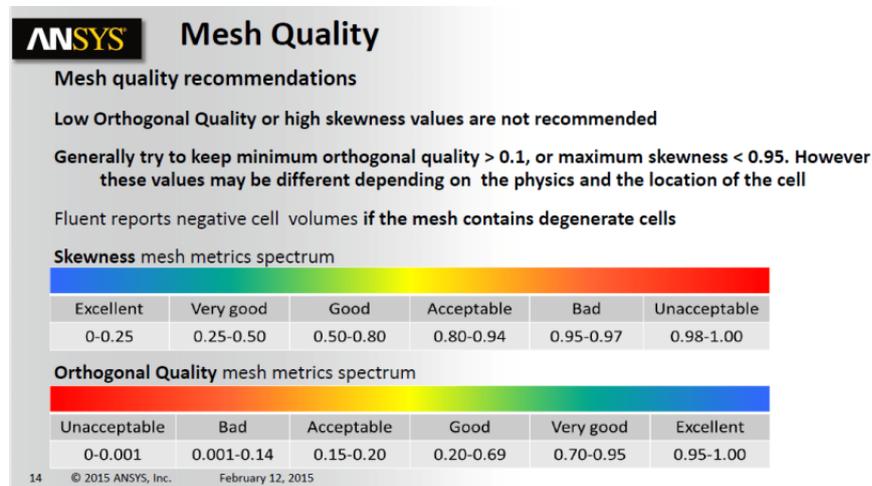


Figura 30 – Métrica do ANSYS para qualidade da malha – Fonte: (ANSYS, 2015)

5.4 Tipos de Resultados

Uma das *workbenches* para simulações no ANSYS é a "Static Structural". Nela, após a definição da geometria, malha, condições de contorno e de carregamentos, uma variedade de resultados pode ser obtidos para analisar o comportamento estrutural de um sistema sob cargas estáticas¹. Esses resultados fornecem informações sobre as deformações, tensões e outros aspectos relevantes para a análise estrutural. Assim, esses podem ser vistos como (ANSYS, 2006):

- **Deformações dimensionais:** As deformações dimensionais podem ser divididas em totais e direcionais. As totais são um resultado fundamental em análise estrutural, mostrando a magnitude das deformações sofridas pelo sistema em resposta às cargas aplicadas. Assim, essas deformações podem ser visualizadas como deslocamentos, onde é possível observar quais partes da estrutura se movem mais ou menos em relação à sua posição inicial. Enquanto as direcionais analisam as deformações nas direções x , y e z , que correspondem aos eixos cartesianos. Essas podem ser avaliadas separadamente, permitindo identificar como as diferentes partes da estrutura se deformam em cada direção.
- **Deformações adimensionais:** Diferente das deformações dimensionais, as adimensionais, representadas pela letra ϵ , são expressas como a relação entre o deslocamento e o comprimento original do material. Ela fornece informações sobre a

¹ Como ponderado na seção 5.5, o estudo será baseado em modelagem estática das forças que os EPI devem suportar.

deformabilidade e como ele responde às tensões aplicadas, podendo, a partir da análise das deformações adimensionais, determinar informações como: rigidez, capacidade de absorção de energia e capacidade de deformação de um material ou estrutura.

- **Tensões:** As tensões, representadas pela letra σ , são uma medida das forças internas que atuam em um material. Assim, é possível obter as tensões normais (tensões que atuam perpendicularmente à superfície do material) e as tensões de cisalhamento (tensões que atuam paralelamente à superfície do material).

Além dessas considerações, também existem as tensões e deformações de von-Misses. Esse critério é baseado na teoria de von Mises-Hencky, também conhecida como teoria da energia de cisalhamento ou teoria da energia de distorção máxima, que afirma que um material dúctil começa a escoar em um local onde a tensão de von Mises se torna igual ao limite de tensão (SYSTEMES, 2012). Assim, esse caso são valores representativos das tensões e deformações equivalentes em um material, sendo calculado com base nas tensões principais e permitindo determinar se a estrutura está sujeita a níveis de tensão críticos que podem levar a falhas ou deformações excessivas. Essa tensão pode ser expressa pela seguinte equação (MISES, 1913):

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (5.7)$$

Onde σ_1, σ_2 e σ_3 são as tensões principais da estrutura.

Assim, pode-se expressar um fator de segurança, ao utilizar essa teoria, da seguinte forma (SYSTEMES, 2012):

$$F_s = \frac{\sigma_e}{\sigma_{vM}} \quad (5.8)$$

Onde σ_e , como falado anteriormente, é a tensão de escoamento do material de análise. Assim, esse valor permite a análise dos objetos, ainda inserindo um fator de segurança antes da sua falha.

5.5 Modelagem Estática dos Esforços

Como já observado na seção 2.4, os cenários e condições de um acidente motociclístico são inúmeros. Todas essas variáveis interagem para determinar a intensidade dos acidentes, os danos materiais causados à motocicleta e outros veículos envolvidos, bem como as lesões sofridas pelo motociclista e eventuais passageiros. Assim, ao analisar um acidente motociclístico, diversas propriedades podem ser extraídas para entender melhor

o evento, sendo uma delas as forças de impacto. Essas forças são uma medida crucial, pois indicam a quantidade de energia envolvida na colisão e servem para determinar a gravidade das lesões nos envolvidos.

As informações das energias envolvidas são fundamentais para análises numéricas e experimentais, servindo como referência e condições para esses estudos, e permitindo a modelagem dos testes a serem feitos. Contudo, análises que envolvam o estudo de impacto² podem ter uma complexidade elevada, ou exigindo uma modelagem mais complexa para o caso de estudos numéricos, ou exigindo ambientes controlados e maquinários especializados para ensaios experimentais. Dessa maneira, uma forma de reduzir essa problemática é a simplificação dos casos para uma análise estática, tornando-se especialmente útil para estudos preliminares e/ou de viabilidade.

A modelagem estática é útil em algumas situações, como quando os efeitos dinâmicos são negligenciáveis ou quando a análise detalhada de resposta em frequência não é necessária. Nesses casos, os modelos estáticos podem fornecer uma representação adequada do sistema e permitir a observação de comportamentos estáticos, como cargas aplicadas, distribuição de tensões ou deformações (AKIN, 2019).

Assim, uma das formas de considerar uma modelagem estática para um problema que envolve carregamentos dinâmicos, mais especificamente questões de impacto, é através do uso do "Fator de Impacto", sendo possível obter uma boa aproximação para a deflexão e tensão máxima esperada (AKIN, 2019). Nesse caso, é considerado que um corpo atingido por um outro, que tem massa e velocidade conhecida, pode ter sua deformação modelada através de uma força estática. Porém, para isso, a força deve ser incrementada através de um fator proveniente de reações de impactos. Esse modelo pode ser visto na Figura 31.

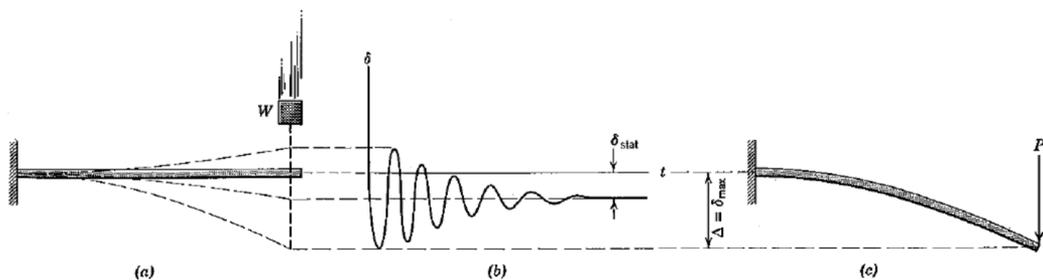


Figura 31 – Força estática \mathbf{P} que aproxima os efeitos decorrentes da colisão de um objeto \mathbf{W} em queda – Fonte: (AKIN, 2019)

Para um objeto em queda, solto de uma altura h , como visto na Figura 31, o fator de impacto é:

² Ou seja, uma análise dinâmica do problema.

$$n = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h\eta}{\delta_{estático}}} \quad (5.9)$$

Para um objeto que se colide com outro, movendo-se horizontalmente, e com uma velocidade v , o fator de impacto é:

$$n = \sqrt{\frac{\eta v^2}{\delta_{estático}}} \quad (5.10)$$

Onde:

n : Fator de Impacto;

h : Altura;

η : Eficiência da colisão;

$\delta_{estático}$: Deflexão do corpo devido a uma força estática \mathbf{P} ;

v : Velocidade.

Nesse contexto, o Fator de Impacto, para corpos rígidos, é sempre igual ou maior a 2, não sendo incomum esse ser um valor entre 10 e 100 (AKIN, 2019).

Em geral, o $\delta_{estático}$ pode ser modelado através da seguinte relação:

$$\delta_{estático} = W/k \quad (5.11)$$

Onde o k é a rigidez do membro, no ponto de impacto e na direção que esse ocorre (AKIN, 2019).

Portanto, faz-se necessário conhecer a força de impacto média, sendo que essa pode ser modelada de acordo com parâmetros da massa do objeto, a velocidade que ele está e as condições do impacto³, e é definida pela equação:

$$F_{média} = \frac{mv}{t} \quad (5.12)$$

Onde $F_{média}$ é a força média da colisão a ser multiplicada pelo Fator de Impacto, e t é o tempo de duração do impacto, visto que esse tempo pode ser definido conforme a equação a seguir (RECHNITZER; POWELL; SEYER, 2001):

$$t = \frac{2s}{v} \quad (5.13)$$

³ Pode ser a duração ou a distância desse.

Sendo s um fator que indica a deformação geral da estrutura. Esse fator pode ser estimado conforme certas previsões e refinado conforme o prosseguimento da análise.

Assim, esse método pode ser útil para a modelagens e análises de EPI para motociclistas, sejam por simulação, sejam por ensaios experimentais, permitindo *setups* mais simples, possibilitando a predição das forças envolvidas apenas fazendo considerações de alguns cenários de colisões nos quais esses equipamentos se mostram eficientes na redução de danos aos seus usuários.

Porém, é necessária que uma consideração seja feita para esse tipo de análise, sendo essa que há apenas um único impulso de curto período de duração acontecendo, portanto, efeitos de longa duração, como arrastamentos, não são analisados. Além disso, também não pode considerar estudos de fadiga para esse caso ([DATTAKUMAR; GANESHAN, 2017](#)).

Parte III

Metodologia

6 Modelagem e Prototipagem dos EPI

Este capítulo apresenta a metodologia da concepção dos projetos e protótipos dos diferentes Equipamentos de Proteção Individual desenvolvidos, passando pelos *designs* de referência de produtos do mercado, avançando nos modelos 3D com seus parâmetros e terminando nos protótipos desenvolvidos para análises, testes e ensaios.

6.1 Referências do mercado

Equipamentos de Proteção Individual para motociclistas são produtos amplamente presentes no mercado, havendo uma variedade desses para oferecer segurança e proteção aos usuários de motocicleta. Dessa forma, para estudar a viabilidade da fabricação desses por métodos de manufatura não convencionais, ou seja, Manufatura Aditiva, um ponto de partida seria a concepção de *designs* seguindo a linha desses que já são comercializados.

Assim, foram observados diversos produtos disponíveis no mercado a fim de compreender sua proposta e usar como referência e inspiração para projetos de novas peças, sendo essas modeladas seguindo a filosofia do *design* parametrizado antes apresentada.

6.1.1 Protetor de perna

Assim como os braços, as pernas dos usuários de motocicletas estão expostas de maneira que simples colisões podem causar diversos prejuízos a esses membros, ocorrendo até mesmo fraturas e decepamentos (ALICIOGLU et al., 2008). Isto posto, devido a equivalência desses membros, os equipamentos são usualmente projetados de forma semelhante, protegendo, especialmente, regiões de canela e joelho de seus usuários, como visto na Figura 32.



Figura 32 – Exemplo de protetor de perna para motociclistas – Fonte: (TRADEINN, 2023)

6.1.2 Protetor de braço

Os braços dos motociclistas são áreas expostas e suscetíveis a lesões até mesmo nos mais simples acidentes motociclísticos (ALICIOGLU et al., 2008). Assim, os equipamentos são usualmente modelados de forma a proteger as partes posteriores e exteriores desses membros, especialmente na área do cotovelo e do antebraço¹ (Fig. 33), servindo como interface de contato em caso de pancadas, arrastamentos e os outros possíveis tipos de acidentes.



Figura 33 – Exemplo de protetor de braço para motociclistas – Fonte: (MXPARTS, 2023)

6.2 Modelos de referência

Além de observar soluções de mercado para esses equipamentos, também teve como base um estudo científico cujo objetivo era a criação de modelos de EPI para serem fabricados por Manufatura Aditiva. Esse estudo desenvolveu os protótipos que serviram como base para o projeto em questão, sendo tais concedidos pelo autor para livre uso (ARAUJO, 2023).

Assim, foram utilizados modelos de produtos como citado anteriormente, sendo esses os equipamentos: protetor de braço (Fig. 34) e protetor de perna (Fig. 35).

¹ Regiões usualmente usadas como apoio em caso de quedas e proteção do rosto e tronco em diversas situações (OLUWADIYA et al., 2004).



Figura 34 – Protótipo base do conjunto protetor de braço para motociclistas – Fonte: (ARAUJO, 2023)



Figura 35 – Protótipo base do conjunto protetor de perna para motociclistas – Fonte: (ARAUJO, 2023)

Os modelos criados por ARAUJO (2023), diferente dos vistos no mercado, possuem geometrias superficiais simples. Isso acontece pelo fato que esses detalhes possuem um fator mais estético do que o de elevar aspectos de proteção de seus usuários. Portanto, essa questão de um *design* que pondere aspectos de estética não foram considerados para esse estudo.

6.3 Criação dos modelos

Um projeto bem executado de um produto consiste, geralmente, de um *design* iterativo, ou seja, exige reavaliações do *design* conforme necessidades (SAVAGE, 1996). Assim, os modelos verificados (Fig. 34 e 35) serviram como base visual para o projeto em questão e, ao observar esses, buscou-se criar versões dos EPI que se adaptassem às medidas catalogadas conforme Figura 7, apresentada na seção respectiva a modelos corporais (3.4.1).

A modelagem do protetores de perna e de braço seguiram metodologias muito semelhantes, sendo essa descrita pela seguinte ordem:

1. **Definição das medidas à serem parametrizadas:** Definir quais serão as dimensões corporais que serão observadas e que servirão como parâmetro para construção da geometria do protetor.

2. **Criação da tabela:** Criação da tabela com os raios, suas respectivas distâncias e demais dimensões que foram observadas em relação à uma referência fixa (o solo para o protetor de perna e o cotovelo para o protetor de braço).
3. **Criação das dimensões-base:** Criação do *sketch* base no CATIA com os raios, suas respectivas distâncias e demais dimensões consideradas.
4. **Parametrização das medidas:** Uso da ferramenta *Knowledge* do CATIA para parametrizar as medidas e referenciá-las corretamente com as dimensões tabeladas.
5. **Criação dos quartos de círculos:** Criação dos quartos de círculo usando os raios respectivos.
6. **Criação da superfície:** Criação da superfície usando cada um dos quartos de círculo.
7. **Criação das abas:** Criação das abas laterais com dimensões parametrizadas que servem para fixação do EPI ao corpo da pessoa.
8. **Criação do *part model*:** A superfície criada recebe uma espessura respectiva à camada interna do protetor (camada de EVA que permite melhor interface do EPI com o membro, além de melhorar o conforto sensorial-tátil).
9. **Criação do núcleo:** Usando a face exterior da camada de EVA, é modelado uma nova parte do protetor com uma espessura a ser definida, sendo essa o núcleo a ser fabricado por Manufatura Aditiva.
10. **Criação do reforço:** Na sequência, sendo esse importante apenas para as simulações, é repetido o processo de replicar a face mais externa do EPI (núcleo impresso) para a criação da camada de reforço.
11. **Criação do modelo corporal:** Por último, de forma semelhante ao item anterior, é usado a face interna do equipamento para a criação de um modelo de perna ou braço que simulará um membro com encaixe ergonômico ao equipamento de proteção.

As Figuras 36 e 37 mostram, respectivamente, esse fluxo de processo para criação dos modelos de protetor de perna e protetor de braço.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Pessoa	R_ankle (mm)	H_ankle (mm)												
2	1	37	90	40	120	46	240	50	300	60	360	65	425	70	470
3	2	40,7	99	44	132	50,6	264	55	330	66	396	71,5	467,5	77	517
4	CATIA_PEGUENO	30	120	38	200	58	338	55	420	59	470	62	510	67	540
5	CATIA_MEDIO	35	137	44	207	61	350	58	427	65	480	66,5	530	73	565
6	CATIA_GRANDE	39	145	47	215	63	395	59,5	430	72	485	72,5	535	80	565
7	CATIA_percent_5_fem	25	100	35	170	53	285	48	365	55	423	58	450	62	485
8	CATIA_percent_50_mas	30	122	40	210	61	355	56	435	63	505	66,5	550	71	575
9	CATIA_percent_95_mas	32	130	43	225	66	365	59	465	67,5	543	70	580	78	615

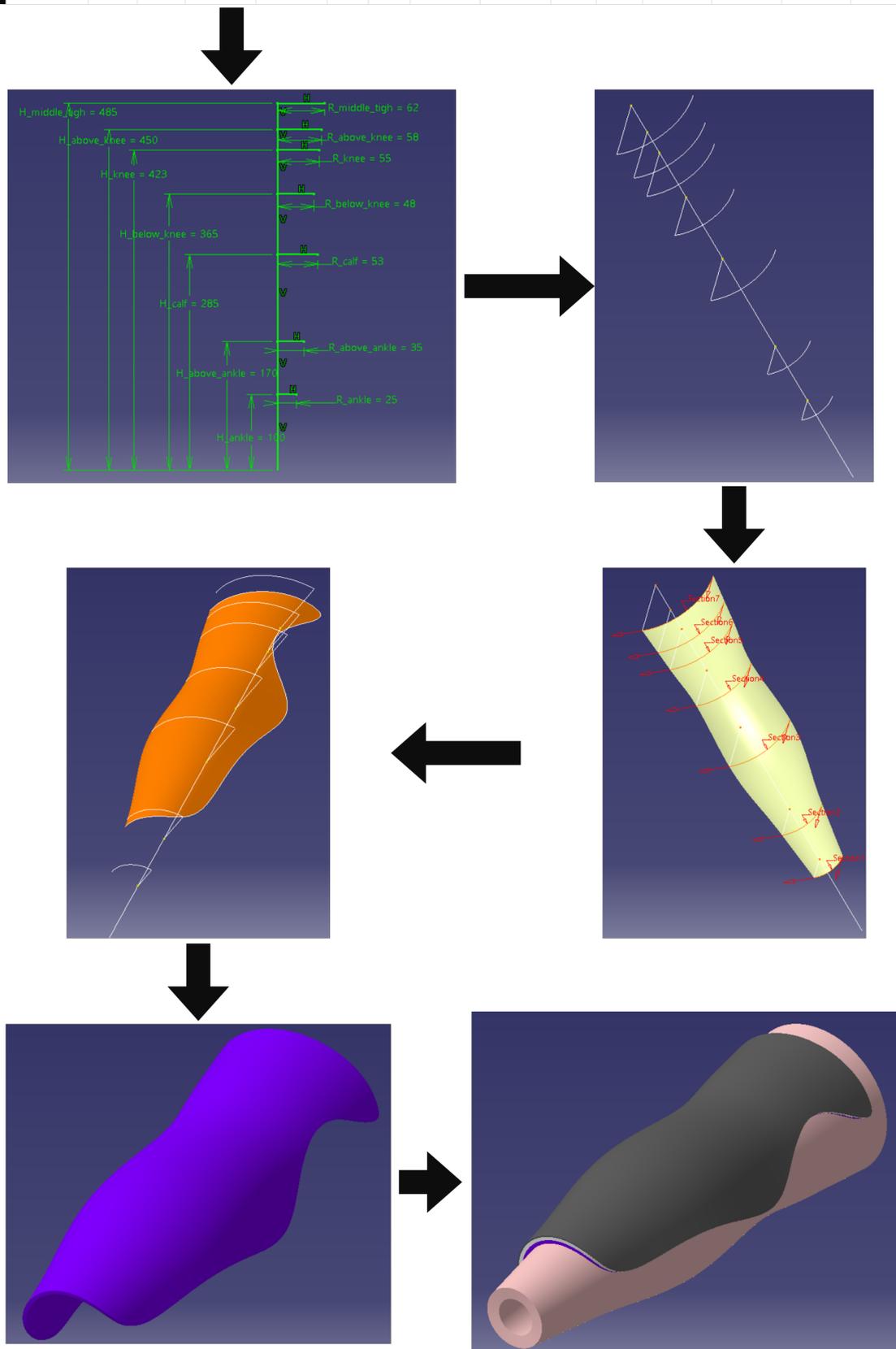


Figura 36 – Fluxo de modelagem do protetor de perna – Fonte: autor

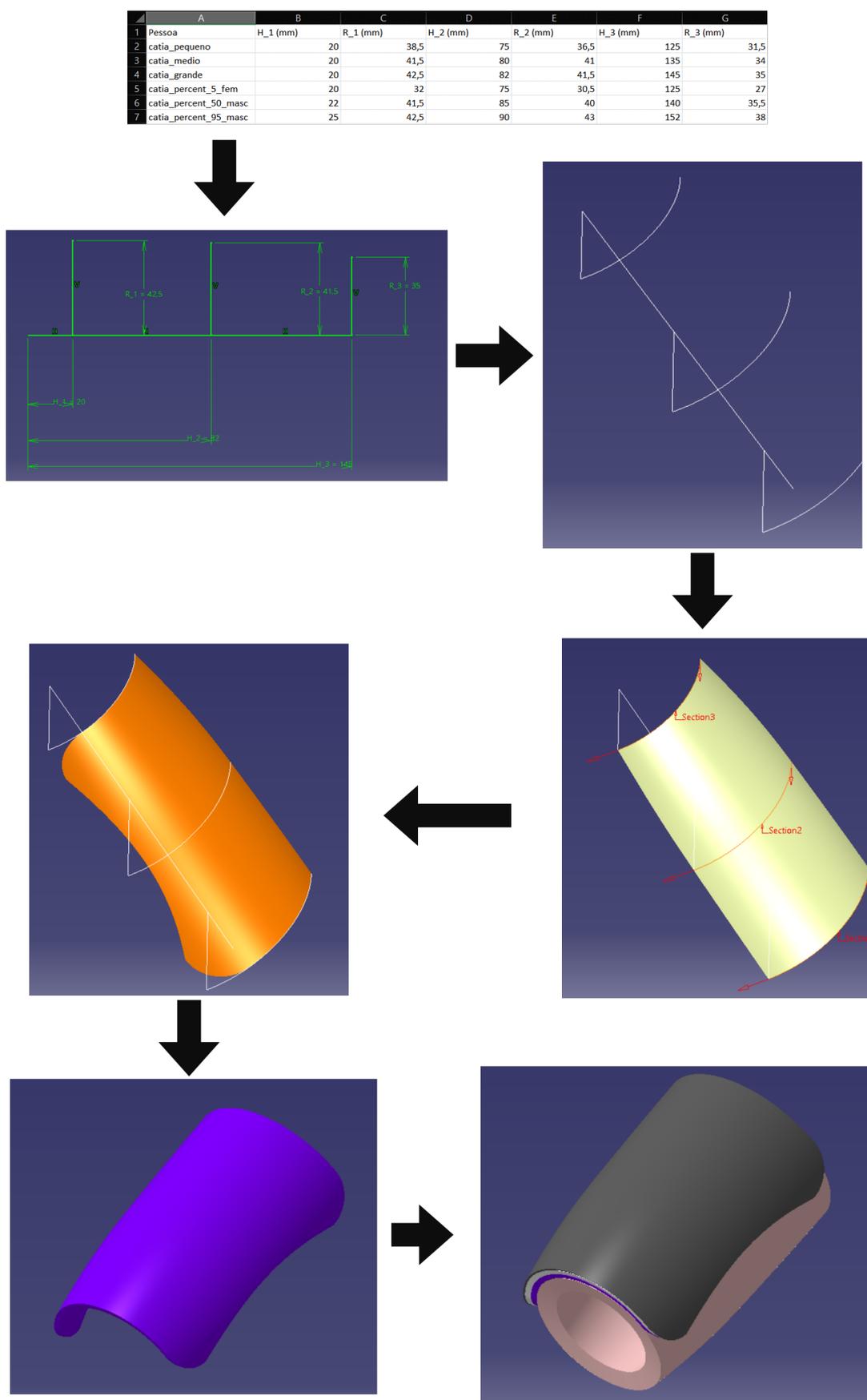


Figura 37 – Fluxo de modelagem do protetor de braço – Fonte: autor

Após aplicar a metodologia exposta, o resultado é um modelo de equipamento de proteção individual para uma determinada região corporal com sua geometria adaptável a qualquer possível usuário, sendo necessário apenas adquirir, via escaneamento, as dimensões corporais dessa pessoa e usá-las na tabela criada. Essa metodologia permite a criação dos equipamentos individuais de forma veloz, exigindo apenas extrair o modelo respectivo ao núcleo impresso no padrão stl e exportá-lo para um software de fatiamento e fabricá-lo via Manufatura Aditiva.

Na sequência, é possível observar em detalhes os equipamentos projetados nesse estudo na Figura 38, assim como as sucessivas camadas que os compõe.



Figura 38 – Modelos finais dos protetores - a) Protetor de perna b) Protetor de braço –
Fonte: autor

6.4 Sugestão de modelagem de protetores de tórax e costas

Considerando a extensão da análise envolvida neste trabalho, que abrange a modelagem dos equipamentos, a seleção de materiais, a avaliação da espessura e as simulações, foi tomada a decisão de não realizar o desenvolvimento do protetor de tórax e protetor de coluna. Entretanto, procurou-se indicar uma abordagem para a sua modelagem. Esta abordagem pode ser realizada utilizando técnicas semelhantes às descritas anteriormente. Dessa forma, é necessário buscar uma maneira de referenciar as medidas desses membros, utilizando elementos de reta simples, como a largura dos ombros, peito e cintura, junto com suas respectivas alturas em relação a um ponto de referência.

Uma sugestão é desenhar circunferências ou elipses que se adaptem à geometria média de um corpo, parametrizando todas as dimensões e utilizando tabelas para listar essas medidas para cada modelo em questão. Posteriormente, deve-se criar superfícies complexas utilizando esses planos como base.

Para validar esses modelos, pode-se adotar uma abordagem semelhante a que será demonstrada a seguir para dimensionar esses equipamentos para diferentes grupos de pes-

soas. Essa metodologia busca assegurar a eficácia e a adequação dos protetores de tórax e coluna para uma ampla gama de usuários, garantindo a sua efetividade e conforto. Este processo de validação envolverá análises mais aprofundadas, como simulações computacionais e, quando possível, testes experimentais, para garantir a eficácia e segurança dos protetores propostos.

6.5 Dimensões Corporais

6.5.1 Escaneamento 3D

Como já explicado anteriormente no presente estudo, a variedade de dimensões corporais e a pouca disponibilidade de tamanhos desses produtos representam um desafio para a utilização dos EPI por motociclistas e passageiros. Dessa forma, os EPI propostos neste estudo se utilizam da tecnologia de *design* parametrizado para superar esse problema. Porém, para essa solução alcançar o máximo de sua eficiência, é necessária a presença das dimensões corporais transferidas para o *software* de modelagem 3D de preferência.

Uma das formas mais eficientes de se adquirir essa informação, tendo qualidade, formas complexas e facilidade, é através do uso de equipamentos de escaneamento 3D. O *scanner* da empresa 3D Systems, chamado de iSense™ 3D Scanner (Fig. 39), é uma opção viável para isso, tendo esse equipamento como vantagem a sua portabilidade, podendo ser facilmente transportado e manipulado por qualquer pessoa, além de ser integrado a um dispositivo do tipo *tablet*, permitindo a visualização instantânea do membro a ser escaneado, facilitando o trabalho (3DSYSTEMS, 2014). Entretanto, esse equipamento não foi adquirido em tempo hábil para esse projeto, mantendo apenas sua indicação como ferramenta viável.



Figura 39 – *Scanner* 3D passível de ser utilizado acoplado a um *tablet* - Modelo iSense™ 3D Scanner – Fonte: (3DSYSTEMS, 2014)

6.5.2 Uso de Dummies

Apesar da ausência da ferramenta adequada para adquirir as medidas corporais de possíveis usuários, ainda sim, buscou-se uma forma de analisar como esses equipamentos se adequam à diferentes biotipos. Dessa forma, usou-se os Dummies² do CATIA, sendo que eles apresentam uma ferramenta para selecionar o percentil desejado, mudando as diferentes dimensões corporais desse modelo humano.

Para observar a possibilidade desses equipamentos atenderem, ao menos, 90% da população, buscou-se representar os equipamentos modelados para três tamanhos distintos. Para isso, foram adquiridas as dimensões para o protetor de perna e para o protetor de braço adaptados aos humanos usando: percentil 5 feminino (pequeno), percentil 50 masculino (médio) e percentil 95 masculino (grande). As dimensões paramétricas dos equipamentos foram colocadas nas tabelas respectiva aos modelos de protetor e foram gerados esses de forma conforme. A Figura 40 apresenta um desses modelos humanos com o equipamento adaptado à sua dimensão. Já a Figura 41 apresenta as tabelas com as dimensões paramétricas dos modelos de EPI (protetor de braço e protetor de perna) para cada caso, sendo que essa tabela é o que permite a criação e modelagem desses equipamentos de forma a se adaptar a diferentes biotipos.

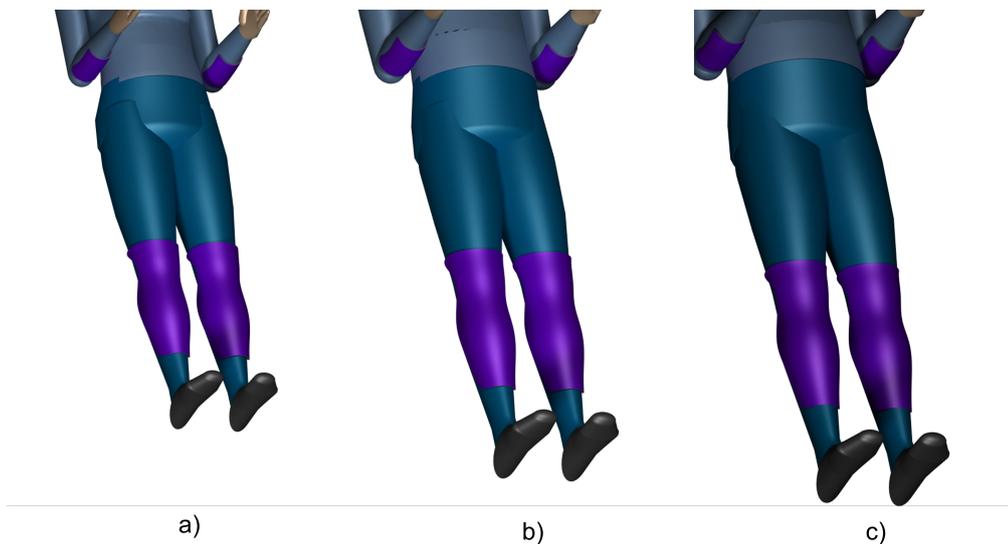


Figura 40 – Dummies usando protetores adaptados as suas dimensões - a) Percentil 5 feminino b) Percentil 50 masculino c) Percentil 95 masculino – Fonte: autor

² Elemento do CATIA que simulam um corpo humano, permitindo análises de ergonomia.

Protetor de perna														
Tamanho	H ₁ (mm)	R ₁ (mm)	H ₂ (mm)	R ₂ (mm)	H ₃ (mm)	R ₃ (mm)	H ₄ (mm)	R ₄ (mm)	H ₅ (mm)	R ₅ (mm)	H ₆ (mm)	R ₆ (mm)	H ₇ (mm)	R ₇ (mm)
Percentil 50 (masculino)	25	100	35	170	53	285	48	365	55	423	58	450	62	485
Percentil 5 (feminino)	30	122	40	210	61	355	56	435	63	505	66,5	550	71	575
Percentil 95 (masculino)	32	130	43	225	66	385	59	465	67,5	543	70	580	78	615

Protetor de braço						
Tamanho	H ₁ (mm)	R ₁ (mm)	H ₂ (mm)	R ₂ (mm)	H ₃ (mm)	R ₃ (mm)
Percentil 50 (masculino)	20	32	75	30,5	125	27
Percentil 5 (feminino)	22	41,5	85	40	140	35,5
Percentil 95 (masculino)	25	42,5	90	43	152	38

Figura 41 – Tamanho dos EPI adaptados para cada percentil – Fonte: autor

Utilizando-se dessa modelagem, foi possível verificar o comportamento adequado das superfícies dos equipamentos, sendo que as faces principais desses se adaptaram ao membro ao utilizar medidas corretas, apresentando um encaixe ergonômico e, por consequência, pode sugerir um melhor conforto em sua utilização.

6.6 Protótipos fabricados

Estando em posse dos modelos desenvolvidos neste estudo, foi possível fabricá-los utilizando a Manufatura Aditiva, através do método FDM, apresentado na seção 4.2.3.1, a fim de obter protótipos e avaliar alguns de seus aspectos. O núcleo impresso é a parte indicada nos modelos 3D vistos nas figuras anteriores. Escolheu-se modelos de protetores de perna e de braço adaptados para os tamanhos pequenos, médios e grandes³ para impressão. Além disso, optou-se por imprimir com o material PLA transparente devido a questões de disponibilidade. Essa impressão servirá para validação e análise de diversos aspectos desses protetores, como questões de *design*, possibilidade de impressão e outras características pertinentes.

6.6.1 Impressora

A fabricação dos protótipos se deu utilizando a impressora CR-30, da Creality. Como já apresentado, uma vantagem desse modelo é a presença de um dos eixos com dimensão infinita devido ao uso de uma esteira. Esse aspecto é importante por conta do elevado comprimento, principalmente, do protetor de perna. Além disso, esse tipo de impressora permite a fabricação de diversos produtos em sequência, favorecendo aspectos comerciais no qual vários produtos poderiam ser fabricados com apenas um Código-G. Logo, é possível verificar esse equipamento atuando na Figura 42.

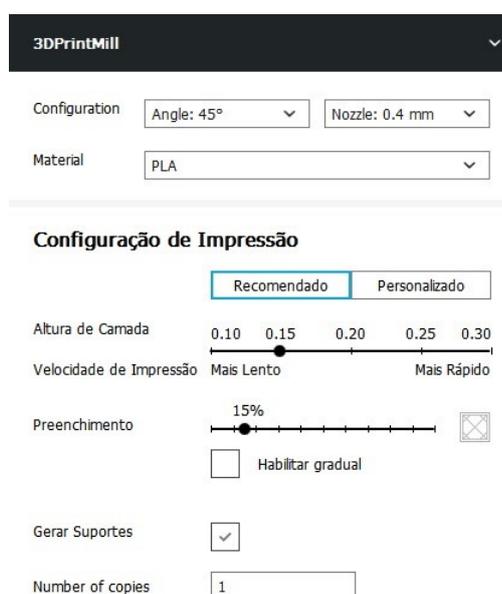
³ Esse aspecto de dimensão será melhor explicado a frente.



Figura 42 – Impressora CR-30 da Creality realizando a impressão de um protótipo de protetor – Fonte: autor

6.6.2 Setup de impressão

Os modelos protótipos foram levados ao *software* de fatiamento e os parâmetros de impressão foram feitos conforme recomendação do fabricante do filamento (3DLAB, 2017), que também são visíveis na Tabela 2. Além disso, utilizou-se como premissa algumas informações do estudo de CARVALHO (2019), que também utilizou o mesmo material. Ademais, as informações foram todas inseridas aos modelos fatiados no *software* (Fig. 44). Após isso, foi dado início ao processo de impressão dos protótipos.



3DPrintMill

Configuration Angle: 45° Nozzle: 0.4 mm

Material PLA

Configuração de Impressão

Recomendado Personalizado

Altura de Camada 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30

Velocidade de Impressão Mais Lento Mais Rápido

Preenchimento 15% Habilitar gradual

Gerar Suportes

Number of copies 1

Figura 43 – Parâmetros de impressão – Fonte: autor

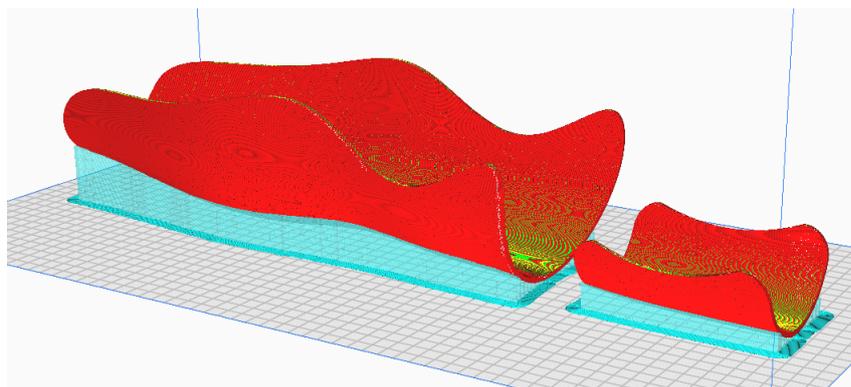


Figura 44 – Protótipos fatiados (tamanho médio) – Fonte: autor

Os tempos de impressão dos protótipos, a massa e o comprimento de material utilizado podem ser vistos na Tabela 5.

EPI	Tempo	Massa [g]	Comprimento [m]
Protetor de perna (pequeno)	02d 01h 43m	250	88
Protetor de braço (pequeno)	09h 37m	37	13
Protetor de perna (médio)	02d 14h 15m	316	110
Protetor de braço (médio)	11h 15m	51	18
Protetor de perna (grande)	02d 23h 01m	372	130
Protetor de braço (grande)	14h 55m	73	26

Tabela 5 – Características dos protótipos indicadas pelo software

6.6.3 Peças impressas

Os núcleos dos protótipos de protetor de perna e protetor de braço foram fabricados com êxito, demonstrando sua viabilidade. As partes impressas apresentaram aparência suave, bons contornos e resistência aparente satisfatória. Além disso, também foi verificada a consistência e qualidade da geometria impressa quando comparada àquela que foi produzida via CAD. As Figuras 45 à 47 apresentam esses produtos, enquanto a Tabela 6 apresenta a análise de suas espessuras.



Figura 45 – Protótipos impressos (pequeno) – Fonte: autor



Figura 46 – Protótipos impressos (médio) – Fonte: autor

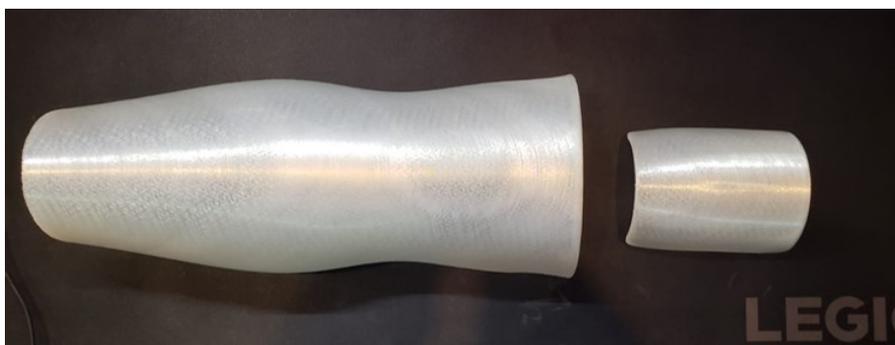


Figura 47 – Protótipos impressos (grande) – Fonte: autor

EPI	Espessura média [mm]	Dp
Protetor de perna (pequeno)	3,03	±0,06
Protetor de braço (pequeno)	3,05	±0,07
Protetor de perna (médio)	3,04	±0,03
Protetor de braço (médio)	3,06	±0,05
Protetor de perna (grande)	3,09	±0,06
Protetor de braço (grande)	3,10	±0,08

Tabela 6 – Espessura dos protótipos fabricados

7 Análise Numérica

A análise numérica é um artifício importante na concepção de novos produtos de engenharia que estarão submetidos a carregamentos mecânicos consideráveis. Assim, esta seção tem como objetivo descrever como procedeu a simulação no software ANSYS para a análise numérica do protetor, além das diversas características intrínsecas a esse processo. Dessa forma, optou-se que essa análise fosse realizada com os equipamentos na sua variação de tamanho médio.

7.1 Cenários de simulação

Por conta da complexidade de analisar experimentalmente um equipamento de proteção como esse, optou-se por fazê-lo em um modelo mais simples e factível, conforme limitações e que será melhor descrito posteriormente. Assim, considerou-se que as simulações seriam feitas em 3 cenários, para melhor análise e caracterização, permitindo uma integração da análise numérica com a análise experimental, possibilitando uma melhor comparação. Esses cenários são: Cenário Experimental, Cenário Real 1 e Cenário Real 2.

7.1.1 Cenário Experimental

O Cenário Experimental, que também pode ser descrito como cenário de referência, teve como objetivo realizar uma simulação de tal forma que seja possível replicá-la experimentalmente. Assim, esse cenário serviu para validar modelos, verificar comportamento dos equipamentos de proteção, fazer previsões, refinamentos e otimizações, permitindo que os demais cenários sejam mais eficientes e possibilitem uma análise mais profunda e realista.

Dessa forma, esse foi pensado em modelar o cenário desse equipamento sendo testado em uma máquina para ensaio de flexão de três pontos, semelhante a análise feita de painéis sanduíche fabricados por Manufatura Aditiva no estudo (CARVALHO, 2019) (Fig. 48), com o objetivo de analisar as deflexões e o comportamento do modelo ensaiado.



Figura 48 – Ensaio de flexão 3 pontos de painel sanduíche – Adaptado de: (CARVALHO, 2019)

7.1.2 Cenário Real 1

O Cenário Real 1 dessa vez buscou uma análise que se aproxime mais de um modelo condizente com a utilização desses equipamentos. Nesse, o EPI será analisado estando anexado a um modelo corporal¹ (Fig. 49) e a força será modelada com a mesma ferramenta do Cenário Experimental, em que será avaliado as deformações da peça, as tensões, o nível de transmissibilidade dos esforços para os modelos de membros e como esse ficam esses aspectos no membro sem a presença do protetor.

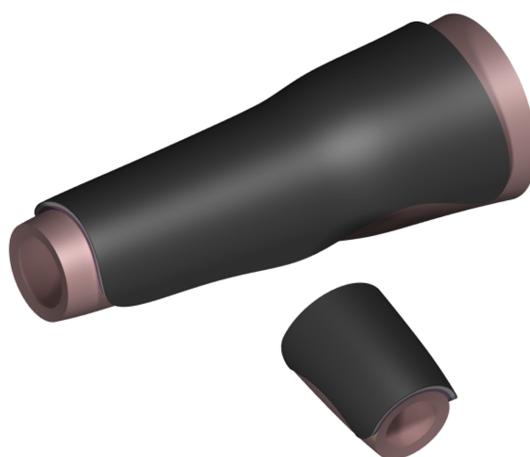


Figura 49 – Protetores integrados a modelos corporais – Fonte: autor

7.1.3 Cenário Real 2

Por fim, o Cenário Real 2 será semelhante ao Cenário Real 1 no que diz respeito a presença do membro corporal, porém, nesse caso, a força será modelada como uma

¹ Apresentado na seção 6.5.

pressão uniforme sobre a face principal do protetor equivalente às forças aplicadas no caso anterior, verificando, novamente, as deformações, as tensões, a transmissibilidade dessa força e a redução desses aspectos na presença do protetor.

7.2 Definição das forças

Como foi apresentado na Seção 2.4, existe uma variedade de acidentes motociclísticos, o que indica que há uma variedade de esforços envolvidos possíveis². Conjuntamente, também foi apresentado uma forma de transformar esforços provenientes de impactos em uma força estática na Seção 5.5, o que é capaz de simplificar a análise e trazer aspectos aproximados de deformações e tensões. Além disso, para análises numéricas e experimentais de EPI motociclísticos, faz-se necessário determinar carregamentos que representem as condições nas quais esses sejam exigidos mecanicamente.

Dessa forma, considerando esses aspectos mencionados, demanda-se a definição de condições possíveis que esses equipamentos possam ser submetidos, tendo como objetivo verificar seu comportamento nesses casos, demonstrando, assim, a eficiência (ou não-eficiência) de proteção.

Isto posto, optou-se por verificar quatro condições de solitação mecânica baseando-se em ambientes e condições de operação que motociclistas estejam inseridos, indo desde eventos mais simples até situações mais extremas, de forma respectiva.

7.2.1 Condição de carregamento 1

A primeira condição de carregamento considerada, cuja sua força será chamada de F_{c1} , foi definida considerando uma colisão simples da perna do motociclista a um objeto solto na pista. As condições serão que a motocicleta estará a uma velocidade v de 40 km/h , esse objeto tem uma massa m de 1 kg e a colisão durou 0,4 s . Assim, utilizando a equação 5.12, encontrou-se que a força média F_{media} é de 27,77 N . Além disso, considerando um fator de impacto n de 10, valor plausível segundo (AKIN, 2019), tem-se que a F_{c1} é de 278 N . Dessa forma, essa força será aplicada ao equipamento no modelo de elementos finitos nos três cenários antes citados.

7.2.2 Condição de carregamento 2

Para a segunda condição, observou-se uma situação em que o objeto é cinco vezes mais pesado do que na condição anterior, possuindo uma massa m de 5 kg , a motocicleta está a uma velocidade v igual ao caso anterior, assim como a duração e o fator de impacto. Dessa forma, a força F_{c2} considerada foi de 1.388 N .

² Desde colisões leves e suaves, até colisões extremas.

7.2.3 Condição de carregamento 3

Já para a terceira condição, considerou-se a motocicleta agora em um acidente cuja colisão da perna do usuário do EPI ocorreu a um carro, assim, a massa m da colisão será a do sistema moto/motociclista, considerado de 250 kg . Ademais, optou-se por observar a motocicleta a uma velocidade v de 25 km/h , um tempo de colisão t_i de $0,8 \text{ s}$ e um fator de impacto n de 2^3 . Assim, a força F_{c3} será igual a 4.340 N .

7.2.4 Condição de carregamento 4

Para a quarta e última condição de carregamento, considerou-se as características da colisão anterior, porém, agora, a velocidade v considerada foi o dobro (50 km/h). Portanto, a força F_{c4} observada é de 8.681 N .

Dessa forma, todas as condições de carregamento descritas e suas respectivas características podem ser vistas na Tabela 7.

Condição	$v \text{ [km/h]}$	$m \text{ [kg]}$	$t_i \text{ [s]}$	$F_{med} \text{ [N]}$	n	$F_{ci} \text{ [N]}$
1	40	1	0,4	27,77	10	278
2	40	5	0,4	138,8	10	1.388
3	25	250	0,8	2.170	2	4.340
4	50	250	0,8	4.340	2	8.681

Tabela 7 – Condições de carregamento consideradas

7.3 Materiais

As tensões e as deformações encontradas nas simulações serão observadas tanto nos EPI, quanto nos modelos que representam um membro corporal. Portanto, é necessário definir os materiais que compõe esses membros nos modelos dentro do ANSYS a fim de encontrar resultados válidos. Dessa forma, esses foram definidos conforme revisão bibliográfica, sendo os modelos corporais conforme o osso apresentado na seção 3.5 e os materiais poliméricos de impressão conforme a Tabela 1 apresentadas na seção 4.2.5.

7.4 Variáveis de estudo

Os EPI modelados neste estudo, apresentados anteriormente, apresentam diversas variáveis a serem analisadas, dentre elas, têm-se:

³ Tempo de colisão maior e fator de impacto menor por conta da uma consideração que essa é a mais elástica (AKIN, 2019).

1. **Tamanho do EPI:** Os EPI, por terem suas dimensões parametrizadas e adaptáveis a diferentes biotipos, podendo ter qualquer dimensão.
2. **Material de impressão utilizado:** Observou-se as propriedades mecânicas do ABS, PLA e PETG, sendo esses possíveis candidatos.
3. **Espessura da camada impressa:** Os núcleos das partes impressas dos protetores podem ter espessuras variáveis.
4. **Reforço:** A presença (ou não) de um reforço de material compósito na face externa.
5. **Cenário de carregamento:** Foram definidos três cenários de carregamentos para avaliação numérica, buscando validar a eficiência do equipamento de diferentes maneiras.
6. **Forças envolvidas:** Foram definidas quatro forças de carregamento para análise, indicando diferentes cenários que uma colisão pode ocorrer.
7. **Presença do EPI:** Além disso, faz-se importante avaliar como a presença do EPI diminui os esforços que o membro corporal pode enfrentar.

Considerando esses inúmeros tópicos de análises, criou-se um fluxo de trabalho de forma a realizar premissas e, também, analisar cada um deles de maneira independente e selecionando aquele mais pertinente para avançar. Assim, esse fluxo pode ser observado na Figura 50.

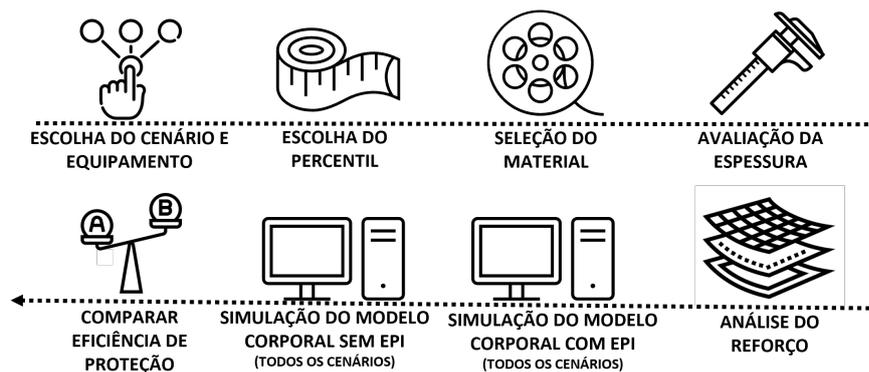


Figura 50 – Fluxo de simulação adotado para a análise dos EPI – Fonte: autor

O primeiro aspecto analisado foi a escolha do cenário que seria realizada essa iteração até encontrar o equipamento mais adequado. Assim, buscou-se realizar essa validação utilizando o Cenário Real 1, já que esse possui o modelo corporal, sendo esse necessário para o comparativo da eficiência que o EPI teve em proteger. Além disso, optou-se por observar o equipamento de perna apenas por simples premissa, e que esse seja o do tamanho adaptado para um percentil 50, por se tratar de um tamanho médio.

Teve como objetivo adquirir diversos aspectos mecânicos do protetor de perna, verificando como ele reage aos carregamentos, procurando se há a redução da magnitude das tensões levadas ao corpo do usuário desses quando comparado a não utilização. Para análise de tensões e deformações foram consideradas o equivalente de von Mises, dando um bom retorno para critério de falha.

7.5 Tipo de elemento para análise numérica

Todas as diferentes partes envolvidas na simulação foram modeladas usando os elementos do tipo sólido, apresentado na Figura 27. Essa escolha é devido a complexidade da forma geométrica dos protetores e membros corporais e pela necessidade de avaliar o comportamento tridimensional dos carregamentos. A simplificação de considerar os materiais como isotrópicos também privilegia essa escolha.

7.6 Condições de contorno e de carregamento

As condições de contorno são elementos essenciais para uma análise numérica na *workbench* Static Structural do ANSYS, referenciando certos comportamentos de determinadas regiões, permitindo que o corpo seja estático e possibilita a análise das tensões e deformações. Assim, as condições para os três cenários de análise são:

7.6.1 Condições de Contorno do Cenário Experimental

Para o Cenário Experimental é considerado um esquema semelhante ao ensaio de flexão por 3 pontos, onde três peças de aços são responsáveis pela aplicação dessa força, sendo que as duas inferiores servem de base, enquanto uma superior, que está equidistante horizontalmente dessas duas, aplica uma força na face superior, tendo movimento restrito ao eixo normal à face principal peça. Essas considerações podem ser observadas na Figura 51. Essa força é aplicada considerando um contato entre a face inferior da peça metálica e a face mais externa do EPI, o que pode gerar tensões deformações passives de criar efeitos não-lineares no problema.

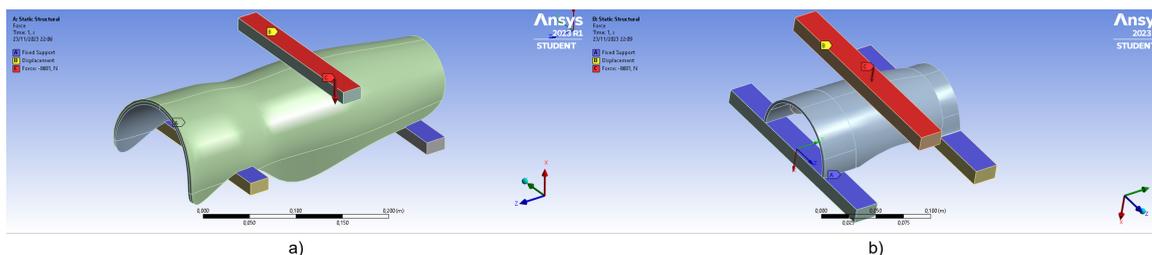


Figura 51 – Condições de contorno e carregamento do Cenário Experimental - a) protetor de perna b) protetor de braço – Fonte: autor

Como há a necessidade dos suportes inferiores de aço para a aplicação da força, as geometrias desses equipamentos foram alteradas, permitindo a existência de faces planas para o contato com as peças (Fig. 52), contudo, como a região de análise é justamente onde há a interface de impacto, considera-se que não há grande variação dos resultados.

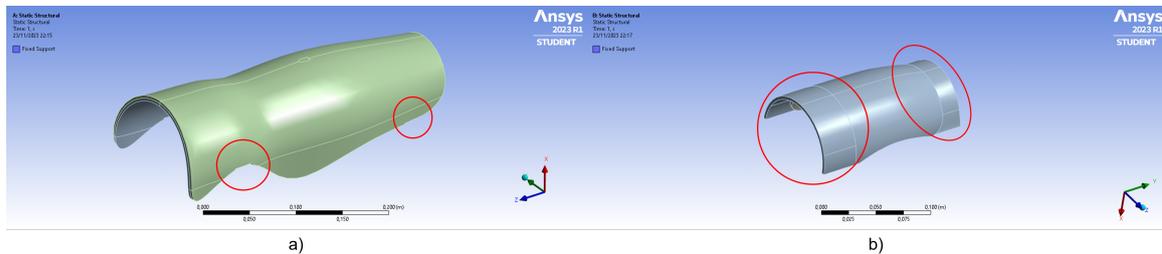


Figura 52 – Alteração na geometria dos equipamentos para a simulação do Cenário Experimental - a) protetor de perna b) protetor de braço – Fonte: autor

7.6.2 Condições de Contorno do Cenário Real 1

Para o caso que almeja representar um cenário de uso desse equipamento por um motociclista, é considerado que o modelo que representa um membro humano está engastado em suas extremidades, referenciando um cenário no qual a perna/braço do motociclista está bem presa à motocicleta, enquanto o protetor está ergonomicamente encaixado a esse membro. A força é aplicada agora por uma peça de aço idêntica ao caso anterior na face externa, representando o impacto com a aplicação da força estática. Essas considerações são visíveis na Figura 53.

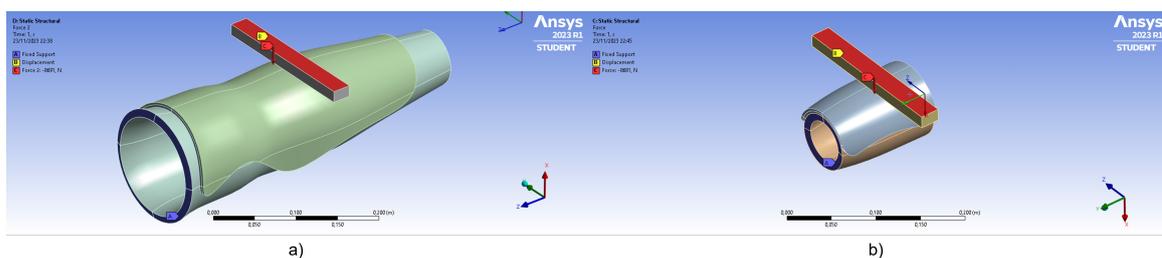


Figura 53 – Condições de contorno e carregamento do Cenário Real 1 – a) protetor de perna b) protetor de braço – Fonte: autor

7.6.3 Condições de Contorno do Cenário Real 2

Por fim, para o Cenário Real 2, a geometria de engaste da perna é equivalente ao Cenário Real 1, porém, agora a força é aplicada na forma de pressão sob toda a face primária do protetor, conforme visível na Figura 54.

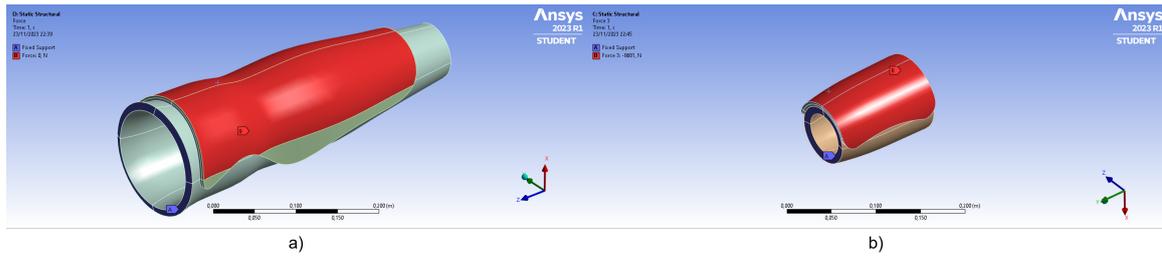


Figura 54 – Condições de contorno e carregamento do Cenário Real 2 – a) protetor de perna b) protetor de braço – Fonte: autor

7.6.4 Condições de Contorno da Interface protetor com o membro corporal

Para a região de interface entre os protetores e os modelos de membros corporais, nos casos onde esse último existe, foi utilizado a condição desses estarem colados (contato do tipo *bonded*). Essa condição foi com o intuito de indicar o ajuste adequado desses protetores ao membro corporal, permitindo uma maior interface.

7.7 Malha

A malha é outro aspecto fundamental da análise, pois ela é responsável por discretizar o objeto e servir de referência para os cálculos conforme condições de contorno e demais condições aplicadas. Além disso, como apresentado na seção 5.3, é importante considerações sobre a qualidade dessa malha, tendo como objetivo que a análise apresente valores válidos e próximos ao que se encontraria em um cenário real.

Os resultados das simulações são dependentes de diversos aspectos da malha do problema, somado a isso, a qualidade pode ser elevada através do refinamento dessa, apesar de que refinamentos muito grandes podem trazer problemas de convergência e grande custo computacional (ANSYS, 2006). Dessa forma, buscou-se que a malha apresentasse seus elementos com qualidade o mais próxima de 1. Assim, utilizou-se elementos tetraédricos para permitir melhor adaptação dessa ao formato complexo exibido pela estrutura. Além disso, utilizou-se da ferramenta *body sizing* para que cada estrutura tivesse uma quantidade de elementos adequada considerando sua espessura, buscando essa qualidade elevada. Dessa forma, a qualidade da malha para a simulação do protetor de perna (Fig. 55) e para a simulação do protetor de braço (Fig. 56) podem ser vistas a seguir.

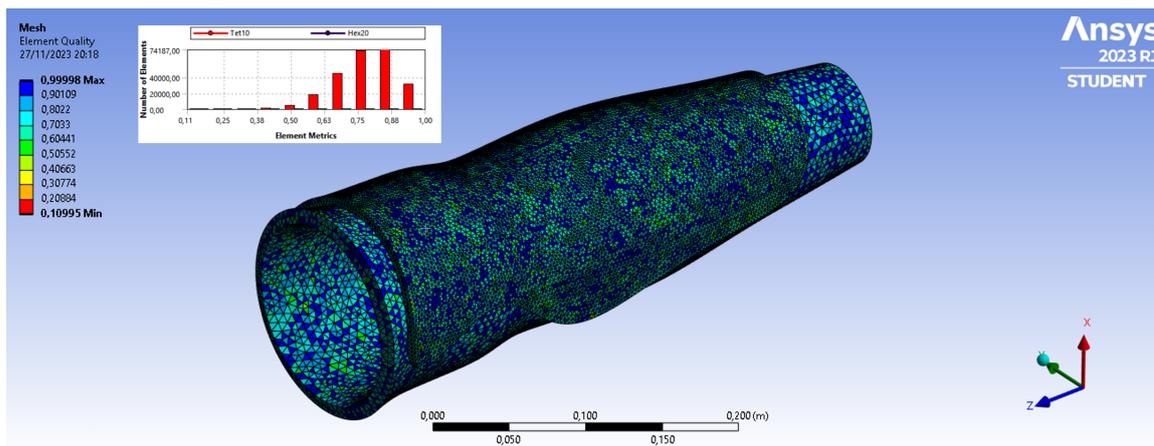


Figura 55 – Qualidade da malha do protetor de perna e modelo de membro – Fonte: autor

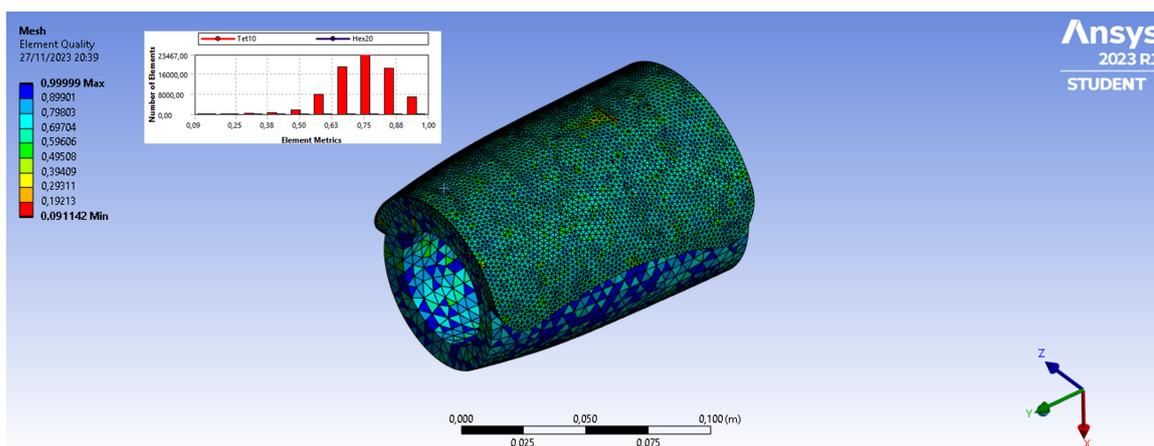


Figura 56 – Qualidade da malha do protetor de braço e modelo de membro – Fonte: autor

Nota-se que, para ambos os casos, quase todos os elementos apresentam qualidade superior a 0,7, sendo esse valor considerado muito bom de acordo com a Figura 30. Dessa forma, considerou-se que a malha tem comportamento adequado e possível de retornar valores plausíveis e condizentes. Por fim, a quantidade de elementos de cada um desses objetos, considerando esse cenário, pode ser observada nas Tabelas 8 e 9.

Objeto	Nós	Elementos
Protetor de perna	137.205	74.289
Modelo de perna	156.677	100.066
Reforço	254.584	126.221

Tabela 8 – Quantidade de nós e de elementos por objeto de análise do protetor de perna

Objeto	Nós	Elementos
Protetor de braço	28.404	15.189
Modelo de braço	31.540	20.020
Reforço	54.741	26.944

Tabela 9 – Quantidade de nós e de elementos por objeto de análise do protetor de braço

7.8 Modelo de análise

A formulação linear desempenha um papel crucial nas simulações numéricas mecânicas, oferecendo uma abordagem simplificada e eficiente para modelar o comportamento de estruturas sob carga. A análise linear presume que as relações entre as forças aplicadas e as deformações resultantes são proporcionais, o que simplifica significativamente os cálculos. Dessa forma, esse modelo de análise foi escolhido para o estudo em questão.

7.9 Etapas do estudo

Esse estudo por simulação numérica, em um primeiro momento, foi feito em cima dos equipamentos de proteção de referência feitos por (ARAÚJO, 2023), estando apresentado no Apêndice A. Essa primeira análise foi nomeada como a primeira iteração do estudo e serviu para validar toda essa estrutura de simulação em um momento que os equipamentos definitivos do projeto ainda não haviam sido projetados. Ela serviu como referência para diversas análises. Já a parte nomeada como segunda iteração foi justamente o momento onde os equipamentos do estudo foram modelados e simulados conforme todas as condições descritas anteriormente.

8 Caracterização Experimental

A caracterização adequada dos EPI para motociclistas é de suma importância para garantir sua eficácia na proteção contra lesões e acidentes. Essas técnicas podem envolver ensaios de laboratório, como testes de: flexão, compressão, impacto, abrasão, tração e penetração; que visam mensurar a resistência, durabilidade e outras características mecânicas dos materiais empregados nos equipamentos (RACERED, 2020). Com uma caracterização adequada, é possível selecionar os projetos mais eficientes, bem como fornecer informações valiosas para o aprimoramento contínuo desses dispositivos, visando a segurança e o bem-estar dos motociclistas e passageiros. Contudo, para esse estudo, os principais resultados procurados são: a sua capacidade de reduzir esforços transmitidos para os motociclistas que os estiverem usando quando solicitados mecanicamente em acidentes ou colisões; e o fato de serem confortáveis para utilização de pessoas dos mais variados tipos de corpos.

8.1 Caracterização mecânica

Como introduzido na seção 7.1.1, o Cenário Experimental para avaliação numérica através do método dos elementos finitos estaria estruturado de forma que fosse possível realizar um experimento em laboratório, buscando, assim, a validação dos modelos e uma análise mais prática do comportamento dos EPI quando solicitados mecanicamente. Portanto, a análise observada seria baseada no experimento de flexão de 3 ou 4 pontos de material plástico, sendo esse presente na norma ASTM D790 (Fig. 57) (ASTM, 2016).

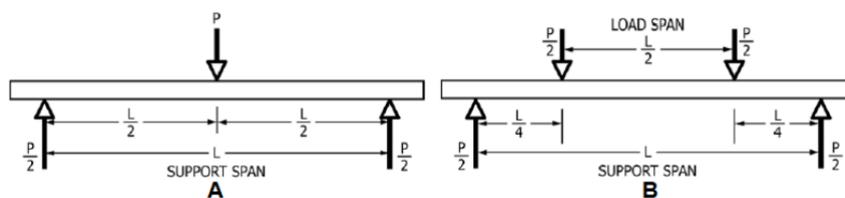


Figura 57 – Esquemático de aplicação de forças - a) no ensaio de flexão 3 pontos - e b) no ensaio de flexão 4 pontos – Adaptado de: (ASTM, 2016)

Essa abordagem é de fácil modelagem numérica, assim como também é factível de ser realizado em ensaios práticos, considerando a disponibilidade de equipamentos para pesquisa na universidade e a premissa de análise desses equipamentos através da aplicação de carregamentos estáticos. Assim, a máquina para essa realização é a Universal Instron 8801 (Fig. 58), disponível no Laboratório de Materiais da UnB, campus Gama.



Figura 58 – Máquina de ensaio de flexão Universal Instron 8801 – Fonte: autor

Esse ensaio deveria retornar propriedades mecânicas dos equipamentos a serem analisados, as suas curvas de "força compressiva \times deslocamento", além de características visuais a respeito da falha mecânica desses produtos, permitindo visões a respeito desses e, por consequência, a possibilidade de otimizações, melhorias e considerações a serem feitas no projeto.

Devido a diferentes questões, como cronograma e disponibilidade de equipamentos, essa análise mecânica não foi viabilizada. Deixa-se como sugestão de estudos futuros a realização desses ensaios e a comparação dos resultados encontrados com àqueles que serão demonstrados no capítulo de simulações.

8.2 Ergonomia e Conforto

Para alcançar o objetivo de desenvolver EPI parametrizados para motociclistas através da Manufatura Aditiva, é crucial compreender as necessidades e expectativas dos usuários em relação ao conforto e ergonomia. A criação de um questionário estruturado desempenha um papel fundamental nesse processo, permitindo a coleta sistemática de dados relevantes para a concepção e otimização desses equipamentos. O questionário não apenas explora as preferências individuais dos motociclistas, mas também se concentrará em aspectos anatômicos específicos que variam de pessoa para pessoa.

Ao elaborar o questionário, é imperativo abordar questões que avaliem tanto as preferências subjetivas quanto os requisitos ergonômicos objetivos. Perguntas relacionadas à distribuição de peso, flexibilidade do material, pontos de pressão e ventilação podem oferecer aspectos do conforto percebido. Além disso, incluir consultas sobre a variedade de biotipos e medidas antropométricas dos motociclistas garante que os EPI sejam verdadeiramente inclusivos, adaptando-se de maneira eficaz ao corpo de qualquer usuário.

O questionário deve ser estruturado de maneira a considerar diversos fatores que influenciam a experiência do motociclista ao usar os EPI. As condições climáticas, a duração das viagens, a frequência de uso e o tipo de motocicleta podem afetar as preferências individuais. Ao entender a interseção desses fatores com as características físicas do usuário, é possível criar um conjunto de parâmetros que permita a personalização eficaz dos equipamentos, garantindo não apenas proteção, como também conforto em diversas situações.

Após a coleta de dados por meio do questionário, é crucial implementar um processo de validação e iteração contínuo. Isso envolve a análise estatística das respostas, a comparação com padrões ergonômicos estabelecidos e, quando possível, a prototipagem rápida para avaliar fisicamente a aceitação dos designs propostos. Esse ciclo de *feedback* permitirá ajustes constantes nos parâmetros parametrizados, refinando a eficácia do EPI em se adaptar ao corpo dos motociclistas de maneira personalizada e garantindo um equilíbrio ideal entre conforto e segurança.

Dessa forma, buscou-se estruturar esse questionário dividindo-o em quatro partes: características individuais da pessoa, avaliação dos aspectos relacionados à ergonomia e conforto através da percepção individual, avaliação da capacidade de proteção do equipamento e pontos que o motociclista gostaria que fossem melhores adaptados ou diferentes do contexto atual. Cada um desses capítulos busca compreender a relação que o avaliado teve com o equipamento, caracterizando-o em grupos distintos e entender características que seriam mais adequadas considerando os potenciais usuários. Esse questionário pode ser observado no Anexo [A](#).

Parte IV

Resultados e Conclusões

9 Resultados Numéricos

Esta seção tem como objetivo demonstrar e comentar os resultados encontrados nas diferentes análises numéricas realizadas neste estudo. Diversos dados foram obtidos a fim de verificar comportamentos mecânicos dos equipamentos desenvolvidos, permitindo que considerações sobre os cenários avaliados possam ser feitas.

9.1 Seleção do material

Para a seleção do material que irá compor os EPI, observou-se o comportamento do protetor de perna da forma como foi descrita anteriormente para três materiais distintos: PLA, ABS e PETG. Suas propriedades foram apresentadas na Tabela 1 e colocadas nos materiais respectivos no *software* de simulação Ansys. Além disso, também foram observadas as propriedades do EVA (Tab. 3) e do membro corporal (Seção 3.5). Para essa avaliação preliminar, considerou-se que a parte impressa teria espessura de 3 *mm*.

Para a validação, buscou-se encontrar quais forças geram tensões máximas equivalentes as tensões de escoamento e ruptura para cada um dos protetores, e essas são visíveis na Tabela 10, que também são visíveis graficamente na Figura 59. Além disso, também foram observadas as demais propriedades do protetor (Tab. 11) e do membro corporal (Tab. 12) para cada um dos materiais, considerando a força que atinge a tensão de ruptura, já que seria esse momento mais crítico e no qual deve ocorrer a falha do equipamento.

Material	F_{ce} [N]	σ_e [MPa]	F_{cr} [N]	σ_r [MPa]
ABS	800	20,81	1200	32,05
PLA	1450	48,19	1750	58,16
PETG	950	22,99	1700	40,22

Tabela 10 – Forças e tensões de escoamento e ruptura referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1

Onde:

- F_{ce} : Força que gera uma tensão máxima equivalente à tensão de escoamento no protetor;
- σ_e : Tensão de escoamento no protetor;
- F_{cr} : Força que gera uma tensão máxima equivalente à tensão de ruptura no protetor;

- σ_r : Tensão de ruptura no protetor.

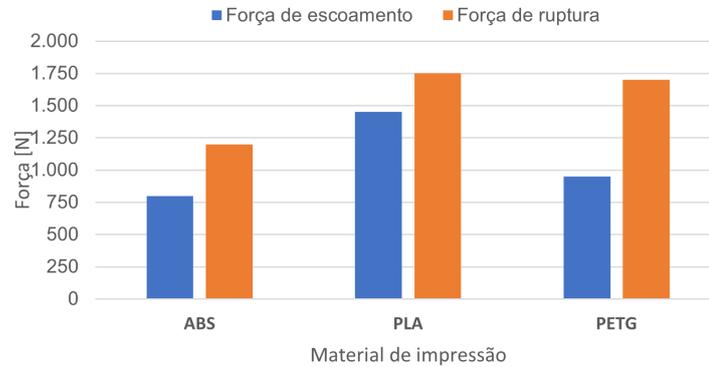


Figura 59 – Forças que geram tensões de escoamento e ruptura para o protetor feito de cada um dos materiais – Fonte: autor

Material	F_{cr} [N]	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
ABS	1200	32,05	0,67	0,0154	0,0003	0,51
PLA	1750	58,16	1,32	0,0175	0,0003	0,16
PETG	1700	40,22	0,77	0,0259	0,0004	0,78

Tabela 11 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1

Material	F_{cr} [N]	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
ABS	1200	4,55	0,59	0,0021	0,0002	0,39
PLA	1750	5,92	0,82	0,0026	0,0003	0,42
PETG	1700	6,81	0,86	0,0030	0,0004	0,46

Tabela 12 – Dados mecânicos numéricos referentes ao modelo corporal da perna no Cenário Real 1

Onde:

- F_{cr} : Força que gera uma tensão máxima equivalente à tensão de ruptura no protetor;
- σ_{max} : Tensão máxima;
- σ_{med} : Tensão média;
- ϵ_{max} : Deformação máxima;
- ϵ_{med} : Deformação média;

- Δ_{max} : Deslocamento máximo.

Nota-se, ao observar os valores encontrados, que o protetor feito de PLA aguenta maiores esforços antes da falha quando comparado aos demais materiais. Além de apresentar uma considerável redução dos esforços transmitidos ao modelo corporal quando comparado aos outros modelos, já que as tensões e deformações do modelo de perna para o caso desse material apresentar tensões consideravelmente inferiores que o outro caso. Dessa forma, ao considerar apenas os aspectos mecânicos encontrados, o PLA foi o melhor material dentre os três e, portanto, o escolhido para a continuidade.

9.2 Avaliação da espessura

Ponderando que o protetor de perna seja feito do material PLA, conforme conclusões anteriores, buscou-se observar como a variação da espessura afeta esse equipamento. Portanto, analisou-se o protetor de perna com a parte impressa tendo 0,2 mm e 0,4 mm, comparando a eficiência nesses casos. Assim, as tabelas a seguir foram criadas, sendo as Tabelas 13 e 14 para o EPI com 2 mm de espessura e as Tabelas 15 e 16 para o EPI com 4 mm de espessura. Também se tem uma visão gráfica das forças principais para cada uma das espessuras analisadas na Figura 60. As forças consideradas foram: a força de ruptura do caso anterior e as forças que geram as tensões de escoamento e ruptura para as espessuras em questão.

F_{ci} [N]	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
1750	78,15	0,91	0,0230	0,0002	0,69
$F_{ce} = 1050$	47,65	0,54	0,0138	0,0001	0,41
$F_{cr} = 1300$	58,20	0,67	0,0170	0,0002	0,51

Tabela 13 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1 – Espessura: 2 mm

F_{ci} [N]	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
1750	8,77	0,95	0,0005	0,0000	0,06
$F_{ce} = 1050$	5,26	0,57	0,0003	0,0000	0,04
$F_{cr} = 1300$	6,51	0,71	0,0004	0,0000	0,05

Tabela 14 – Dados mecânicos numéricos referentes ao modelo corporal da perna no Cenário Real 1 – Espessura: 2 mm

F_{ci} [N]	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
1750	30,84	0,67	0,0092	0,0002	0,36
$F_{ce} = 2700$	47,59	1,03	0,0140	0,0003	0,56
$F_{cr} = 3200$	57,09	1,22	0,0166	0,0004	0,67

Tabela 15 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1 – Espessura: 4 mm

F_{ci} [N]	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
1750	7,00	0,91	0,0004	0,0000	0,06
$F_{ce} = 2700$	10,81	1,41	0,0006	0,0001	0,10
$F_{cr} = 3200$	12,81	1,67	0,0007	0,0001	0,12

Tabela 16 – Dados mecânicos numéricos referentes ao modelo corporal da perna no Cenário Real 1 – Espessura: 4 mm

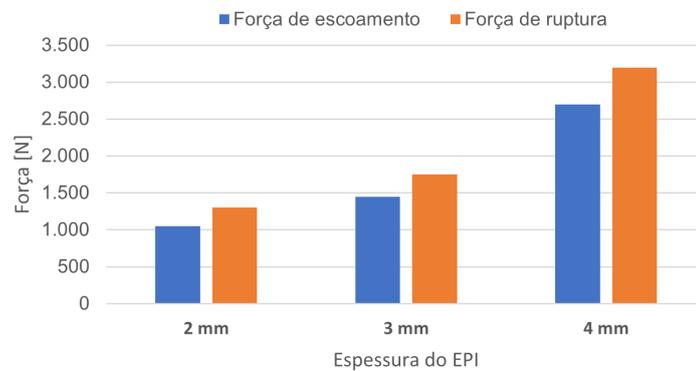


Figura 60 – Forças que geram tensões de escoamento e ruptura para o protetor com cada uma das espessuras – Fonte: autor

Nota-se que a redução da espessura diminui, de forma elevada, as forças que a estrutura aguenta, assim como o nível de redução dos esforços transmitidos para o membro corporal, enquanto o oposto também ocorreu, no qual o aumento da espessura melhorou, consideravelmente, a eficiência de proteção do EPI. Espera-se que, portanto, esse aumento continue a valer conforme aumenta a espessura do equipamento, contudo, elevar a espessura resulta em maior custo com material, tempo de impressão e a massa, sendo esse último capaz de afetar aspectos de conforto do usuário. Assim, essa solução pode não ser a mais viável e se deve buscar outras soluções que possam ser mais eficientes.

9.3 Análise do reforço

Considerando agora uma caneleira de material PLA com 3 mm de espessura, buscou-se verificar como um reforço de carbono-epóxi de 1 mm na face externa do equipamento poderia mudar esses valores de tensões, deformações e deslocamentos observados, além de aumentar a eficiência de proteção. Esse reforço foi modelado apenas como um objeto sólido usando as propriedades da Tabela 4.

Dessa forma, foram construídas as Tabelas 17 e 18, mostrando as propriedades encontradas. Foram consideradas, para a simulação, a força de ruptura do EPI feito de PLA de 3 mm, a força de ruptura do EPI feito com PLA de 4 mm e a F_{c4} das condições de carregamento (8.681 N). Também foi construído o gráfico da Figura 61, onde é mostrado um comparativo do EPI com reforço em relação ao EPI com reforço.

F_{ci} [N]	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
1750	9,57	0,36	0,0027	0,0002	0,14
3200	17,50	0,67	0,0050	0,0002	0,25
$F_{c4} = 8.681$	47,49	1,83	0,0135	0,0005	0,69

Tabela 17 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1 – Com reforço

F_{ci} [N]	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
1750	3,93	0,75	0,0002	0,0000	0,04
3200	7,19	1,37	0,0004	0,0001	0,08
$F_{c4} = 8.681$	19,51	3,74	0,0011	0,0002	0,22

Tabela 18 – Dados mecânicos numéricos referentes ao modelo corporal da perna no Cenário Real 1 – Com reforço

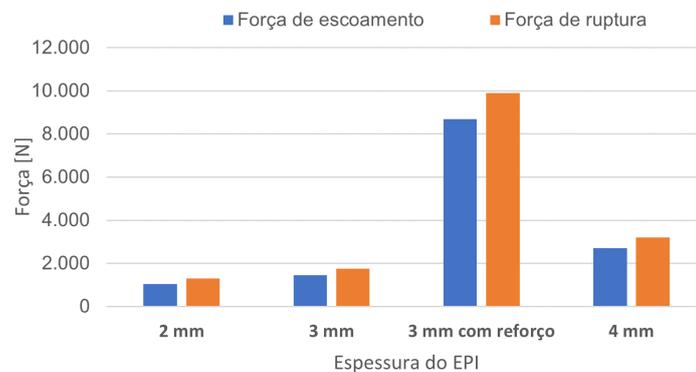


Figura 61 – Comparativo do EPI com reforço em relação a mudança de espessura – Fonte: autor

É possível observar que o reforço teve efeito extremamente positivo, diminuindo tanto as tensões e deformações sobre o núcleo impresso de PLA, permitindo que esse resista a maiores impactos, quanto aumentando a eficácia de proteção desse equipamento, tendo em vista que as tensões e deformações sofridas pelo modelo de perna são menores para um mesmo cenário de carregamento. Dessa forma, o reforço por material compósito teve sua viabilidade apontada.

Contudo, essa solução possui problemas inerentes relacionados a maior complexidade de fabricação e o aumento dos custos da mesma. Porém, no quesito mecânico, foi demonstrado que é uma solução interessante por apresentar, além de tudo, baixa massa específica, não elevando muito o peso do equipamento, permitindo um melhor conforto.

9.4 Análise completa

Por fim, buscou-se avaliar tanto o protetor de perna, quanto o protetor de braço, para todos os cenários descritos e com as quatro condições de carregamento. Essa validação se deu considerando os resultados apresentados anteriormente, isso é, o material de impressão é o PLA, a espessura de 3 *mm* e com um reforço de fibra de carbono e epóxi na face exterior de ambos os modelos de EPI. As condições de carregamento estão apresentadas na Tabela 19.

F_{ci}	Força [N]
F_{c1}	278
F_{c2}	1.388
F_{c3}	4.340
F_{c4}	8.681

Tabela 19 – Forças para cada uma das condições de carregamento

9.4.1 Protetor de perna

9.4.1.1 Cenário Experimental

O Cenário Experimental é aquele cujo objetivo é verificar características da simulação e validá-la através de um ensaio em laboratório, tendo, assim, aspectos do mundo real para poder comparar. Portanto, essa foi feita de forma a mimetizar o ensaio de flexão de 3 pontos utilizando uma máquina de flexão. Dessa forma, para esse caso, existe apenas o equipamento (com o EVA, núcleo impresso e reforço de carbono) e os suportes de aço responsáveis por gerar o carregamento, sendo o protetor de perna, nessa análise, alterado em relação ao original justamente para permitir o uso desses suportes.

As propriedades encontradas foram respectivas ao núcleo impresso de PLA, já que é, majoritariamente, a viabilidade desse que está sendo avaliada. Dessa forma, o equi-

pamento foi simulado nessa condição para os quatro diferentes carregamentos, trazendo resultados respectivos às tensões, deformações e deslocamentos, visíveis na Tabela 20.

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	6,41	0,38	0,0020	0,0001	0,23
F_{c2}	32,05	1,93	0,0102	0,0007	1,15
F_{c3}	100,21	6,05	0,0319	0,0021	1,71
F_{c4}	200,44	12,09	0,0637	0,0043	3,40

Tabela 20 – Dados mecânicos numéricos do núcleo impresso do protetor de perna – Cenário Experimental

Tendo como referência que a tensão de escoamento σ_e e a tensão de ruptura σ_r do PLA em questão ser, respectivamente, 47,65 MPa e 57,00 MPa, nota-se que o material atinge essas tensões entre as condições de carregamento F_{c2} e F_{c3} . Assim, a força encontrada, chamada de F_{ce} , foi de, aproximadamente, 2100 N para o primeiro caso, enquanto uma força F_{cr} de 2500 N produziu uma tensão máxima na mesma ordem do segundo (Fig. 62)

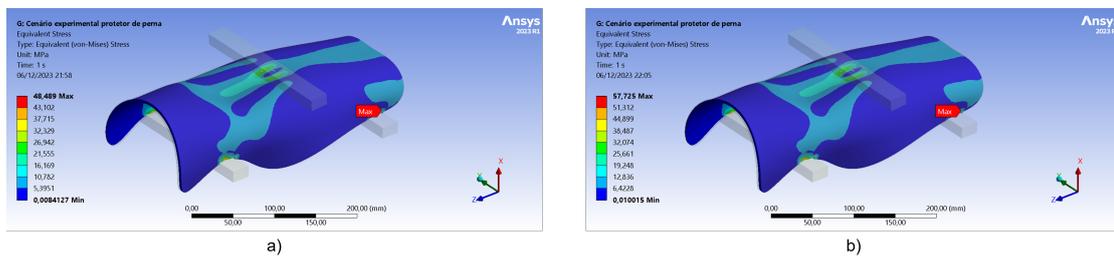


Figura 62 – Tensões resultantes da força de – a) 2100 N – b) 2500 N para o protetor de perna – Fonte: autor

Essas forças são boas referências para a validação do modelo numérico, já que, assim, faz-se possível a realização de um ensaio experimental em laboratório para validação, esperando-se que, portanto, a falha do equipamento ocorra em uma região de força equivalente caso a simulação esteja reproduzindo resultados consideravelmente aproximados da realidade.

9.4.1.2 Cenário Real 1

Para os casos de simulação que buscam uma verificação mais fiel a realidade, não há uma perspectiva de comparação com ensaios de laboratório, tendo como principal análise a redução da magnitude das tensões transmitidas ao membro quando se utiliza esse equipamento observadas nos valores encontrados numericamente. Dessa forma, duas condições são simuladas para o Cenário Real 1 e duas para o Cenário Real 2, sendo uma

a simulação do carregamento com o protetor e outra do carregamento diretamente sobre o modelo corporal, sem o EPI.

Portanto, foram produzidas as tabelas das informações mecânicas do protetor de perna quando presente (Tab. 21) e também a do membro corporal para ambas as condições (Tab. 22 e 23), sendo essas informações novamente encontradas em simulações numéricas do Ansys.

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	2,33	0,06	0,0007	0,0000	0,04
F_{c2}	11,63	0,34	0,0033	0,0001	0,21
F_{c3}	36,38	1,07	0,0145	0,0003	0,67
F_{c4}	72,76	2,15	0,0209	0,0007	1,35

Tabela 21 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 1

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	0,57	0,11	0,0000	0,0000	0,00
F_{c2}	2,89	0,59	0,0001	0,0000	0,03
F_{c3}	9,04	1,85	0,0005	0,0001	0,10
F_{c4}	18,09	3,70	0,0015	0,0002	0,21

Tabela 22 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 1 com a presença do protetor de perna

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	1,78	0,15	0,0001	0,0000	0,01
F_{c2}	8,92	0,79	0,0005	0,0000	0,05
F_{c3}	27,89	2,47	0,0017	0,0001	0,17
F_{c4}	55,79	4,94	0,0034	0,0002	0,35

Tabela 23 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 1 com a ausência do protetor de perna

Observa-se que, para o cenário em questão, as tensões, deformações e deslocamentos são bem menores no EPI do que para o Cenário Experimental. Isso se dá pela maior área de interface do protetor com a perna, indicando que um bom ajuste desses EPI é importante para maior eficiência na proteção, estando essa relacionada com distribuição das tensões para o corpo. Nota-se também que essas tensões máximas se localizam em uma região pequena e disforme em relação as tensões próximas (Fig. 63), indicando que é possível que o escoamento só ocorra para esforços ainda mais elevados, sendo necessário o ensaio experimental para melhor avaliação desse aspecto.

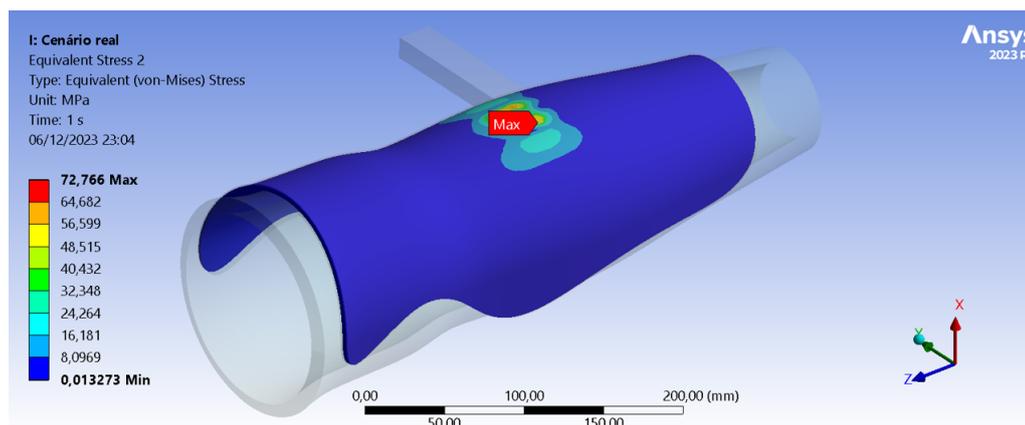


Figura 63 – Tensões no protetor de perna para uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 – Fonte: autor

Essa eficiência é evidenciada, principalmente, quando comparada as tensões no modelo de membro corporal com e sem um equipamento de proteção, visíveis na Tabela 24 e nas Figuras 64 e 65.

F_{ci}	$\sigma_{comprotetor}$ [MPa]	$\sigma_{semprotetor}$ [MPa]	Diferença [MPa]	%
F_{c1}	0,57	1,78	1,21	67%
F_{c2}	2,89	8,92	6,03	67%
F_{c3}	9,04	27,89	18,85	67%
F_{c4}	18,09	55,79	37,07	66%

Tabela 24 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal com e sem protetor para o Cenário Real 1

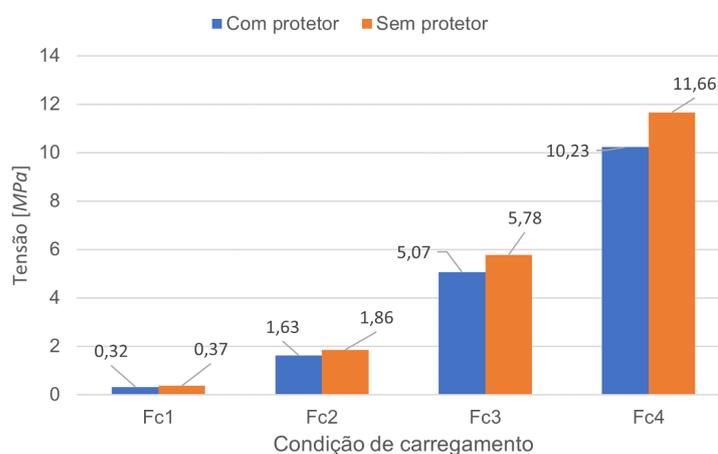


Figura 64 – Gráfico das tensões no modelo de membro corporal de perna com e sem protetor para o Cenário Real 1 – Fonte: autor

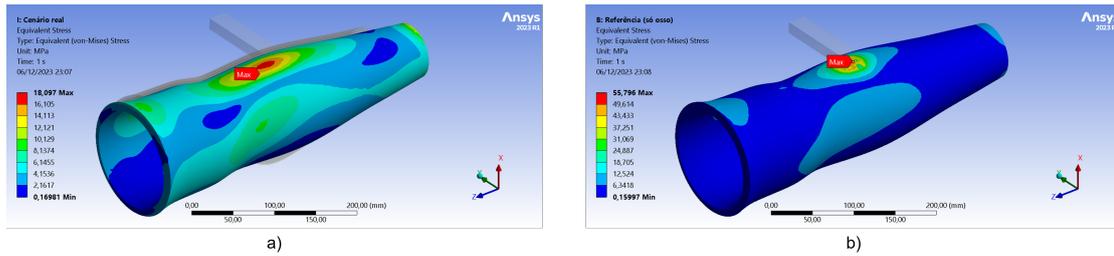


Figura 65 – Comparativo do modelo de membro corporal sob uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 – a) Com EPI – b) Sem EPI – Fonte: autor

A redução nas transmissões de tensões para o membro havendo a presença de um equipamento de proteção no cenário da carga aplicada numa região pequeno foi na ordem de, aproximadamente, 67%¹. Um valor extremamente considerável, indicando que a utilização desse recurso pode impedir ou, pelo menos, reduzir consideravelmente a gravidade de lesões provenientes de acidentes motociclísticos, evitando quebras e fraturas de ossos, luxações nos músculos e outros diversos danos possíveis para motociclistas e passageiros. Percebe-se também, através das imagens da simulação, que o protetor age de forma a acumular uma parte das forças na forma de deformação, além de transmitir essas tensões para uma área maior, diminuindo a pressão sobre o membro, evidenciando a forma como esse protetor age em proteger o seu usuário.

9.4.1.3 Cenário Real 2

Seguindo o apresentado, o Cenário Real 2 considera uma situação na qual a força está aplicada de forma distribuída sobre uma grande área. Assim, como essa é definida como uma pressão, usou-se a equação 9.1, relacionando pressão, força e área para definir o valor a ser aplicado no programa, tendo como referência que a área A de aplicação dessa carga, extraída do modelo 3D, é de 0,0355 m^2 :

$$P_{ci} = \frac{F_{ci}}{A} \quad (9.1)$$

Assim, as pressões podem ser vistas na Tabela 25.

¹ Tendo como referência o Apêndice A, foi observada uma redução de, aproximadamente, 50% das tensões transmitidas ao membro, contudo, aquele protetor conta apenas com o núcleo feito de PLA com 3 mm de espessura **sem reforço**, indicando que a presença do reforço aumentou ainda mais a eficiência de proteção do equipamento nesse cenário.

Força de cada condição (F_{ci}) [N]	Pressão equivalente (P_{ci}) [Pa]
278	7.830
1.388	39.098
4.340	122.253
8.681	244.535

Tabela 25 – Pressão equivalente para cada força no protetor de perna

Utilizando essas pressões, as simulações foram executadas a fim de encontrar as mesmas propriedades mecânicas antes obtidas para os outros casos. As Tabelas 26 e 27 são para o cenário com protetor, representando, respectivamente, o protetor e o modelo de perna. A Tabela 28 conta com as informações do modelo de perna sem EPI.

P_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
P_{c1}	0,08	0,01	0,0000	0,0000	0,01
P_{c2}	0,40	0,06	0,0001	0,0000	0,07
P_{c3}	1,27	0,21	0,0003	0,0000	0,21
P_{c4}	2,55	0,42	0,0007	0,0001	0,42

Tabela 26 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna no Cenário Real 2

P_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
P_{c1}	0,40	0,09	0,0000	0,0000	0,00
P_{c2}	2,01	0,48	0,0001	0,0000	0,01
P_{c3}	6,31	1,51	0,0003	0,0001	0,05
P_{c4}	12,62	3,01	0,0007	0,0002	0,10

Tabela 27 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a presença do protetor de perna

P_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
P_{c1}	0,43	0,09	0,0000	0,0000	0,00
P_{c2}	2,16	0,45	0,0001	0,0000	0,01
P_{c3}	6,75	1,41	0,0003	0,0000	0,05
P_{c4}	13,50	2,83	0,0008	0,0001	0,09

Tabela 28 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a ausência do protetor de perna

Novamente, com essas informações, avaliou-se o nível de redução das tensões transmitidas para o modelo de membro corporal, visível na Tabela 29 e na Figura 66.

P_{ci}	$\sigma_{comprotetor}$ [MPa]	$\sigma_{semprotetor}$ [MPa]	Diferença [MPa]	%
P_{c1}	0,40	0,43	0,03	6,9%
P_{c2}	2,01	2,16	0,15	6,9%
P_{c3}	6,31	6,75	0,44	6,5%
P_{c4}	12,62	13,50	0,88	6,5%

Tabela 29 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal com e sem protetor de perna para o Cenário Real 2

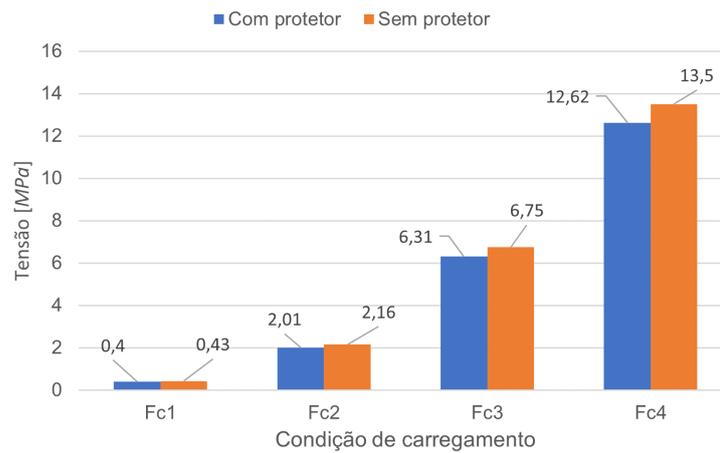


Figura 66 – Gráfico das tensões no modelo de membro corporal de perna com e sem protetor para o Cenário Real 2 – Fonte: autor

As tensões, as deformações e os deslocamentos sofridos pelo equipamento são ainda menores para esse cenário do que nos dois anteriores. Isso é referente a maior área de aplicação da força, diminuindo as tensões máximas, sendo que essas não chegam perto das tensões admissíveis dos materiais. Além disso, também observou que as regiões de maior concentração de tensão agora são próximas onde se considerou o engaste no modelo de perna, como visível na Figura 67, indicando que, para carregamentos mais distribuídos, os problemas seriam mais relacionados nos pontos de apoio do membro corporal.

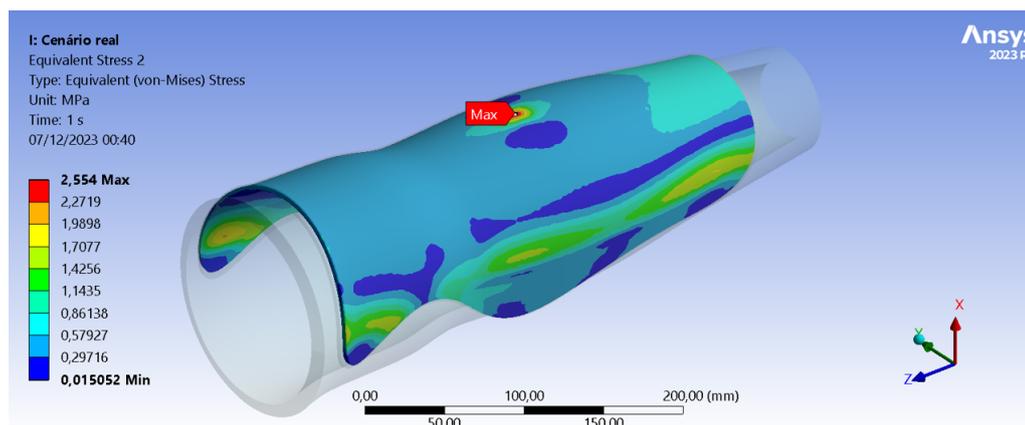


Figura 67 – Tensões no protetor de perna para uma força de 8.681 N (pressão de 2,55 MPa) para o Cenário Real 2 – Fonte: autor

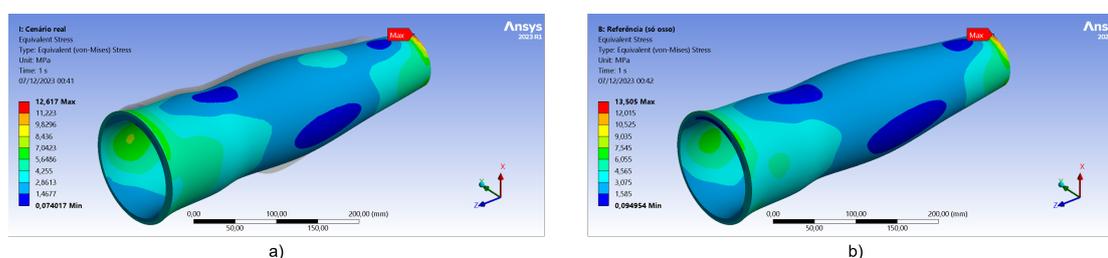


Figura 68 – Comparativo do modelo de membro corporal de perna uma força de 8.681 N (pressão de 2,55 MPa) para o Cenário Real 2 – a) Com EPI – b) Sem EPI – Fonte: autor

Nota-se que, novamente, o equipamento protetor foi responsável por reduzir as tensões transmitidas ao modelo de perna. Contudo, diferente do Cenário Real 1, que teve uma redução na ordem de 67%, agora ela é próxima a 7%. Essa diferença está relacionada a forma como o carregamento é realizado, já que, por se tratar de uma pressão sobre toda a face do equipamento, a força já está distribuída em uma grande área, fazendo com que a eficiência de proteção, agora, seja decorrente quase que exclusivamente, da transformação da energia vindas da pressão em deformação do equipamento, mostrando a importância de esse ser, até certo nível, menos rígido².

9.4.2 Protetor de braço

Assim como realizado para o protetor de perna, buscou-se verificar as mesmas propriedades do protetor quando submetido às mesmas condições de carregamento e ce-

² No caso do Apêndice A, a redução para o caso equivalente foi de, aproximadamente, 13% (sendo que esse caso não possui reforço), o que novamente reforça o aspecto do aumento da rigidez diminuir, até certo ponto, a eficiência de proteção, já que a dissipação da força através da deformação do protetor é menor quando há um reforço de material composto.

nários de análise, estando essas demonstradas a seguir. O tamanho escolhido para estudo também foi àquele adaptado para o percentil 50.

9.4.2.1 Cenário Experimental

Para o Cenário Experimental, há a necessidade de mudança de geometria do protetor como mostrado anteriormente, sendo que essa variação serve apenas para acomodar as peças de flexão. Novamente as propriedades do núcleo impresso são as que foram avaliadas, e essas são visíveis na Tabela 30.

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	28,26	2,46	0,0086	0,0009	1,47
F_{c2}	141,11	12,33	0,0431	0,0045	7,34
F_{c3}	441,21	38,55	0,1347	0,0139	22,96
F_{c4}	882,52	77,11	0,2695	0,0278	45,93

Tabela 30 – Dados mecânicos numéricos do núcleo impresso do protetor de braço – Cenário Experimental

Observa-se que, já antes da segunda condição de carregamento, há a provável falha da peça impressa nesse cenário. Dessa forma, buscou-se novamente avaliar, agora para o protetor de braço, quais forças que as tensões máximas são equivalentes às tensões de escoamento (F_{ce}) e ruptura (F_{cr}), encontrando os valores de 470 N e 570 N respectivamente. Essas informações podem ser observadas na Figura 76.

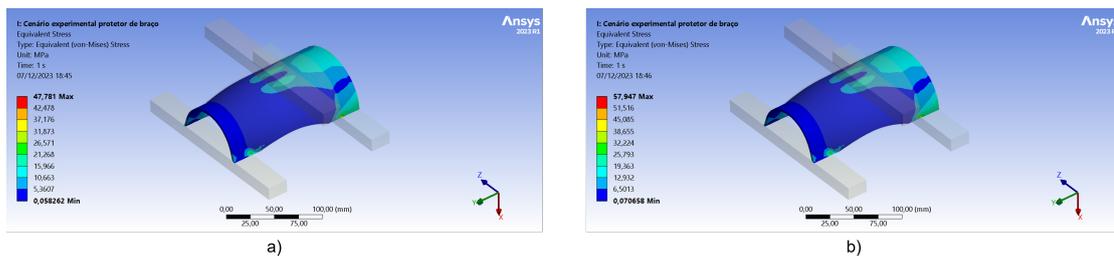


Figura 69 – Tensões resultantes da força de – a) 470 N – b) 570 N para o protetor de braço – Fonte: autor

Novamente, essas forças servem como referência para os ensaios experimentais, no qual encontrar valores próximos ao modelo numérico podem validar a estrutura de simulação ou indicar possíveis inconsistências do modelo. Além disso, notou-se que as tensões foram bem mais elevadas para esse caso, estando esse relacionado as regiões de concentrado de tensão devido à mudança de geometria para acomodar os suportes.

9.4.2.2 Cenário Real 1

Para o cenário que se assemelha mais a uma condição real de operação do EPI, buscou-se novamente verificar a capacidade de redução das tensões resultantes de um esforço na presença do protetor de braço. A Tabela 31 são as informações respectivas ao núcleo impresso do protetor, enquanto as Tabelas 32 e 33 são respectivas ao modelo corporal de braço na presença e ausência do protetor, respectivamente.

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	1,88	0,22	0,0005	0,0000	0,02
F_{c2}	9,10	1,10	0,0026	0,0003	0,12
F_{c3}	28,47	3,46	0,0081	0,0010	0,39
F_{c4}	56,96	6,93	0,0162	0,0021	0,79

Tabela 31 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de braço no Cenário Real 1

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	0,79	0,12	0,0000	0,0000	0,00
F_{c2}	3,84	0,61	0,0002	0,0000	0,01
F_{c3}	12,03	1,93	0,0007	0,0001	0,02
F_{c4}	24,07	3,85	0,0014	0,0002	0,06

Tabela 32 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 1 com a presença do protetor de braço

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	1,43	0,21	0,0001	0,0000	0,00
F_{c2}	6,94	1,03	0,0005	0,0000	0,02
F_{c3}	21,71	3,22	0,0017	0,0002	0,06
F_{c4}	43,43	6,45	0,0035	0,0004	0,13

Tabela 33 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 1 com a ausência do protetor de braço

Observa-se que, assim como para o protetor de perna, as tensões, deformações e deslocamentos são bem menores no EPI do que para o cenário experimental, novamente indicando a importância da interface e do bom ajuste ao corpo. A Figura 70 mostra a distribuição de tensões no protetor para a F_{c4} .

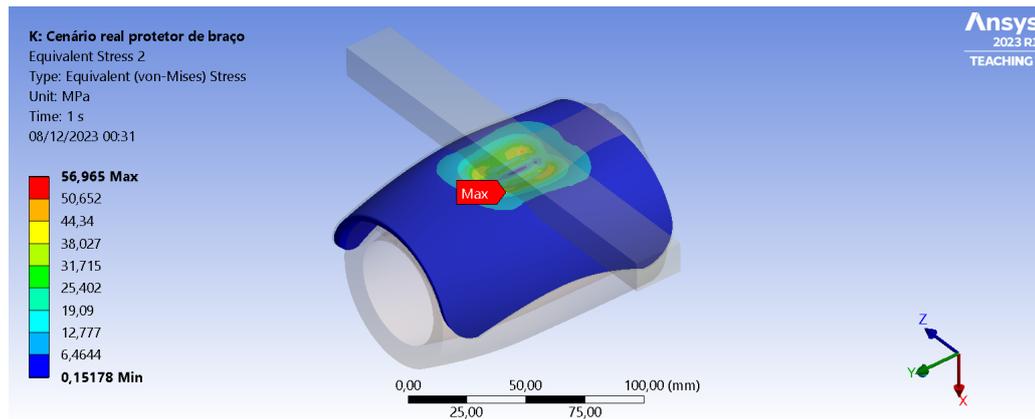


Figura 70 – Tensões no protetor de braço para uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 – Fonte: autor

A Tabela 34 e as Figura 71 e 72 apresentam uma comparação entre as tensões no modelo corporal de braço com e sem o equipamento de proteção.

F_{ci}	$\sigma_{comprotetor}$ [MPa]	$\sigma_{semprotetor}$ [MPa]	Diferença [MPa]	%
F_{c1}	0,79	1,43	0,64	44%
F_{c2}	3,84	6,94	3,10	44%
F_{c3}	12,03	21,71	9,68	44%
F_{c4}	24,07	43,43	19,36	44%

Tabela 34 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal com e sem protetor de braço para o Cenário Real 1

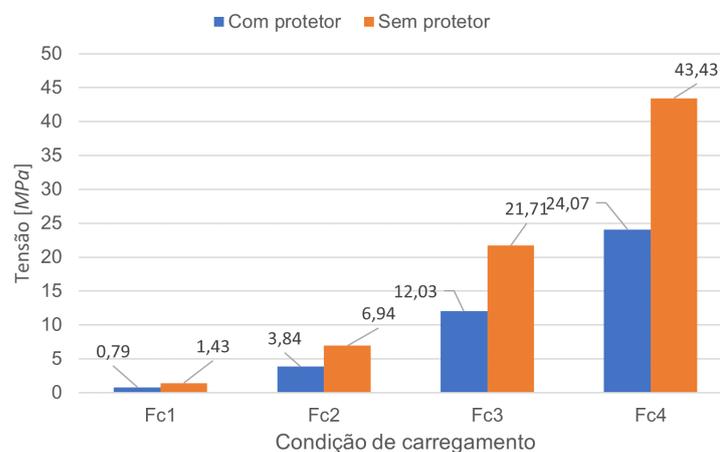


Figura 71 – Gráfico das tensões no modelo de membro corporal de braço com e sem protetor para o Cenário Real 1 – Fonte: autor

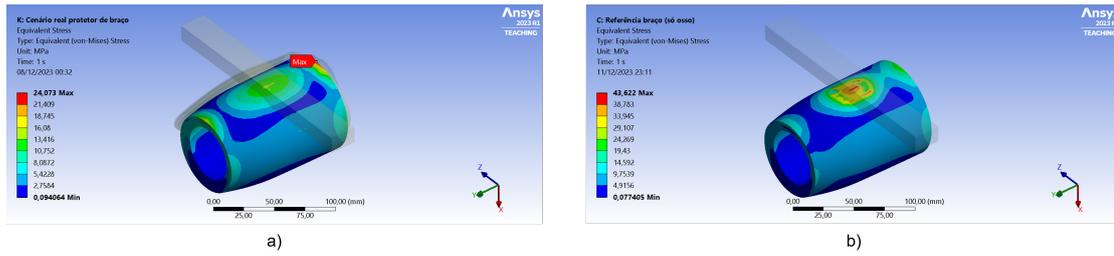


Figura 72 – Comparativo do modelo de membro corporal de braço sob uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 – a) Com EPI – b) Sem EPI – Fonte: autor

A redução nas transmissões de tensões para o modelo de braço havendo a presença de um equipamento de proteção no cenário da carga aplicada em uma região pequena foi na ordem de, aproximadamente, 44%. Valor novamente considerável, apesar de ser menor que os 67% do protetor de perna. Contudo, isso não tira o mérito e não deixa de demonstrar a importância do uso desses equipamentos, além de mostrar que o equipamento em específico é sim capaz de aumentar a segurança de seus usuários.

9.4.2.3 Cenário Real 2

Seguindo novamente o padrão de encontrar a pressão equivalente aos cenários de carregamento descritos para aplicar no protetor de braço para o Cenário Real 2, considerando que a área A da face do EPI é $0,007969 \text{ m}^2$, foi construída a Tabela 35.

Força de cada condição (F_{ci}) [N]	Pressão equivalente (P_{ci}) [Pa]
278	34.885
1.388	174.174
4.340	540.610
8.681	1.089.346

Tabela 35 – Pressão equivalente para cada força no protetor de braço

Ao utilizar essas pressões, as simulações foram executadas a fim de encontrar as mesmas propriedades mecânicas antes obtidas para o protetor de braço. As Tabelas 36 e 37 são para o cenário com protetor, representando, respectivamente, o protetor e o modelo de perna. A Tabela 38 conta com as informações do modelo de perna sem EPI.

P_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
P_{c1}	0,11	0,03	0,0001	0,0000	0,01
P_{c2}	0,55	0,16	0,0002	0,0000	0,08
P_{c3}	1,72	0,52	0,0005	0,0002	0,26
P_{c4}	3,47	1,05	0,0011	0,0004	0,53

Tabela 36 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de braço no Cenário Real 2

P_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
P_{c1}	0,32	0,12	0,0000	0,0000	0,00
P_{c2}	1,63	0,54	0,0001	0,0000	0,00
P_{c3}	5,07	1,68	0,0003	0,0001	0,01
P_{c4}	10,23	3,39	0,0006	0,0002	0,02

Tabela 37 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a presença do protetor de braço

P_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
P_{c1}	0,37	0,12	0,0000	0,0000	0,00
P_{c2}	1,86	0,60	0,0001	0,0000	0,00
P_{c3}	5,78	1,88	0,0003	0,0001	0,02
P_{c4}	11,66	3,80	0,0006	0,0002	0,03

Tabela 38 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a ausência do protetor de braço

Novamente, com essas informações, avaliou-se o nível de redução das tensões transmitidas para o modelo de membro corporal, visível na Tabela 29.

P_{ci}	$\sigma_{comprotetor}$ [MPa]	$\sigma_{semprotetor}$ [MPa]	Diferença [MPa]	%
P_{c1}	0,32	0,37	0,05	13%
P_{c2}	1,63	1,86	0,23	12%
P_{c3}	5,07	5,78	0,71	12%
P_{c4}	10,23	11,66	0,43	12%

Tabela 39 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal com e sem protetor de braço para o Cenário Real 2

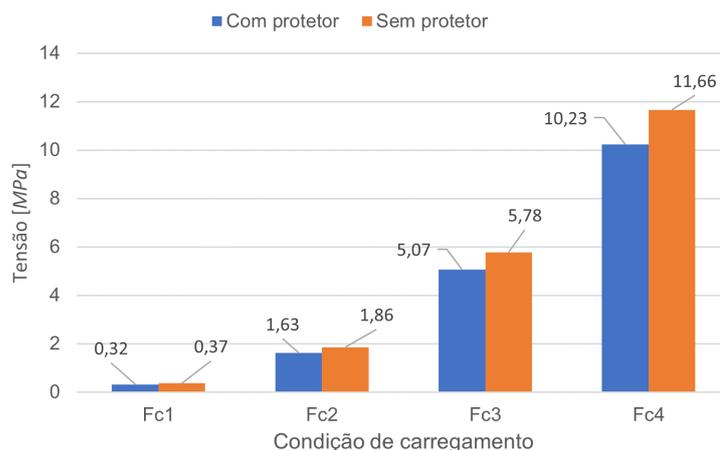


Figura 73 – Gráfico das tensões no modelo de membro corporal de braço com e sem protetor para o Cenário Real 2 – Fonte: autor

As tensões, as deformações e os deslocamentos sofridos pelo equipamento são ainda menores para esse cenário do que nos dois anteriores, observação feita já anteriormente no protetor de perna. Outro fato observado anteriormente é que a redução das tensões na presença do EPI para o cenário de carregamento distribuído é bem menor do que para o carregamento concentrado, sendo, em média, 12% para o cenário em questão. Também observou-se que as regiões de maior concentração de tensão agora são próximas onde se considerou o engaste no modelo de braço, como visível na Figura 74.

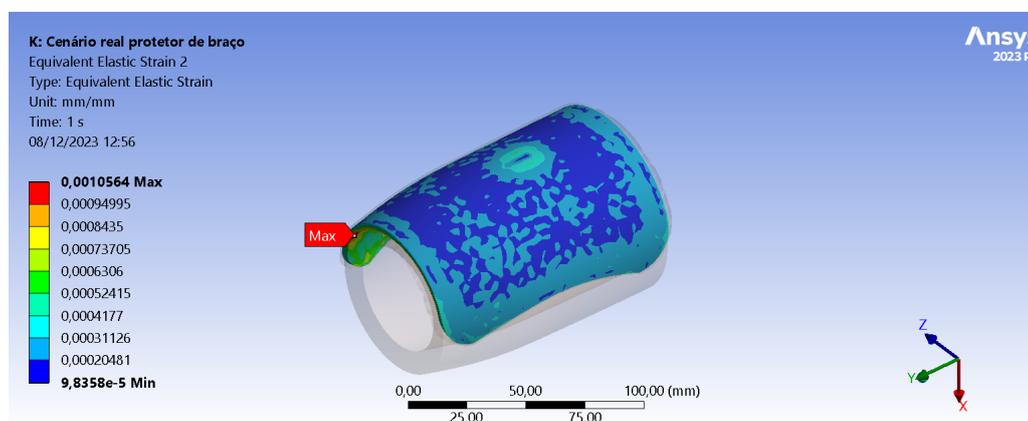


Figura 74 – Tensões no protetor de braço para uma força de 8.681 N (pressão de 1,08 MPa) para o Cenário Real 2 – Fonte: autor

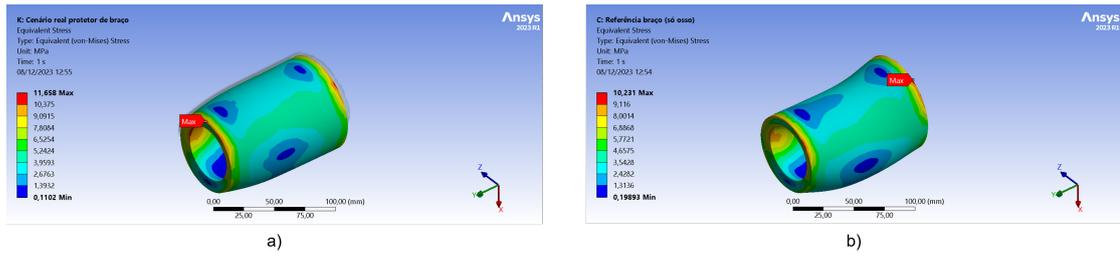


Figura 75 – Comparativo do modelo de membro corporal de braço para uma força de 8.681 N (pressão de 1,08 MPa) para o Cenário Real 2 – a) Com EPI – b) Sem EPI – Fonte: autor

10 Considerações Finais

10.1 Primeira iteração

Na primeira etapa do estudo, foram levantados diversos aspectos pertinentes a utilização de Equipamentos de Proteção Individuais para motociclistas. Nele, foram observadas desde a normas de utilização, sua regulamentação, eficácia e importância no que diz respeito a acidentes motociclísticos, passando por: questões de conforto e ergonomia (aspectos importantes e que podem ditar a utilização desses equipamentos), motivos desses equipamentos não serem diversos para permitir maior conforto, soluções para esses problemas usando métodos não convencionais de *design* e de manufatura e indo até formas de caracterização de novos projetos e modelos desses equipamentos.

Foi abordado que a Manufatura Aditiva poderia ser capaz de superar o problema de baixa variedade de dimensões desses produtos para utilização por parte das pessoas com os diversos biotipos possíveis. Assim, com essa técnica, seria possível utilizar o *design* parametrizado para gerar produtos adaptáveis a cada pessoa e viabilizar a fabricação deles sem a utilização de moldes, tornando esse produto comercialmente viável.

Porém, para observar os produtos fabricados dessa maneira, fez-se necessário conhecer as características, observando as vantagens e desvantagens, dos diferentes processos da Manufatura Aditiva e do material a ser utilizado, verificando, também, o comportamento mecânico desse quando solicitado. Dessa forma, para realizar essa análise mecânica, definiu-se uma forma de transformar efeitos provenientes de impacto em forças de aplicação constante, simplificando o método de análise.

Para a análise mecânica dos EPI, observou-se o modelo de perna de referência em análise MEF feita em ANSYS (melhor apresentado no Apêndice A), tendo como objetivo validar os cenários e condições de carregamento como uma metodologia vantajosa e que possa ser usada para outros EPI, considerando mudanças de material, geometria e existência de reforço. Essa análise numérica retornou importantes resultados a respeito do comportamento mecânico desse equipamento quando solicitado, observando suas tensões, deformações e deslocamentos para diferentes cenários e condições de carregamento, sendo esses:

- **Cenário Experimental:** Nesse cenário foi observado o comportamento do protetor de perna de referência montado em um sistema que simula o ensaio de flexão de 3 pontos, buscando-se, portanto, os valores de força as quais geram tensões de escoamento e de ruptura no equipamento, permitindo um comparativo com um cenário

real, validando (ou não) os modelos numéricos. Encontrou-se que forças entre 500 N e 600 N seriam capazes de gerar essas tensões, sendo uma referência para cenários de avaliação posteriores.

- **Cenário Real 1:** Para esse caso, buscou-se verificar a capacidade desses equipamentos em reduzir as tensões transmitidas para um modelo corporal que representa uma perna quando submetido a um esforço semelhante ao caso antes apresentado. Foi possível observar uma redução na ordem de 50% das tensões no modelo de perna quando comparado com esse sem o protetor, sendo essas reduções resultado da distribuição dos esforços na transmissão, além do acúmulo dessa força na forma de deformação elástica, indicando a capacidade de elevar a proteção dos membros de seu usuário.
- **Cenário Real 2:** Esse foi modelado de forma a realizar as mesmas análises do Cenário Real 1, porém, agora considerando uma força distribuída sobre toda a face principal do equipamento, buscando verificar como é a eficiência dos EPI quando submetidos a uma força em uma área maior. Observou-se que a ordem da redução da tensão é menor em relação ao caso anterior, porém, ainda relevante, estando na casa dos 14%. Essa redução indica que o EPI é mais eficiente para forças localizadas, já que sua capacidade de redistribuir os esforços é praticamente inexistente. Porém, a ordem da força necessária para gerar tensões relevantes no membro corporal cresce grandemente.

10.2 Segunda iteração

A segunda etapa desse estudo consistiu na modelagem de novos protetores, sendo esses os protetores de perna e de braço, usando uma metodologia de *design* parametrizado com esses valores padronizados pensando na geometria geral do membro em questão. Essa técnica de modelagem permitiu a criação de modelos 3D passíveis de se adaptarem a usuários de diferentes biotipos, sendo essa afirmação constatada ao adaptar os protetores para serem usados por *dummies* de diferentes percentis.

Com esses EPI projetados, buscou-se avaliá-los mecanicamente, buscando entender como diferentes propriedades mudam sua resistência mecânica e sua capacidade de absorver e diminuir a transmissão de esforços. Essa avaliação se deu da seguinte forma:

- **Seleção do material:** Primeiro, observou-se como três diferentes materiais de impressão se comportariam mecanicamente para o EPI de perna, sendo esses o ABS, o PLA e o PETG. A conclusão foi que o PLA tinha a maior capacidade de reduzir a transmissão de tensões para o membro corporal, além de esse ser capaz de aguentar

forças maiores antes de atingir tensões de escoamento e ruptura, tornando-o mais adequado ao projeto.

- **Avaliação da espessura:** Após a escolha do material, verificou-se como a mudança de espessura era capaz de alterar as propriedades antes avaliadas. Notou-se que o aumento da espessura era vantajoso no aspecto de diminuir as tensões transmitidas ao membro corporal, além de aguentar maiores forças antes de alcançar as tensões críticas. Contudo, esse aumento progressivo da espessura aumenta o peso do EPI (o que pode prejudicar aspectos de conforto), além de aumentar os custos de fabricação e o tempo de impressão.
- **Análise do reforço:** Considerando os aspectos negativos do aumento contínuo da espessura, buscou-se observar outra solução para melhorar os propriedades mecânicas do EPI, sendo essa o uso de um reforço de material composto na face externa dos protetores. Essa avaliação foi feita considerando o uso de fibra de carbono como material de reforço e trouxe resultados positivos, nas quais as forças máximas admitidas foram maiores e as tensões transmitida foram menores, a custo do aumento da complexidade de fabricação.

Foi observado a elevada eficiência de proteção dos protetores, especialmente, para o Cenário Real 1, no qual a redução foi de quase 70% das tensões máximas sofridas pelo modelos de membro caporal. Já o Cenário Real 2 retornou reduções menos consideráveis, essa observação está relacionada com o aumento do módulo de elasticidade geral da estrutura, já que parte da redução das tensões transmitidas está relacionada com a capacidade do material absorver os esforços na forma de deformações, e essa é reduzida com o material de reforço. Contudo, esse fato é mais relevante para cenários que a força é aplicada sob uma área maior, sendo esse cenário já menos crítico por reduzir as tensões para uma mesma força. Assim, o EPI projetado se faz mais eficiente para colisões mais concentradas, fazendo com que a proteção seja maior ao distribuir os esforços sobre o membro corporal, ao invés de acumular essa energia na forma de deformações plásticas e elásticas.

10.3 Sugestões de melhorias e estudos futuros

Os resultados encontrados indicam que o caminho e as decisões tomadas no estudo são plausíveis, demonstrando uma geometria e propriedades satisfatórias para proteger o usuário, além dessa ser capaz de se adaptar a diferentes modelos corporais considerando suas dimensões triviais. Também foi criada e apresentada uma metodologia estruturada para modelagem e análise de novos equipamentos de proteção, permitindo a expansão desse estudo para novos modelos e regiões de proteção. Também avaliou aspectos impor-

tantes relacionados à utilização desses equipamentos, estruturando um questionário capaz de trazer informações relevantes ao projeto, sendo possível de gerar novas ideias para otimização dos produtos apresentados, permitindo maior aceitação de uso. Dessa forma, esse estudo foi capaz de contextualizar os tópicos de projeto e análise de Equipamentos de Proteção Individual parametrizados e passíveis de serem fabricados por Manufatura Aditiva. Contudo, existem pontos ainda que se observam capacidade de expansão e melhoria dos estudos, sendo esses descritos a seguir.

10.3.1 Otimização e novos modelos de EPI

Buscar a otimização e melhoria dos modelos dos EPI considerando a testagem desses equipamentos por potenciais consumidores e o preenchimento do formulário (Anexo A) por partes desses, avaliando aspectos descritos, como: conforto, ajuste, dimensões e geometria geral da peça. Dessa forma, sendo necessário fazer um estudo completo de ergonomia, focando em aspectos antropométricos e subjetivos de conforto.

Também pode realizar a modelagem e fabricação de novos modelos de EPI, sendo eles feitos para proteger outras regiões do corpo, como articulações, cabeça e a região do tronco, buscando validar aspectos de sua usabilidade da mesma forma descrita anteriormente.

Além disso, a obtenção do membro corporal de possíveis usuários através do escaneamento 3D pode ser vantajoso para esse cenário, pois permite a avaliação dos modelos desenvolvidos para modelos corporais reais.

10.3.2 Melhoria na caracterização numérica

Visando melhorar os resultados obtidos numericamente, é viável o fim da consideração de carga estática ao analisar os equipamentos, sendo mais fiel a realidade uma simulação com carregamentos dinâmicos. Essa análise possui caráter mais complexo, porém, ela pode ser capaz de retornar resultados mais próximos de condições de operações reais desses equipamentos.

Outro aspecto para melhorar a caracterização numérica é a melhoria das condições de contorno, pois foi usado o contato do tipo *bonded* entre o protetor e o membro corporal, o que pode não ser o mais adequado pois deformações que agem de forma a afastar o protetor do membro geram tensões que não ocorreriam na condição real.

Também é possível a realização de simulações mais complexas considerando aspectos não-lineares da interface de carregamento e dos materiais aplicados na simulação.

Por fim, uma melhora no modelo corporal pode resultar em resultados ainda mais precisos. Dessa forma, deve-se deixar a consideração de observar apenas o osso e passar a considerar os tecidos moles como: músculo, pele e gordura, permitindo uma melhor

avaliação mecânica da proteção dos EPI em caso de impactos, avaliando como essas partes corporais influenciam essa dinâmica.

10.3.3 Caracterização experimental

Outro tópico que permite a expansão desse projeto é a fabricação de exemplares protótipos de diferentes EPI nas espessuras e feitos com os materiais descritos neste estudo, buscando comparar os resultados encontrados numericamente, permitindo a melhoria dos modelos e uma mais complexa avaliação das propriedades mecânicas dos protetores.

Também é possível a utilização de corpos de prova para validar considerações como a simplificação feita para a modelagem da estrutura de reforço e a consideração de isotropia do material, usando, por exemplo, o ensaio de impacto com esses corpos de prova.

10.3.4 Análise de material de impressão reforçado

A análise da viabilidade de fabricação de equipamentos utilizando material de impressão reforçado pode ser vantajosa, sendo esse um potencial substituto da camada de reforço por material composto, o que eliminaria processos adicionais de fabricação, além de poder estar em um caminho intermediário do reforço exagerado (o que resulta em menor eficiência de proteção para forças mais distribuídas) e do reforço diminuto (o que resulta no aumento das tensões transmitidas ao usuário).

Referências

- 2E4RODAS. *Conheça os EPIS (itens de segurança) para Motofrete e Motoboy*. 2e4rodas, 2021. Disponível em: <<https://www.2e4rodas.com.br/site/motocenter/conheca-os-epis-itens-de-seguranca-para-motofrete-e-motoboy/>>. Acesso em: 25/05/2023. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 24.
- 3DLAB. *Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D*. 2017. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>>. Acesso em: 20/06/2023. Citado 3 vezes nas páginas 13, 58 e 86.
- 3DLAB. *Creality CR30: conheça agora a impressora 3D infinita!* 2021. Disponível em: <<https://www.3dlab.com.br/creality-cr30-conheca-essa-impressora/>>. Acesso em: 23/05/2023. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 54.
- 3DSYSTEMS. *3D Systems Announces New iSense 3D Scanner*. 3D Systems, 2014. Disponível em: <<https://www.3dsystems.com/press-releases/3d-systems-announces-new-isense-3d-scanner>>. Acesso em: 27/06/2023. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 83.
- 3NTR. *Dainese and 3D printing, from head to toe*. 3ntr Additive Manufacturing Systems, 2022. Disponível em: <<https://3ntr.net/en/2022/11/10/dainese-and-3d-printing/>>. Acesso em: 28/06/2023. Citado na página 62.
- ABNT. Nbr7471 de 12/2015 - veículos rodoviários automotores — capacete e viseiras para condutores e passageiros de motocicletas e veículos similares — requisitos de desempenho e métodos de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasília, DF, 2015. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/1030/abnt-nbr7471>>. Citado na página 31.
- ABNT. Abnt nbr 16933 - vestuário — referenciais de medidas do corpo humano — vestibilidade para mulheres — biótipos retângulo e colher. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasília, DF, 2021. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/13250/nbr16933>>. Citado na página 39.
- ABREU, S. A. C. Impressão 3d baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo. 2015. Citado na página 50.
- AKBAR-KHANZADEH, F.; BISESI, M. S.; RIVAS, R. D. Comfort of personal protective equipment. *Applied ergonomics*, Elsevier, v. 26, n. 3, p. 195–198, 1995. Citado na página 41.
- AKIN, J. Impact load factors for static analysis. *Lecture Notes*, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 10, 72, 73, 91 e 92.
- ALICIOGLU, B. et al. Injuries associated with motorcycle accidents. *Acta Orthop Traumatol Turc*, v. 42, n. 2, p. 106–111, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 76 e 77.
- ANDERL, R.; MENDGEN, R. Parametric design and its impact on solid modeling applications. In: *Proceedings of the third ACM symposium on Solid modeling and applications*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 1–12. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 64.

ANKARATH, S. et al. Injury patterns associated with mortality following motorcycle crashes. *Injury*, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 473–477, 2002. Citado na página 35.

ANSYS. *How to Verify Mesh Quality in ANSYS Workbench*. featiptips, 2015. Disponível em: <<https://featiptips.com/2021/05/07/how-to-verify-mesh-quality-in-ansys-workbench/>>. Acesso em: 18/06/2023. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 70.

ANSYS, C. *Training Manual, Version 12.0*. [S.l.]: ANSYS San Diego, CA, USA., 2006. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 96.

ANTONELLI, L. A. *Impressora 3D de baixo custo*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019. Citado na página 51.

ARAÚJO, L. M. C. de. Projeto de equipamentos de proteção individual para motociclistas. *O Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)*, 2023. Citado 5 vezes nas páginas 10, 77, 78, 98 e 140.

ASTM. *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. [S.l.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 99.

BARRERA, M. Ppe-volution. *Occupational health & safety (Waco, Tex.)*, v. 76, n. 1, p. 50–58, 2007. Citado na página 60.

BARTOL, K. et al. A review of body measurement using 3d scanning. *Ieee Access*, IEEE, v. 9, p. 67281–67301, 2021. Citado na página 42.

BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. *Gestão Tecnologia e Inovação*, v. 1, n. 3, p. 9–18, 2017. Citado na página 53.

BISCHOFF, W. *Foguete produzido por impressora 3D é lançado nos EUA, mas missão falha antes de alcançar órbita*. Estúdios Globo, 2023. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ciencia/noticia/2023/03/23/foguete-produzido-por-impressora-3d-e-lancado-nos-eua-mas-missao-falha-antes-de-alcancar-orbita.ghml>>. Acesso em: 19/06/2023. Citado na página 146.

BLUME, B. A. *Mobilidade urbana: o que tem de errado com o nosso trânsito?* 2016. Disponível em: <<https://www.politize.com.br/mobilidade-urbana-transito-problemas/>>. Acesso em: 25/05/2023. Citado na página 33.

BOURELL, D. et al. Materials for additive manufacturing. *CIRP annals*, Elsevier, v. 66, n. 2, p. 659–681, 2017. Citado na página 52.

BRASIL. Código de trânsito brasileiro: Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. *Departamento Nacional de Trânsito*, Brasília, DF, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9503.htm>. Citado 3 vezes nas páginas 24, 30 e 31.

BRASIL. Lei nº 12.009, de 29 de julho de 2009. *Presidência da República - Casa Civil*, Brasília, DF, 2009. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12009.htm>. Citado na página 32.

- BRASIL. Resolução contran nº 940, de 28 de março de 2022. *CONSELHO NACIONAL DE TRÁNSITO - CONTRAN*, Brasília, DF, 2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-contran-n-940-de-28-de-marco-de-2022-390285259>>. Citado na página 31.
- BUZZATTI, A. et al. Avaliação das propriedades mecânicas e morfológicas das espumas de eva com a incorporação de eva resíduo. Citado na página 59.
- CARVALHO, L. R. Fabricação e caracterização de estruturas sanduíche tipo colmeia com núcleo impresso por fusão e deposição de material termoplástico. 2019. Citado 4 vezes nas páginas 11, 86, 89 e 90.
- CHAUDHRY, F. N. et al. Effect of carbon fibre on reinforcement of thermoplastics using fdm and rsm. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 35, n. 3, p. 352–374, 2022. Citado na página 60.
- CHEN, A.-N. et al. High-performance ceramic parts with complex shape prepared by selective laser sintering: a review. *Advances in Applied Ceramics*, v. 117, p. 1–18, 09 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 55.
- CHEN, Z.; TURNG, L.-S. A review of current developments in process and quality control for injection molding. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, Wiley Online Library, v. 24, n. 3, p. 165–182, 2005. Citado na página 47.
- DATA), M. M. P. *Overview of materials for Epoxy/Carbon Fiber Composite*. 2008. Disponível em: <https://www.matweb.com/search/datasheet__print.aspx?matguid=39e40851fc164b6c9bda29d798bf3726>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 60.
- DATASUS. *Estatísticas vitais: Mortalidade 2020, pela CID-10. Departamento de Informática do SUS*. [S.l.]: Recuperado de <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?sim/cnv/ext10br.def>, 2020. Acesso em: 01/05/2023. Citado na página 25.
- DATTAKUMAR, S. S.; GANESHAN, V. Converting dynamic impact events to equivalent static loads in vehicle chassis. *Department of Applied Mechanics, Chalmers University, Gothenburg, Sweden*, 2017. Citado na página 74.
- DÁVILA, M. A. et al. Processo de moldagem por injeção de polímeros semicristalinos: caracterização e simulação assistida por computador. Florianópolis, SC, 1997. Citado na página 49.
- DELFS, P.; TOWS, M.; SCHMID, H.-J. Optimized build orientation of additive manufactured parts for improved surface quality and build time. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 12, p. 314–320, 2016. Citado na página 51.
- DICKSON, A. N.; ABOURAYANA, H. M.; DOWLING, D. P. 3d printing of fibre-reinforced thermoplastic composites using fused filament fabrication—a review. *Polymers*, MDPI, v. 12, n. 10, p. 2188, 2020. Citado na página 60.
- DINIZ, E. P. H.; ASSUNÇÃO, A. Á.; LIMA, F. d. P. A. Por que os motociclistas profissionais se acidentam?: riscos de acidentes e estratégias de prevenção. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, SciELO Brasil, v. 30, p. 41–50, 2005. Citado na página 30.

- D'OR, G. R. *Biotipo corporal: o que é, tipos e como identificar*. 2023. Disponível em: <<https://www.tuasaude.com/como-identificar-o-seu-biotipo/>>. Acesso em: 22/05/2023. Citado na página 39.
- DREHMER, V. *Brasil é o 2º pior país do mundo para dirigir por quatro motivos*. Estúdio Globo, 2023. Disponível em: <<https://autoesporte.globo.com/mobilidade/noticia/2023/04/brasil-e-o-2-pior-pais-do-mundo-para-dirigir-por-quatro-motivos.ghtml>>. Acesso em: 30/05/2023. Citado na página 33.
- DUFOUR, P. Picking an element type for structural analysis. *Belcan Engineering Group*, v. 5, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 10, 65 e 66.
- FIGUEIREDO, B. B.; CESAR, F. I. G. Um estudo da utilização da impressora 3d na engenharia e na medicina. *RECISATEC-REVISTA CIENTÍFICA SAÚDE E TECNOLOGIA-ISSN 2763-8405*, v. 2, n. 1, p. e2170–e2170, 2022. Citado na página 51.
- FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of cleaner Production*, Elsevier, v. 137, p. 1573–1587, 2016. Citado na página 26.
- GAO, W. et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, Elsevier, v. 69, p. 65–89, 2015. Citado na página 52.
- GLOBO, E. *Veja diferentes regras para uso de moto pelo mundo e no Brasil*. 2014. Disponível em: <<https://g1.globo.com/carros/motos/noticia/2014/08/veja-diferentes-regras-para-uso-de-moto-pelo-mundo-e-no-brasil.html>>. Acesso em: 10/05/2023. Citado na página 32.
- GLOBO, E. *Dez equipamentos de segurança para os motociclistas*. 2016. Disponível em: <<https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2016/11/dez-equipamentos-de-seguranca-para-os-motociclistas.ghtml>>. Acesso em: 01/05/2023. Citado na página 24.
- GLOBO, R. A. E. *Quem são as vítimas do trânsito: motociclistas ou motoristas?* 2014. Disponível em: <<https://g1.globo.com/carros/motos/blog/dicas-de-motos/post/quem-sao-vitimas-do-transito-motociclistas-ou-motoristas.html>>. Acesso em: 25/05/2023. Citado na página 33.
- GOODSHIP, V. *ARBURG practical guide to injection moulding*. [S.l.]: Smithers Rapra, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 9, 46, 48 e 49.
- GORNI, A. A. Introdução aos plásticos. *Revista plástico industrial*, v. 10, n. 09, 2003. Citado na página 61.
- GOUASMI, S. et al. On the reduction of stress concentration factor around a notch using a functionally graded layer. *Materials Research*, SciELO Brasil, v. 18, p. 971–977, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 69.
- HEXR. *Our manufacturing process*. Hexr, 2020. Disponível em: <<https://hexr.com/pages/manufacturing>>. Acesso em: 18/06/2023. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 62.

HIEU, L. C. et al. Customer driven mass-customisation and innovative product development with parametric design and generative modeling. In: *Proceeding of the 15th International Conference on Manufacturing Research. Series: Advances in Transdisciplinary Engineering XXXI*. Editor: James Gao, Mohammed El Souri, Simeon Keates. IOS Press. [S.l.: s.n.], 2017. v. 6, p. 415–420. Citado na página 64.

HSISSOU, R. et al. Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite structures*, Elsevier, v. 262, p. 113640, 2021. Citado na página 59.

HURREN, C.; VARNSVERRY, P.; ROME, L. de. A guide to designing and manufacturing motorcycle protective clothing. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 9, 40 e 41.

IBGE. *Censo 2022*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Disponível em: <<https://censo2022.ibge.gov.br/sobre/numeros-do-censo.html>>. Acesso em: 30/05/2023. Citado na página 34.

IBGE. *Frota de veículos*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120>>. Acesso em: 30/05/2023. Citado na página 34.

INBRAEP. *EPI – Capacete para Motociclista*. INSTITUTO BRASILEIRO DE ENSINO PROFISSIONALIZANTE, 2019. Disponível em: <<https://inbraep.com.br/publicacoes/epi-capacete-motociclista/>>. Acesso em: 28/06/2023. Citado na página 37.

INFRAESTRUTURA, M. da. *Registro Nacional de Acidentes e Estatísticas de Trânsito: banco de dados*. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/docs/renaest>>. Acesso em: 22/05/2023. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 34.

JIANG, J.; XU, X.; STRINGER, J. Support structures for additive manufacturing: a review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, mdpi, v. 2, n. 4, p. 64, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

JURISATO, G. S. et al. Aplicação de tecnologias assistidas no desenvolvimento de uma extrusora para produção de filamento reciclado para impressão 3d. 2017. Citado na página 50.

KFT, C.-C. A. *What Gear Do You Need to Race a Rally?* 2022. Disponível em: <<https://crosscountryadv.com/what-gear-do-you-need-to-race-a-rally/>>. Acesso em: 22/05/2023. Citado na página 35.

KIM, S. et al. Preventive effects of motorcycle helmets on intracranial injury and mortality from severe road traffic injuries. *The American Journal of Emergency Medicine*, v. 36, n. 2, p. 173–178, 2018. ISSN 0735-6757. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735675717305739>>. Citado na página 24.

LANZER, E. A.; STEFFANI, G.; GONÇALVES, T. P. Previsão de custos de fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. *Produção em Foco*, v. 8, n. 3, 2018. Citado na página 25.

- LATIF, K. et al. A review of g code, step, step-nc, and open architecture control technologies based embedded cnc systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 114, p. 2549–2566, 2021. Citado na página 50.
- LÍDER, S. *Relatório Anual 2020*. [S.l.]: Recuperado de <https://www.seguradoralider.com.br/Documents/Relatorio-Anual/Relatorio%20Anual%20-%202020%20v3.pdf?zoom=65%>, 2020. Acesso em: 01/05/2023. Citado na página 25.
- LIU, Y.; GLASS, G. Effects of mesh density on finite element analysis 2013-01-1375. 2013. Citado na página 67.
- LOTTI, C. Influência das condições de processamento na morfologia e das propriedades mecânicas de sistemas poliméricos moldados por injeção e sua predição através de redes neurais artificiais. Universidade Federal de São Carlos, 2004. Citado na página 46.
- MAPFRE. *A Importância do Uso de Equipamentos de Proteção Individual na Pilotagem de Motocicletas*. 2023. Disponível em: <https://www.mapfre.com.br/para-voce/seguro-auto/artigos/a-importancia-do-uso-de-equipamentos-de-protecao-individual-na-pilotagem-de-motocicletas/>. Acesso em: 01/05/2023. Citado na página 25.
- MAZZALI, G. B. Potencialidades da manufatura aditiva. Universidade Federal de São Carlos, 2022. Citado na página 26.
- MAZZOLI, A. Selective laser sintering in biomedical engineering. *Medical & biological engineering & computing*, Springer, v. 51, p. 245–256, 2013. Citado na página 55.
- MCLAREN, P. ‘Danger zone’: MotoGP’s new accident detection system explained. Crash, 2022. Disponível em: <https://www.crash.net/motogp/feature/1018201/1/danger-zone-motogp-s-accident-detection-system-explained>. Acesso em: 18/05/2023. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 36.
- MECALUX. *A impressão 3D leva a logística a uma nova dimensão*. MECALUX, 2021. Disponível em: <https://www.mecalux.com.br/blog/impressao-3d-logistica>. Acesso em: 12/06/2023. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 26.
- MENDES, R. R.; SILVA, F. J. A. da. Relação entre as alterações posturais ocasionadas pelo excesso de peso da mochila escolar e sua incidência no sistema locomotor de escolares do município de guarabira-pb. *Praxia-Revista on-line de Educação Física da UEG*, v. 3, p. e2021003–e2021003, 2021. Citado na página 41.
- MENEGUCCI, F. et al. Vestuário de proteção, materiais têxteis e conforto térmico: uma análise com aplicadores de agrotóxico, epi e ambiente agrícola. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2012. Citado na página 41.
- MERRIAM-WEBSTER. *Merriam-Webster’s collegiate dictionary*. [S.l.]: Merriam-Webster, 2004. Acesso em: 10/05/2023. Citado na página 32.
- MISES, R. v. Mechanik der festen körper im plastisch-deformablen zustand. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, v. 1913, p. 582–592, 1913. Citado na página 71.

- MOLD, R. *INJECTION MOLD FOR THE HELMET*. Runk Mold, 2014. Disponível em: <https://www.runke-mold.com/INJECTIONMOLD_156.html>. Acesso em: 22/06/2023. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 61.
- MUELLER, B. Additive manufacturing technologies—rapid prototyping to direct digital manufacturing. *Assembly Automation*, Emerald Group Publishing Limited, v. 32, n. 2, 2012. Citado na página 56.
- MXPARTS. *Cotoveleira IMS Protector*. MXParts, 2023. Disponível em: <<https://www.mxparts.com.br/cotoveleira-ims-protector>>. Acesso em: 30/06/2023. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 77.
- MYUNG, S.; HAN, S. Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method. *Expert Systems with applications*, Elsevier, v. 21, n. 2, p. 99–107, 2001. Citado na página 63.
- NASA. *NASA Astronauts on Mars (Illustration)*. NASA, 2020. Disponível em: <<https://mars.nasa.gov/resources/25153/nasa-astronauts-on-mars-illustration/>>. Acesso em: 20/07/2023. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 147.
- NATARAJAN, G.; T, P. R. Review on the performance characteristics and quality standards of motorcycle protective clothing. *Journal of Industrial Textiles*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 51, n. 5_suppl, p. 7409S–7427S, 2022. Citado na página 25.
- NEGI, S.; DHIMAN, S.; SHARMA, R. Basics and applications of rapid prototyping medical models. *Rapid Prototyping Journal*, v. 20, 04 2014. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 55.
- NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3d printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, v. 143, p. 172–196, 2018. Citado na página 53.
- NHTSA. *Motorcycle Safety*. National Highway Traffic Safety Administration, 2022. Disponível em: <<https://www.nhtsa.gov/road-safety/motorcycles>>. Acesso em: 30/05/2023. Citado na página 34.
- NORRIS, E.; MYERS, L. Determinants of personal protective equipment (ppe) use in uk motorcyclists: Exploratory research applying an extended theory of planned behaviour. *Accident Analysis Prevention*, v. 60, p. 219–230, 2013. ISSN 0001-4575. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457513003539>>. Citado na página 25.
- OLUWADIYA, K. S. et al. Motorcycle limb injuries in a developing country. *West African Journal of Medicine*, v. 23, n. 1, p. 42–47, 2004. Citado na página 77.
- OTTE, D.; MIDDELHAUVE, V. Quantification of protective effects of special synthetic protectors in clothing for motorcyclists. In: *1987 International RCOBI Conference of the Biomechanics of Impacts, Birmingham*. [S.l.: s.n.], 1987. p. 1–18. Citado na página 37.
- OTTE, D.; SCHROEDER, G.; RICHTER, M. Possibilities for load reductions using garment leg protectors for motorcyclists—a technical, medical and biomechanical approach. In: *Annual proceedings. Association for the Advancement of Automotive Medicine*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 46, p. 367–385. Citado na página 37.

- PANDEY, P.; REDDY, N. V.; DHANDE, S. Part deposition orientation studies in layered manufacturing. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 185, n. 1-3, p. 125–131, 2007. Citado na página 51.
- PAPANEEK, V. Design for the real world: Human ecology and social change, 1971. *St Albans, Herts.: St Albans, Herts.: Paladin*, 2011. Citado na página 43.
- PAVLOVSKY, D. *10 Best Motorcycle Lifestyle Brands*. Topspeed.com, 2022. Disponível em: <<https://www.topspeed.com/best-motorcycle-lifestyle-brands/#fuel>>. Acesso em: 28/06/2023. Citado na página 39.
- PEARSON, J. R. *Mechanics of polymer processing*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 48.
- POLÍMEROS, A. *Processamento de Polímeros: Extrusão e Injeção*. 2018. Disponível em: <<https://afinkopolimeros.com.br/processamento-de-polimeros/>>. Acesso em: 01/05/2023. Citado na página 25.
- PRPIĆ, V. et al. Comparison of mechanical properties of 3d-printed, cad/cam, and conventional denture base materials. *Journal of Prosthodontics*, Wiley Online Library, v. 29, n. 6, p. 524–528, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 59.
- QUEIROZ, D. D. d. et al. Influência das condições de mistura e dos teores de acetato de vinila e de argila nas propriedades de nanocompósitos de eva/montmorilonita organofílica. *Polímeros*, SciELO Brasil, v. 24, p. 579–586, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 59.
- RACERED. *MOTORCYCLE PPE AND CE CERTIFICATION EXPLAINED*. RACERED, 2020. Disponível em: <<https://racered.eu/blogs/blog/ce-certification-explained>>. Acesso em: 28/06/2023. Citado 3 vezes nas páginas 9, 38 e 99.
- RECHNITZER, G.; POWELL, C.; SEYER, K. *Performance criteria, design and crash tests of effective rear underride barriers for heavy vehicles*. [S.l.], 2001. Citado na página 73.
- REHMANI, M. A. A.; JAYWANT, S. A.; ARIF, K. M. Study of microchannels fabricated using desktop fused deposition modeling systems. *Micromachines*, MDPI, v. 12, n. 1, p. 14, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 9, 53 e 54.
- REILLY, D. T.; BURSTEIN, A. H.; FRANKEL, V. H. The elastic modulus for bone. *Journal of biomechanics*, Elsevier, v. 7, n. 3, p. 271–275, 1974. Citado na página 45.
- RENAP, K.; KRUTH, J.-P. Recoating issues in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, MCB UP Ltd, v. 1, n. 3, p. 4–16, 1995. Citado na página 55.
- REPSOL. *MotoGP armour: maximum protection for MotoGP riders*. 2021. Disponível em: <<https://www.boxrepsol.com/en/motogp-en/motogp-armour-maximum-protection-for-motogp-riders/>>. Acesso em: 22/05/2023. Citado na página 35.
- REV'IT! *CE certification explained*. REV'IT! Newsletter, 2020. Disponível em: <<https://www.revitsport.com/en/revit-ce-certification>>. Acesso em: 28/06/2023. Citado na página 38.

- ROCHA, H. E. R. d. et al. Segurança do trabalho: a importância do uso de epi. 029, 2022. Citado na página 24.
- RODRIGUES, V. P. et al. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, v. 12, n. 3, p. 1, 2017. Citado na página 26.
- ROME, L. de. The injury reduction benefits of motorcycle protective clothing. In: *NTSB Public Forum on Motorcycle Safety*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 12–13. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 44.
- ROME, L. de et al. Motorcycle protective clothing: protection from injury or just the weather? *Accident Analysis & Prevention*, Elsevier, v. 43, n. 6, p. 1893–1900, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- SAVAGE, P. User interface evaluation in an iterative design process: A comparison of three techniques. In: *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 307–308. Citado na página 78.
- SERRE, T. et al. *HUMOS (Human Model for Safety) Geometry: From One Specimen to the 5 th and 95 th Percentile*. [S.l.], 2006. Citado na página 44.
- SILVA, J.; CHANG, K.-H. Design parameterization for concurrent design and manufacturing of mechanical systems. *Concurrent Engineering*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 10, n. 1, p. 3–14, 2002. Citado na página 27.
- SILVA, M. V. B. d. Caracterização mecânica de materiais utilizados em prototipagem rápida por deposição de material fundido para aplicação aeroespacial. 2018. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/22616>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 58.
- SILVA, W. R. d. Os acidentes de trânsito e os impactos na saúde pública. 2017. Citado na página 33.
- SIMMONS, K. K. P. *Body shape analysis using three-dimensional body scanning technology*. [S.l.]: North Carolina State University, 2002. Citado na página 39.
- SIMSCALE. *Mesh Quality*. SIMSCALE, 2020. Disponível em: <<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/meshing/mesh-quality/>>. Acesso em: 28/06/2023. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.
- SMITH, B. M. et al. Towards accurate 3d human body reconstruction from silhouettes. In: IEEE. *2019 International Conference on 3D Vision (3DV)*. [S.l.], 2019. p. 279–288. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 42.
- STOLARSKI, T.; NAKASONE, Y.; YOSHIMOTO, S. *Engineering analysis with ANSYS software*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2018. Citado na página 67.
- SYSTEMES, D. *Critério de tensão de von Mises máxima*. Dassault Systèmes, 2012. Disponível em: <https://help.solidworks.com/2012/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/prot_vonm.htm?id=3abc3d3ea83d4d8fb9cc776007bd04da#Pg0>. Acesso em: 28/06/2023. Citado na página 71.

- TECNOLOGIES, W. *GUIA DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PLÁSTICOS*. 2019. Disponível em: <<https://www.wishbox.net.br/blog/processos-de-fabricacao-de-plasticos/>>. Acesso em: 01/05/2023. Citado na página 26.
- TEIXEIRA, J. R. B. et al. Utilização dos equipamentos de proteção individual por mototaxistas: percepção dos fatores de risco e associados. *Cadernos de Saúde Pública*, SciELO Public Health, v. 30, p. 885–890, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 39.
- TRADEINN. *Alpinestars Joelheiras-Caneleiras Bionic Action*. Tradeinn, 2023. Disponível em: <<https://www.tradeinn.com/motardinn/pt/alpinestars-joelheiras-caneleiras-bionic-action-junior>>. Acesso em: 30/06/2023. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 76.
- TURNER, B. N.; STRONG, R.; GOLD, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling. *Rapid prototyping journal*, Emerald Group Publishing Limited, v. 20, n. 3, p. 192–204, 2014. Citado na página 52.
- UE. *Marcação CE*. União Europeia, 2022. Disponível em: <https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/labels-markings/ce-marking/index_pt.htm>. Acesso em: 28/06/2023. Citado na página 38.
- VEIGA, M. M.; ALMEIDA, R.; DUARTE, F. O desconforto térmico provocado pelos equipamentos de proteção individual (epi) utilizados na aplicação de agrotóxicos. *Laboreal*, Universidade do Porto, v. 12, n. N^o2, 2016. Citado na página 41.
- VIDAL, M. C. et al. Introdução à ergonomia. *Apostila do Curso de Especialização em Ergonomia Contemporânea/CESERG*. Rio de Janeiro: COPPE/GENTE/UFRJ, 2000. Citado na página 40.
- VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. [S.l.]: Editora Blucher, 2021. Citado na página 50.
- WERNKE, A. P. Caracterização e avaliação da preditibilidade de modelos isotrópicos e ortotrópicos para materiais impressos com foco em otimizações topológicas. 2019. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/24054>>. Citado na página 54.
- WHEELER, A. *Startup's Bike Helmet is Custom Fit, 3D Printed Honeycomb*. engineering.com, 2020. Disponível em: <<https://www.engineering.com/story/startups-bike-helmet-is-custom-fit-3d-printed-honeycomb>>. Acesso em: 14/06/2023. Citado na página 61.
- WHO. Publications. *Global status report on road safety 2018*. [S.l.]: World Health Organization, 2018. 403 p. p. Citado 4 vezes nas páginas 25, 33, 34 e 37.
- WHO. *Helmets: a road safety manual for decision-makers and practitioners, 2nd Edition*. [S.l.]: World Health Organization, 2022. Citado na página 32.
- WHO. *OMS divulga novo guia sobre uso de capacetes para motociclistas*. World Health Organization, 2023. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2023/04/1812642>>. Acesso em: 10/05/2023. Citado na página 32.

- WIBERG, A.; PERSSON, J.; ÖLVANDER, J. Design for additive manufacturing—a review of available design methods and software. *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Publishing Limited, 2019. Citado na página 56.
- WICK, M. et al. The motorcyclist: easy rider or easy victim? an analysis of motorcycle accidents in germany. *The American journal of emergency medicine*, Elsevier, v. 16, n. 3, p. 320–323, 1998. Citado na página 35.
- WICKRAMASINGHE, S.; DO, T.; TRAN, P. Fdm-based 3d printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers*, MDPI, v. 12, n. 7, p. 1529, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 59.
- WILCZYŃSKI, K. et al. Fundamentals of global modeling for polymer extrusion. *Polymers*, MDPI, v. 11, n. 12, p. 2106, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 47.
- WNEK, G. E.; BOWLIN, G. L. *Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering*. [S.l.]: CRC Press, 2008. Citado na página 46.
- WONG, K. C. 3d-printed patient-specific applications in orthopedics. *Orthopedic research and reviews*, Taylor & Francis, p. 57–66, 2016. Citado na página 51.
- WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, Hindawi, v. 2012, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 52, 53 e 55.
- XIAO, J. et al. Large-scale 3d printing concrete technology: Current status and future opportunities. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, v. 122, p. 104115, 2021. Citado na página 52.
- ZETTAS, J. P.; ZETTAS, P.; THANASOPHON, B. Injury patterns in motorcycle accidents. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, LWW, v. 19, n. 11, p. 833–836, 1979. Citado na página 37.
- ZIAEE, M.; CRANE, N. B. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, Elsevier, v. 28, p. 781–801, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 56.
- ZIER, A. F. et al. Estudo da prototipagem rápida por meio da impressão 3d e seu efeito na redução de custos e prazos dos projetos de produto. *Memorial TCC Caderno da Graduação*, v. 5, n. 1, p. 301–318, 2019. Citado na página 51.

Apêndices

APÊNDICE A – Caracterização numérica do protetor de referência

A seção a seguir foi produzida durante a primeira iteração deste estudo, onde foi avaliada a viabilidade dos cenários de simulação e das condições de carregamento para o protetor que foi usado como referência (ARAÚJO, 2023).

A.1 Cenário Experimental

O protetor de perna referência foi simulado nas condições do Cenário Experimental para os quatro diferentes carregamentos, trazendo resultados respectivos às tensões, deformações e deslocamentos, visíveis na tabela 40. Esse equipamento consta apenas com o núcleo impresso, não contendo a interface de EVA nem o reforço de carbono, além de possuir considerações geométricas de geometria diferentes do protetor de perna desenvolvido nesse estudo.

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	25,47	1,49	0,0074	0,0005	0,83
F_{c2}	127,21	7,48	0,0371	0,0025	4,12
F_{c3}	397,72	23,39	0,1161	0,0079	12,90
F_{c4}	795,52	46,80	0,2323	0,0158	25,82

Tabela 40 – Dados mecânicos numéricos referentes ao Cenário Experimental do protetor de perna de referência

Além disso, buscou-se verificar as forças que geram tensões de escoamento e ruptura do PLA, visível na Figura 76.

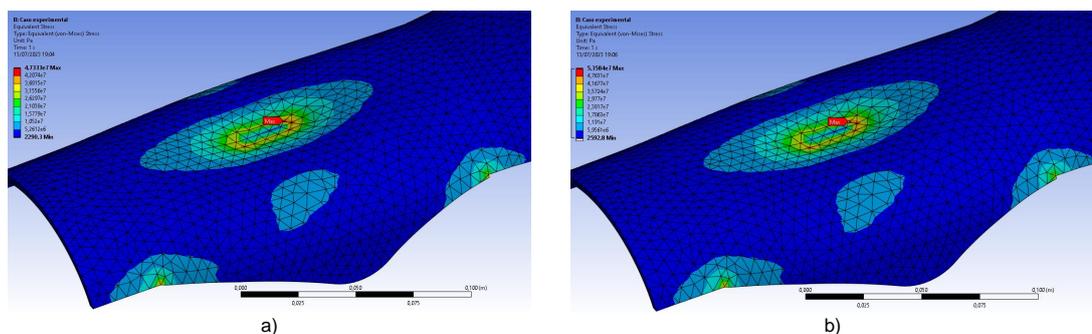


Figura 76 – Tensões resultantes da força de - a) 530 N - b) 600 N – Fonte: autor

Essas forças podem servir de referências para a validação do modelo numérico do protetor de referência, já que, assim, faz-se possível a realização de um ensaio experimental em laboratório para validação.

A.2 Cenário Real 1

Para o Cenário Real 1, foram produzidas as tabelas das informações mecânicas do equipamento quando presente (Tab. 41) e também a do membro corporal para ambas as condições (Tab. 42 e 43).

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	1,41	0,06	0,0004	0,0000	0,02
F_{c2}	7,05	0,34	0,0022	0,0001	0,08
F_{c3}	22,06	1,06	0,0069	0,0003	0,26
F_{c4}	44,13	2,13	0,0139	0,0064	0,52

Tabela 41 – Dados mecânicos numéricos referentes ao protetor de perna de referência no Cenário Real 1

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	1,73	0,18	0,0001	0,0000	0,02
F_{c2}	8,64	0,94	0,0005	0,0000	0,08
F_{c3}	27,01	2,94	0,0015	0,0001	0,26
F_{c4}	54,03	5,89	0,0031	0,0003	0,52

Tabela 42 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal de referência no Cenário Real 1 com a presença do protetor de perna

F_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
F_{c1}	3,24	0,20	0,0002	0,0000	0,01
F_{c2}	18,94	1,02	0,0012	0,0000	0,08
F_{c3}	59,22	3,20	0,0037	0,0001	0,27
F_{c4}	118,47	6,40	0,0075	0,0003	0,54

Tabela 43 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal de referência no Cenário Real 1 com a ausência do protetor de perna

As conclusões observadas são equivalentes àquelas encontradas anteriormente, contudo, considerando a ausência, principalmente, da camada de reforço, que alterou algumas propriedades de proteção, mas que continuam agindo de forma semelhante.

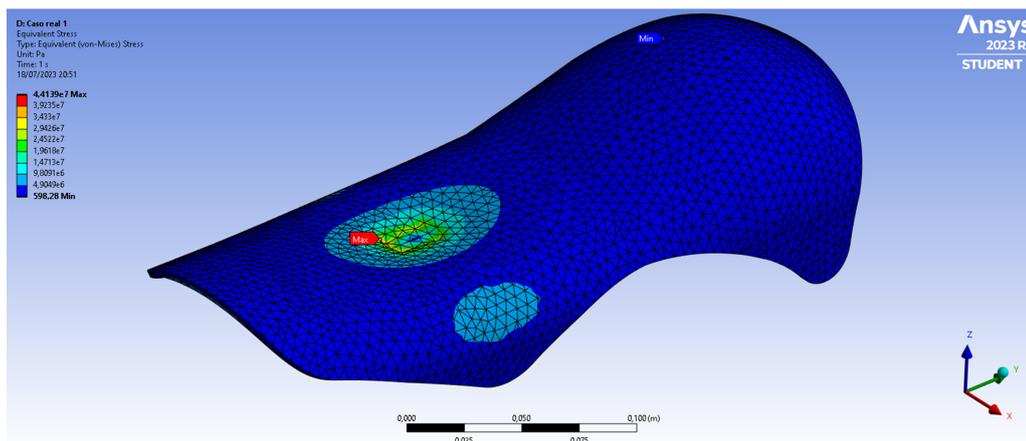


Figura 77 – Tensões no protetor de perna de referência para uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 – Fonte: autor

Essa eficiência é evidenciada, principalmente, quando comparada as tensões no modelo de membro corporal com e sem um equipamento de proteção, visíveis na Tabela 44 e na Figura 78.

F_{ci}	$\sigma_{comprotetor}$ [MPa]	$\sigma_{semprotetor}$ [MPa]	Diferença [MPa]	%
F_{c1}	1,73	3,24	1,51	47%
F_{c2}	9,64	18,94	9,3	49%
F_{c3}	27,01	59,22	32,21	54%
F_{c4}	54,03	118,47	64,44	54%

Tabela 44 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal de referência com e sem protetor para o Cenário Real 1

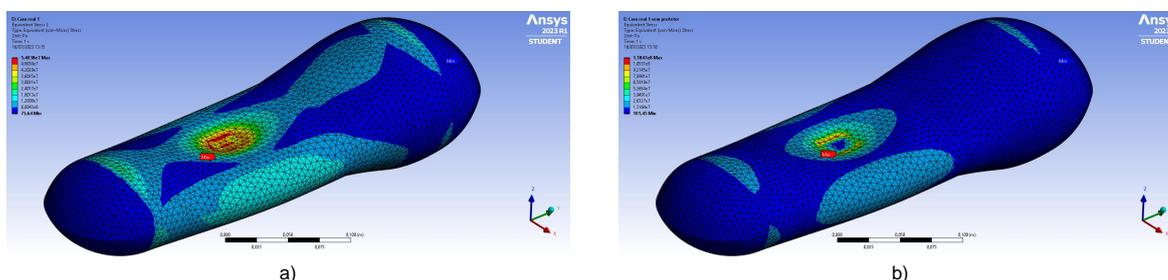


Figura 78 – Comparativo do modelo de membro corporal sob uma força de 8.681 N para o Cenário Real 1 - a) Com EPI - b) Sem EPI – Fonte: autor

A redução nas transmissões de tensões para o membro havendo a presença de um equipamento de proteção no cenário da carga aplicada numa região foi na ordem

de, aproximadamente, 50%, menor do que a observada para o protetor com reforço de material composto.

A.3 Cenário Real 2

Para o cálculo de pressão, tendo como referência que a área A de aplicação dessa carga, extraída do modelo 3D do protetor de referência, é de $0,0476 \text{ m}^2$, tem-se as seguintes pressões, visíveis na Tabela 45.

Força de cada condição (F_{ci}) [N]	Pressão equivalente (P_{ci}) [Pa]
278	5.828
1.388	29.099
4.340	90.987
8.681	181.994

Tabela 45 – Pressão equivalente para cada força

Utilizando essas pressões, as simulações foram executadas a fim de encontrar as mesmas propriedades mecânicas antes obtidas para os outros casos. As Tabelas 46 e 47 são para o cenário com protetor, representando, respectivamente, o protetor e o modelo de perna. A Tabela 48 conta com as informações do modelo de perna sem EPI.

P_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
P_{c1}	0,10	0,01	0,0000	0,0000	0,00
P_{c2}	0,53	0,08	0,0001	0,0000	0,00
P_{c3}	1,65	0,25	0,0005	0,0000	0,04
P_{c4}	3,31	0,50	0,0010	0,0001	0,09

Tabela 46 – Dados mecânicos numéricos referentes à caneleira no Cenário Real 2

P_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
P_{c1}	0,29	0,06	0,0000	0,0000	0,00
P_{c2}	1,48	0,30	0,0000	0,0000	0,01
P_{c3}	4,65	0,94	0,0003	0,0000	0,04
P_{c4}	9,31	1,88	0,0006	0,0001	0,09

Tabela 47 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a presença do protetor de perna

P_{ci}	σ_{max} [MPa]	σ_{med} [MPa]	ϵ_{max}	ϵ_{med}	Δ_{max} [mm]
P_{c1}	0,34	0,06	0,0000	0,0000	0,00
P_{c2}	1,71	0,30	0,0001	0,0000	0,01
P_{c3}	5,36	0,96	0,0003	0,0000	0,04
P_{c4}	10,73	1,92	0,0006	0,0001	0,09

Tabela 48 – Dados mecânicos numéricos referentes ao membro corporal no Cenário Real 2 com a ausência do protetor de perna

Novamente, com essas informações, avaliou-se o nível de redução das tensões transmitidas para o modelo de membro corporal, visível na Tabela 49.

P_{ci}	$\sigma_{comprotetor}$ [MPa]	$\sigma_{semprotetor}$ [MPa]	Diferença [MPa]	%
P_{c1}	0,29	0,34	0,05	15%
P_{c2}	1,48	1,71	0,23	13%
P_{c3}	4,65	5,36	0,71	13%
P_{c4}	9,31	10,73	1,42	13%

Tabela 49 – Diferença das tensões no modelo de membro corporal com e sem protetor para o Cenário Real 2

As observações foram equivalentes as encontradas nas análises do protetor de perna desenvolvido nesse projeto.

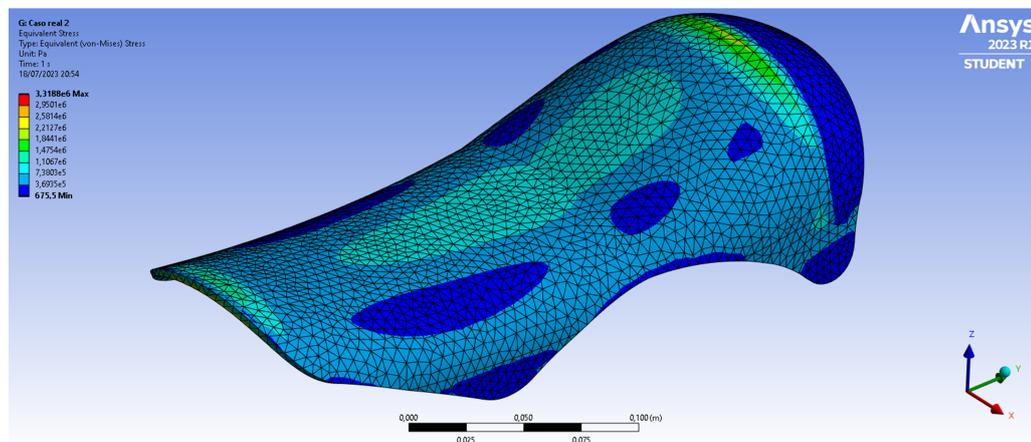


Figura 79 – Tensões no protetor de perna para um força de 8.681 N para o Cenário Real 2 – Fonte: autor

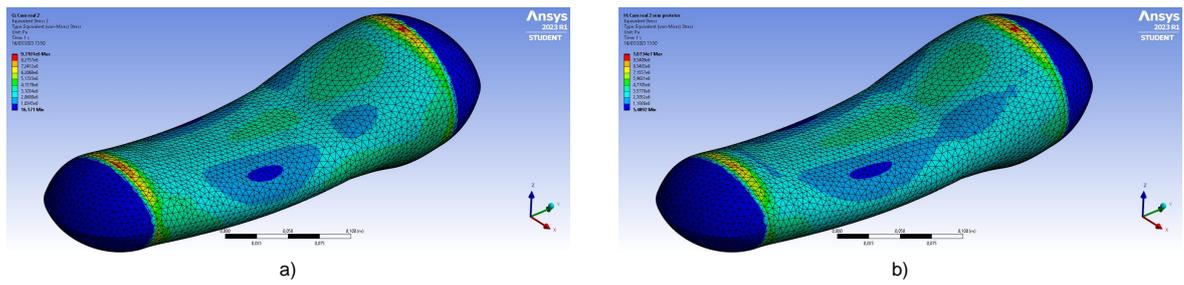


Figura 80 – Comparativo do modelo de membro corporal uma pressão de 181.994 Pa para o Cenário Real 2 - a) Com EPI - b) Sem EPI – Fonte: autor

Nota-se que, novamente, o equipamento protetor foi responsável por reduzir as tensões transmitidas ao modelo de perna, contudo, diferente do Cenário Real 1, que teve uma redução na ordem de 50%, agora ela é próxima a 15%, sendo essa diferença devido a maior área de aplicação da força.

APÊNDICE B – Colonização de Marte

Esse apêndice é mais a título de curiosidade, buscando conceituar esse trabalho em aspectos que são importantes no cenário aeroespacial, demonstrando sua abrangência e importância que se estendem do cenário motociclístico, além de apresentar outras formas de interpretar a sua relevância.

O estudo em questão ressalta a Manufatura Aditiva como uma ferramenta promissora e emergente no cenário da indústria 4.0. Sua versatilidade em criar produtos sem a necessidade de moldes ou complexas ferramentas, além da própria impressora, tem se mostrado cada vez mais relevante em diversas aplicações, desde simples impressões caseiras até a fabricação de peças para o setor aeroespacial, como o foguete Terran 1 (BISCHOFF, 2023), portanto, essa tecnologia tem ganhado espaço em diferentes camadas da sociedade.

Um dos aspectos mais notáveis da Manufatura Aditiva, apresentada anteriormente no estudo, é a facilidade de prototipagem e fabricação de produtos utilizando apenas modelos 3D. Essa característica se torna especialmente relevante em cenários onde os recursos são escassos, possibilitando a criação de equipamentos sob medida de forma mais acessível e eficiente.

No contexto atual, no qual diversas empresas, como SpaceX, NASA e outras, estão empenhadas em expandir a raça humana além dos domínios terrestres, as vantagens dessa tecnologia são ainda mais evidentes. Para viagens interplanetárias, como a tão ambiciosa ida a Marte, a Manufatura Aditiva oferece uma solução valiosa para o desafio do gerenciamento de recursos embarcados em espaçonaves. Considerando a limitada massa de carga paga em foguetes, é fundamental otimizar o peso dos equipamentos e componentes a serem transportados. Nesse contexto, essa técnica de manufatura possibilita a produção de diversas peças, o que contribui diretamente para a redução do peso total da carga levada, permitindo que mais recursos sejam alocados para outros propósitos essenciais para a missão.

Dessa forma, considerando os trajes espaciais que têm como função proteger os astronautas das diferentes intempéries inerentes às missões, a aplicação da Manufatura Aditiva se mostra altamente vantajosa. A tecnologia permite a produção de peças sob medida que se ajustam perfeitamente às necessidades e à anatomia do astronauta, garantindo tanto sua segurança quanto o melhor desempenho durante as missões espaciais. Além disso, com a capacidade de criar componentes personalizados torna possível a adaptação de trajes para diferentes atividades, como caminhadas espaciais e operações específicas em outros planetas, não se fazendo necessário levar todos esses recursos prontos, podendo fabricar conforme demanda, além de permitir o reprocessamento desses materiais, elevando

a eficiência dos recursos levados nessas missões.



Figura 81 – Ilustração de astronautas em marte – Fonte: (NASA, 2020)

Portanto, o estudo apresentado, apesar de ter como base solucionar um problema mais corriqueiro, estando contextualizado em equipamentos de proteção para motociclistas, pode ter seu cenário elevado para ambientes ainda mais ambiciosos, referenciando a importância da Manufatura Aditiva e do *design* parametrizado como tecnologias relevantes e consideráveis para o desenvolvimento tecnológico humano.

Em suma, a Manufatura Aditiva abre novas possibilidades na exploração espacial e em outras áreas da indústria, sendo uma aliada crucial para alcançar avanços significativos no campo da tecnologia espacial e no desenvolvimento de produtos sob medida com eficiência, economia de recursos e elevada performance.

APÊNDICE C – Custos de fabricação

Considerando um cenário de análise da viabilidade financeira da implementação da técnica de fabricação de EPI descrita nesse estudo, buscou-se criar uma visibilidade dinâmica que, através de certas variáveis, fosse capaz de trazer análises de custos por equipamento fabricado, preço da venda considerando uma margem de lucro, custo total e lucro total previsto. Essa dinâmica foi construída em forma de tabela e as variáveis nela presentes consideram aspectos aproximados, tendo como objetivo refinar essas informações conforme evoluções nesse área de estudo, visando uma melhor avaliação dos aspectos financeiros dessa solução de engenharia. Isto posto, a tabela criada é visível na Figura 82.

Densidade PLA [g/cm ³]	1,24							
Preço PLA (R\$/g)	0,1							
Preço HH projeto [R\$/h]	20							
Preço HH fabricação [R\$/h]	10							
Preço energia [R\$/kWh]	0,57							
Preço impressora [R\$]	6500							
Consumo energia [kWh]	0,81							
Margem de lucro	1,1							
		Qtd fabricada	HH (projeto)	HH (fabricação) [u]	Tempo impressao [h]	Volume [cm ³]	Qtd de material [g]	
Protetor de braço		50	30	8	24	103	127,7	
Protetor de perna		50	40	8	35	193,7	240,188	
		Projeto [u]	Fabricação [u]	Material [u]	Energia [u]	Acabamento [u]	Finalização [u]	Outros [u]
R\$	55,33	R\$ 80,00	R\$ 12,77	R\$ 11,08	R\$ 20,00	R\$ 30,00	R\$ 20,00	
R\$	59,33	R\$ 80,00	R\$ 24,02	R\$ 16,16	R\$ 24,00	R\$ 35,00	R\$ 24,00	
		Custo final [u]	Preço venda [u]	Total de custos	Total de lucros			
R\$	229,19	R\$ 252,10	R\$ 11.459,31	R\$ 1.145,93				
R\$	262,51	R\$ 288,76	R\$ 13.125,58	R\$ 1.312,56				

Figura 82 – Tabela para predição de aspectos financeiros da fabricação dos EPI por Manufatura Aditiva – Fonte: autor

Outros custos que seriam inerentes à estrutura desse projeto seriam o de HH de adquirir as medidas corporais do potencial usuário e o custo do scanner corporal (ou qualquer outro equipamento de aquisição de dimensões).

Anexos

ANEXO A – Questionário de utilização

Questionário sobre EPI

1. Características individuais do usuário

a. Informações demográficas

- i. Idade: _____
- ii. Sexo: () Masculino () Feminino () Outro: _____
- iii. Peso (kg): _____
- iv. Altura (cm): _____
- v. Veículo: () Esportiva () Custom () Touring () Off-road () Outro
- vi. Frequência de Uso: () Diário () Semanal () Mensal () Ocasional
- vii. Tempo médio de Uso: () Até 1 hora () 2 a 4 horas () + de 8 horas

b. Medidas Antropométricas:

- i. Altura (m): _____
- ii. Peso (Kg): _____
- iii. Circunferência da Cintura (mm): _____
- iv. Comprimento do Braço (mm): _____
- v. Comprimento da perna (mm): _____
- vi. Comprimento do tronco (mm): _____

2. Avaliação dos aspectos de ergonomia

a. Percepção individual de conforto:

- i. Avalie o conforto geral do seu equipamento de proteção em uma escala de 1 a 10, sendo 1 muito desconfortável e 10 muito confortável: _____
- ii. Como você descreveria aspectos sensoriais táteis do equipamento?
() Satisfatório () Moderadamente satisfatório () Insatisfatório
Descreva: _____
- iii. Como você descreveria o ajuste do equipamento ao seu corpo?
() Satisfatório () Moderadamente satisfatório () Insatisfatório
Descreva: _____
- iv. Como você descreveria a distribuição de peso do equipamento?
() Equilibrada () Levemente desequilibrada () Fortemente desequilibrada
Descreva: _____

a. Flexibilidade e mobilidade:

- i. Como você avalia a flexibilidade dos materiais utilizados no seu equipamento?

Rígido Moderadamente flexível Altamente flexível

Descreva: _____

- ii. O equipamento permite movimentos naturais durante diferentes atividades montado à motocicleta, como fazer curvas, trocar de marcha e montar no veículo?

Permite Permite de forma moderada Não permite

Descreva: _____

- iii. O equipamento permite movimentos naturais durante diferentes atividades fora da moto, como flexionar joelhos e braços, andar e se sentar?

Permite Permite de forma moderada Não permite

Descreva: _____

b. Conforto térmico:

- i. Como você avalia aspectos de conforto térmico do equipamento?

Satisfatório Moderadamente satisfatório Insatisfatório

Descreva: _____

- ii. Como você avalia aspectos de transpiração do corpo ao usar o equipamento?

Satisfatório Moderadamente satisfatório Insatisfatório

Descreva: _____

2. Avaliação dos aspectos de segurança

a. Percepção individual de segurança:

- i. Como você avalia a área que os equipamentos protegem?

Suficiente Insuficiente Exagerada

Descreva: _____

- ii. Como você avalia a forma do equipamento no que tange à segurança?

Satisfatório Moderadamente satisfatório Insatisfatório

Descreva: _____

i. Como você avalia a região que os equipamentos protegem?

Necessárias Moderadamente necessárias Desnecessárias

Descreva: _____

2. Comentários e outras observações do equipamento

a. Comente situações ou momentos específicos que o equipamento apresentou um elevado desconforto:

b. Comente situações ou momentos específicos que o equipamento apresentou uma sensação de insegurança:

c. Comente expectativas não atendidas pelo equipamento:

d. Alguma observação final?
