

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE COMUNICAÇÃO E EXPRESSÃO  
DEPARTAMENTO DE DESIGN E EXPRESSÃO GRÁFICA – EGR  
DESIGN DE PRODUTO

Gabriela Chicarelli Ruiz

**PROPOSTA DE ENTRESSOLA CUSTOMIZÁVEL FABRICADA COM  
IMPRESSÃO 3D**

Florianópolis

2022

Gabriela Chicarelli Ruiz

**PROPOSTA DE ENTRESSOLA CUSTOMIZÁVEL FABRICADA COM  
IMPRESSÃO 3D**

Projeto de Conclusão de Curso (PCC) submetido ao Programa de Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Bacharel em Design de Produto.

Orientador: Prof. Dra. Regiane Trevisan Pupo

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Chicarelli, Gabriela

Proposta de Entressola Customizável Fabricada com Impressão 3D / Gabriela Chicarelli ; orientadora, Regiane Trevisan Pupo, 2022.

115 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Comunicação e Expressão, Graduação em Design, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Design. 2. Design de Entressola . 3. Modelagem Paramétrica. 4. Customização em Massa. 5. Manufatura Aditiva. I. Trevisan Pupo, Regiane. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Design. III. Título.

Gabriela Chicarelli Ruiz

**Proposta de entressola customizável fabricada com impressão 3D**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Design de Produto e aprovado em sua forma final pelo Curso de Design de Produto da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 14 de Julho de 2022.

---

Prof. Cristiano Alves, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof<sup>a</sup>. Regiane Trevisan Pupo, Dra.  
Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof<sup>a</sup>. Ana Veronica Pazmino, Dra.  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Ivan Luiz de Medeiros, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

## RESUMO

A indústria calçadista está passando por uma transformação e, atualmente, caminha em direção à tendência da customização em massa, um processo em que há a retomada da era original da produção artesanal, mas com as vantagens de sistemas e tecnologias avançadas que viabilizam a produção de lotes de itens personalizados, oferecendo soluções que se adequem melhor às necessidades e desejos do consumidor. Sabe-se que em razão da grande complexidade da estrutura dos pés e de sua diversidade dimensional entre a população, os tênis ainda apresentam muitos problemas ergonômicos que causam prejuízos que vão além da dor e desconforto e podem levar a lesões e deformidades nos pés. Com base nessa reflexão, este Projeto de Conclusão de Curso teve como objetivo desenvolver uma proposta de entressola de tênis customizável a partir de algoritmos e fabricada por impressão 3D. Buscando o desenvolvimento de soluções e a criação de artefatos que beneficiem a atuação humana, este projeto foi guiado pela metodologia *Design Science Research*, além de outras ferramentas que possibilitaram explorar as possibilidades entre a combinação do conceito de customização em massa, manufatura aditiva e design computacional. Por meio da construção de geometrias baseadas em algoritmos, foi possível desenvolver um design de entressola capaz de reagir a modificações sofridas em seus parâmetros de acordo com dados antropométricos e de pressão dos pés. Assim, além de este projeto contribuir para a criação de um produto personalizado de acordo com as necessidades de cada consumidor, ele também expõe as possibilidades do uso da modelagem paramétrica como ferramenta de projeto no Design de Produto.

**Palavras-chave:** Design de Entressola. Modelagem Paramétrica. Customização em Massa. Manufatura Aditiva.

## ABSTRACT

The footwear industry is undergoing a change and is currently moving towards the trend of mass customization, a process in which there is a resumption of the original era of artisanal production, but with the advantages of advanced systems and technologies that enable the production batch of personalized items, offering solutions that best fit the needs and desires of the consumer. It is known that, due to the great complexity of the structure of the feet and its dimensional diversity among the population, sneakers still present many ergonomic problems that cause damage that go beyond pain and discomfort and can lead to injuries and deformities in the feet. Based on this reflection, this Bachelor Thesis aimed to develop a proposal for a customizable midsole based on algorithms and manufactured by 3D printing. Seeking the development of solutions and the creation of artifacts that benefit human performance, this Project was guided by the Design Science Research methodology, in addition to other tools that made it possible to explore the possibilities between the combination of the concept of mass customization, additive manufacturing and computational design. Through the construction of algorithm-based geometries, it was possible to develop a midsole design capable of reacting to changes in its parameters according to anthropometric and foot pressure data. Thus, in addition to this Project contributing to the creation of a customized product according to the needs of each consumer, it also exposes the possibilities of using parametric modeling as a project tool in Product Design.

**Keywords:** Midsole Design. Parametric Modeling. Mass Customization. Additive Manufacturing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da metodologia <i>Design Science Research</i> .....	15
Figura 2 – Solado da sandália romana <i>caliga</i> .....	18
Figura 3 – Tênis Nike Waffle Trainer, 1974.....	20
Figura 4 – Tênis de corrida Nike ZoomX Vaporfly Next% 2.....	21
Figura 5 – Tênis para jogar tênis.....	22
Figura 6 – Tênis de basquete Puma Clyde All-Pro.....	23
Figura 7 – Tênis de vôlei Asics Gel-Rocket 10.....	24
Figura 8 – Composição do tênis.....	25
Figura 9 – Representação do sistema de modelagem paramétrica.....	27
Figura 10 – Nike By You.....	29
Figura 11 – Etapas para impressão 3D.....	31
Figura 12 – Processo de impressão FDM.....	33
Figura 13 – Processo de impressão SLS.....	35
Figura 14 – Processo de impressão SLA.....	37
Figura 15 – Processo de impressão DLS.....	38
Figura 16 – Ossos e regiões do pé.....	40
Figura 17 – Arco longitudinal lateral.....	41
Figura 18 – Arco longitudinal medial.....	41
Figura 19 – Arco transversal.....	42
Figura 20 – Flexão Plantar e Dorsiflexão.....	43
Figura 21 – Inversão e Eversão.....	43
Figura 22 – Abdução e Adução.....	44
Figura 23 – Pronação e Supinação.....	44
Figura 24 – Ciclo da Marcha.....	45
Figura 25 – Aetrex Albert 2 Pro Scanner.....	50
Figura 26 – Yeti 3D Foot Scanner.....	51
Figura 27 – Baropodômetro Emed.....	52
Figura 28 – Análise Sincrônica.....	54
Figura 29 – Tênis e entressola Adidas Futurecraft 4D.....	56

Figura 30 – Tênis e entressola New Balance Zante Generate.....	57
Figura 31 – Tênis e entressola Under Armour ArchiTech Futurist.....	58
Figura 32 – Perguntas elaboradas para o questionário virtual.....	60
Figura 33 – Perfil demográfico .....	62
Figura 34 – Principais atividades e tempo de uso de tênis por dia.....	63
Figura 35 – Tipo de tênis usados com mais frequência .....	64
Figura 36 – Características em níveis de importância.....	65
Figura 37 – Dificuldades em comprar tênis adequados .....	66
Figura 38 – Interesse em entressolas customizadas e preferências estéticas.....	67
Figura 39 – Requisitos de Projeto .....	69
Figura 40 – Painel de estilo de vida .....	71
Figura 41 – Painel de expressão do produto.....	72
Figura 42 – Painel de expressão do produto.....	73
Figura 43 – Painel de tema visual do produto.....	74
Figura 44 – Geração de Alternativas de 1 a 8 .....	76
Figura 45 – Geração de Alternativas de 9 a 16 .....	77
Figura 46 – Critérios de seleção .....	78
Figura 47 – Agrupamento das alternativas.....	79
Figura 48 – Alternativas selecionadas.....	80
Figura 49 – Modelagem algorítmica .....	81
Figura 50 – Desenho das curvas base.....	81
Figura 51 – Gradação da numeração.....	82
Figura 52 – Escaneamento 3D com o UPOD-S 3D Laser Full-Foot Scanner .....	83
Figura 53 – Escaneamento 3D com equipamento portátil .....	84
Figura 54 – Escaneamento com Iphone 11 e reparo da malha.....	85
Figura 55 – Redução de regiões convexas do pé escaneado .....	86
Figura 56 – Extração da geometria da base do pé.....	87
Figura 57 – Suavização e divisão da superfície da entressola.....	87
Figura 58 – Estrutura formada por <i>boxes</i> .....	88
Figura 59 – Formação da estrutura de treliça .....	89
Figura 60 – Teste de baropodometria.....	89



Figura 61 – Inserção do exame de baropodometria no algoritmo .....	90
Figura 62 – Adição de espessura na entressola .....	91
Figura 63 – Acabamento .....	92
Figura 64 – Renderização do conjunto.....	93
Figura 65 – Renderização da alternativa 5 .....	93
Figura 66 – Renderização da alternativa 11 .....	94
Figura 67 – Renderização da alternativa 8 .....	94
Figura 68 – Renderização da alternativa 7 .....	95
Figura 69 – Render conceitual.....	95
Figura 70 – Simulação de uso .....	98
Figura 71 – Cores disponíveis para o EPU 44.....	99
Figura 72 – Desenho técnico .....	100
Figura 73 – Impressão de amostras .....	101
Figura 74 – <i>software</i> de fatiamento Ultimaker Cura 4.13.1 .....	102
Figura 75 – Fabricação do protótipo .....	103
Figura 76 – Protótipo: imagem 1 .....	103
Figura 77 – Protótipo: imagem 2.....	104
Figura 78 – Protótipo: imagem 3.....	104
Figura 79 – Custo de fabricação do protótipo .....	105

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS .....	13
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>13</b>
1.2	JUSTIFICATIVA .....	13
1.3	METODOLOGIA.....	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	HISTÓRIA DO TÊNIS.....	17
2.2	TIPOS DE TÊNIS.....	20
2.3	COMPOSIÇÃO DO TÊNIS .....	24
2.4	MODELAGEM PARAMÉTRICA.....	26
2.5	CUSTOMIZAÇÃO EM MASSA.....	27
<b>2.5.1</b>	<b>Customização em massa de calçados .....</b>	<b>29</b>
2.6	MANUFATURA ADITIVA .....	30
<b>2.6.1</b>	<b><i>Fused Deposition Modeling (FDM)</i>.....</b>	<b>32</b>
<b>2.6.2</b>	<b><i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6.3</b>	<b><i>Stereolithography (SLA)</i>.....</b>	<b>36</b>
<b>2.6.4</b>	<b><i>Digital Light Sinthesys (DLS)</i> .....</b>	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>ANATOMIA E BIOMECÂNICA Do Pé .....</b>	<b>39</b>
3.1	OSSOS DO PÉ .....	39
3.2	ARCOS DO PÉ .....	40
3.3	MOVIMENTOS DO PÉ.....	42
3.4	CICLO DA MARCHA .....	45
3.5	ERGONOMIA E ANTROPOMETRIA .....	46

3.5.1	Ergonomia aplicada ao calçado.....	47
3.5.2	Escaneamento 3D e baropodometria .....	49
4	<b>ESPECIFICAÇÃO DE PROJETO.....</b>	<b>52</b>
4.1	ANÁLISE SINCRÔNICA.....	53
4.1.1	Futurecraft 4D .....	55
4.1.2	New Balance Zante Generate .....	56
4.1.3	Under Armour ArchiTech Futurist .....	57
4.1.4	Considerações gerais da análise sincrônica.....	58
4.2	PESQUISA DE PÚBLICO.....	59
4.2.1	Questionário .....	59
4.2.2	Discussão dos resultados .....	61
4.2.3	Considerações gerais da pesquisa de público.....	67
4.3	Requisitos de projeto .....	68
5	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>70</b>
5.1	PAINEIS VISUAIS .....	70
5.2	GERAÇÃO DE ALTERNATIVAS .....	74
5.2.1	Critérios de seleção.....	78
5.3	MODELAGEM 3D .....	80
5.3.1	Desenho das curvas base e gradação da numeração .....	81
5.3.2	Gradação da numeração .....	81
5.3.3	Escaneamento 3D.....	82
5.3.4	Redução de regiões convexas do pé escaneado.....	85
5.3.5	Molde do pé .....	86
5.3.6	Suavização e divisão da superfície da entressola .....	87
5.3.7	Criação de estrutura formada por <i>boxes</i> .....	88
5.3.8	Formação da estrutura de treliça.....	88

<b>5.3.9</b>	<b>Exame de baropodometria.....</b>	<b>89</b>
<b>5.3.10</b>	<b>Espessura da entressola.....</b>	<b>90</b>
<b>5.3.11</b>	<b>Acabamento.....</b>	<b>91</b>
5.4	RENDERINGS .....	92
5.5	MEMORIAL DESCRITIVO.....	96
<b>5.5.1</b>	<b>Conceito .....</b>	<b>96</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Fator Social-Tecnológico.....</b>	<b>96</b>
<b>5.5.3</b>	<b>Fator Estético-Simbólico .....</b>	<b>97</b>
<b>5.5.4</b>	<b>Fator de Uso .....</b>	<b>97</b>
<b>5.5.5</b>	<b>Fator Técnico-Construtivo.....</b>	<b>98</b>
<b>5.5.6</b>	<b>Fator Estrutural e Funcional.....</b>	<b>99</b>
<b>5.5.7</b>	<b>Protótipo .....</b>	<b>101</b>
<b>5.5.8</b>	<b>Fator de custo.....</b>	<b>104</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o período paleolítico, o homem pré-histórico já representava calçados em suas pinturas rupestres. Em um período em que se dependia muito do clima, vegetação e condições do solo, esses objetos eram desenvolvidos com uma finalidade puramente protetora (BOSSAN, 2015). No entanto, ao longo de séculos, eles passaram a ser elaborados com uma complexidade maior no que se diz respeito à estética, funcionalidade, tecnologia e materiais (ROMA, 2017).

Até a Revolução Industrial, a fabricação de produtos era um processo artesanal em que os objetos eram peças únicas e direcionadas às necessidades e desejos dos consumidores. A partir de então, com o avanço do processo de manufatura, os produtos passaram a ser fabricados em massa, ou seja, em grande quantidade e de maneira padronizada (BOËR; DULIO, 2007; FRALIX, 2001).

Os métodos de fabricação estão em constante evolução e atualmente caminham em direção à customização em massa, um processo em que há uma retomada da era original da produção artesanal, mas com as vantagens de sistemas e tecnologias avançadas que possibilitam o desenvolvimento de produtos que satisfaçam as necessidades e desejos do consumidor (BOËR; DULIO, 2007; FRALIX, 2001; KOLAREVIC; DUARTE, 2019).

Digitalizadores 3D, processos de fabricação digital e sistemas CAD (*computer-aided-design*) são algumas das tecnologias responsáveis por modificar o sistema de manufatura e concretizar a fabricação de produtos customizados em massa no setor calçadista. Desse modo, o projeto e a produção de produtos desse segmento podem ser feitos com base em parâmetros centrados no usuário em termos de conforto, segurança e estética (GOONETILLEKE, 2013; ROMA, 2017).

Sabendo que os pés são estruturas complexas com grande variedade dimensional entre as pessoas, mesmo com todos os estudos e a melhor adequação antropométrica possível, os tênis ainda apresentam muitos problemas ergonômicos. Além da dor e desconforto, o uso de calçados mal ajustados pode levar a lesões e deformidades nos pés (DEMELLO, 2009, GOMES FILHO, 2010; GOONETILLEKE, 2013).

Levando em conta os prejuízos à saúde e ao bem-estar causados por calçados inadequados e, também, considerando a possibilidade de fabricação em pequenos lotes de produtos personalizados com auxílio da tecnologia, este trabalho tem o intuito de propor o desenvolvimento de uma entressola customizável por meio de algoritmos e fabricada por impressão 3D.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este Projeto de Conclusão de Curso tem como objetivo desenvolver uma proposta de entressola de tênis customizável por meio de algoritmos generativos e fabricada por impressão 3D.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar tendências em tecnologias aplicadas na fabricação de tênis;
- Criar um algoritmo para a customização de entressolas;
- Obter dados por baropodometria e digitalização 3D;
- Aplicar o processo algorítmico na customização de entressolas;
- Testar materiais compatíveis utilizando a impressão 3D;
- Materializar amostras de entressolas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A partir da integração de tecnologias e da digitalização avançada, a indústria vem sofrendo um processo de mudança em sua estrutura que altera o ciclo dos produtos, desde o projeto até o descarte (LASI *et al.*, 2014; BOËR; DULIO, 2007).

Com a disponibilidade de novas tecnologias, como a impressão 3D, a indústria calçadista também está passando por uma renovação, substituindo cada vez mais os métodos de produção convencionais a fim de otimizar as cadeias de suprimentos e ajustar os custos dos processos de fabricação.

A manufatura aditiva, antes utilizada pelos fabricantes de calçados apenas para fins de prototipagem, agora é aplicada em produtos finais, como palmilhas, solados e entressolas,

incluindo também processos de customização em massa e peças exclusivas (UKOBITZ; FAULLANT, 2021).

Dentro desse contexto, nota-se que o futuro da indústria aponta cada vez mais para a tendência da customização em massa de produtos por meio de sistemas eficientes e modulares. Essa personalização possibilita oferecer soluções que se adequem melhor às necessidades e desejos dos usuários, produzindo lotes de itens personalizados e ainda mantendo sua viabilidade econômica e competitividade no mercado global (LASI *et al.*, 2014; BOËR; DULIO, 2007).

Assim, as inúmeras possibilidades de projeto entre a combinação da manufatura aditiva, digitalização 3D, design computacional e outras ferramentas são fundamentais para o desenvolvimento de entressolas customizáveis. Tais procedimentos podem ultrapassar o nível estético, englobando também questões de ajuste, conforto e funcionalidade a fim de elevar a qualidade de vida das pessoas.

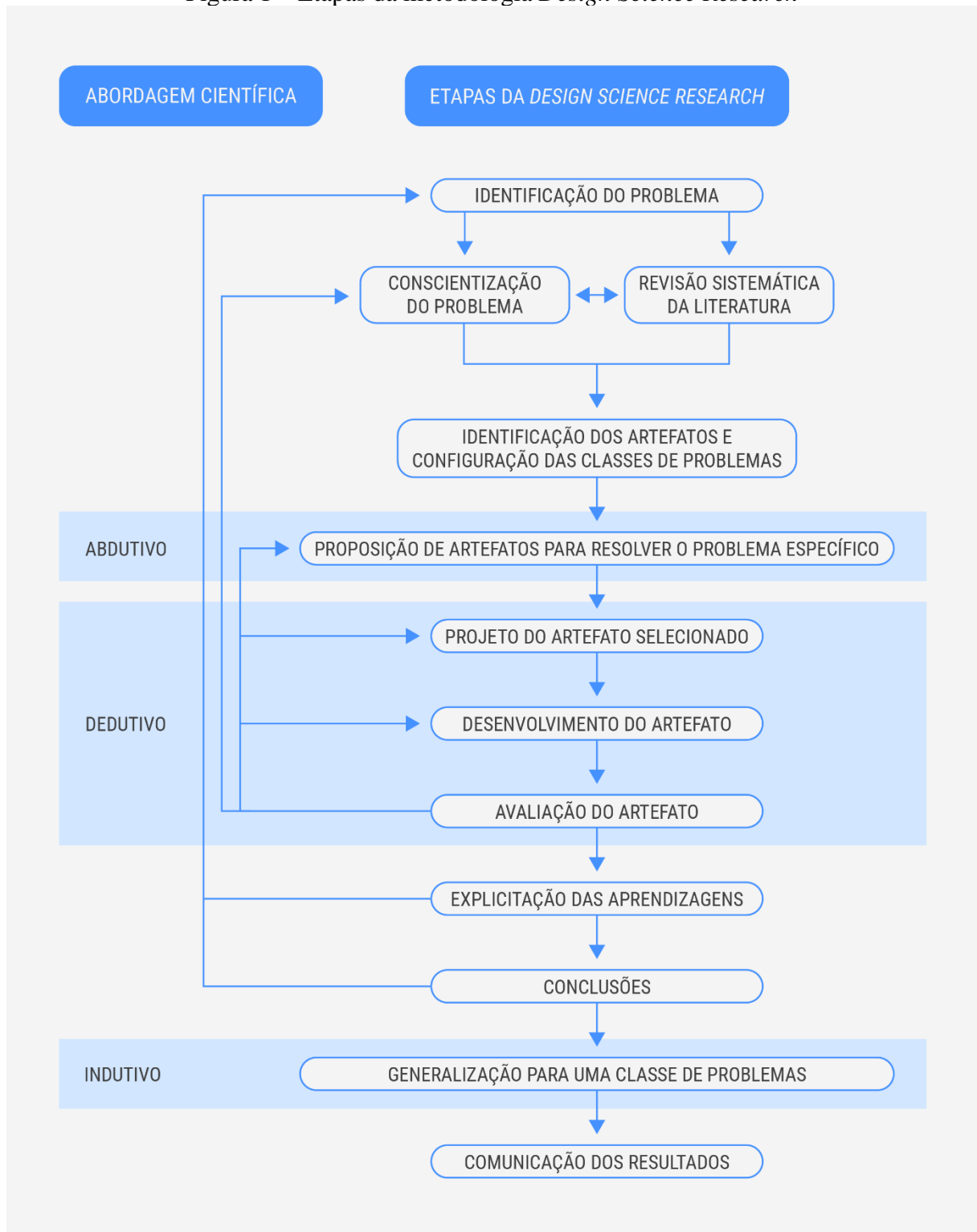
### 1.3 METODOLOGIA

Esta pesquisa utilizou como metodologia a *Design Science Research*, ciência que busca desenvolver e projetar soluções para problemas existentes e criar artefatos que beneficiem a atuação humana (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2015).

A *Design Science Research* tem sua origem na obra “As ciências do artificial” de Herbert Alexander Simon (1996) em que o autor diferencia os ambientes naturais e artificiais. Segundo Simon (1996), a ciência natural abrange o conhecimento sobre como objetos e fenômenos naturais se comportam e interagem entre si. Já a ciência do artificial, segundo ele, é o oposto ao natural, ou seja, são as coisas sintetizadas pelo homem.

O método de condução da *Design Science Research* proposto por Dresch, Lacerda e Antunes (2015) é dividido em 12 etapas, conforme a figura 1, e tem como objetivo ampliar o portfólio de metodologias e sintetizar conteúdos relevantes para a condução de pesquisas científicas.

Figura 1 – Etapas da metodologia *Design Science Research*



Fonte: Adaptado de Dresch, Lacerda e Antunes (2015)



Dresh, Lacerda e Antunes (2015) descrevem as etapas de condução da *Design Science Research* como:

- Identificação do problema — entender, definir e justificar a relevância do problema como objeto de estudo.
- Conscientização do problema — buscar o máximo de informações sobre o problema a fim de compreendê-lo de forma mais abrangente e contextualizada.
- Revisão sistemática da literatura — fazer pesquisas em bases científicas para encontrar estudos relacionados ao problema identificado.
- Identificação dos artefatos e configuração das classes de problemas — identificar artefatos desenvolvidos por outros pesquisadores para auxiliar na resolução do problema da pesquisa do investigador.
- Proposição de artefatos para resolução do problema — propor artefatos levando em consideração o contexto, a viabilidade e possíveis soluções para melhorar a realidade atual.
- Projeto do artefato — selecionar um dos artefatos proposto na etapa anterior para ser projetado e descrever os métodos do desenvolvimento de sua construção.
- Desenvolvimento do artefato — fabricar o artefato na forma de algoritmos computacionais, protótipos, representações gráficas ou outros meios.
- Avaliação do artefato — observar e analisar como o artefato se comporta quando aplicado. Caso o resultado não seja satisfatório, é necessário identificar em qual etapa ocorreu o problema e refazer a pesquisa a partir desse ponto.
- Explicitação das aprendizagens e conclusão — mostrar a geração de conhecimento da pesquisa, evidenciando seus pontos de sucesso e insucesso durante todo o processo.
- Conclusões – apresentar os resultados da pesquisa.
- Generalização para uma classe de problemas — generalizar a solução desenvolvida para que ela possa ser aplicada em projetos similares por outros pesquisadores.
- Comunicação dos resultados — publicar os resultados para que a pesquisa alcance outras pessoas interessadas no mesmo assunto, contribuindo, assim, com o avanço do conhecimento.

Assim, a fim de aproximar a teoria da prática, este trabalho será guiado pela *Design Science Research*, metodologia que, segundo Formoso (2015), consiste em desenvolver

artefatos inovadores com o objetivo de solucionar problemas e contribuir com o conhecimento científico.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesta etapa inicial de revisão da literatura, foi realizada uma pesquisa sobre a história do tênis, suas particularidades para cada finalidade de uso, bem como uma análise de cada parte de sua composição. Além disso, por meio da literatura médica, procurou-se conhecer a estrutura óssea dos pés e seus movimentos para um bom desenvolvimento ergonômico do produto proposto por este projeto.

Completando esta revisão bibliográfica, buscou-se compreender o conceito de customização em massa, considerando o uso de tecnologias de escaneamento 3D e de manufatura aditiva como ferramentas capazes de direcionar o projeto para o caminho da inovação, levando em conta as demandas específicas de cada pessoa.

### **2.1 HISTÓRIA DO TÊNIS**

Em séculos anteriores, quando se dependia mais do clima e das condições do solo, o homem já buscava cobrir seus pés com peles de animais como proteção e, também, para locomoção. Apesar de não existirem evidências concretas de sapatos no período paleolítico e os estudos não indicarem uma proximidade entre homens pré-históricos e calçados, pinturas rupestres descobertas na Espanha que datam 14.000 a.C. mostram a representação de um homem utilizando botas de pele (BOSSAN, 2015).

No antigo Egito foi onde surgiram as primeiras sandálias que, inicialmente eram feitas de fibras de palmeira, folhas de papiro e palha trançada e que, mais tarde, provavelmente, passaram a ser feitas também com peles de animais e madeira. Pode-se dizer que as sandálias nasceram como uma forma de adaptação ao ambiente, já que elas eram ideais para arejar os pés no calor e protegê-los da areia quente do deserto (DEMELLO, 2009). Apesar disso, nota-se que as pessoas dessa civilização, mesmo quando praticavam algum tipo de atividade física, geralmente eram representadas descalças em pinturas e vasos (BOSSAN, 2015; CHESKIN; SHERKIN; BATES, 1987).

Assim como no Egito, as sandálias eram o tipo de calçado mais comum na Grécia e em Roma. Em geral, as mais simples dessas civilizações eram feitas com um solado de couro

ou cortiça e eram presas aos pés através de tiras de couro. O calçado também era um elemento importante para os soldados gregos e romanos.

Tradicionalmente datados com início em 766 a.C., os Jogos Olímpicos da Antiguidade eram um festival religioso e atlético da Grécia que ocorria no santuário de Olímpia. Apesar das guerras, crises políticas e outras adversidades, as Olimpíadas foram ininterruptamente realizadas a cada quatro anos em um período de mais de mil anos, até 260 d.C. Após isso, elas continuaram esporadicamente até 393 d.C. (KIDD, 2013; FINLEY; PLEKET, 2005).

No início dos Jogos Olímpicos, a maioria dos atletas não utilizava roupas e muito menos calçados, competindo completamente nus. Com a expansão do Império Grego, os competidores passaram a usar sandálias ao perceberem que elas aumentavam a tração. Além dos gregos, os romanos também utilizavam sandálias, que se distinguiam por seus solados com tachas (Figura 2), dando ainda mais tração aos atletas (CHESKIN; SHERKIN; BATES, 1987; DEMELLO, 2009).

Figura 2 – Solado da sandália romana *caliga*



Fonte: Musée D'archéologie Nationale – France (2021)

Com a importância e sucesso das Olimpíadas, os gregos e romanos passaram a investigar e desenvolver artefatos, como os calçados, para melhorar o desempenho dos atletas.(WERD; KNIGHT; LANGER, 2017).

De modo geral, os tênis como são conhecidos atualmente se devem graças ao desenvolvimento do processo de vulcanização da borracha por Charles Goodyear em 1839.

Essa técnica, que consiste na adição de enxofre à borracha, foi o que permitiu a criação de calçados leves e flexíveis (DEMELLO, 2009; KEYSER, 2015).

Em 1876, a primeira empresa a produzir tênis esportivos com solado de borracha foi a New Liverpool Company, na Inglaterra. Conhecidos como *plimsolls*, esses tênis eram fabricados especialmente para a prática de jogos de *croquet*. Já nos Estados Unidos, em 1892, a U.S Rubber Company foi a primeira empresa a fabricar calçados usando a técnica de vulcanização e lançou a conhecida marca de tênis Keds (DEMELLO, 2009).

Com o aumento da popularidade de esportes como basquete, beisebol e tênis nos anos 1900, os calçados esportivos tiveram que acompanhar esse crescimento na mesma proporção. Em 1917, a Converse Rubber Company lançou um dos primeiros tênis de basquete, o Converse All Star, tênis de cano alto feito de lona nas cores preto e branco e com uma estrela posicionada próxima ao tornozelo. Apenas alguns anos depois, quase todos os jogadores de basquete os usavam (DEMELLO, 2009; KEYSER, 2015).

Já no início do século XX, várias grandes empresas de tênis começaram a se estabelecer no mercado. Entre os fundadores dessas marcas estão o inglês Joseph Foster, que lançou a empresa que mais tarde se tornaria a Reebok e a família Dassler, na Alemanha, que depois se dividiria em Adidas e Puma (CHESKIN; SHERKIN; BATES, 1987; KEYSER, 2015).

Com o impulsionamento do desenvolvimento de calçados esportivos, a empresa Reebok, fundada em 1900, começou a fabricar tênis de couro com pontas de metal em sua sola, atraindo os principais nomes do atletismo e outros esportes. Vários desses competidores conseguiram conquistar medalhas olímpicas usando os tênis da marca (CHESKIN; SHERKIN; BATES, 1987; KEYSER, 2015).

Já na Alemanha, Adolf Dassler começou a fabricar calçados esportivos em 1920 junto com seu irmão Rudolf. A empresa dos irmãos Dassler foi a primeira a incluir suporte de arco em seus tênis, o que fez com que os produtos ganhassem popularidade entre os atletas. Apesar do sucesso, em 1948, Rudolf deixou a empresa para formar a Puma, enquanto Adolf fundou a Adidas (DEMELLO, 2009; KEYSER, 2015).

Desse momento em diante, calçados voltados principalmente para a prática de tênis e basquete começaram a ser fabricados com recursos que incluíam solas antiderrapantes e com

ventosas, palmilhas com suporte de arco e absorção de impacto e cores que iam além dos tons de preto e branco (CHESKIN; SHERKIN; BATES, 1987).

O crescente esforço dos fabricantes de calçados para desenvolver novas tecnologias para seus produtos deu início a uma nova era do tênis esportivo. Então, com o objetivo de melhorar o desempenho dos tênis de atletismo, Phil Knight e Bill Bowerman criaram a Nike em 1964. A nova empresa foi responsável por importantes inovações como a sola do tipo *waffle* (Figura 3), o sistema de amortecimento de ar e o cabedal de nylon.

Figura 3 – Tênis Nike Waffle Trainer, 1974



Fonte: Northhampton Museum and Art Gallery (2021)

As empresas de tênis esportivos, a partir da década de 1970, começaram a contar com a assistência de podiatras, profissionais que cuidam da saúde dos pés, e a dar mais importância para fatores ergonômicos e antropométricos em novos projetos. Com isso, foi possível o desenvolvimento de tênis altamente especializados para as mais diversas atividades esportivas como treino funcional, corrida de velocidade e até luta (CHESKIN; SHERKIN; BATES, 1987; DEMELLO, 2009).

## 2.2 TIPOS DE TÊNIS

Atividades esportivas como vôlei e corrida envolvem diferentes movimentos, ambientes e níveis de estresse nos pés. Por isso, os tênis esportivos devem ser projetados levando em consideração as especificidades de cada atividade física com a finalidade de

melhorar o conforto, performance e, principalmente, prevenir lesões. Abaixo estão descritos alguns tipos de tênis de acordo com cada esporte.

Corrida — com a evolução no desenvolvimento de calçados esportivos ao longo do tempo, atualmente existe uma grande variedade de tênis de corrida disponível no mercado que consegue se adaptar a diversos tipos de pés e modalidades do esporte. De maneira geral, os tênis de corrida (Figura 4) são bastante leves, apresentam um sistema de amortecimento bem desenvolvido e recursos que garantem uma boa estabilidade do calçado. Ainda, possuem uma sola que garante flexibilidade ao tênis e tração adequada (DEMELLO, 2008; HERRING, 2017; WERD; KNIGHT; LANGER, 2017).

Figura 4 – Tênis de corrida Nike ZoomX Vaporfly Next% 2



Fonte: Nike (2021)

Tênis — o tênis é um esporte que pode ser jogado em diversos tipos de quadra, demandando calçados distintos para cada modalidade. Os atletas de quadra de grama, por exemplo, movimentam-se mais lentamente em comparação aos de quadra dura. Ou seja, o estilo de jogo e a superfície influenciam as características dos tênis, principalmente em relação ao solado.

Para quadras de grama, o ideal é uma sola de padrão ondulado ou com travas de borracha para aumentar a tração (Figura 5A). Em quadras de saibro, a sola mais indicada é a com padrão espinha de peixe, similar ao padrão *zig-zag* (Figura 5B). Já para quadras duras, o fator mais importante de uma sola é sua durabilidade, pois nesse tipo de superfície os tênis se desgastam mais facilmente (Figura 5C).

De maneira geral, os calçados para jogar tênis são leves e com boa flexibilidade, já que o esporte que exige movimentos rápidos. Ainda, eles possuem uma tração e sistema de amortecimento adequados (KOR, 2017).

Figura 5 – Tênis para jogar tênis



Fonte: Sneakersbr (2021), Asics (2021) e Nike (2021)

Basquete — no basquete são exigidos diversos tipos de ações pelos seus jogadores como salto, corrida e movimentos laterais. Por isso, os tênis de basquete devem ter como objetivo fornecer uma boa estabilidade lateral, pouca flexibilidade no plano sagital e uma tração adequada. Além disso, eles devem ter um bom sistema de amortecimento, principalmente na área do antepé, pois, no basquete, é nessa região que a maior parte do impacto ocorre.

Uma das características mais vistas nos tênis de basquetebol são seus canos altos. Esse atributo tem como finalidade dar mais estabilidade lateral e reduzir o risco de lesões nos atletas. No entanto, nota-se que cada vez mais os tênis de basquete estão sendo fabricados no modelo cano baixo, como mostrado na figura 6, por proporcionar mais mobilidade aos atletas e o número de lesões não variar muito em comparação aos tênis de cano alto (LOSITO, 2017).

Figura 6 – Tênis de basquete Puma Clyde All-Pro



Fonte: Puma (2021)

Vôlei — o vôlei é um esporte que exige movimentos semelhantes aos do basquete, com a diferença em que o vôlei também requer ações de mergulho e não há corridas constantes. Por isso, os tênis desses dois esportes são similares em relação a estabilidade lateral, flexibilidade e tração. No entanto, no vôlei, nota-se que os calçados possuem cano baixo para dar mais mobilidade aos jogadores, como pode ser visto abaixo na figura 7 (LOSITO, 2017).



Figura 7 – Tênis de vôlei Asics Gel-Rocket 10



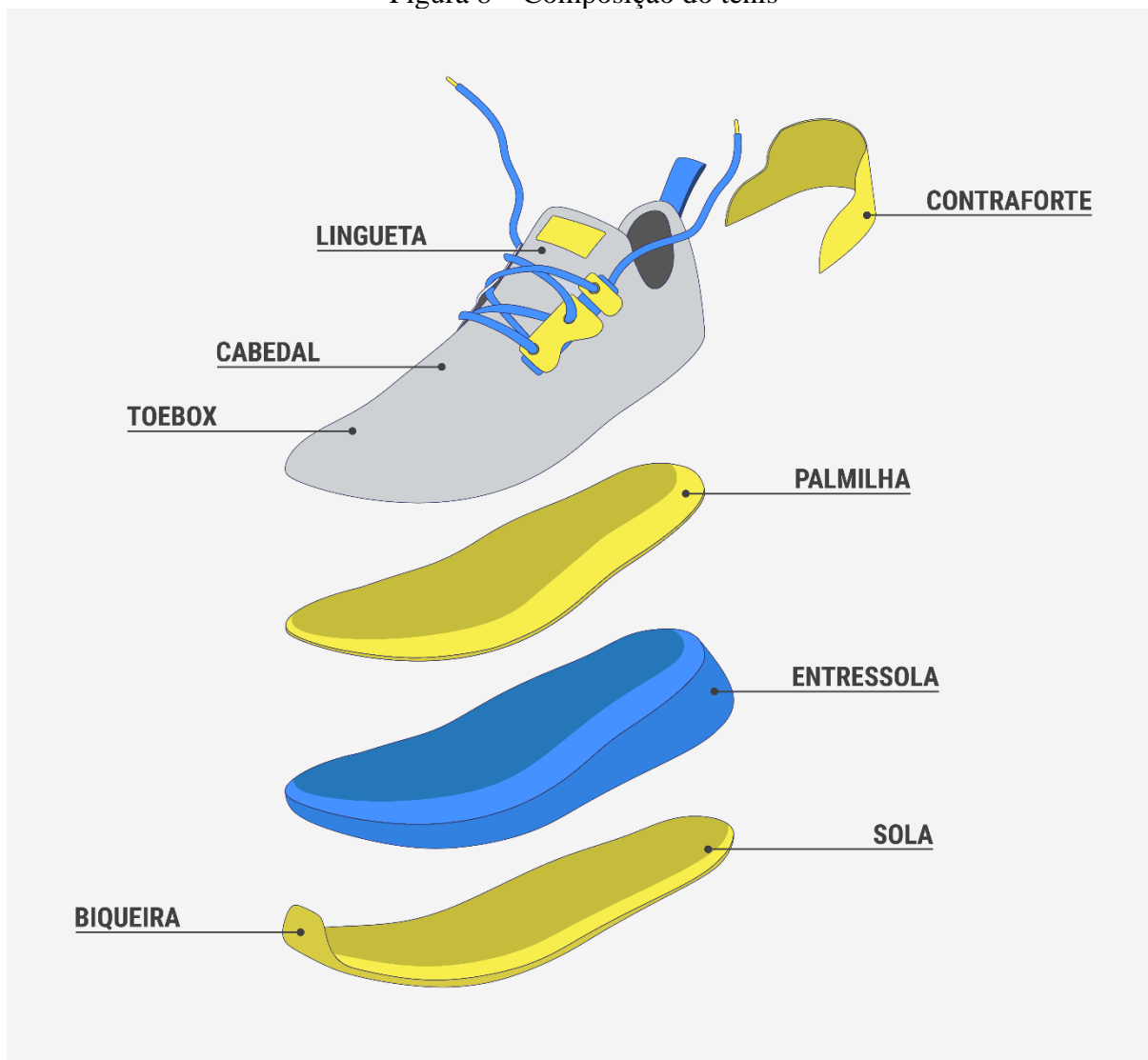
Fonte: Asics (2021)

Apesar de este projeto não ser direcionado ao desenvolvimento de uma entressola para esportes específicos, nesta análise foi possível estabelecer uma relação entre determinados aspectos do design dos tênis e a função que se deseja alcançar. Assim, essa pesquisa foi relevante para compreender e analisar características de tênis que podem agregar ao desenvolvimento deste projeto, como leveza ou amortecimento em regiões específicas da entressola.

### 2.3 COMPOSIÇÃO DO TÊNIS

Os tênis geralmente são divididos em duas áreas principais: a superior e a inferior. Cada uma dessas partes é composta por diversos elementos. Também chamada de cabedal, a área superior do tênis tem a função de proteger e dar conforto aos pés. Os materiais utilizados nessa parte, como couro, lona, tecido ou materiais sintéticos, são responsáveis pela ventilação do calçado e influenciam em seu peso, resistência e durabilidade. O cabedal do tênis inclui diversas outras partes como lingueta, cadarço e contraforte. Já a parte inferior, composta pela palmilha, entressola e sola, é responsável principalmente pelo amortecimento e tração (Figura 8) (DEMELLO, 2009; SUBOTNICK *et al.*, 2017).

Figura 8 – Composição do tênis



Fonte: A autora

As partes dos tênis podem ser descritas como:

- *Toe box* — área do tênis que indica a largura da região dos dedos do pé e fica logo acima deles. Essa parte deve fornecer um espaço suficiente que permita movimentos de flexão dos pés. Em alguns tênis é inserido uma espécie de reforço na *toe box* para evitar danos em seu material (CHESKIN; SHERKIN; BATES, 1987; LEVINE, 2017).
- Lingueta — costuma ser leve e acolchoada e tem a função de proteger a área dorsal dos pés contra a pressão dos cadarços (CHESKIN; SHERKIN; BATES, 1987; SUBOTNICK *et al.*, 2017).

- Contraforte — estrutura rígida posicionada na parte de trás do cabedal que tem como finalidade estabilizar o calcanhar e manter a fôrma do calçado (DEMELLO, 2009).
- Biqueira — parte frontal do tênis que ajuda na flexibilidade dos movimentos do pé e na proteção dos dedos.
- Palmilha — elemento que fica em contato direto com o pé e tem a função de dar sustentação a ele (DEMELLO, 2009).
- Entressola — localizada entre o cabedal e a sola do tênis, a entressola é a parte do tênis responsável pelo amortecimento. Em tênis esportivos, a entressola geralmente é fabricada com algum tipo de espuma, como EVA (acetato de vinila) ou outros materiais que tem capacidade de sofrer deformação durante o impacto e logo retornar ao seu estado inicial (DEMELLO, 2009; SUBOTNICK *et al.*, 2017).
- Sola — é a camada de material que fica em contato direto com o solo e sua função é fornecer tração e flexibilidade ao tênis. Além disso, o solado também tem grande influência no peso e durabilidade do calçado (CHESKIN; SHERKIN; BATES, 1987)

## 2.4 MODELAGEM PARAMÉTRICA

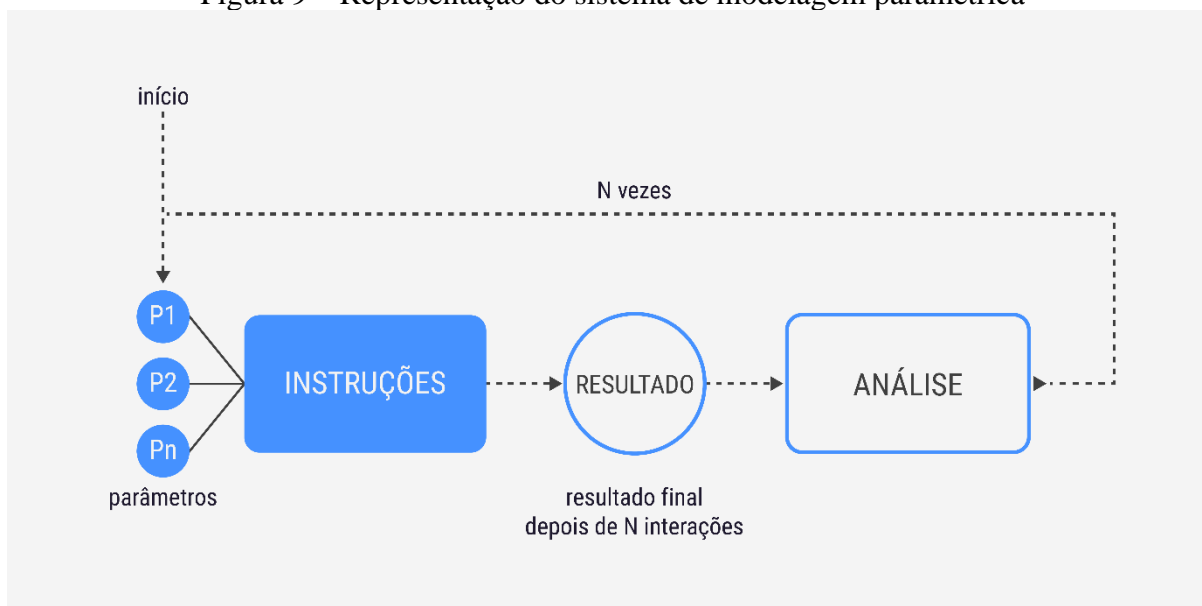
De acordo com Terdizis (2006), um algoritmo pode ser considerado um processo de solução de problemas a partir de um conjunto finito de etapas simples e precisas. Apesar de poderem ser definidos independentemente das linguagens de programação, os algoritmos estão fortemente associados ao computador e à geração de geometrias 3D por meio de um editor integrado a um sistema CAD (*computer-aided design*) (TEDESCHI, 2014).

A modelagem paramétrica, então, corresponde a um processo em que a construção de geometrias é baseada em regras ou algoritmos, geralmente derivados de ferramentas computacionais como Processing, Grasshopper 3D e outras plataformas de *script* (AGKATHIDIS, 2015).

Ao contrário da modelagem tradicional, a modelagem paramétrica (Figura 9) é um sistema composto por partes relacionadas entre si que se modificam juntas de maneira coordenada, sem que sua estrutura principal seja perdida (WOODBURY, 2010). Ou seja, o *output* desse sistema pode ser considerado um modelo digital interativo que reage a modificações sofridas em seus parâmetros, manipulando todo o sistema. O projeto, então, pode

ser alterado e modificado em qualquer estágio, permitindo que os designers desenvolvam um processo em vez de um único objeto (OXMAN; GU, 2015; TEDESCHI, 2014).

Figura 9 – Representação do sistema de modelagem paramétrica



Fonte: Adaptado de Tedeschi (2014)

Dessa forma, uma das grandes vantagens da modelagem paramétrica é que não é preciso redesenhar uma geometria sempre que houver a necessidade de modificação no projeto (FU, 2018). Além de economizar tempo, isso possibilita que seja gerada rapidamente uma grande variedade de soluções que podem ser analisadas, cada uma criada com diferentes parâmetros. Assim, o processo de projeto paramétrico é fundamental para o desenvolvimento de um produto customizável (LEARY, 2019; JABI, 2013).

## 2.5 CUSTOMIZAÇÃO EM MASSA

Até a Revolução Industrial, o processo de fabricação de produtos era feito de maneira artesanal, ou seja, eram peças únicas e direcionadas às necessidades de cada consumidor. Em razão disso, os produtos possuíam preços elevados e geralmente eram restritos apenas às classes mais altas.

A partir desse momento, a manufatura evoluiu e no século XX surgiu o processo de produção em massa, que possibilitou a fabricação em grande quantidade de produtos

padronizados com custos baixos e acessíveis para a maioria da população (BOËR; DULIO, 2007; FRALIX, 2001).

Combinando os ideais da produção artesanal com os métodos de produção em massa, a customização em massa é uma das principais tendências do mercado atual. Seu conceito surgiu na obra *Future Perfect* de Stanley Davis (1987) e mais tarde foi desenvolvido por Joseph B. Pine (1993), que definiu a customização em massa como “desenvolver, produzir, comercializar e entregar bens e serviços acessíveis com variedade e personalização suficientes para que quase todos encontrem exatamente o que desejam”. Ou seja, é um método de produção capaz de envolver os usuários no processo produtivo, transformando-os em co-designers com o objetivo de fornecer produtos com maior desempenho funcional e alta satisfação do consumidor sem que haja um aumento significativo no custo e tempo de fabricação de um produto (BOËR; DULIO, 2007; KOLAREVIC; DUARTE, 2019; TSENG; JIAO; MERCHANT, 1996).

Nas últimas duas décadas, a customização em massa atingiu a maioria dos segmentos da economia, de serviços e de produtos de consumo fabricados industrialmente. No setor calçadista, por exemplo, os consumidores podem ter a possibilidade de personalizar recursos de seus tênis como materiais, cores e acabamentos a um custo similar aos produtos padronizados de uma mesma marca (KOLAREVIC; DUARTE, 2019).

O Nike By You (Figura 10), por exemplo, é um serviço oferecido pela Nike em que é possível customizar peças como tênis e roupas esportivas. Lançado com o nome de NikeID em 1999, o Nike By You permite que os consumidores personalizem os produtos com base na cor, material e, ainda, adicionem um texto personalizado e em alguns modelos escolham entre um conjunto de logotipos pré-determinados.

Figura 10 – Nike By You



Fonte: Gretel (2021)

### 2.5.1 Customização em massa de calçados

No mercado calçadista, os consumidores estão cada vez mais exigentes em relação aos produtos. Eles buscam, além de conforto e qualidade, calçados que sejam capazes de expressar suas identidades pessoais. Diante disso, os fabricantes de calçados estão buscando atender as necessidades dos consumidores por meio da customização em massa (ZHANG; LUXIMON, 2013; WANG; TSENG, 2013).

Segundo Piller e Müller (2004), a customização de calçados pode ser dividida em três níveis (Figura 11), descritos a seguir:

- Customização de estilo (estética) — tem como objetivo satisfazer as demandas dos consumidores em termos de estética. Neste tipo de customização, os clientes têm a liberdade de configurar seu produto escolhendo cores, materiais e outros elementos estéticos dentro das restrições definidas pelo fabricante (BOËR; DULIO, 2007).
- Customização de ajuste e conforto (medidas) — é a customização de calçados baseada nas dimensões do pé do usuário (obtidas por meio de métodos de medição manual, dispositivos de medição simples ou scanners complexos) com o objetivo fabricar produtos que fiquem bem ajustados e confortáveis. A customização de ajuste e conforto pode seguir dois

caminhos, o *Best Matched-Fit* e o *Custom Fit*. O *Best Matched-Fit* acontece quando as dimensões do pé do consumidor são analisadas e comparadas a uma extensa biblioteca de fôrmas, palmilhas e solas e a melhor combinação é escolhida para ser fabricada sob demanda. Já o *Custom Fit* é quando o calçado é feito sob medida. Ou seja, ele é desenvolvido a partir de uma fôrma customizada de acordo com as dimensões exatas do pé do consumidor.

- Customização funcional (performance) — tem como propósito desenvolver calçados que correspondam ao uso que os consumidores darão a eles como: caminhar, dirigir ou ficar sentado por muitas horas ao longo do dia. Este nível de customização acontece por meio da personalização de parâmetros dimensionais, técnicas construtivas e materiais. Ou seja, o consumidor pode, por exemplo, escolher entre diferentes palmilhas e tipos de amortecimento de acordo com suas preferências de corrida ou até mesmo selecionar o material do cabedal conforme o clima do ambiente em que o calçado será usado a fim de proporcionar maior conforto térmico (BOËR; DULIO, 2007; PILLER; MÜLLER, 2004).

Apesar de os níveis de customização serem bem definidos, eles não são necessariamente exclusivos. Ainda, quando há a combinação dessas dimensões dentro de um projeto de calçados, geralmente as mais altas incluem as mais baixas. A customização de ajuste e conforto, por exemplo, pode aparecer sozinha, mas quando empregada, ela geralmente inclui também a customização de estilo. O mesmo ocorre com a customização funcional, que costuma incluir os níveis de customização de estilo e de ajuste e conforto (BOËR; DULIO, 2007; WANG; TSENG, 2013).

A customização em massa, então, é um processo de produção que tem um grande potencial principalmente pelo contato direto e contínuo das empresas com seus usuários. Assim, é possível que os fabricantes conheçam as características e desejos de seus clientes, além de obterem dados biométricos durante a fase de vendas e informações em tempo real relacionadas às demandas dos consumidores que constituem o mercado (BOËR; DULIO, 2007).

## 2.6 MANUFATURA ADITIVA

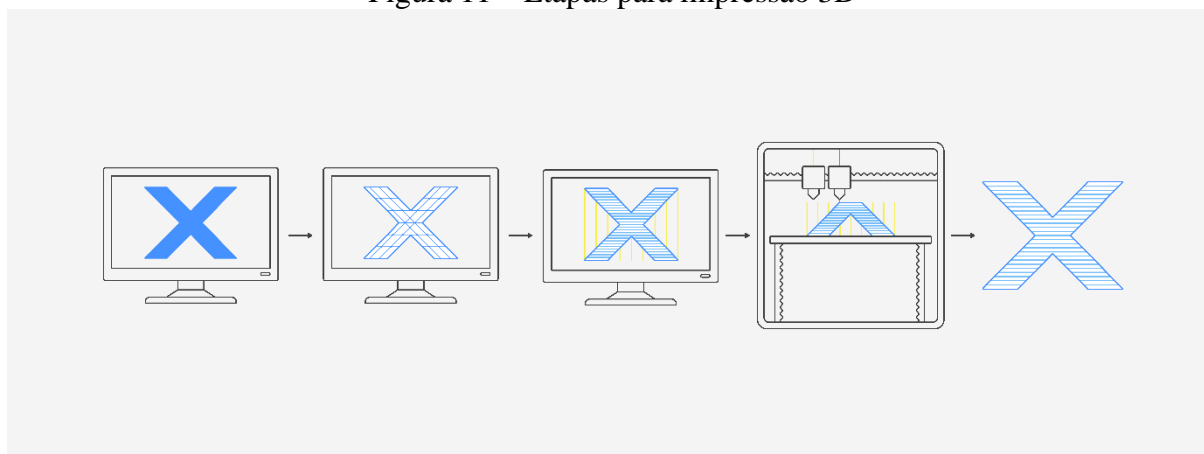
A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, é definida por Volpato (2017) como “processo de fabricação por meio da adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D do componente”. Esse processo aditivo permite a fabricação de componentes

físicos em diferentes tipos de materiais e formas a partir de diversas técnicas de construção totalmente automatizadas (VOLPATO, 2017).

Até recentemente, muitos autores se referiam à impressão 3D com o termo conhecido como prototipagem rápida, que se tornou comum pelo fato de que esse processo, inicialmente, tinha sua aplicação voltada principalmente para a produção rápida de protótipos físicos. Contudo, a manufatura aditiva teve evoluções significativas e houve o surgimento de novas tecnologias com potencial de serem utilizadas para a fabricação de produtos finais, possibilitando, assim, a produção de produtos customizados em pequenos lotes (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014; PUPO, 2009; VOLPATO, 2017).

Baseando-se no princípio da adição de materiais em camadas, Volpato (2017) descreve o processo de manufatura aditiva em cinco etapas básicas (Figura 11), sendo elas:

Figura 11 – Etapas para impressão 3D



Fonte: A autora

- Modelagem tridimensional — geração de um modelo geométrico 3D da peça em um sistema CAD (*computer-aided design*). Neste item, Pupo (2009) ainda ressalta que o modelo 3D também pode ser gerado a partir de digitalização tridimensional do objeto a ser fabricado.
- Modelo geométrico em formato compatível — obtenção do modelo geométrico 3D em um formato específico para a manufatura aditiva, geralmente representado por uma malha de triângulos em um padrão adequado, como por exemplo, em formato STL (*STereoLithography*).



- Planejamento do processo de impressão — fatiamento e definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição de material.
- Fabricação — impressão da peça no equipamento de manufatura aditiva.
- Pós-processamento — varia de acordo com a tecnologia e podem envolver limpeza, etapas adicionais de processamento e acabamento.

Por conta de seu processo de fabricação, a manufatura aditiva tem a grande capacidade de produzir objetos com geometrias complexas que seriam impossíveis de ser fabricadas de outras formas, o que dá mais liberdade na criação de um projeto. Ainda, é possível reduzir o número de peças nas montagens pela integração das funções e, também, pode-se otimizar o projeto para a máxima resistência e o mínimo de peso por meio estruturas celulares, por exemplo. Evidencia-se, também, a possibilidade de customização em massa, já que com a impressão 3D é possível a alteração do design e uma adequação quase instantânea do meio de produção (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014; VOLPATO, 2017).

Contudo, também existem algumas limitações na manufatura aditiva. Em geral, as peças produzidas por esse processo não possuem propriedades equivalentes às produzidas por técnicas consideradas tradicionais. Pelo fato de a fabricação ser processada por adição de camadas, os materiais produzidos são anisotrópicos, ou seja, eles apresentam diferentes propriedades mecânicas para cada eixo de construção. Em relação aos materiais também há uma restrição de quais podem ser usados. Muitas vezes, apenas alguns materiais proprietários desenvolvidos especificamente para uma determinada tecnologia estão disponíveis para o uso. Por fim, a fabricação de grandes quantidades de produtos em impressão 3D ainda é cara e lenta, porém, para aplicações customizadas, tem ocupado cada vez mais seu espaço como processo de produção final de produtos (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014; REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017; VOLPATO, 2017).

Existem inúmeras tecnologias e processos de manufatura aditiva no mercado. Dessa forma, serão descritas a seguir algumas das técnicas que podem contribuir com o desenvolvimento deste projeto.

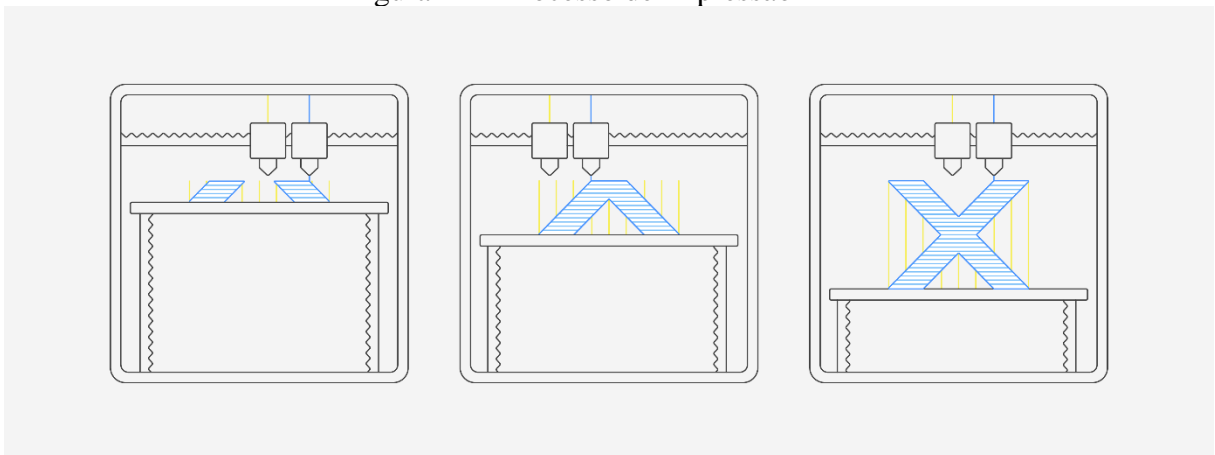
### **2.6.1 Fused Deposition Modeling (FDM)**

A *Fused Deposition Modeling* é uma tecnologia de extrusão de material desenvolvida e comercializada pela empresa americana Stratasys em 1992. Neste processo, um carretel de

material em forma de filamento é tracionado para um cabeçote com um bico extrusor que é aquecido até uma determinada temperatura capaz de derreter o material. Em seguida, o cabeçote se move nos eixos X e Y, depositando o material em forma de filamento com diâmetro reduzido sobre a plataforma de construção. À medida que o filamento já derretido é expelido, ele esfria e se solidifica, aderindo à camada anterior. Por fim, a plataforma se movimenta no eixo Z, descendo após a conclusão de cada camada (PUPO, 2009; REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017; VOLPATO, 2017).

O processo FDM (Figura 12) possui dois bicos extrusores, um para o material da peça e outro que pode ser usado para o material da base ou para as estruturas de suporte que, frequentemente são usadas nas tecnologias de extrusão de material para possibilitar a fabricação de regiões suspensas e com superfícies negativas. Para a produção da peça a ser impressa, a Stratasys oferece diversos materiais em seu catálogo como o ABSPlus (acrilonitrila butadieno estireno), PC (policarbonato), PLA (ácido polilático), ASA (acrilonitrila estireno acrilato), PPSU (polifenilsulfona) e outros (STRATASYS, 2022; VOLPATO, 2017).

Figura 12 – Processo de impressão FDM



Fonte: Adaptado de Redwood, Schöffner e Garret (2017)

Os materiais de suporte do *Fused Deposition Modeling* podem ser divididos em dois grupos, influenciando na parte de pós processamento das peças. Os classificados como *Soluble Release Support (SR)* conseguem ser removidos por imersão em uma solução aquecida à base de água e hidróxido de sódio (soda cáustica). Já os materiais do tipo *Breakaway Support Structures (BASS)* são mais frágeis que o da peça construída e podem ser removidos por uma

operação mecânica manual com o auxílio de ferramentas como alicates (PUPO, 2009; STRATASYS, 2022; VOLPATO, 2017).

A impressão 3D do tipo FDM é uma técnica de deposição de material simples quando comparada a outros processos. Ela permite a utilização de diversos materiais termoplásticos, inclusive os polímeros classificados como de engenharia. Este processo ainda permite a fabricação de protótipos funcionais ou de peças para uso final com propriedades mecânicas semelhantes aos processos de injeção.

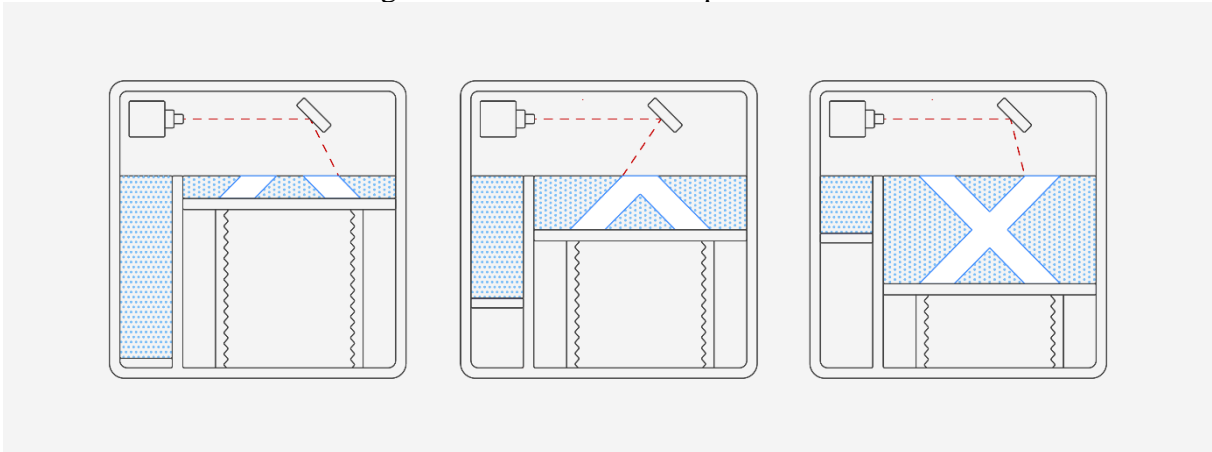
Apesar disso, a técnica de *Fused Deposition Modeling*, tem uma precisão dimensional e resolução de detalhes restritos devido ao diâmetro do bico utilizado, que define um limite na precisão em que a peça pode ser construída. Além disso, este processo é relativamente lento quando comparado a outras tecnologias de manufatura aditiva. Isso ocorre, pois, a velocidade é limitada pela vazão do material no bico extrusor e, também, pelo sistema mecânico de movimentação cartesiana, fazendo com que o cabeçote tenha que se deslocar para cada ponto da peça em que o material será depositado (KAI; FAI; SING, 2003; VOLPATO, 2017).

### **2.6.2 *Selective Laser Sintering (SLS)***

A *Selective Laser Sintering* é uma tecnologia de manufatura aditiva baseada em pó que usa um laser para fundir camadas de material em uma peça final. Desenvolvida na Universidade do Texas, em Austin, nos Estados Unidos, a empresa 3D Systems possui os direitos sobre a tecnologia SLS, tendo sua patente concedida em 1989.

Neste processo, uma lâmina de recobrimento deposita uma fina camada de um pó polimérico na plataforma de construção de peças. Então, um laser de CO<sub>2</sub> começa a escanear a superfície, aquecendo o material para promover a sua fusão/sinterização seletiva nas áreas de interesse em cada camada. No momento em que toda a seção transversal da peça é solidificada, a plataforma de construção se desloca no eixo Z, para baixo, em uma espessura de camada de altura. Logo após, a lâmina de recobrimento deposita uma nova camada de material e esse processo se repete até a formação completa da peça (Figura 13). O pó não fundido permanece no local, sustentando as partes em construção, eliminando, assim, a necessidade de estruturas de suporte (KAI; FAI; SING, 2003; REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017; PUPO, 2009; SILVA, J. 2017).

Figura 13 – Processo de impressão SLS



Fonte: Adaptado de Redwood, Schöffner e Garret (2017)

A empresa 3D Systems oferece em seu catálogo materiais baseados na Poliamida 11 e na Poliamida 12, que possuem o nome comercial Duraform®. O material DuraForm® PA, por exemplo, é um material de poliamida durável com propriedades mecânicas balanceadas e com um bom acabamento superficial. Outros materiais disponíveis são o Duraform® TPU Elastomer, um elastômero termoplástico com funcionalidade e flexibilidade semelhantes à da borracha e, também, o Duraform® ProX EX NAT, um plástico resistente ao impacto e à fadiga para ambientes adversos (3D SYSTEMS, 2022).

O processo *Selective Laser Sintering* possibilita a produção de peças funcionais e resistentes que podem ter geometrias complexas e até mesmo partes móveis em uma mesma estrutura. Além disso, este processo não requer estruturas de suporte, já que o pó não fundido é responsável por essa função, produzindo peças sem marcações ou sinais de retirada de suportes. Isso torna o pós-processamento mínimo que, também, não exige pós-cura da peça, apenas limpeza e jateamento (KAI; FAI; SING, 2003; REDWOOD; SCHÖFFNER; GARRET, 2017; SILVA, J. 2017).

A tecnologia SLS também tem algumas limitações. O acabamento superficial da peça é poroso devido aos tamanhos de partículas relativamente grandes dos pós usados, o que pode resultar em infiltrações. Ainda, o processo pode ser demorado devido aos estágios de aquecimento e resfriamento necessários durante a impressão. Outra desvantagem é o alto custo de aquisição, operação e manutenção do equipamento, exigindo operadores altamente

qualificados (KAI; FAI; SING, 2003; REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017; PUPO, 2009; SILVA, J. 2017).

Devido à resistência das suas peças, a *Selective Laser Sintering* é indicada para o design automotivo, peças e tubulações aeroespaciais, dispositivos médicos, peças com encaixes, soluções de produção de baixo volume e personalização em massa e outras finalidades (3D SYSTEMS, 2022).

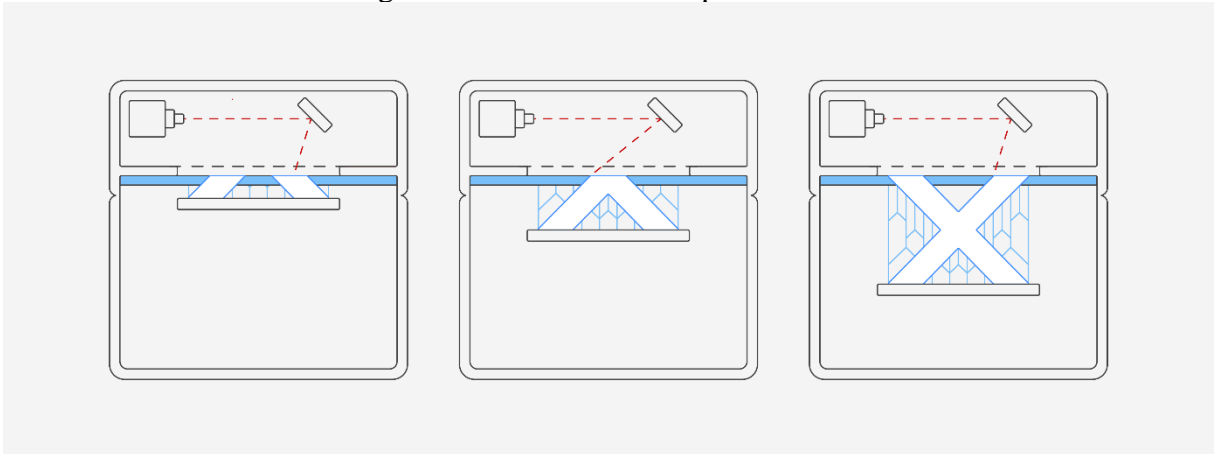
### **2.6.3 Stereolithography (SLA)**

A *Stereolithography* foi a primeira tecnologia de impressão 3D comercializada e teve sua patente concedida em 1986 para Charles. W. Hull, fundador da 3D Systems. A SLA é um processo de manufatura aditiva por fotopolimerização em cuba que se baseia na construção, a partir de resinas de fotopolímero líquido, de objetos solidificados por meio da irradiação de uma fonte de luz ultravioleta (UV) (HOPKINSON; DICKENS, 2006; KAI; FAI; SING, 2003; REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017; PUPO, 2009).

Neste processo, a resina fotocurável é colocada em uma cuba que contém uma plataforma de construção mergulhada. Em seguida, um feixe de laser é movimentado nas direções X e Y, reproduzindo a geometria 2D proveniente do sistema CAD. Assim que o feixe de laser interage com a resina, ela se polimeriza, mudando do estado líquido para o sólido, gerando uma camada. Então, a plataforma de construção se move no eixo Z, para baixo, com um valor correspondente à distância de uma camada. Esse processo se repete até que a peça seja construída em sua totalidade (Figura 14).

Assim como a maioria das técnicas de manufatura aditiva, a SLA requer estruturas de suporte para peças que tenham partes desconectadas ou em balanço em sua geometria. Nesse processo, o material de suporte é o mesmo usado para a construção do objeto. Além disso, ao final da impressão, as peças devem, primeiro, passar por um processo de limpeza para a remoção da resina não curada, depois, deve-se remover os suportes e, por último, o objeto é levado para um forno UV para a obtenção da cura completa da resina (ALVES, 2017).

Figura 14 – Processo de impressão SLA



Fonte: Adaptado de Redwood, Schöffler e Garret (2017)

Os materiais para SLA da empresa 3D Systems estão disponíveis com o nome comercial Accura®, que apresentam uma série de propriedades mecânicas e são capazes de produzir peças com características similares ao ABS moldado por injeção ou polipropileno e, também, podem ter transparência e propriedades semelhantes ao policarbonato. Por exemplo, a Accura® AMX Durable Natural, é uma resina de grau de produção com estabilidade ambiental a longo prazo, enquanto o Accura® 25 é um material preciso e flexível, indicado para montagens de encaixe rápido, painéis de estilo automotivo, peças normalmente usinadas a partir de polipropileno ou ABS e outras aplicações (3D SYSTEMS, 2022).

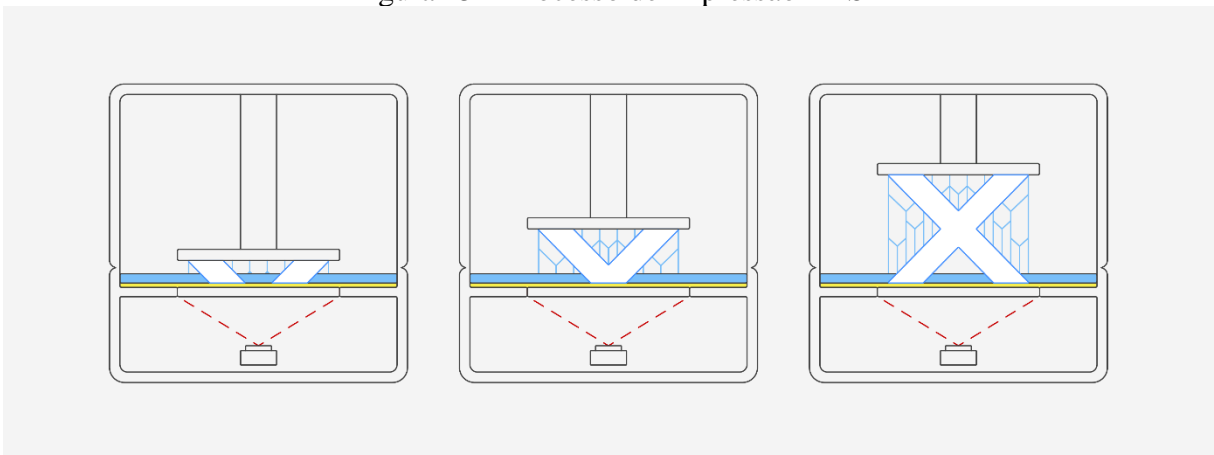
Uma das maiores vantagens da *Stereolithography* é sua capacidade de produzir peças com um acabamento superficial bastante liso. Além disso, esta tecnologia tem uma ótima precisão dimensional, ou seja, ela é ideal para a produção de peças com alto grau de detalhamento em que são necessárias tolerâncias precisas, sendo indicada para a indústria joalheira e odontológica. Porém, a SLA possui algumas desvantagens que, inclusive, foram mencionadas anteriormente. Entre elas estão a necessidade de estruturas de suporte para determinadas geometrias, que devem ser removidos mecanicamente, podendo danificar a peça nessas regiões. O objeto ainda necessita passar por um processo de cura para que a resina possa ser totalmente consolidada e aumentar sua resistência mecânica (KAI; FAI; SING, 2003; REDWOOD; SCHÖFFLER; GARRET, 2017).

#### 2.6.4 Digital Light Synthesis (DLS)

A *Digital Light Synthesis* é uma tecnologia de manufatura aditiva desenvolvida mais recentemente. Criada pela empresa Carbon, esta técnica de impressão 3D por fotopolimerização em cuba usa projeção digital de luz e uma camada ótica permeável ao oxigênio para a criação de peças (Figura 15).

A DLS é impulsionada por uma técnica chamada de *Continuous Liquid Interface Production*<sup>TM</sup> (CLIP<sup>TM</sup>), um processo fotoquímico que tem como princípio controlar com precisão o nível de oxigênio que passa na área ocupada pela resina que fica logo abaixo da superfície da peça que está sendo construída. Essa região é chamada de *dead zone*, ou zona morta, já que a presença de oxigênio impede que a luz cure a resina dessa área, permitindo que as peças sejam construídas por um movimento contínuo no eixo Z para cima da plataforma de construção, em vez de camada por camada (ALVES, 2017; CARBON, 2022).

Figura 15 – Processo de impressão DLS



Fonte: A autora (2022)

Dessa forma, a *Digital Light Synthesis*<sup>TM</sup> consegue fabricar peças de 20 a 100 vezes mais rápido que outros processos baseados em fotopolimerização, abrindo caminho para customização em massa e estoque sob demanda. Outra grande vantagem desse processo é a produção de peças com propriedades mecânicas isotrópicas, o que quer dizer que elas se comportam de forma consistente em todas as direções. Porém, assim como a *Stereolithography*, a DLS requer o uso de suportes e de um processo de cura da peça final.

A Carbon oferece materiais rígidos, elastoméricos e específicos para aplicações odontológicas. O FPU 50, por exemplo, é um material semi-rígido resistente a impactos, abrasão e fadiga e é indicado para peças que devem suportar esforços repetitivos. Já o EPU 41, um poliuretano elastomérico, é um material altamente elástico, resistente a rasgos e com retorno de energia adequado para a fabricação de estruturas de treliça (CARBON, 2022).

### 3 ANATOMIA E BIOMECÂNICA DO PÉ

A fim de desenvolver um produto ergonomicamente adequado, durante a revisão de literatura, também buscou-se conhecer a estrutura óssea dos pés e seus movimentos. O pé é uma estrutura complexa que consiste em 26 ossos, 33 articulações, músculos, tendões, ligamentos, nervos, pele e outros tecidos. Juntos, esses componentes fornecem suporte, equilíbrio e mobilidade ao corpo humano. Além disso, os pés também ajudam na absorção de impacto, adaptam-se a superfícies irregulares e atuam como uma alavanca que propulsiona o organismo (XIAO; LUXIMON, Y.; LUXIMON, A., 2013; HAMILL; KNUTZEN; DERRICK, 2015).

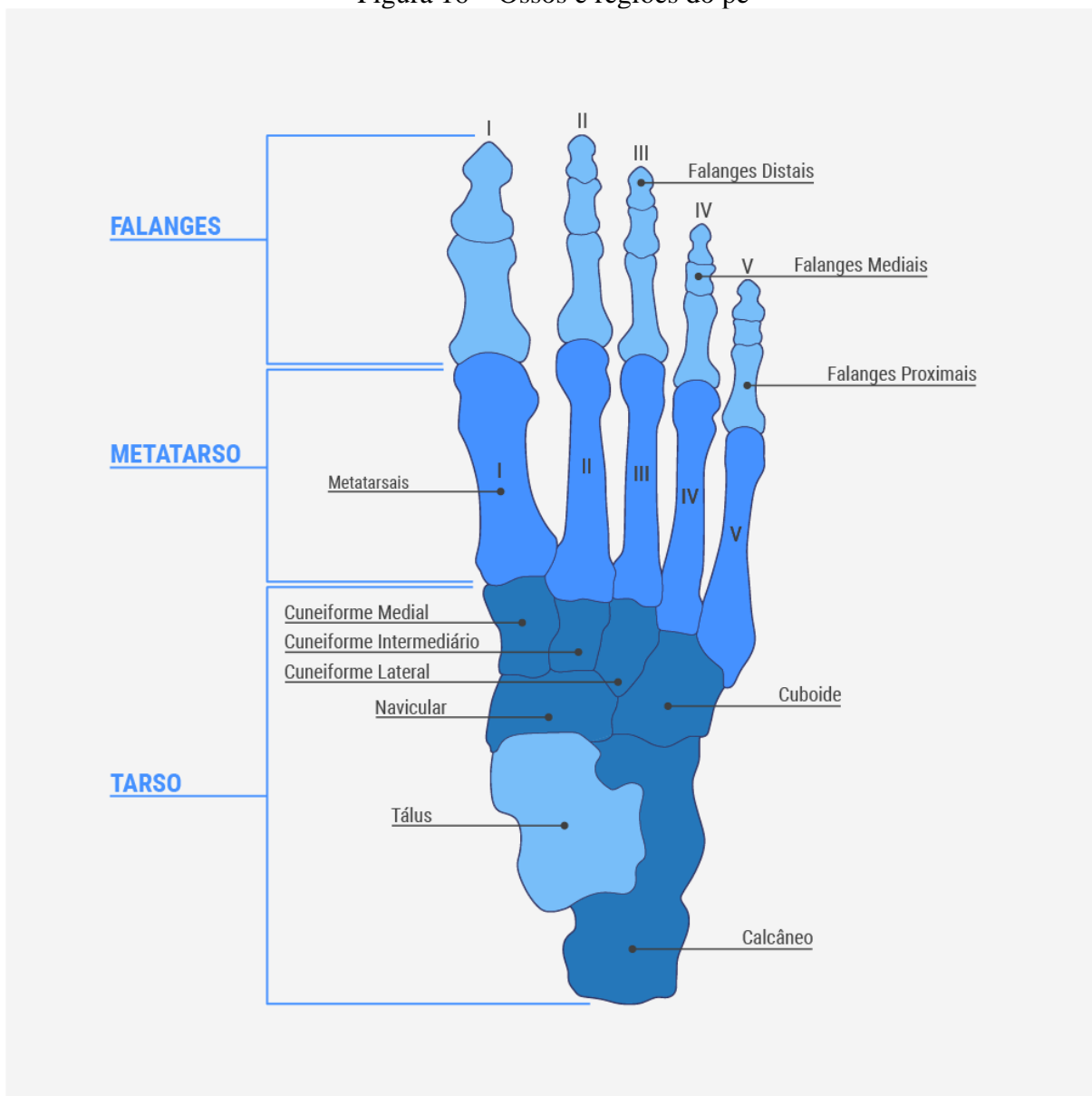
#### 3.1 OSSOS DO PÉ

Segundo Drake, Vogl e Mitchell (2020), os ossos dos pés são classificados em três grupos: tarso, metatarso e falange, que estão descritos abaixo e ilustrados na figura 16.

- Tarso — o tarso possui os sete ossos que formam a estrutura do tornozelo, sendo eles o calcâneo, tálus, navicular, cuboide e três cuneiformes. Os movimentos de inversão e eversão do pé, ou seja, virar a planta do pé para dentro e para fora, respectivamente, ocorrem nas articulações entre os ossos do tarso.
- Metatarso — o metatarso é composto por 5 ossos metatarsos, que são numerados de I a V de acordo com sua posição. Os ossos dessa região têm a função estabelecer uma conexão entre o tarso e as falanges.
- Falanges — esta área é composta pelas 14 falanges que formam os dedos do pé. O dedão, primeiro dedo do pé, possui apenas duas falanges, enquanto os outros dedos possuem três cada: a falange proximal, a falange média e a falange distal (DRAKE; VOGL; MITCHELL, 2020; XIAO; LUXIMON, Y.; LUXIMON, A., 2013).



Figura 16 – Ossos e regiões do pé



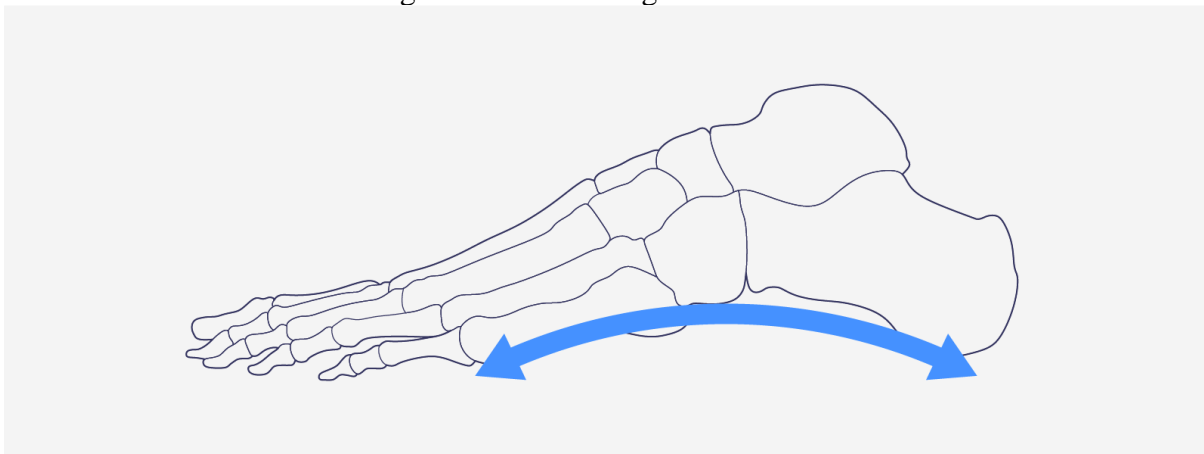
Fonte: Adaptado de Drake, Vogl e Mitchell (2020) e Hamill, Knutzen e Derrick (2015)

### 3.2 ARCOS DO PÉ

Os ossos do pé não estão dispostos em um plano horizontal e, por isso, não ficam planos no chão. Em vez disso, os ossos do tarso e metatarso formam três arcos, sendo dois longitudinais e um transversal em relação ao solo. Esses arcos são responsáveis pela absorção de impacto e distribuição da pressão do corpo para o solo ao caminhar ou ficar em pé (DRAKE; VOGL; MITCHELL, 2020; XIAO; LUXIMON, Y.; LUXIMON, A., 2013).

O arco longitudinal lateral (Figura 17) é composto pelo calcâneo, cuboide e quarto e quinto ossos metatarsais. Por ser mais baixo que o medial e relativamente plano, o arco lateral pode entrar em contato com solo e, assim, suportar o peso corporal e fornecer apoio ao pé.

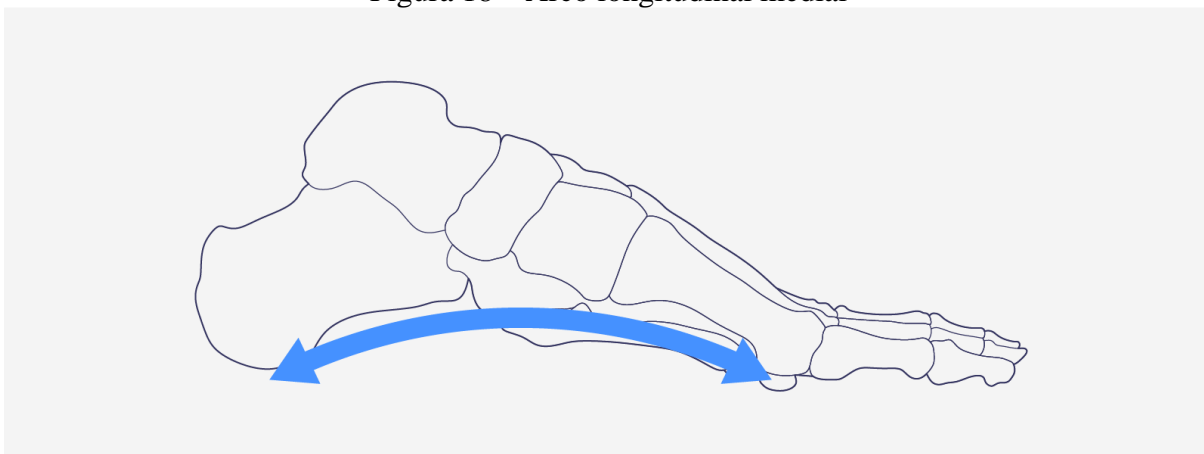
Figura 17 – Arco longitudinal lateral



Fonte: Adaptado de em Drake, Vogl e Mitchell (2020)

Já o arco longitudinal medial (Figura 18) é formado pelos ossos calcâneo, tálus, navicular, cuneiformes e os três primeiros metatarsais. Este arco é mais dinâmico que o arco lateral e desempenha a função de absorção de impacto. Apesar de sua flexibilidade, o arco medial não costuma entrar em contato com o solo.

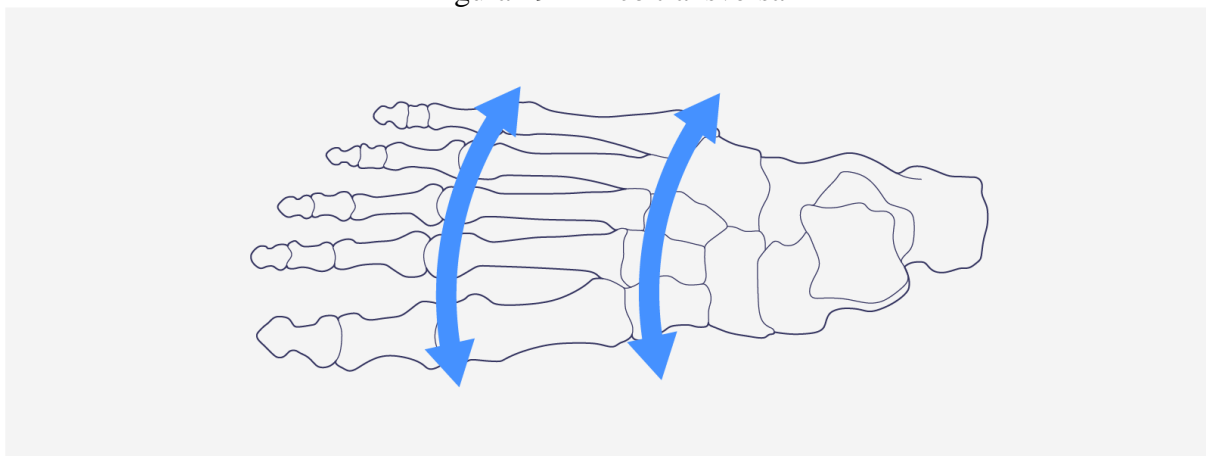
Figura 18 – Arco longitudinal medial



Fonte: Adaptado de Drake, Vogl e Mitchell (2020)

O arco transversal (Figura 19) é composto pelos ossos cuneiformes (medial, intermédio e lateral), cuboide e a base dos cinco ossos metatarsais. Esses ossos têm a função de sustentação, podendo suportar de três a quatro vezes o peso corporal (HAMILL; KNUTZEN; DERRICK, 2015).

Figura 19 – Arco transversal



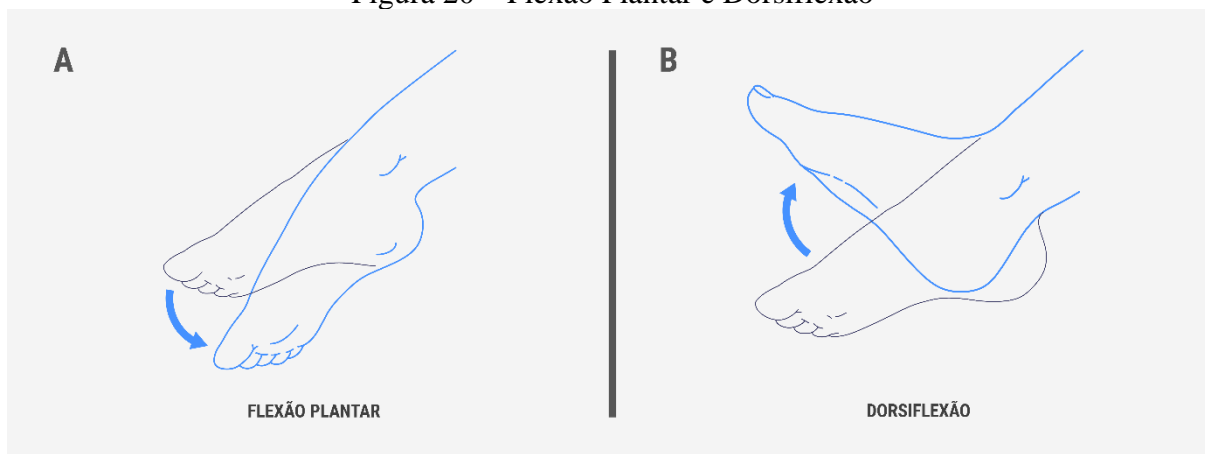
Fonte: Adaptado de Drake, Vogl e Mitchell (2020)

### 3.3 MOVIMENTOS DO PÉ

As articulações dos pés e tornozelos são as estruturas responsáveis por permitir a movimentação, proporcionando suporte mecânico e absorção de choque nos pés. Os movimentos que ocorrem nesta região serão descritos abaixo.

Flexão plantar e dorsiflexão — A flexão plantar (Figura 20A) é o movimento da planta do pé para baixo, aumentando o ângulo entre o pé e a perna. Ela ocorre quando o calcanhar é levantado e o peso deslocado para a ponta dos pés. Já a dorsiflexão (Figura 20B) é o movimento da parte superior do pé para cima, em direção à perna, diminuindo o ângulo entre essas partes. Esse movimento ocorre ao colocar o peso do corpo sobre o calcanhar e levantar os dedos do pé. A flexão plantar e a dorsiflexão ocorrem na articulação do tornozelo.

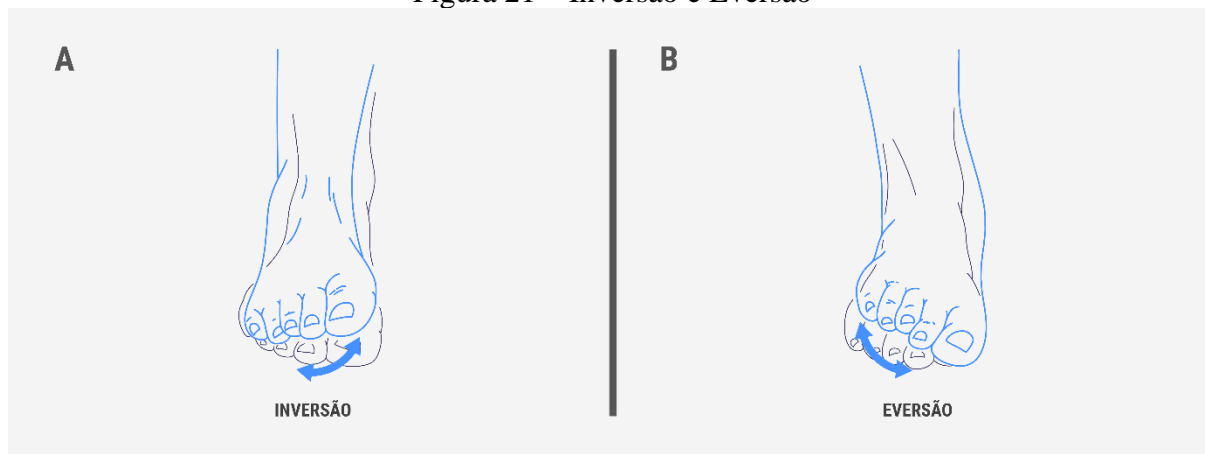
Figura 20 – Flexão Plantar e Dorsiflexão



Fonte: Adaptado de Hall (2019)

Inversão e Eversão — A inversão (Figura 21A) ocorre quando a borda medial do pé se eleva de modo que a sola do pé fique voltada para dentro em direção à linha média do corpo. Já a eversão (Figura 21B) é o movimento oposto, ou seja, quando a borda lateral do pé se eleva e fica voltada para fora, em direção contrária à linha média do corpo (HAMILL; KNUTZEN; DERRICK, 2015).

Figura 21 – Inversão e Eversão

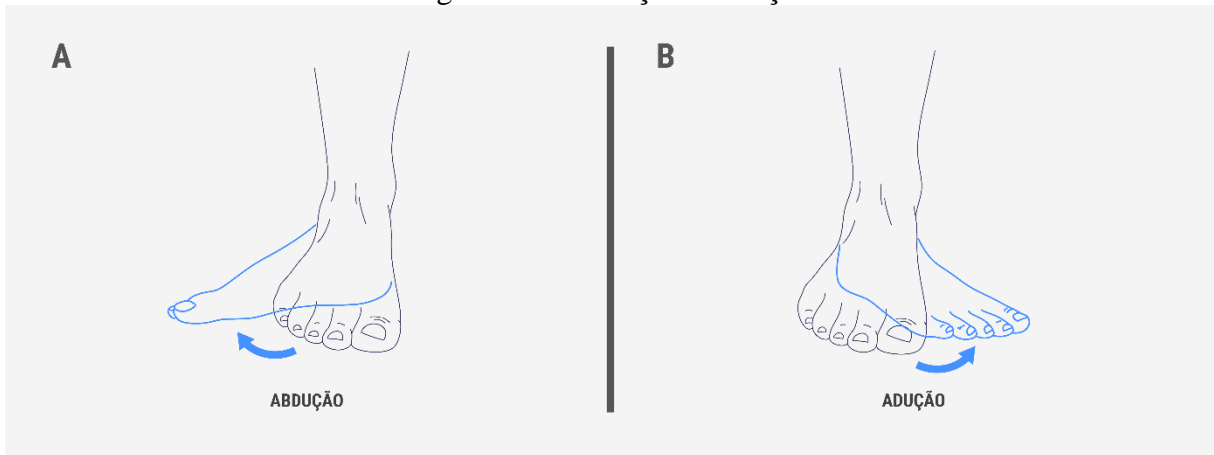


Fonte: Adaptado de Hamill, Knutzen e Derrick (2015)

Abdução e adução — o movimento de abdução (Figura 22A) ocorre quando a extremidade lateral do pé se afasta em direção ao plano mediano do corpo, e o de adução (Figura 22B) é quando a extremidade lateral do pé vai em direção ao plano mediano (CALAIS-

GERMAIN, 2007). A abdução e adução também podem ser descritas como a rotação do pé para fora e para dentro, respectivamente.

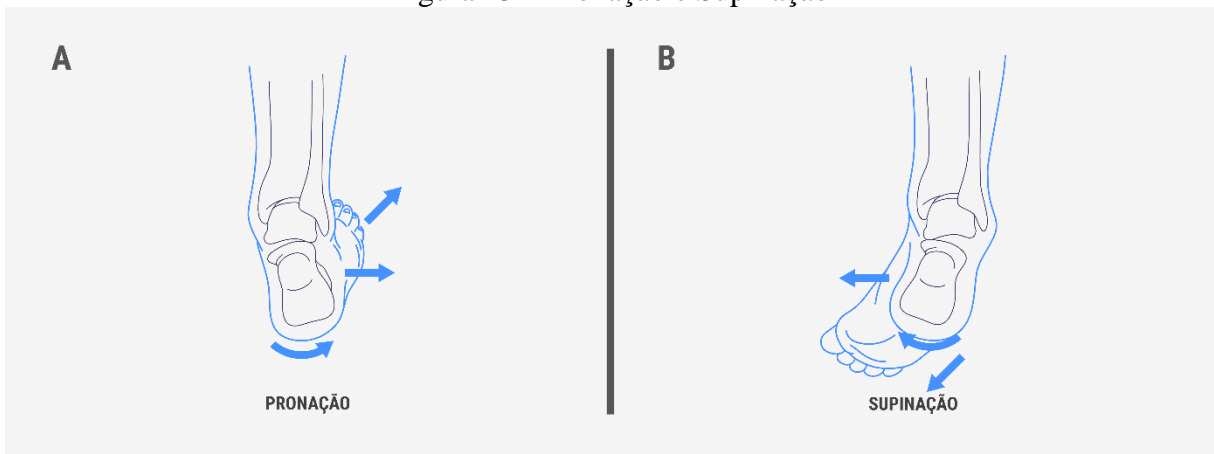
Figura 22 – Abdução e Adução



Fonte: A autora

Pronação e supinação — são sequências cíclicas de movimentos que ocorrem principalmente quando o pé está em contato com o solo durante a caminhada ou corrida. A pronação (Figura 23A) consiste na combinação dos movimentos de dorsiflexão, eversão e abdução. Já a supinação (Figura 23B) é a combinação de flexão plantar, inversão e adução (HALL, 2019).

Figura 23 – Pronação e Supinação



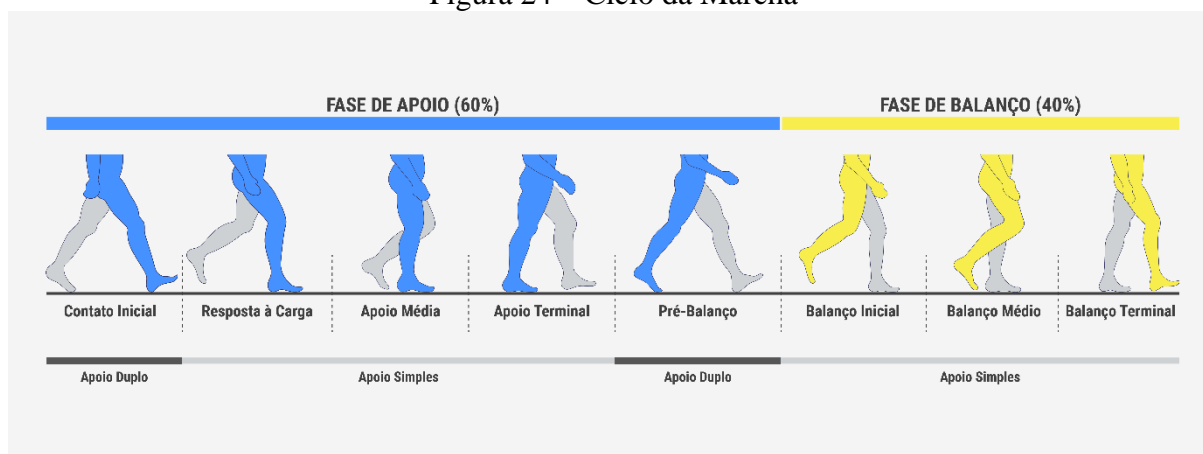
Fonte: Adaptado de Hamill, Knutzen e Derrick (2015)

### 3.4 CICLO DA MARCHA

A marcha humana pode ser definida como uma série de movimentos que resultam na propulsão do corpo de maneira estável. O ciclo da marcha (Figura 24) inicia no momento em que um dos pés entra em contato com o solo e termina quando o mesmo pé volta a tocá-lo e é composto por duas fases, a de apoio e a de balanço (SCHMELTZPFENNING; BRAUNER, 2013; SHAH; SOLAN; DAWE, 2020).

Aproximadamente 60% do tempo é ocupado pela fase de apoio e o restante, 40%, é gasto na fase de balanço. Em dois momentos da marcha, no início e no final da fase de apoio, existem os chamados “períodos de apoio duplo”. Eles ocorrem quando ambos os pés ficam em contato com o chão simultaneamente e representam cerca de 10% do ciclo de marcha (SHAH; SOLAN; DAWE, 2020).

Figura 24 – Ciclo da Marcha



Fonte: Adaptado de Shah, Solan e Dawe (2020)

A fase de apoio acontece quando o pé encosta no solo e ela pode ser dividida em cinco subfases: contato inicial, resposta ao carregamento, apoio médio, apoio terminal e pré-balanço.

- Contato Inicial — é o momento em que o calcanhar do pé entra em contato com o solo. É também nesta fase que ocorre o primeiro período de apoio duplo.
- Resposta à carga — segue o contato inicial e é o ponto em que todo o pé entra em contato com o chão e passa a receber o peso corporal. Conforme ocorre a propulsão para a frente, o outro pé deixa o solo, finalizando a fase de resposta à carga e, também, o primeiro período de apoio duplo (SHAH; SOLAN; DAWE, 2020).

- Apoio médio — à medida que termina o apoio duplo e um dos pés deixa o solo, o peso corporal se distribui pelo pé de referência enquanto o corpo se move para frente (SCHMELTZPFENNING; BRAUNER, 2013; SHAH; SOLAN; DAWE, 2020).
- Apoio terminal — inicia assim que o calcanhar começa a sair do chão e o peso do corpo é transferido para a região do antepé (NORDIN; FRANKEL, 2012; SCHMELTZPFENNING; BRAUNER, 2013).
- Pré-balanço — é a fase em que o pé de referência começa a se desprender do chão, preparando-se para entrar em fase de balanço. Neste momento ocorre o segundo período de apoio duplo já que o pé oposto volta a tocar o solo (NORDIN; FRANKEL, 2012; SCHMELTZPFENNING; BRAUNER, 2013; SHAH; SOLAN; DAWE, 2020).

A fase de balanço começa no momento em que o pé deixa de tocar o solo e pode ser dividida em três subfases: balanço inicial, balanço médio e balanço terminal (SHAH; SOLAN; DAWE, 2020).

- Balanço inicial — também chamado de aceleração, este período inicia no momento em que o pé de referência se desprende do solo e vai até a flexão máxima do joelho da mesma extremidade.
- Balanço médio — é a fase que começa a partir do momento em que o pé em balanço se encontra posicionado ao lado do pé em apoio e vai até o ponto em que a tíbia se encontra em posição vertical em relação ao solo.
- Balanço terminal — é o período em que o pé começa a desacelerar, preparando-se para tocar o solo em contato inicial novamente, reiniciando o ciclo da marcha (SCHMELTZPFENNING; BRAUNER, 2013).

### 3.5 ERGONOMIA E ANTROPOMETRIA

De acordo com a IEA – *International Ergonomics Association* (2022), a ergonomia (ou fatores humanos) é definida como “a disciplina científica que trata da compreensão das interações entre os seres humanos e outros elementos de um sistema, e a profissão que aplica teorias, princípios, dados e métodos, a projetos que visam otimizar o bem-estar humano e a performance global dos sistemas”.

A ergonomia, palavra derivada do grego *ergon* (trabalho) e *nomos* (leis), é uma ciência que busca a melhor adequação dos produtos aos seres vivos levando em consideração a segurança, o conforto e a eficácia do uso dos objetos (GOMES FILHO, 2016; IEA, 2022).

Do ponto de vista ergonômico, os produtos têm como objetivo satisfazer certas necessidades dos usuários e, para isso, devem apresentar qualidade técnica, qualidade ergonômica e qualidade estética. A qualidade técnica é a parte relacionada ao funcionamento do produto, do ponto de vista mecânico, elétrico, eletrônico ou químico. Já a qualidade ergonômica é a que garante uma boa interação do produto com o usuário e inclui a facilidade de manuseio, adaptação antropométrica e outros itens de conforto e segurança. Por fim, a qualidade estética é a que proporciona prazer ao consumidor e envolve a combinação de formas, cores, materiais, texturas, acabamentos e movimentos, para que os produtos sejam considerados atraentes e desejáveis para o consumidor (IIDA, 2005).

A ergonomia possui um caráter interdisciplinar e emprega conhecimentos de outros campos científicos como biomecânica, fisiologia, psicologia e antropometria. Em vista disso, pode-se definir a antropometria como a área da ergonomia que trata das dimensões e proporções do corpo humano, incluindo todo o processo de coleta, documentação, análise e informação de dados (DUL; WEERDMEESTER, 2008; GUPTA, 2020). Dentro da ergonomia, esses dados antropométricos são importantes para a especificação das dimensões físicas dos espaços de trabalho, equipamentos, roupas e outros produtos para garantir que eles atendam fisicamente as necessidades dos usuários (BRIDGER, 2018).

A obtenção de medidas antropométricas como comprimentos, larguras e alturas podem ser realizadas de maneira direta ou indireta. As formas de medição diretas envolvem contato físico com os indivíduos a serem mensurados e são feitas a partir do uso de instrumentos tradicionais como réguas, paquímetros e fitas métricas. Já nas medições indiretas, não há contato físico e as dimensões do corpo são obtidas por equipamentos como o *scanner 3D*, capazes de coletar centenas de dimensões em poucos segundos e digitalizar partes do corpo para gerar um modelo tridimensional (XIONG; ZHAO, 2013; GUPTA, 2020).

### **3.5.1 Ergonomia aplicada ao calçado**

No design de calçados, a antropometria é o campo que estabelece a mais importante conexão com a ergonomia. Para viabilizar a produção em larga escala, a maioria dos calçados



é fabricada segundo dimensões padronizadas de modelos e fôrmas moldados a partir dos pés dos usuários. O tamanho desses produtos é definido por faixas dimensionais, ou seja, as numerações, estabelecidas ergonomicamente baseadas em dados estatísticos de diversos conjuntos da população como crianças e adultos de ambos os sexos (GOMES FILHO, 2010). No mundo, existem diversos sistemas de dimensionamento de calçados, sendo os mais importantes o ponto inglês, o ponto francês, o ponto americano e o *Mondopoint*.

No Brasil, por exemplo, o sistema utilizado é o ponto francês e cada unidade equivale a 6,66 mm ou  $\frac{2}{3}$  de 10 mm. Porém, enquanto no ponto francês original utiliza-se o comprimento da fôrma do calçado (molde 3D que simula a forma do pé) para dimensionamento, no Brasil, a classificação da numeração é indicada pela marcação do comprimento real do pé (LUXIMON, A.; JIANG; LUXIMON, Y., 2020; SCHMIDT, 2007). E, segundo a NBR 15159:2013, norma vigente no Brasil que regulamenta o conforto de calçados e componentes, o comprimento do pé é compreendido como a “distância longitudinal entre o ponto mais proeminente na região da tuberosidade do calcâneo até o ponto mais proeminente na região da tuberosidade da falange distal do dedo mais saliente (dedo I, dedo II ou dedo III)”.

Mesmo com o avanço dos estudos e uma melhoria no campo da antropometria, ainda há diversos problemas ergonômicos em calçados. Dentre eles, existem questões de inadequação entre o calçado e os pés do usuário, que podem ser explicados pelas diferenças físicas e de biotipos ou pela própria configuração do modelo do produto. Outros problemas estão relacionados ao uso de materiais inadequados e incompatibilidade do calçado para a função destinada a ele. Além disso, há situações em que o usuário possui numeração quebrada, como por exemplo 37,5, e não consegue encontrar um calçado que coincida com o tamanho de seus pés e, ainda, pouca disponibilidade de modelos de calçados para pessoas que usam numeração superior a 42, ou seja, percentis entre 95% e 99% (GOMES FILHO, 2010).

O uso de calçados mal ajustados ou inadequados são responsáveis por desconforto, dor, lesões e deformidades nos pés. Como consequência, pode ocorrer a formação de calos, joanetes (hálux valgo), unhas encravadas, bolhas e outros problemas (DEMELLO, 2009).

Para garantir um bom ajuste do calçado, diferentes métodos de medição podem ser utilizados para a coleta de dados antropométricos. Porém, sendo o pé uma estrutura complexa em relação à sua geometria, o uso de aparelhos que fornecem apenas dados lineares e angulares como réguas, paquímetros e fitas métricas podem ser limitados (XIONG; ZHAO, 2013).

### 3.5.2 Escaneamento 3D e baropodometria

Com o desenvolvimento da tecnologia de digitalização tridimensional, tornou-se possível coletar medidas antropométricas lineares e não lineares do corpo humano em uma questão de segundos por meio de *scanners 3D* (LU; WANG, 2008; ISTOOK; HWANG, 2001). Esses aparelhos conseguem capturar dados precisos da superfície do corpo do usuário para a geração de modelos tridimensionais digitais, permitindo, assim, a captação de informações mais precisas e com maior potencial de replicabilidade em relação à medição física.

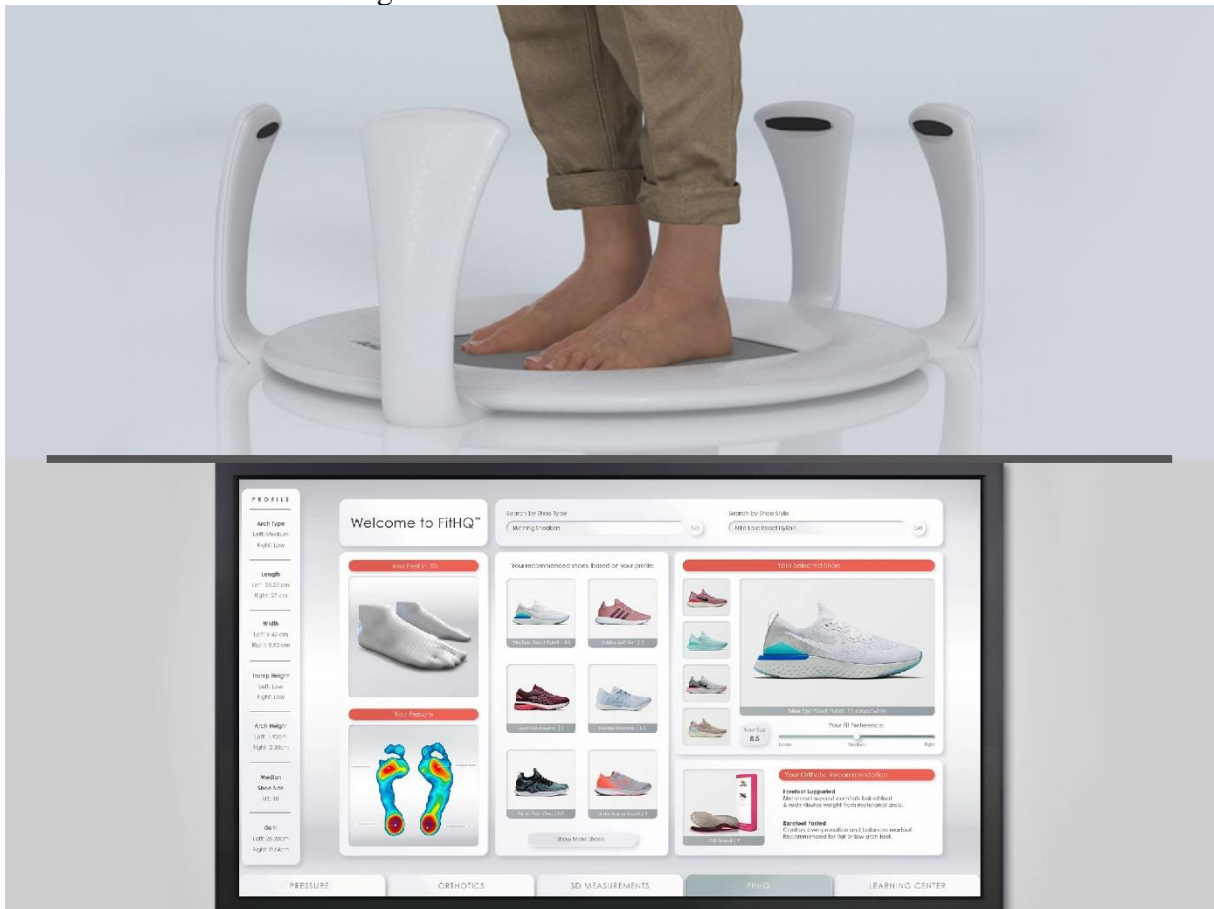
Por esses motivos, a tecnologia de escaneamento 3D se mostrou fundamental para a fabricação de objetos para customização em massa visto que o projeto de um produto personalizado pode partir diretamente do modelo 3D gerado com base nas características físicas específicas de cada pessoa (ISTOOK; HWANG, 2001; SILVA, F. *et al.*, 2010).

Alguns fabricantes de *scanners 3D* já são especializados no desenvolvimento de dispositivos para a captação de dados do usuário para a produção de palmilhas e órteses ou apenas para fazer uma análise completa dos pés de seus clientes para encontrar um produto que seja mais compatível com as suas necessidades.

A empresa Aetrex, por exemplo, lançou em 2020 o Albert 2 Pro Scanner (Figura 25), um equipamento compacto, com custo acessível e intuitivo voltado especialmente para o varejo. Ele possui 4 câmeras de profundidade 3D para capturar medidas como comprimento, largura, circunferência e altura do arco e mais de 5 mil sensores capazes de obter informações sobre a profundidade do arco e os pontos de pressão dos pés, indicando lugares mais propensos ao desconforto ou dor.

O processo de varredura completa dura aproximadamente 20 segundo e, após isso, os dados coletados são convertidos em um modelo 3D que permite uma experiência interativa com o consumidor por meio do próprio *software* da marca (AETREX, 2022).

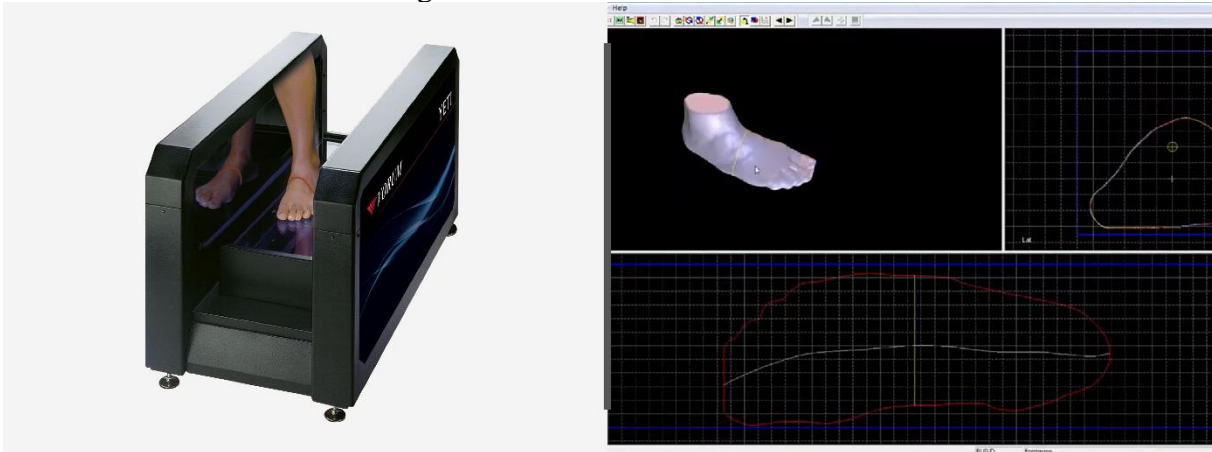
Figura 25 – Aetrex Albert 2 Pro Scanner



Fonte: Aetrex (2022)

Outro *scanner 3D* disponível no mercado é o Yeti (Figura 26), fabricado pela Vorum. Ele possui quatro *lasers* e oito câmeras capazes de fazer varreduras precisas do pé do usuário em menos de 4 segundos. A partir dos dados coletados, é gerado um modelo 3D completo, bem como uma série de medidas dos pés que podem ser utilizados para o design de órteses, palmilhas e fôrmas de calçados usando um *software* desenvolvido pela Vorum (VORUM, 2022).

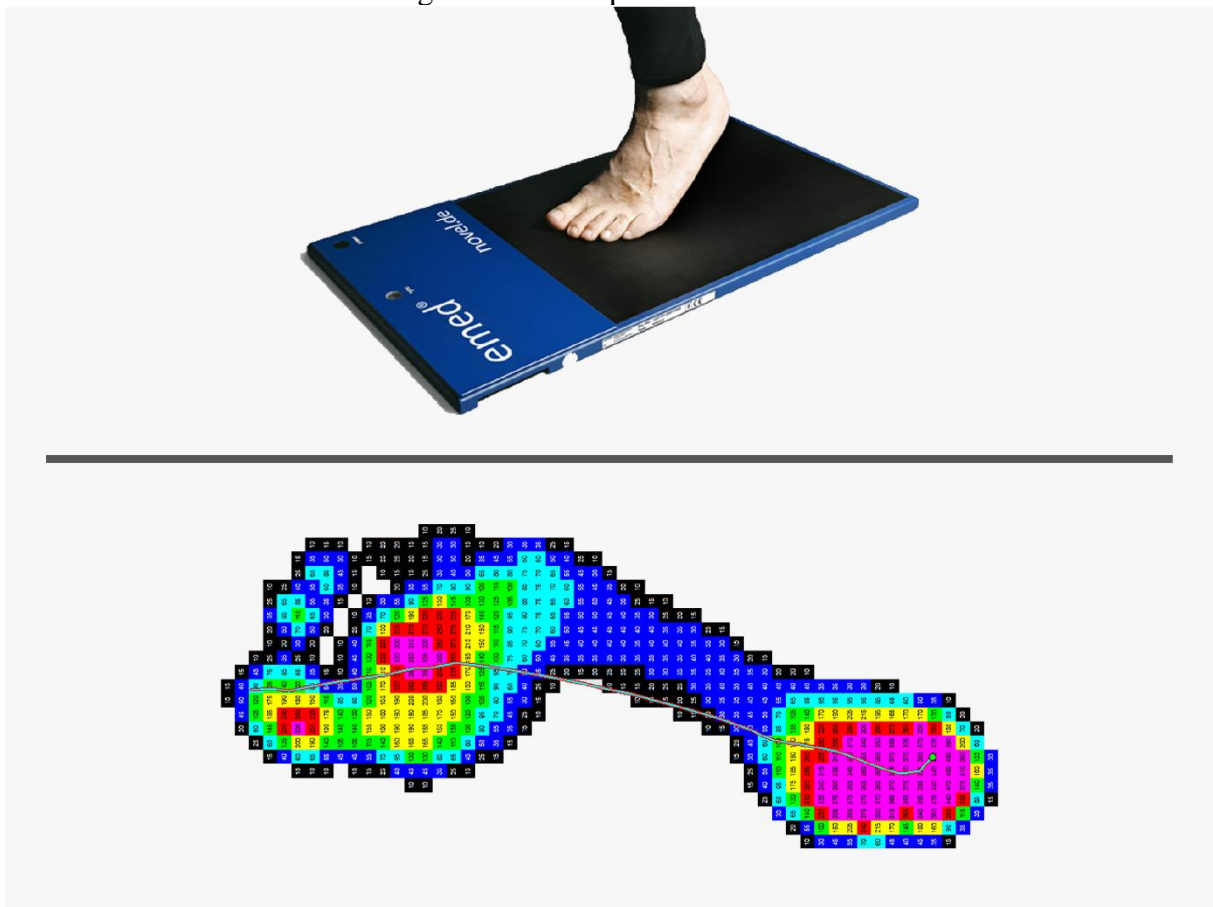
Figura 26 – Yeti 3D Foot Scanner



Fonte: Vorum (2022)

Como visto acima, alguns equipamentos de escaneamento 3D, como é o caso do Aetrex, possuem sensores capazes de fazer uma análise da pressão dos pés dos seus usuários. Porém, existem produtos específicos para esse tipo de medição, os baropodômetros, que consistem em uma plataforma com sensores capaz de avaliar a distribuição da carga corporal do pé em condições estáticas e dinâmicas, fornecendo informações sobre a pressão do pé por meio de um mapa de cores. Um dos dispositivos disponíveis no mercado é o Emed (Figura 27), fabricado pela empresa Novel.

Figura 27 – Baropodômetro Emed



Fonte: Novel (2022)

Até este momento, a pesquisa teve como objetivo buscar o máximo de informações relevantes ao Projeto, permitindo uma compreensão do assunto de maneira mais abrangente e, também, a identificação de ferramentas que podem auxiliar no desenvolvimento do produto. Concluída esta etapa, inicia-se, então, a fase de especificação de projeto.

#### 4 ESPECIFICAÇÃO DE PROJETO

Apoiada na metodologia *Design Science Research*, durante a etapa de identificação dos artefatos, foi feita uma análise sincrônica com o objetivo de identificar produtos já desenvolvidos capazes de auxiliar no desenvolvimento do projeto. Em um segundo momento, como introdução à etapa de proposição de artefatos para resolução do problema, foi elaborada uma pesquisa de público a fim de conhecer as necessidades e desejos dos consumidores em

relação a tênis e entressolas. A partir da reunião e análise das informações coletadas até esta etapa, foi possível a elaboração dos requisitos de projeto.

#### 4.1 ANÁLISE SINCRÔNICA

Também chamada de análise paramétrica, a análise sincrônica tem como propósito comparar o produto em desenvolvimento com produtos existentes ou concorrentes, baseando-se em parâmetros comparativos. Para Baxter (2000), a análise sincrônica de um produto geralmente abrange a avaliação de aspectos quantitativos, qualitativos e de classificação.

Os parâmetros quantitativos podem ser expressos numericamente como tamanho, peso, resistência, preço e outros. Os qualitativos comparam os produtos, mas sem apresentar uma medida absoluta, levando em conta aspectos como eficiência, estética e conforto. Já os de classificação, indicam determinadas características do produto como material, textura e acabamento (BAXTER, 2000; PAZMINO, 2015).

Além disso, os produtos escolhidos para análise devem ser definidos como concorrentes ou similares, sendo que concorrente é aquele que busca o mesmo mercado e, também, satisfazer as mesmas demandas do consumidor, enquanto similar é o produto que desempenha funções semelhantes e pode atender as mesmas necessidades do consumidor (PAZMINO, 2015).

Nesta análise sincrônica (Figura 28) serão avaliados os principais tênis com entressolas fabricadas a partir de impressão 3D que são ou já foram disponibilizados no mercado. Por este projeto ser direcionado ao desenvolvimento de uma entressola, esta análise será voltada principalmente a essa parte dos tênis e levará em conta os seguintes aspectos: fabricante, ano de lançamento, preço, finalidade, tecnologia e material de fabricação.

Figura 28 – Análise Sincrônica

		
<b>Futurecraft 4D</b> (similar)	<b>Zante Generate</b> (concorrente)	<b>ArchiTech Futurist</b> (similar)
Futurecraft 4D é um tênis com uma entressola em impressão 3D baseada em anos de análise de dados dos usuários e com diferentes estruturas de treliça nas regiões do pé e calcanhar	O Zante Generate é um tênis com uma entressola impressa em 3D baseada em dados de pressão de atletas que possui uma estrutura capaz de se adaptar geometricamente às diferentes forças	O ArchiTech Futurist é um tênis com uma entressola parcialmente fabricada em impressão 3D com o objetivo de dar estabilidade, amortecimento e suporte na região do calcanhar
<b>Fabricante:</b> Adidas	<b>Fabricante:</b> New Balance	<b>Fabricante:</b> Under Armour
<b>Ano de lançamento:</b> 2017	<b>Ano de lançamento:</b> 2016	<b>Ano de lançamento:</b> 2017
<b>Preço:</b> R\$ 1.299,99 - disponível para compra no site do fabricante	<b>Preço:</b> ~ R\$ 2.000,00 - edição limitada não disponível para compra	<b>Preço:</b> R\$ 1.099,99 - disponível para compra no site do fabricante
<b>Finalidade:</b> Corrida	<b>Finalidade:</b> Corrida	<b>Finalidade:</b> Treino
<b>Fabricação da entressola:</b> DLS Digital Light Synthesis	<b>Fabricação da entressola:</b> SLS Selective Laser Sintering	<b>Fabricação da entressola:</b> SLS Selective Laser Sintering
<b>Material da entressola:</b> EPU 41	<b>Material da entressola:</b> DuraForm® TPU Elastomer	<b>Material da entressola:</b> TPU

Fonte: A autora

Para uma melhor compreensão dos produtos analisados, principalmente em relação ao projeto da entressola e as técnicas de fabricação, foi feita uma pesquisa mais detalhada de cada um deles.

#### 4.1.1 Futurecraft 4D

Em parceria com a empresa de fabricação digital Carbon, a Adidas lançou em 2017 o Futurecraft 4D (Figura 29), o primeiro tênis de performance com uma entressola feita com luz e oxigênio usando a tecnologia de manufatura aditiva *Digital Light Synthesis*™ (DLS™). Usando este processo de fabricação, a Adidas encontrou mais liberdade de design e pôde desenvolver uma entressola em estrutura treliçada com zonas de desempenho específicas em uma peça monolítica.

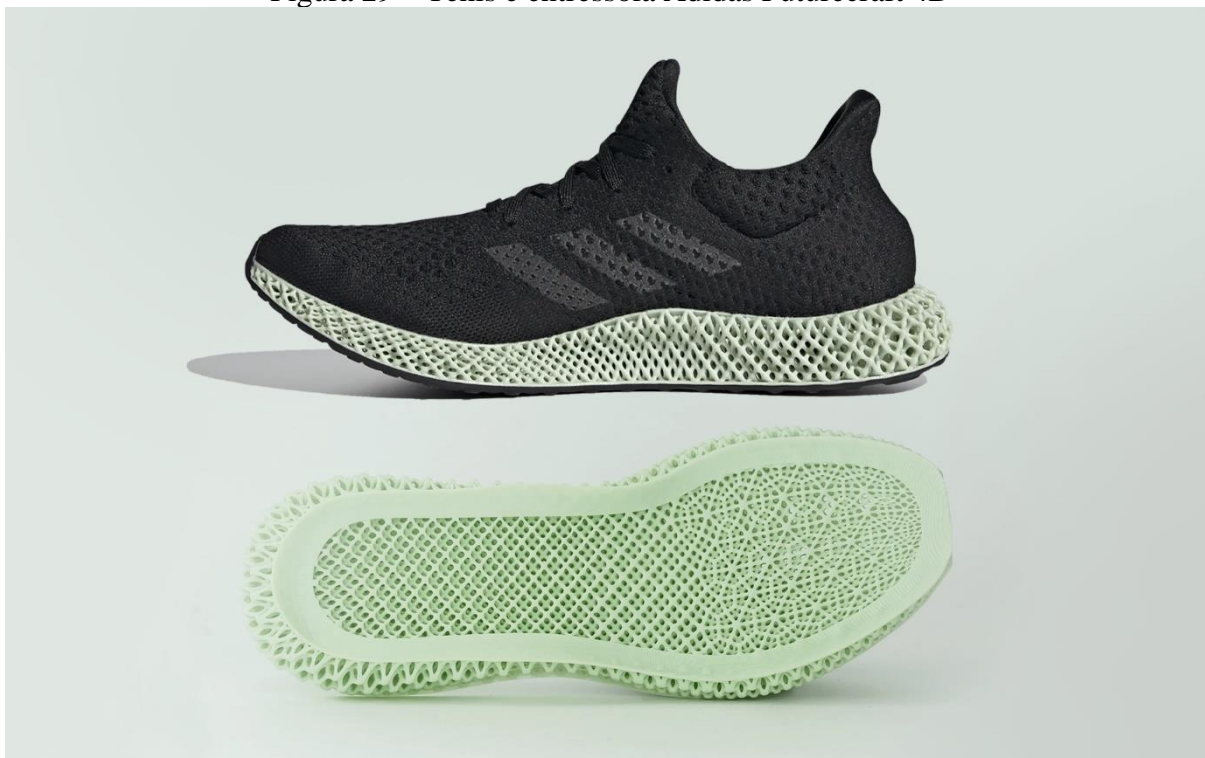
Baseada em anos de análises de coletas de dados de atletas, a entressola Adidas 4D foi projetada para atender às necessidades dos usuários relacionadas ao movimento, amortecimento, estabilidade e conforto. Para alcançar esses objetivos e elevar a função de desempenho de um calçado, esta entressola foi projetada com diferentes estruturas de treliça nas regiões do calcanhar e antepé, levando em conta as diferentes necessidades de amortecimento para essas partes do pé durante a corrida.

Para a fabricação da entressola, é utilizado o material EPU 41 (poliuretano elastomérico), um elastômero especialmente adequado para a manufatura aditiva de estruturas treliçadas em que é necessária uma alta resiliência (retorno de energia). O EPU 41 é um material altamente elástico que combina isotropia (independe da orientação da construção), bom acabamento superficial e precisão. Este material pode ser comparado ao TPU (poliuretano termoplástico) comercial (CARBON, 2022; ADIDAS, 2022).

Apesar de a entressola Adidas 4D ter sido desenvolvida com base em dados de pessoas e ser fabricada utilizando uma tecnologia de impressão 3D que pode ser utilizada para a produção em massa, este produto é categorizado como um similar nesta análise sincrônica pois não apresenta nenhum nível de customização.



Figura 29 – Tênis e entressola Adidas Futurecraft 4D



Fonte: Adidas (2022)

#### 4.1.2 New Balance Zante Generate

Em 2016, a New Balance lançou o Zante Generate (Figura 30), um tênis de corrida de alto desempenho com uma entressola impressa em 3D fabricada usando a tecnologia *Selective Laser Sintering (SLS)* em colaboração com a 3D Systems.

Como material de fabricação da entressola, foi utilizado o pó de SLS da própria 3D Systems, o DuraForm® TPU Elastomer, um elastômero termoplástico com flexibilidade e funcionalidade semelhantes à borracha com boa durabilidade, acabamento superficial e resistência ao rasgo.

O design da entressola do Zante Generate foi desenvolvido em parceria com o escritório de design generativo Nervous System com o objetivo de criar um produto que se adaptasse aos dados de desempenho de um corredor. Assim, a partir dos dados de pressão de atletas, foi gerada uma entressola baseada em diagramas de Voronoi que possibilitou a criação de uma estrutura capaz de se adaptar geometricamente às diferentes forças. Em regiões em que há mais pressão aplicada pelo pé, a densidade da geometria pode aumentar para fornecer mais

suporte. Já em zonas em que há menos pressão aplicada, a densidade pode diminuir para reduzir o peso da entressola.

Embora o projeto da entressola ter sido desenvolvido baseado em dados e apontar para a direção da customização, a New Balance lançou o Zante Generate como um produto com dimensões padronizadas e disponibilizou apenas 44 pares para venda (3D SYSTEMS, 2022; FARAHÍ; LEACH, 2017; NERVOUS SYSTEM, 2022; NEW BALANCE, 2022). Mesmo assim, este produto será considerado como um concorrente pois o projeto da entressola foi desenvolvido com a intenção de ser um produto que pudesse ser customizado.

Figura 30 – Tênis e entressola New Balance Zante Generate



Fonte: New Balance (2022) e Nervous System (2022)

#### 4.1.3 Under Armour ArchiTech Futurist

A Under Armour lançou em 2016 o ArchiTech Futurist (Figura 31), um tênis de treino com uma entressola parcialmente fabricada em impressão 3D em parceria com a empresa de soluções em manufatura aditiva EOS. A partir da tecnologia *Selective Laser Sintering (SLS)*, a entressola é fabricada usando como material pó de TPU e, posteriormente, revestida com verniz para aumentar a durabilidade e resiliência da estrutura, otimizando o desempenho do tênis.

No ArchiTech Futurist, a região do antepé da entressola é fabricada de maneira tradicional usando espuma como material. Apenas a zona do calcanhar é produzida digitalmente e tem como objetivo dar estabilidade, amortecimento e suporte para essa parte do pé.

O tênis da Under Armour é classificado como um produto similar nesta análise pois embora sua entressola seja fabricada usando a tecnologia de impressão 3D, sua estrutura não se baseia em dados específicos dos usuários e, também, não apresenta um potencial tão grande para a customização.

Figura 31 – Tênis e entressola Under Armour ArchiTech Futurist



Fonte: Sneakersbr (2022)

#### 4.1.4 Considerações gerais da análise sincrônica

Nesta análise de produtos concorrentes e similares foi possível compreender e identificar as características que pudessem ser mantidas, melhoradas ou descartadas no desenvolvimento deste projeto. As principais qualidades desejáveis identificadas nesta análise são estruturas capazes de se adaptar geometricamente de acordo com as forças aplicadas, customização a partir de dados de pressão e uso de materiais com propriedades semelhantes ao TPU (poliuretano termoplástico).

## 4.2 PESQUISA DE PÚBLICO

A pesquisa de público objetiva conhecer as necessidades, desejos e percepções dos consumidores em relação a um tipo específico de produto. Essa ferramenta pode utilizar diversos métodos de avaliação como entrevistas, questionários e observação (BAXTER, 2000; PAZMINO, 2015). Por ser um instrumento econômico, com grande alcance e de fácil análise, o questionário virtual foi definido como a técnica para a coleta de dados desta pesquisa.

### 4.2.1 Questionário

Visando traçar um perfil do público-alvo e compreender seus hábitos e experiências em relação ao uso de tênis, foi elaborado um questionário virtual (Figura 32) com 10 perguntas direcionadas a pessoas que costumam utilizar esse tipo de calçado diariamente.

O questionário foi elaborado e disponibilizado pela plataforma *Google Forms* e aplicado virtualmente por meio de redes sociais no primeiro semestre de 2022. Durante esse período foram recebidas um total de 100 respostas.

A fim de facilitar a leitura, organização e interpretação dos resultados, os dados coletados foram representados visualmente por meio de tabelas e gráficos disponíveis no item seguinte.

Figura 32 – Perguntas elaboradas para o questionário virtual

**01. Qual o seu gênero?**

- Masculino  
 Feminino  
 Outro

**02. Qual é a sua idade?**

- Menos que 18 anos  
 De 18 até 24 anos  
 De 25 até 34 anos  
 De 35 até 44 anos  
 De 45 até 54 anos  
 Mais que 55 anos

**03. Quantas horas por dia você costuma usar tênis?**

- Menos de 2 horas  
 De 2 até 4 horas  
 De 4 até 6 horas  
 De 6 até 8 horas  
 Mais de 8 horas

**04. Em qual(ais) atividade(s) você usa tênis com mais frequência?**

- Atividades esportivas  
 Atividades do dia a dia  
 Trabalhar/estudar  
 Sair  
 Outros \_\_\_\_\_

**05. Qual tipo de tênis você usa com mais frequência?**

- Tênis casual  
 Tênis de corrida  
 Tênis de academia e treino  
 Tênis de basquete  
 Tênis de skateboarding  
 Outro \_\_\_\_\_

**06. Como você classificaria estes fatores em um tênis?**

	Pouco Importante	Importante	Muito Importante
Conforto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Estética	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Marca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Preço	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Segmento (ex: corrida)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**07. Você tem dificuldades para comprar tênis que te sirvam adequadamente?**

- Sim  
 Não


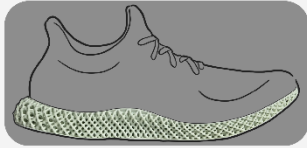

**08. Se sim, qual(ais)?**

- Pouca disponibilidade de tênis com numeração quebrada (ex: 37,5)  
 Pouca disponibilidade de tênis com numeração muito alta ou muito baixa (ex: 43 - muito alta)  
 Incompatibilidade entre a estrutura dos pés e a maioria dos tênis, causando desconforto  
 Pouca disponibilidade de tênis para pés largos  
 Diferenças de tamanho entre pé esquerdo e direito  
 Não possuo dificuldades  
 Outros \_\_\_\_\_

**09. Você teria interesse em usar/adquirir um tênis com um solado (entressola) feito a partir das medidas e formato exatos dos seus pés e com um amortecimento personalizado de acordo com as suas necessidades?**

- Sim  
 Não  
 Talvez

**10. Quais deste solados (entressolas) mais te agrada esteticamente?**

- 1 
- 2 
- 3 

**\* Legenda**

- apenas uma alternativa pode ser selecionada  
 uma ou mais alternativas podem ser selecionadas

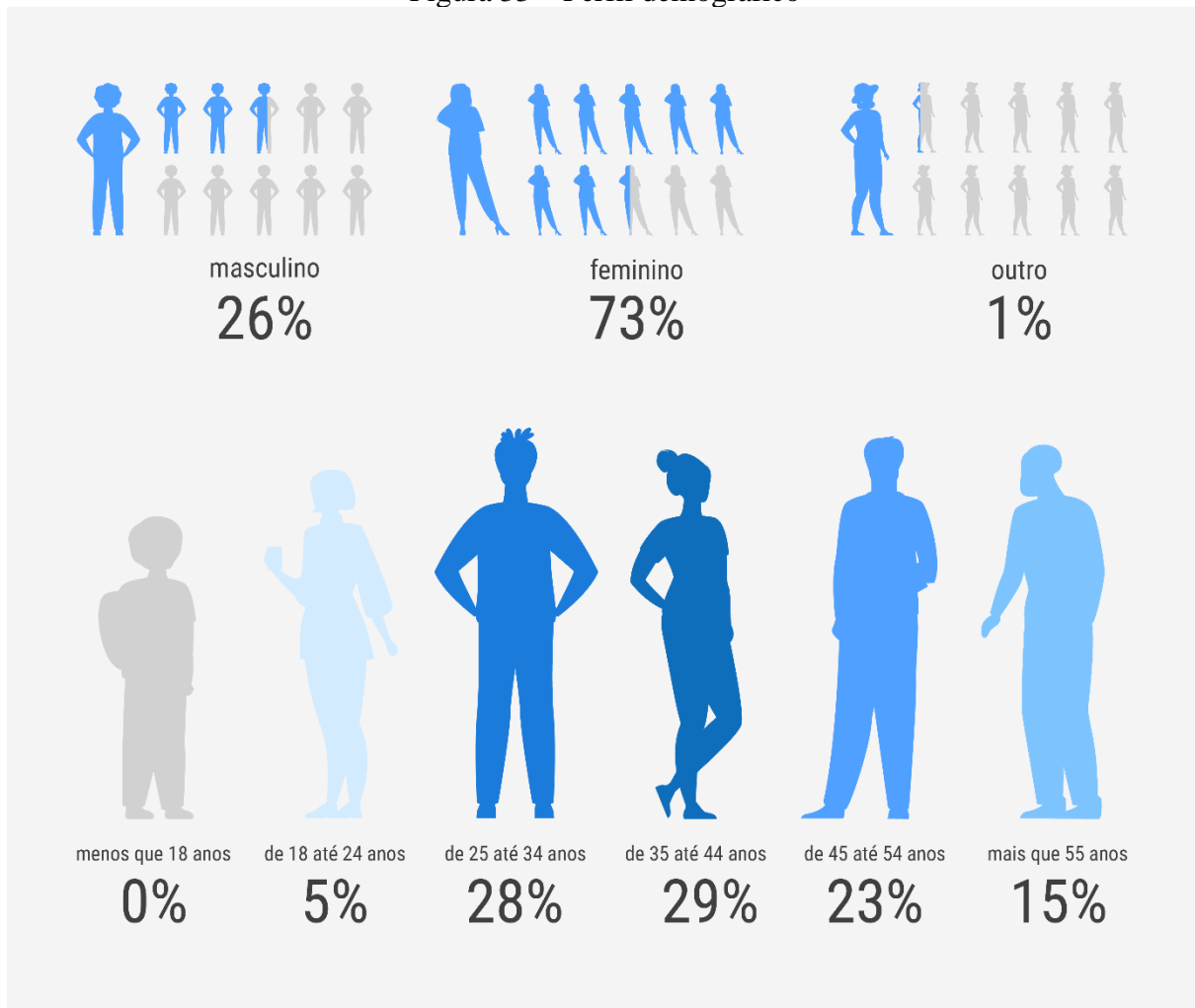
Fonte: A autora

#### **4.2.2 Discussão dos resultados**

O questionário virtual contou com um total 100 respondentes em que houve predominância de pessoas que se identificaram como sendo do gênero feminino, com 73%, seguindo pelo gênero masculino, 26%, e o restante, 1%, não se identificou como pertencente a nenhum dos dois grupos.

No que diz respeito à faixa etária, o questionário abrangeu múltiplos grupos, iniciando abaixo de 18 anos e indo até 55 anos ou mais. Dentro da amostra, houve uma participação mais expressiva da faixa etária que abrange idades entre 35 e 44 anos, com 29%, seguido do grupo entre 25 e 34 anos, 28%, e, logo atrás, os respondentes que possuem entre 45 e 54 anos, com 23 %. Participantes com mais de 55 anos representam 15%, enquanto a contribuição de pessoas que possuem entre 18 e 24 anos foi de apenas 5%. Nesta pesquisa não houve a participação de indivíduos com idade abaixo de 18 anos (Figura 33).

Figura 33 – Perfil demográfico



Fonte: A autora

Em relação ao tempo de uso de tênis diariamente, as respostas se mostraram bem distribuídas. A maior parte, 24%, afirmou usar tênis em um período que vai de 2 até 4 horas por dia, enquanto o grupo que diz fazer uso de tênis entre 6 e 8 horas, foi de 21%. Já a porcentagem de respondentes que usam tênis por menos de 2 horas por dia teve o mesmo valor em relação aos que informaram usar tênis entre 4 e 6 horas, sendo de 20%. Os 15% restantes foram atribuídos aos respondentes que afirmaram usar tênis diariamente por um período maior que 8 horas.

No que se refere às principais atividades realizadas usando tênis, 64% afirmaram que a prática de esportes está entre os principais motivos do uso. Tanto atividades do dia a dia,

quanto trabalho ou estudo, foram relatados por 55% dos participantes. Porém, apenas 26% mencionaram que costumam usar tênis como um calçado para sair (Figura 34).

Figura 34 – Principais atividades e tempo de uso de tênis por dia



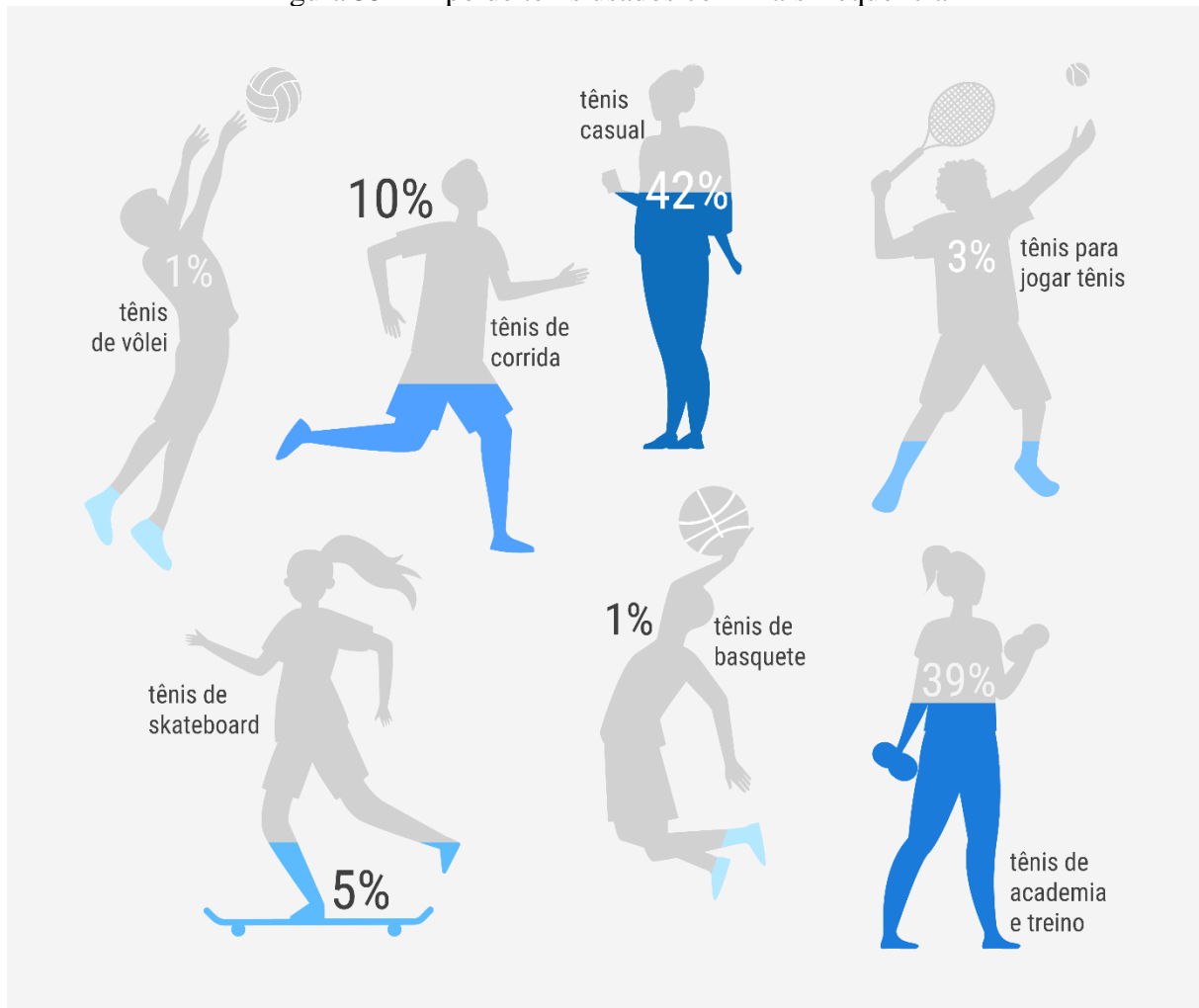
Fonte: A autora

Acerca dos segmentos de tênis usados com mais frequência, houve uma predominância entre os do tipo casual e de academia e treino com porcentagens de 42% e 39%, respectivamente, seguidos pelo tênis de corrida, com 10%. Tênis para skate, para jogar tênis, vôlei e basquete aparecem em seguida, porém com menor expressividade (Figura 35). Tais números revelam que apesar de a prática de esportes ter sido apontada como a principal razão para o uso de tênis, a maioria dos participantes aponta o tênis casual como sendo o tipo usado



com mais frequência. Isso revela que em muitos casos o segmento do tênis não corresponde à função destinada a ele pelo próprio consumidor.

Figura 35 – Tipo de tênis usados com mais frequência

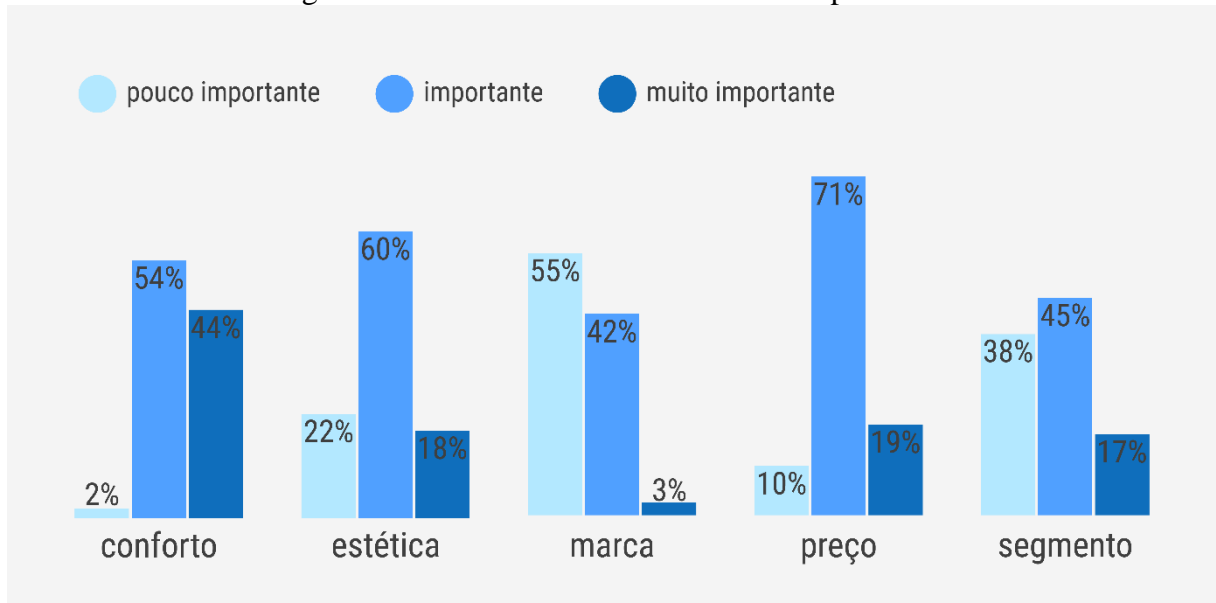


Fonte: A autora

Quando questionados sobre o nível de importância (pouco importante, importante ou muito importante) de determinados fatores em um tênis, o conforto foi a característica que mais se destacou, sendo considerado como muito importante por 44% dos respondentes e importante por 54%. O preço e a estética também obtiveram alta porcentagem e foram classificados como importante por 71% e 60%, respectivamente. A maioria dos participantes apontou a marca como pouco importante, enquanto o fator segmento apresentou um maior equilíbrio entre os

níveis de importância (Figura 36). Por esses dados, pôde-se analisar que os consumidores prezam por tênis confortáveis, levando em conta sua estética e preço.

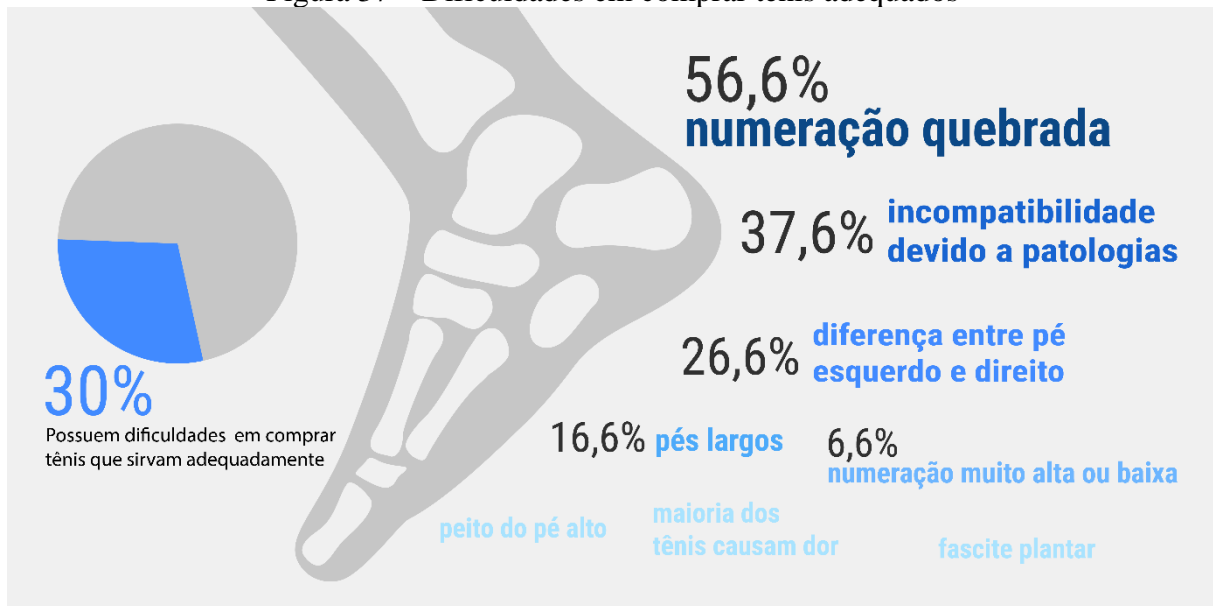
Figura 36 – Características em níveis de importância



Fonte: A autora

Sobre a compra do produto, 30% da amostra afirmou ter dificuldades para encontrar tênis que sirvam adequadamente aos seus pés. Desto desse grupo, a maioria dos respondentes, 56,6%, apontou calçar numeração quebrada, tendo problemas em encontrar tênis que correspondam corretamente ao tamanho de seus pés. A incompatibilidade entre a estrutura dos pés e a maioria dos tênis devido a patologias também foi apontada como uma das causas por 37,6%. Logo em seguida, 26% dos participantes disseram possuir diferenças de tamanho entre pé esquerdo e direito. Com menos expressividade, os participantes também revelaram dificuldades em encontrar tênis por possuírem pés largos, numeração fora dos padrões, fascite plantar, peito do pé alto e, também, por sentirem dores ao usar a maioria dos tênis disponíveis no mercado (Figura 37).

Figura 37 – Dificuldades em comprar tênis adequados



Fonte: A autora

Ao serem questionados se usariam ou comprariam uma entressola customizada, 78% dos participantes responderam desejar um produto personalizado, enquanto 21% responderam talvez ter interesse. Apenas 1% dos respondentes afirmaram não possuir vontade. Tais números revelam o desejo por grande parte dos consumidores em adquirir um produto personalizado, independente de dificuldades para encontrar tênis que se adequem aos seus pés.

Acerca da preferência estética entre produtos, a entressola numerada como 2 foi a mais popular, com 48% dos votos, seguido pelo produto 3, com 42%. O produto de número 1 teve a classificação mais baixa, com 10% (Figura 38).

Figura 38 – Interesse em entressolas customizadas e preferências estéticas



Fonte: A autora

#### 4.2.3 Considerações gerais da pesquisa de público

Com base na pesquisa realizada foi possível compreender hábitos, desejos e dificuldades do público em relação ao uso de tênis. O questionário mostrou uma provável inconsistência entre o segmento de tênis mais usado pelos respondentes e o tipo de uso dado a eles. Ressaltando essa informação, 38% dos respondentes afirmaram que consideram o segmento do tênis como um fator pouco importante na hora da compra. E, sabendo que o uso de calçados inadequados pode levar a deformidades nos pés, é possível considerar se existe uma relação entre essa questão com a porcentagem de pessoas que afirmam ter dificuldades em comprar tênis devido a patologias.

Sobre as principais dificuldades destacadas pelos participantes, deve-se evidenciar a pouca disponibilidade de tênis com numeração quebrada, a incompatibilidade entre a estrutura dos pés e tênis e, também, a diferença entre pé esquerdo e direito. No geral, pôde-se concluir que o público tem o desejo de adquirir um produto personalizado e que atenda suas demandas, principalmente no que diz respeito a conforto e estética, levando em consideração o preço.

#### 4.3 REQUISITOS DE PROJETO

De acordo com Pazmino (2015), os requisitos de projeto podem ser definidos como uma ferramenta de síntese das informações que serão utilizadas como base para o desenvolvimento da etapa de criatividade do projeto. Esta técnica tem como objetivo orientar o processo em relação as metas a serem atingidas e definir as características funcionais, estéticas, ergonômicas, ambientais e semânticas do projeto.

Para a elaboração dos requisitos de projeto, foram levantadas informações obtidas na pesquisa de público-alvo e análise sincrônica, bem como na análise de fatores ergonômicos e construtivos. Dessa forma, foram identificadas características relevantes que pudessem ser incorporadas ao projeto, transformando-as em requisitos (Figura 39). Esses requisitos foram classificados em obrigatório e desejável, sendo obrigatório quando ele deve ser cumprido e desejável quando o requisito deve ser atendido apenas se possível (PAZMINO, 2015).

Figura 39 – Requisitos de Projeto

CATEGORIA	REQUISITOS	OBJETIVO	CLASS.	FONTE
<b>material</b>	conforto e absorção de impacto	elastômero com propriedades semelhantes ao TPU	obrigatório	rev. literatura an. sincrônica
	possibilitar a fabricação em impressão 3D	desenvolvido para manufatura aditiva	obrigatório	rev. literatura an. sincrônica
	não limitar o produto a apenas uma cor pré-determinada	material com mais de uma cor disponível	desejável	rev. literatura an. sincrônica
<b>ergonomia</b>	adaptar as dimensões e densidade da entressola a partir de dados obtidos por escaneamento 3D e baropodometria	customizável	obrigatório	pesq. ergonomia pesq. público
	conforto	acomodar o arco do pé	desejável	pesq. ergonomia pesq. público
	conforto	oferecer numerações quebradas	obrigatório	pesq. ergonomia pesq. público
	conforto	considerar diferenças entre os pés direito e esquerdo	obrigatório	pesq. ergonomia pesq. público
<b>estética</b>	oferecer a resistência adequada com apenas a quantidade de material necessária, dando leveza e economizando material	estrutura celular (colmeia, treliça, etc)	obrigatório	rev. literatura an. sincrônica
	adaptar a densidade de acordo com dados de baropodometria	estrutura que permita a variação de suas propriedades mecânicas	obrigatório	pesq. ergonomia an. sincrônica
<b>fabricação</b>	gerar estruturas celulares e viabilizar a customização	manufatura aditiva	obrigatório	rev. literatura an. sincrônica

Fonte: A autora

Em relação à ergonomia, estabeleceu-se que o produto deve ser customizável de acordo com dados antropométricos e de pressão plantar extraídos dos consumidores por meio de escaneamento 3D e baropodometria. Além disso, julgou-se interessante o uso do formato da planta do pé de cada usuário como uma maneira de acomodar completamente seu arco na entressola, elevando o nível de conforto. Ainda, para oferecer um ajuste adequado, foi

determinado que o produto deve oferecer numerações quebradas e, também, cada entressola deve ser considerada como um objeto independente, já que o pé direito e esquerdo de uma pessoa variam entre si.

Para cumprir os requisitos de ergonomia, definiu-se que a estética deveria ser baseada em uma estrutura capaz de sofrer variações de densidade ao longo de sua geometria. As estruturas celulares cumprem essa função e fornecem a resistência necessária, utilizando o apenas a quantidade de material necessária, dando leveza à entressola. Ainda, o material escolhido deve ser um elastômero com propriedades semelhantes ao TPU para oferecer conforto e uma boa absorção de impacto.

Para possibilitar a fabricação de geometrias celulares e a customização, foi estabelecido que a entressola deve ser produzida pelo processo de manufatura aditiva. Dessa forma, a escolha de material para a fabricação fica restrita à técnica de impressão 3D escolhida e à disponibilidade de materiais oferecidos pelo fabricante, que podem variar em termos de propriedades mecânicas e cores.

## **5 DESENVOLVIMENTO**

Durante à fase de desenvolvimento, foram construídos painéis visuais de estilo de vida do público-alvo, de expressão do produto e de tema visual. Depois, foi dado início à geração de alternativas, seguida de uma etapa de seleção, até o desenvolvimento do produto na forma de algoritmos computacionais e a fabricação do protótipo.

### **5.1 PAINÉIS VISUAIS**

A construção de um painel semântico do público-alvo objetiva traçar um perfil do estilo de vida dos futuros usuários de um produto (BAXTER, 2000; PAZMINO, 2015). No painel da figura 40, foram reunidas imagens que representam um público urbano, ativo e conectado e que refletem seus comportamentos, valores pessoais e sociais, bem como outros tipos de produtos compatíveis com sua personalidade.

Figura 40 – Painel de estilo de vida



Fonte: A autora

Após a elaboração do painel do estilo de vida, foram definidos os conceitos que guiarão a etapa de desenvolvimento do produto: personalização e conforto. Essas palavras traduzem a intenção do projeto, que é oferecer soluções que se adequem às necessidades e desejos dos usuários por meio de produtos personalizados, resultando em um alto nível de conforto, o fator considerado como mais importante em um tênis segundo a pesquisa de público-alvo. Apesar de as imagens que compõem os painéis representarem a ideia dos conceitos, elas não se referem a características específicas do produto a ser desenvolvido.

Para o painel de expressão do produto que diz respeito ao conceito personalização (Figura 41), foram selecionadas imagens de produtos em que o consumidor, de alguma forma, atua como co-designer, modificando o objeto em níveis estéticos ou dimensionais. Já para o painel de expressão do conceito conforto (Figura 42), foram reunidas imagens relacionadas a sensações de maciez, leveza, suavidade, tranquilidade e bem-estar.



Figura 41 – Painel de expressão do produto



Fonte: A autora

Figura 42 – Painel de expressão do produto

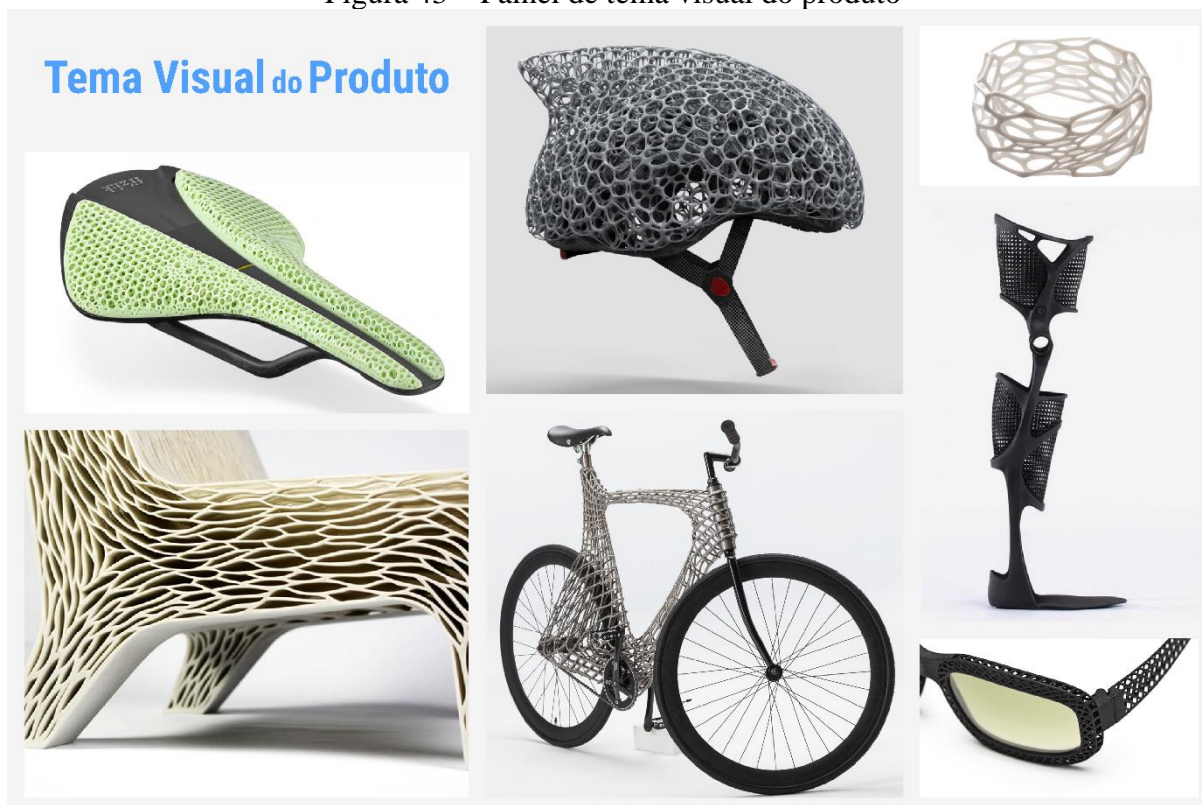


Fonte: A autora

A partir dos painéis de expressão do produto, foi desenvolvido o painel de tema visual (Figura 43). Segundo Pazmino (2015) e Baxter (2000), trata-se de uma técnica em que são reunidas imagens de objetos que estejam de acordo com a essência do produto a ser desenvolvido. O painel do tema visual serve como uma fonte de inspiração em que podem ser explorados elementos estéticos como, formas, cores, estilos e configurações.

No painel de tema visual, é possível identificar formas contínuas compostas por estruturas celulares, transmitindo sensações de leveza e resiliência. Percebe-se, ainda, que os produtos que compõem o painel possuem cores sóbrias ou com baixo nível de saturação. Pela complexidade das estruturas e aspecto polimérico dos materiais, pode-se presumir que a materialização dos produtos ocorreu por meio do processo de manufatura aditiva.

Figura 43 – Painel de tema visual do produto



Fonte: A autora

## 5.2 GERAÇÃO DE ALTERNATIVAS

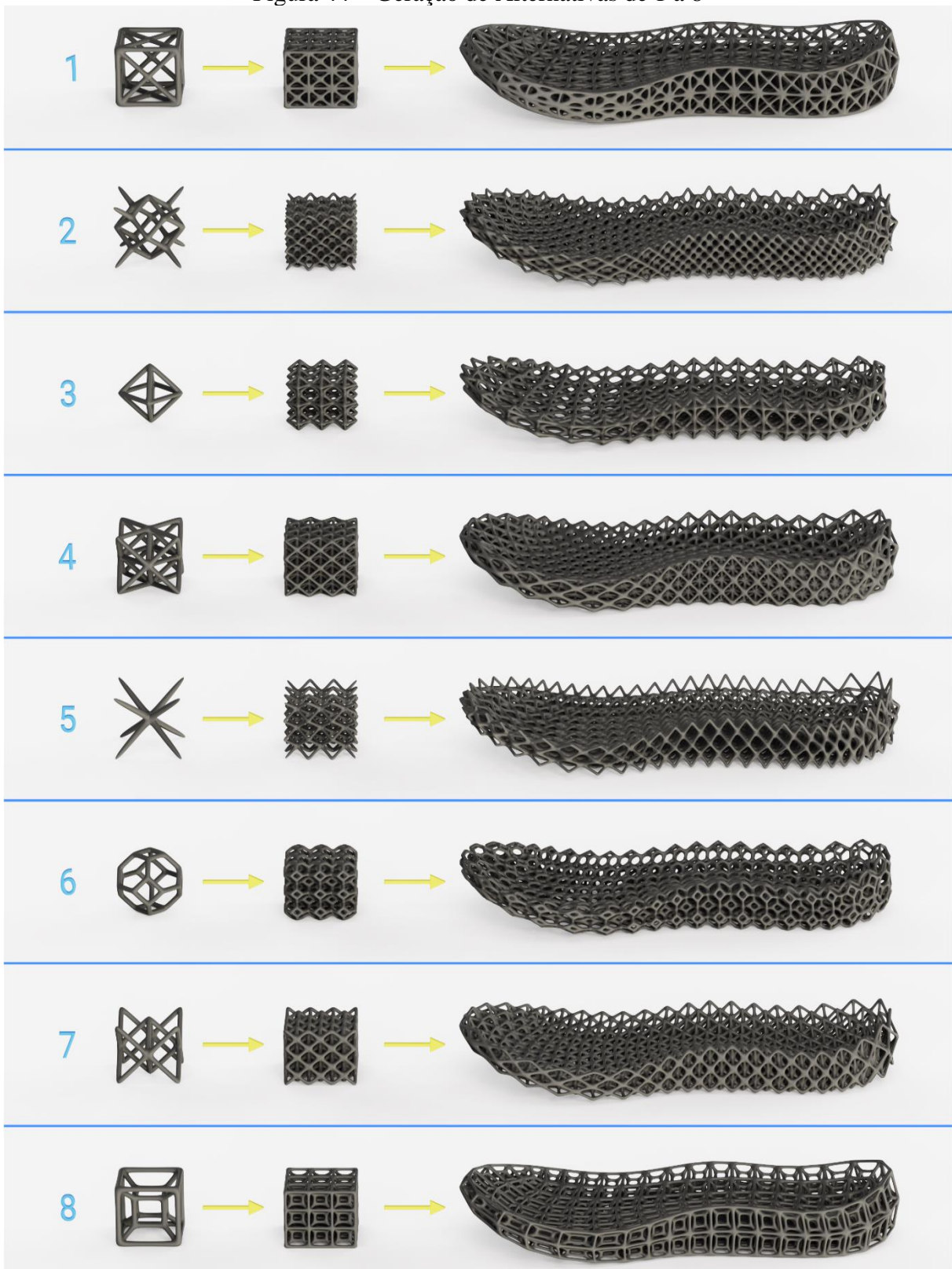
A geração de alternativas, que faz parte da etapa de proposição de artefatos pela metodologia *Design Science Research*, foi guiada pelos requisitos de projeto, conceitos e painéis visuais. Ainda, o processo de manufatura aditiva e a modelagem 3D a partir de algoritmos para o desenvolvimento de uma entressola customizável foram aspectos a ser considerados para a geração de alternativas.

Como estabelecido na fase de requisitos de projeto, definiu-se que a composição da entressola por uma estrutura treliçada é uma solução adequada tanto para o processo produtivo quanto para o conceito de customização em massa. De acordo com Helou, Vongbunyong e Kara (2016), as estruturas treliçadas podem ser definidas como estruturas tridimensionais formadas por células unitárias interligadas que se repetem consecutiva e periodicamente. Ainda, elas possuem boas propriedades mecânicas como alta rigidez e resistência e alta absorção de energia (TAO; LEU, 2016).

Desse modo, a geração de alternativas teve como ponto de partida o desenvolvimento de inúmeras células unitárias a partir de curvas com auxílio do *software* Rhinoceros 3D. Para a visualização e validação das células quando aplicadas tanto em uma estrutura simples, um cubo, quanto em uma estrutura mais orgânica, similar à do produto em desenvolvimento neste projeto, foi desenvolvido um algoritmo simplificado usando o *plug-in* Grasshopper 3D. Entre todas as opções geradas e testadas, inicialmente foram selecionadas 16 células unitárias que apresentaram maior potencial e consistência para compor uma estrutura de entressola coerente com a proposta do projeto em termos estruturais (Figura 44 e Figura 45).

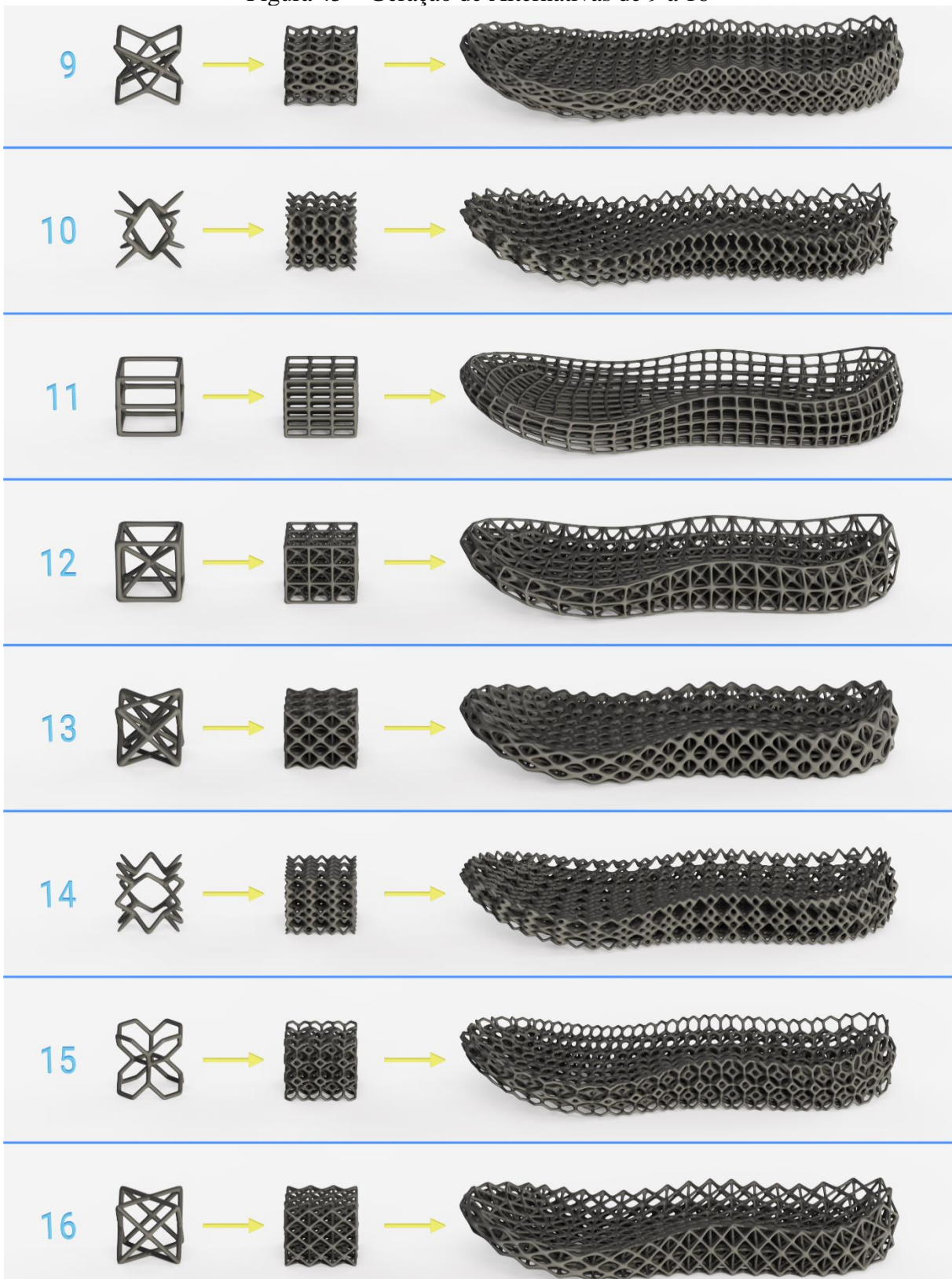
Para a geração de alternativas deste projeto, o uso ferramentas computacionais se mostrou mais adequado pela facilidade de manipulação de curvas, potencializando a quantidade de alternativas geradas, além de facilitar a compreensão das geometrias. Ainda, o desenvolvimento de um algoritmo foi fundamental para validar de forma rápida e consistente a geração de resultados satisfatórios de acordo com a célula unitária.

Figura 44 – Geração de Alternativas de 1 a 8



Fonte: A autora

Figura 45 – Geração de Alternativas de 9 a 16



Fonte: A autora

Após a proposição inicial de alternativas, torna-se necessária uma análise entre elas com o objetivo de selecionar as ideias mais coerentes com os requisitos de projeto. Em seguida, as ideias devem ser refinadas em direção à proposta final.

### 5.2.1 Critérios de seleção

Durante esta etapa, as alternativas devem passar por um funil, em que as mais adequadas em relação aos critérios estabelecidos pelos requisitos de projeto seguem para a próxima fase. Os critérios de seleção devem estar apoiados em aspectos quantitativos e qualitativos, podendo compreender aspectos ambientais, tecnológicos e de materiais (PAZMINO, 2015). Dessa forma, as 16 alternativas geradas na etapa anterior foram analisadas por meio de um *checklist* em que as ideias foram classificadas de acordo com o atendimento ou não dos critérios estabelecidos (Figura 46).

Figura 46 – Critérios de seleção

ASPECTOS	CRITÉRIOS	ATENDE	NÃO ATENDE
fabricação	manufatura aditiva	todas	nenhuma
	material similar ao TPU		
estética	estrutura de treliça	todas	nenhuma
	estrutura que pode variar a espessura		
ergonomia	customizável a partir de dados do usuário	todas	nenhuma

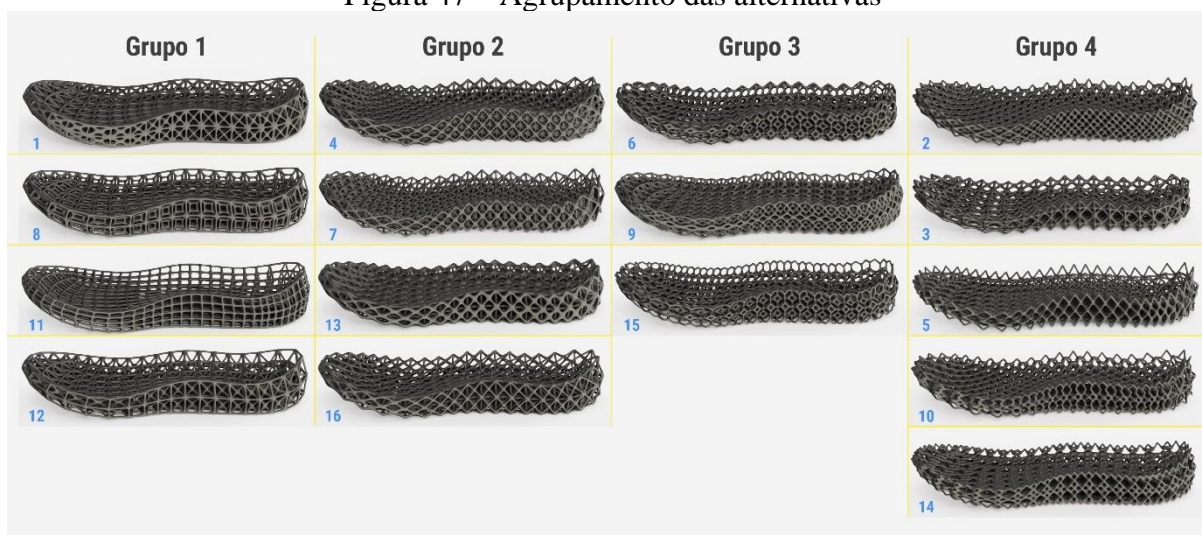
Fonte: A autora

A partir da avaliação das alternativas, concluiu-se que todas atendem igualmente aos critérios de seleção. Comparando as ideias, nota-se que apesar de as células unitárias apresentarem geometrias e propriedades mecânicas distintas, algumas delas geraram configurações visuais próximas.

Apesar de a análise estrutural das células ser um fator relevante na tomada de decisão, ela deve ser feita por uma equipe multidisciplinar, não sendo possível neste momento do projeto. Para a seleção das alternativas, então, a estética será o critério decisivo. Assim, serão levadas em consideração as propostas visualmente próximas às preferências dos usuários segundo o questionário, mas que, também, apresentam maior diferença estética entre si.

Dessa forma, para facilitar a decisão, as alternativas foram distribuídas em 4 grupos. Os 3 primeiros são formados por alternativas que possuem similaridade entre si e, o último grupo é composto por alternativas que não se encaixaram em um conjunto (Figura 47).

Figura 47 – Agrupamento das alternativas

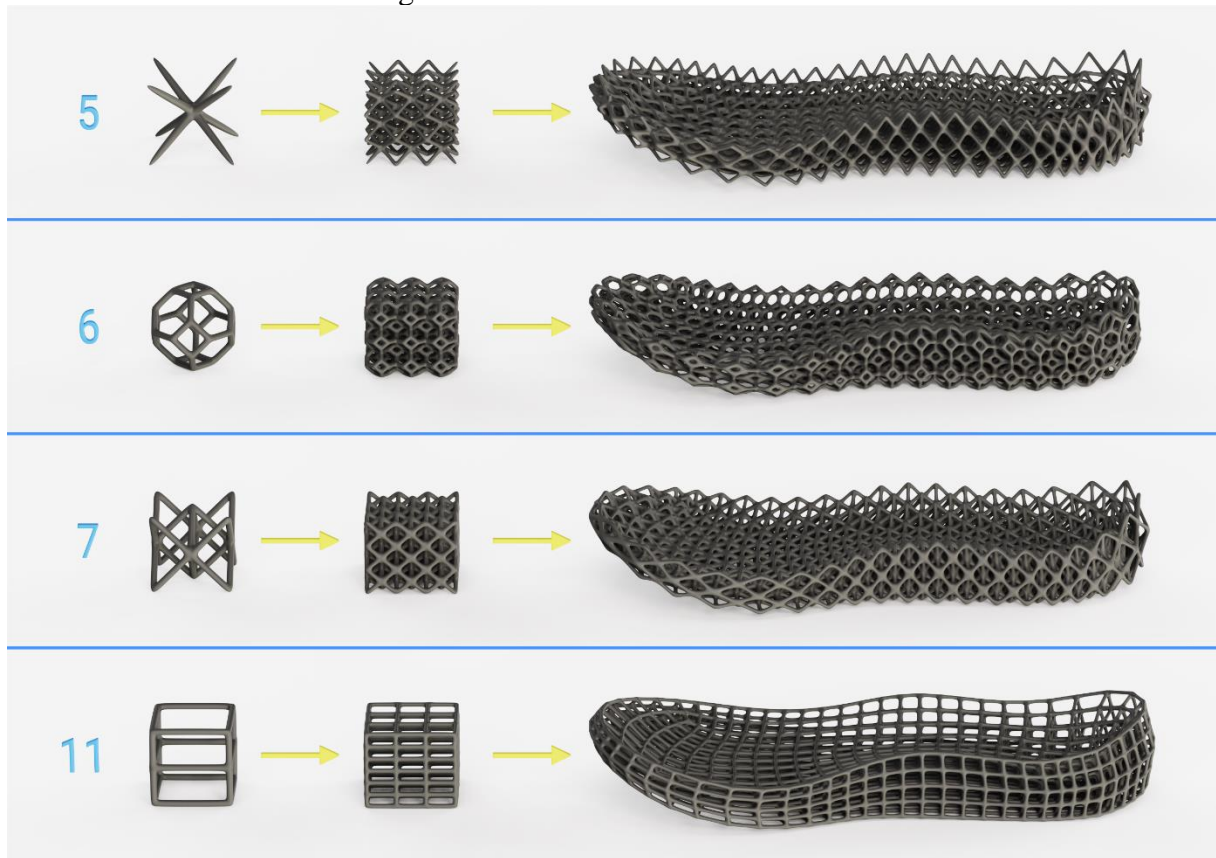


Fonte: A autora

Assim, as alternativas que seguem para as próximas etapas são: 5, 6, 7 e 11 (Figura 48). Contudo, por todas as propostas atenderem os critérios de seleção, elas serão mantidas no algoritmo para uma futura análise estrutural e uma seleção mais adequada das soluções.



Figura 48 – Alternativas selecionadas



Fonte: A autora

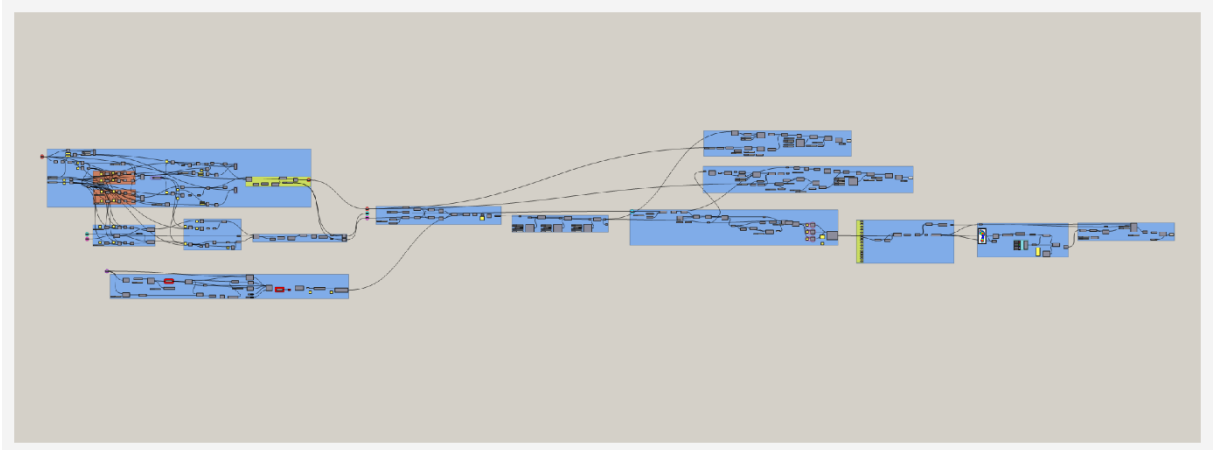
Após esta etapa do projeto, as alternativas serão refinadas com auxílio da modelagem paramétrica, levando em conta dados antropométricos e de pressão plantar do usuário.

### 5.3 MODELAGEM 3D

A fim de englobar o conceito de customização, neste projeto, não foi desenvolvido um produto final, mas sim, um processo que, por meio de algoritmos generativos, permite a personalização do produto em todos os níveis: estético, de ajuste e conforto e funcional. Para isso, a modelagem 3D utilizou o *software* Rhinoceros 3D e o *plug-in* Grasshopper 3D. Além disso, também foram usadas tecnologias de escaneamento 3D e baropodometria para a coleta dos dados usados neste processo.

O algoritmo completo pode ser visto na Figura 49 e, para melhor compreensão, o processo foi dividido em 11 etapas que serão descritas nos próximos itens.

Figura 49 – Modelagem algorítmica

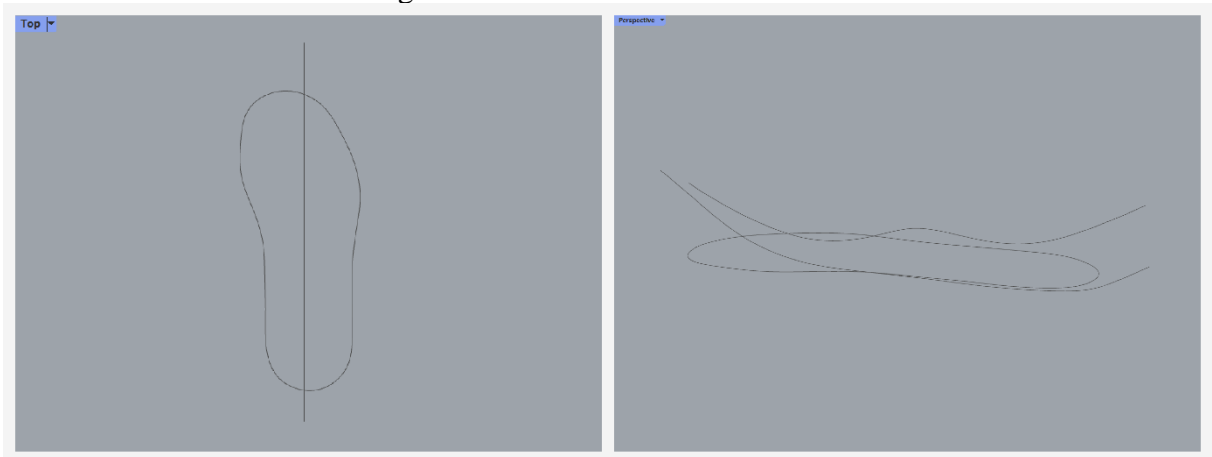


Fonte: A autora

### 5.3.1 Desenho das curvas base e gradação da numeração

O primeiro passo foi o desenho de 3 curvas base usando o Rhinoceros 3D, sendo elas o perímetro, o perfil superior e inferior da entressola (Figura 50). Em seguida, as curvas foram transferidas ao Grasshopper 3D e internalizadas.

Figura 50 – Desenho das curvas base



Fonte: A autora

### 5.3.2 Gradação da numeração

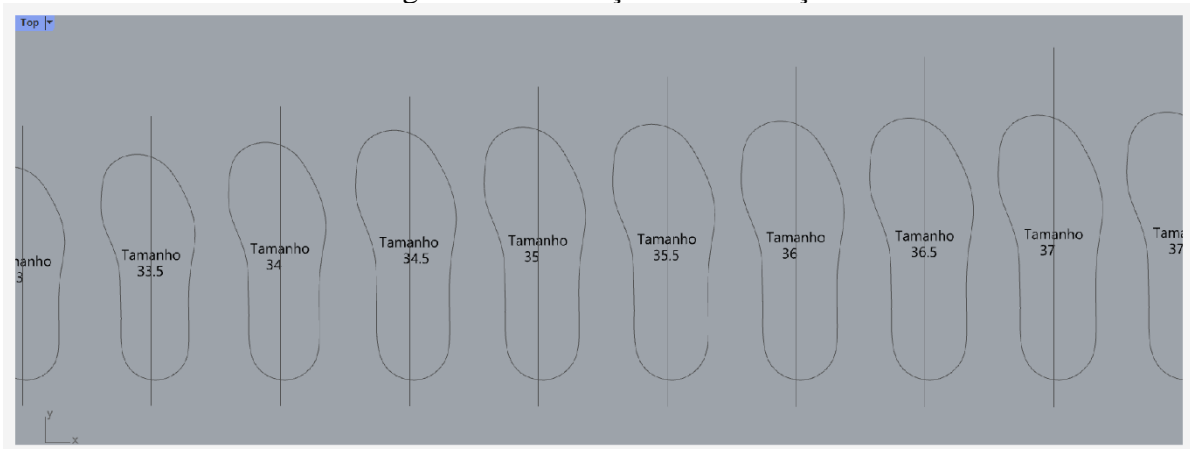
Com isso, a primeira parte do algoritmo consistiu na gradação da numeração de forma parametrizada a partir das curvas base (Figura 51). Para este projeto, definiu-se que as entressolas devem ter numerações definidas, mas que variem em um valor de 0,5 em unidade

de numeração para que os usuários encontrem com mais precisão uma numeração que corresponda ao tamanho de seus pés.

Como identificado na revisão de literatura, a classificação da numeração brasileira é indicada pela marcação do comprimento real do pé e não da fôrma do calçado. Assim, para que os pés do usuário se acomodem adequadamente na entressola, o comprimento da curva base do perímetro possui 10 milímetros a mais do que o valor estabelecido pelo sistema de numeração. Sabendo que cada unidade do ponto francês equivale a 6,66 mm, um pé 35, por exemplo, corresponde a 233,1 mm de comprimento. Assim, o comprimento da curva base do perímetro de uma entressola tamanho 35 será dimensionada com 233,1 mm + 10 mm, resultando em um valor de 243,1 mm de comprimento.

A seleção da numeração na definição é feita por meio de um *number slider* que integra as 3 curvas base e seu alcance vai desde a numeração 32 até a 48. Esse valor foi estabelecido como um parâmetro, mas pode ser alterado se necessário.

Figura 51 – Gradação da numeração



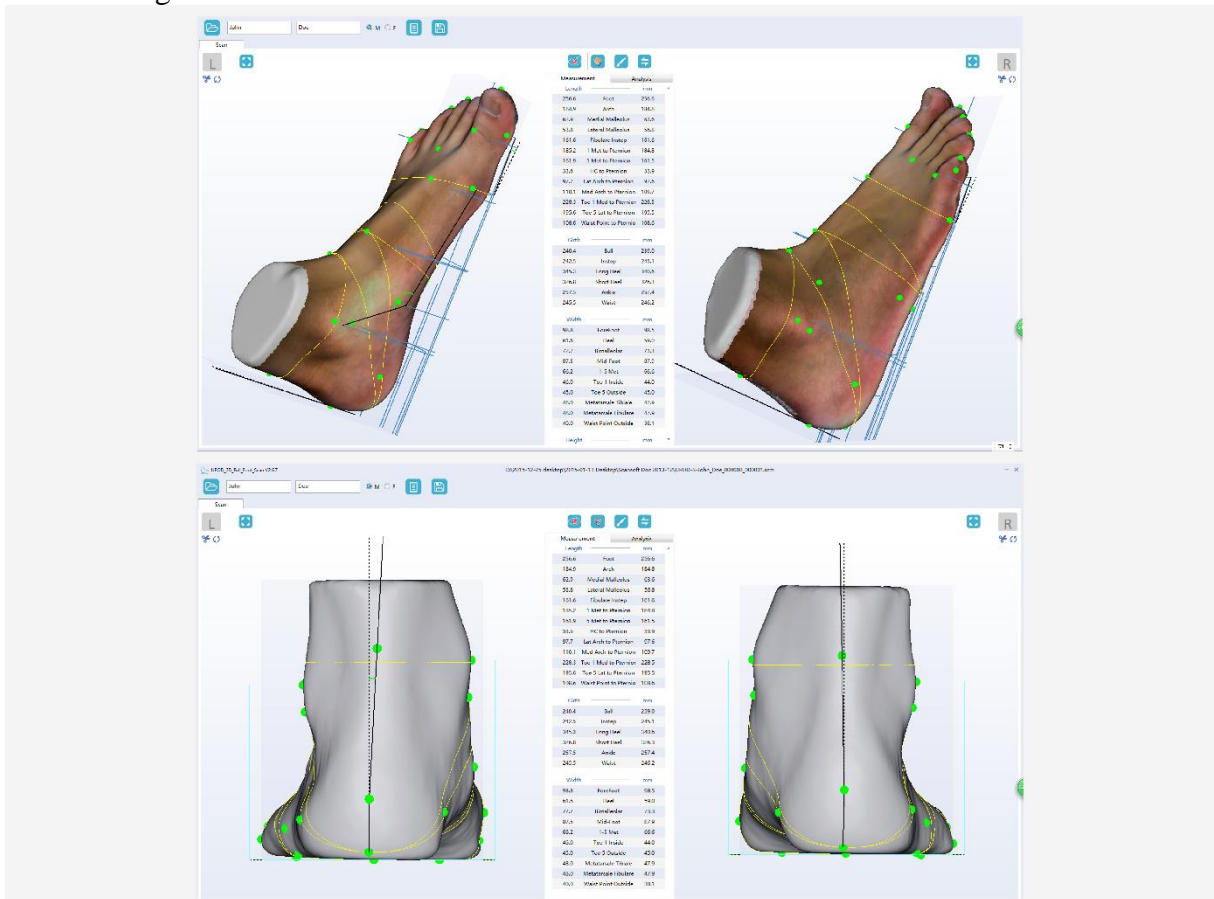
Fonte: A autora

### 5.3.3 Escaneamento 3D

Inicialmente, o escaneamento 3D foi realizado pela empresa de palmilhas ortopédicas Pés Sem Dor, na unidade de Florianópolis, SC, e os pés utilizados como objeto de estudos foram os da autora. Para a varredura, o usuário se posiciona em cima de uma plataforma em que cada um de seus pés é escaneado separadamente em um processo que dura aproximadamente 10 segundos. O equipamento utilizado pela empresa é o UPOD-S 3D Laser Full-Foot Scanner, da

marca ScanPod3D (Vismach Technology), que além de gerar um modelo tridimensional, fornece um diagnóstico completo dos pés, incluindo dados antropométricos (Figura 52). Apesar de este método ter se mostrado o ideal para este projeto, a empresa Pés Sem Dor não disponibilizou o arquivo 3D.

Figura 52 – Escaneamento 3D com o UPOD-S 3D Laser Full-Foot Scanner

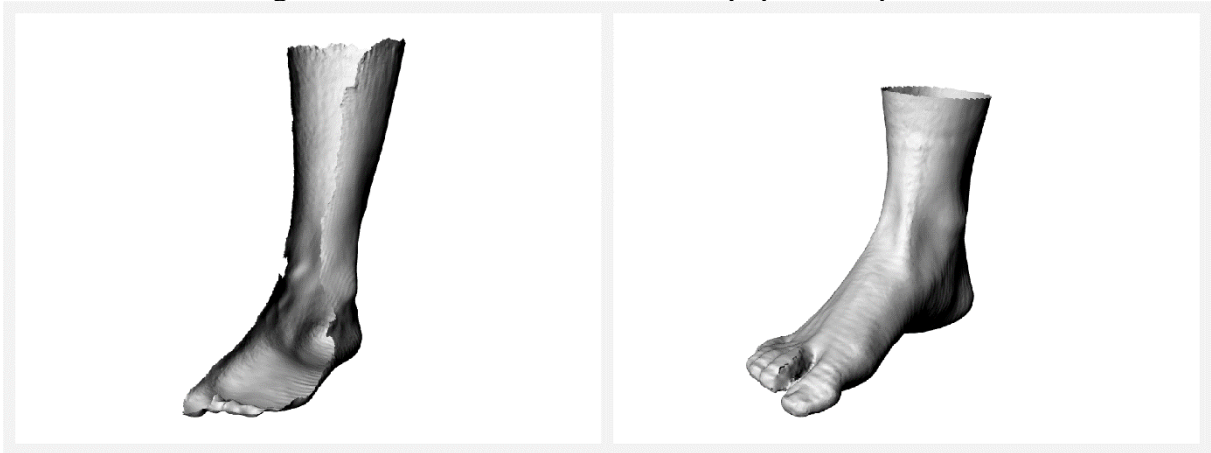


Fonte: ScanPod3D (2021)

Como alternativa, a clínica de fisioterapia Cure – Saúde e Desempenho, com sede em Joinville, SC, prontificou-se em realizar um escaneamento 3D. Em razão de a clínica ser em outra cidade que não a da autora, o processo foi realizado utilizando os pés de um dos colaboradores da clínica. Considerando que o equipamento usado se trata de um *scanner* portátil, o processo foi realizado com a pessoa em pé sobre uma plataforma de material transparente para que a parte inferior pudesse ser escaneada. Porém, com esse método, não foi possível escanear corretamente os dedos ou a parte superior dos pés. Assim, como solução, a

varredura foi realizada com o pé em balanço, ou seja, sem estar em contato com uma superfície. A figura 53 mostra, à esquerda, os resultados do escaneamento do pé em contato com uma superfície e, à direita, o escaneamento do pé em balanço.

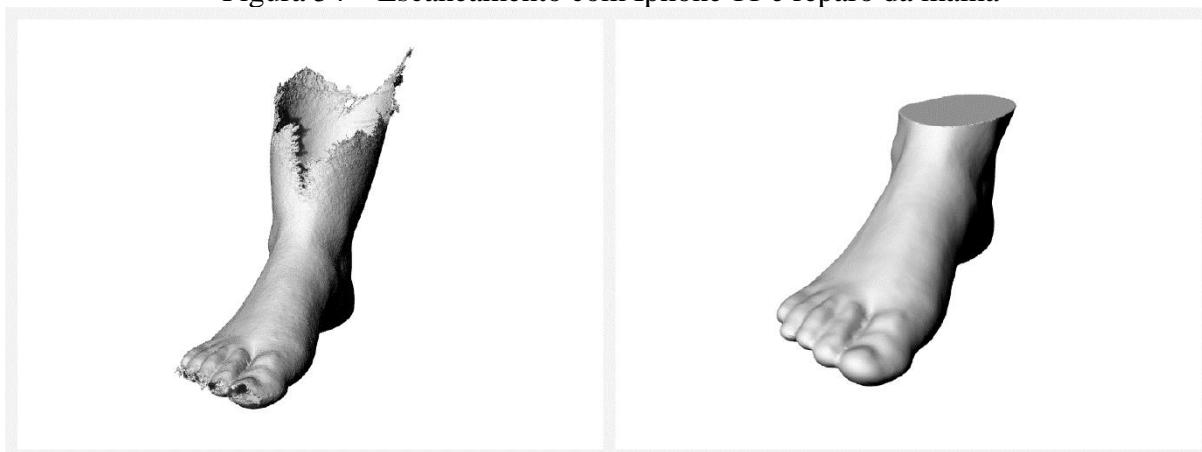
Figura 53 – Escaneamento 3D com equipamento portátil



Fonte: Clínica Cure e Desempenho (2022)

Por último, também foi experimentado um método de escaneamento utilizando o *smartphone* iPhone 11, da Apple, que integra o sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Essa tecnologia utiliza uma fonte de luz pulsada para obter informações de um objeto alvo com base no tempo de retorno dos pulsos de luz refletidos, podendo, então, determinar sua forma e orientação (KIM *et al.*, 2021). Todo o processo foi realizado com auxílio do aplicativo ScandyPro e realizado com o pé em balanço. Após escaneado, a malha 3D teve que passar por um processo de reparo em regiões com falhas auxílio do *software* Autodesk MeshMixer (Figura 54). Em seguida, o modelo digitalizado foi importado ao *software* Rhinoceros 3D e, em seguida, internalizado no Grasshopper 3D.

Figura 54 – Escaneamento com Iphone 11 e reparo da malha



Fonte: A autora

Idealmente, para este projeto, o escaneamento deveria ser realizado com usuário em pé e com seus dois pés posicionados sobre uma superfície. Nessa posição, o peso corporal da pessoa é levado em conta, causando uma expansão na estrutura dos pés e alteração em suas medidas antropométricas. Ainda, por meio desse método, os dedos dos pés permanecem com a mesma altura no eixo Y. Ou seja, a varredura realizada na posição em pé, simula o real estado dos pés durante o uso do calçado, influenciando no design e na própria acomodação dos pés na entressola. Além disso, com o *scanner* adequado, etapas adicionais de ajuste na malha não seriam necessárias e todo o processo levaria apenas alguns segundos.

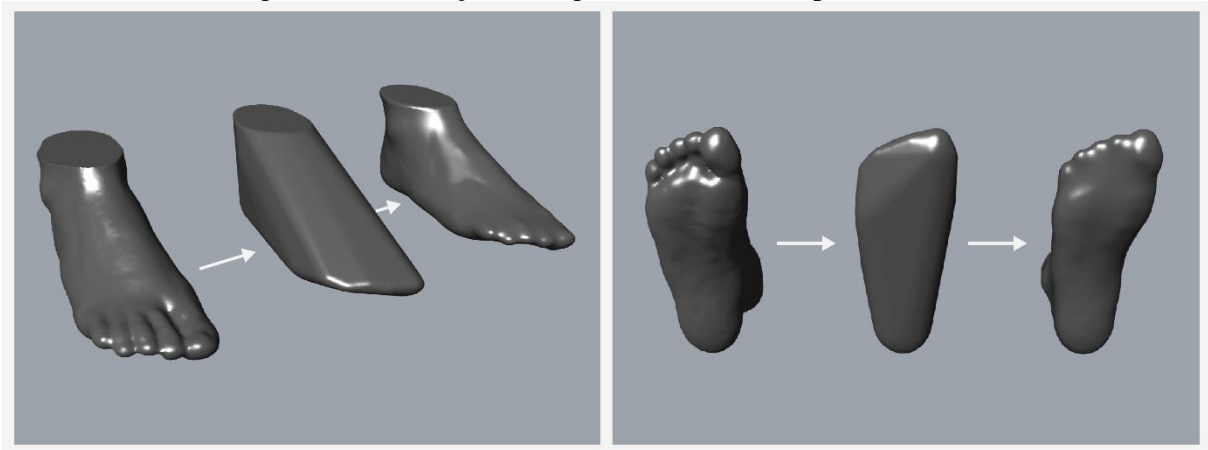
Depois de analisados os processos de digitalização 3D, concluiu-se que o *scanner* portátil produziu resultados mais adequados em relação à qualidade da superfície quando comparado ao escaneamento com o *smartphone*. Porém, sabendo que o pé utilizado como objeto de estudo pelo escaneamento 3D deve corresponder ao pé do exame de baropodometria, que será mostrado nas próximas etapas, optou-se por utilizar o escaneamento 3D realizado com o iPhone 11.

#### 5.3.4 Redução de regiões convexas do pé escaneado

Independente da precisão do equipamento escolhido para o escaneamento 3D, julgou-se necessária a suavização do modelo 3D do pé e a redução de regiões convexas existentes, principalmente nas áreas compreendidas entre os dedos. Desse modo, foi gerado uma *convex hull*, ou envoltória convexa, que nada mais é do que o menor polígono convexo que contém a

geometria. Assim, com auxílio do *plug-in* Kangaroo Physics, foi criada uma simulação que “embrulha” o pé escaneado a partir da envoltória convexa. Desse modo, foi possível manter o formato do pé e, ao mesmo tempo, reduzir as regiões convexas, processo fundamental para a etapa seguinte, como pode ser visto na figura 55.

Figura 55 – Redução de regiões convexas do pé escaneado

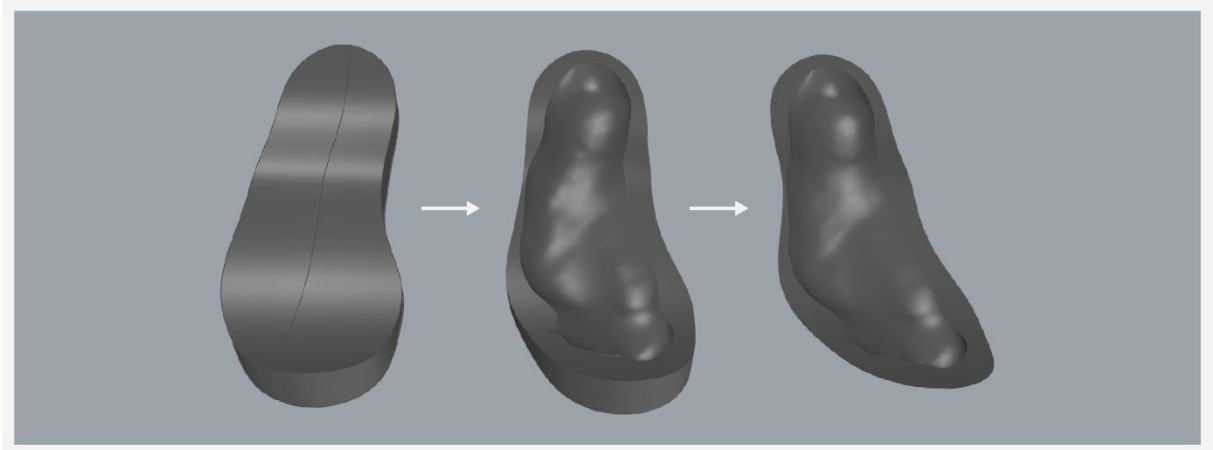


Fonte: A autora

### 5.3.5 Molde do pé

Para desenvolver uma entressola que entre totalmente em contato com a base do pé, fornecendo um suporte de arco adequado, foi gerado um molde da planta do pé para que sua superfície pudesse ser usada como ponto de partida para a construção da geometria da entressola (Figura 56). Para a construção do molde, foram usados componentes nativos de extrusão e separação a partir das curvas base. Em seguida, foi realizada uma operação de subtração de geometrias entre o pé escaneado e o sólido gerado pelas curvas. Por fim, foram usados os componentes *explode unweld* para separar a *mesh* (malha) e o *list item* para a seleção da parte superior do molde.

Figura 56 – Extração da geometria da base do pé

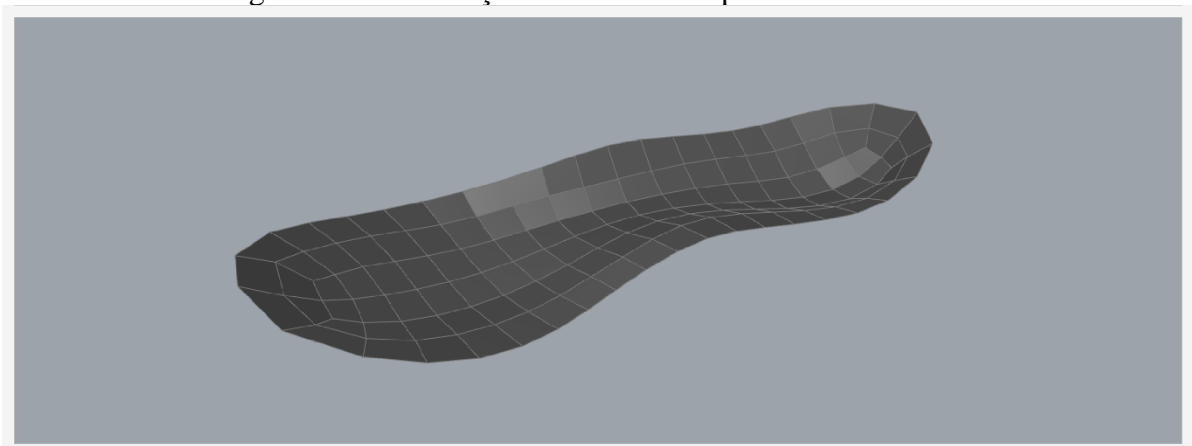


Fonte: A autora

### 5.3.6 Suavização e divisão da superfície da entressola

O *output* gerado na etapa anterior é uma *mesh* do tipo triangular (*triangle mesh*), ou seja, uma geometria difícil de editar ou manipular. Então, foi necessária sua transformação em uma *quad mesh*, ou malha quadrilateral. Desse modo, foi possível definir um número coerente de divisões da *mesh* e, ainda, suavizá-la (Figura 57). Apesar de a quantidade de divisões escolhidas nesta fase influenciar na densidade da estrutura como um todo, ela pode ser alterada em qualquer momento por meio de um *number slider*.

Figura 57 – Suavização e divisão da superfície da entressola



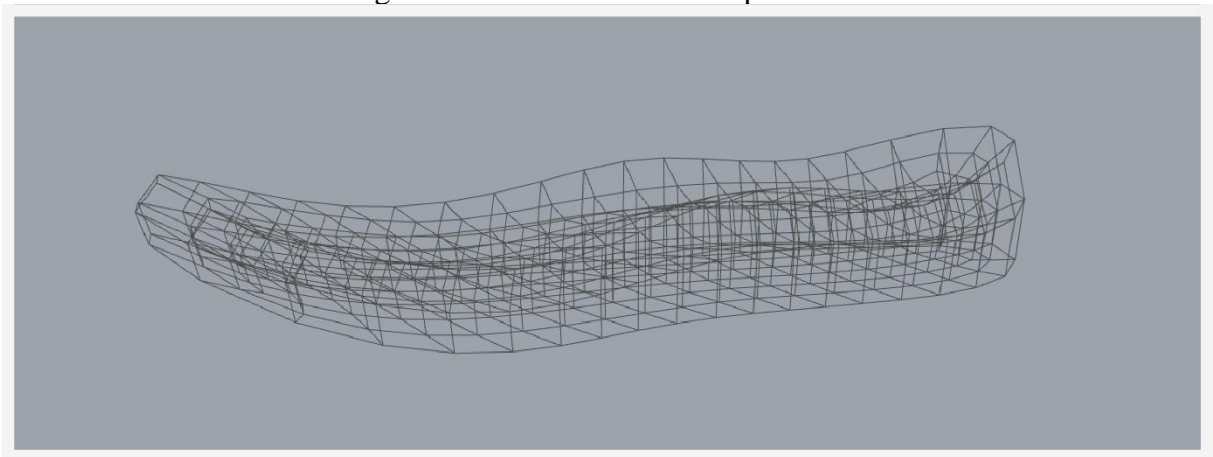
Fonte: A autora



### 5.3.7 Criação de estrutura formada por *boxes*

Usando o componente *twisted box through SubDs* do *plug-in Pufferfish*, nesta etapa foi criada uma estrutura responsiva formada por *boxes* (caixas) conectadas entre as geometrias superior e inferior da entressola (Figura 58). Enquanto a quantidade de *boxes* dos eixos X e Y podem ser alteradas na etapa anterior, nesta fase do processo é possível controlar o número de divisões no eixo Z. Cada *box* dessa estrutura irá conter uma unidade celular, levando à formação de uma estrutura de treliça.

Figura 58 – Estrutura formada por *boxes*

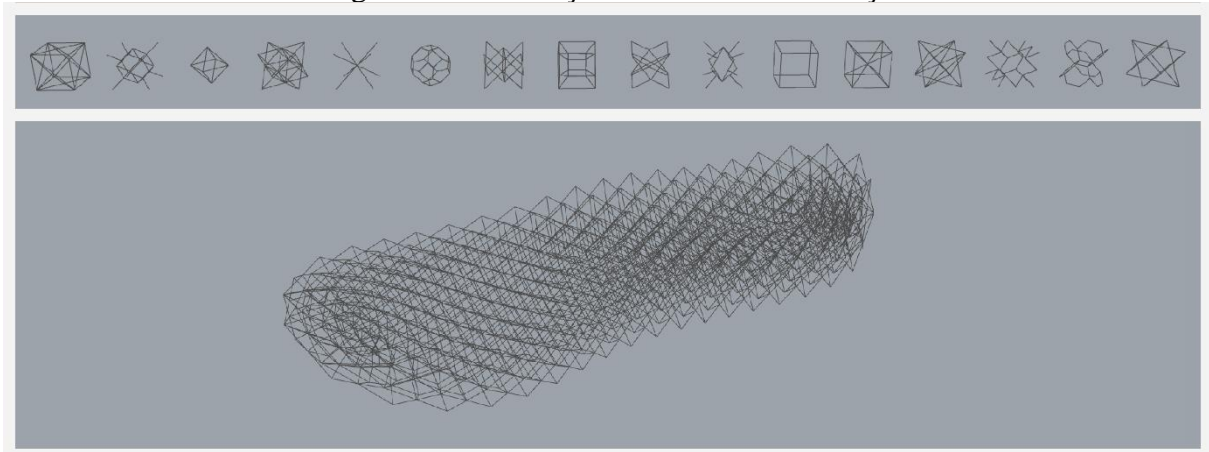


Fonte: A autora

### 5.3.8 Formação da estrutura de treliça

As células unitárias usadas para compor a estrutura treliçada foram desenhadas no Rhinoceros 3D usando apenas curvas e, então, levadas ao Grasshopper 3D. Na sequência, foi usado o componente *bounding box* para criar a menor *box* possível capaz de conter a célula unitária selecionada. Então, por meio de outro componente do *Pufferfish*, o *morph to twisted box*, cada *box* gerado na etapa anterior na estrutura da entressola passou a englobar uma unidade de célula, formando, assim, a estrutura de treliça (Figura 59). Para este projeto, inicialmente foram desenhadas 16 células unitárias, sendo que 4 delas foram selecionadas como mais adequadas neste momento do projeto.

Figura 59 – Formação da estrutura de treliça

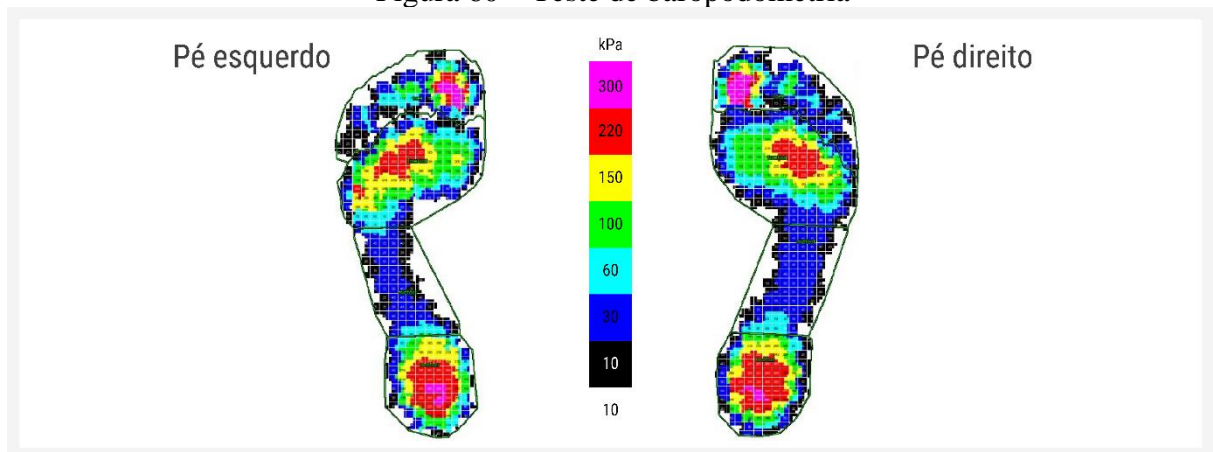


Fonte: A autora

### 5.3.9 Exame de baropodometria

O teste de baropodometria foi realizado pela empresa Pés Sem Dor com auxílio do equipamento Emed, fabricado pela Novel. Para o processo, o usuário deve caminhar sobre uma plataforma a fim de quantificar e medir as áreas de pressão na planta dos pés. Tais dados são representados por meio de um mapa de cores, em que cada uma delas representa um valor em quilopascal (kPa). O mapa de pressão foi gerado a partir dos pés da autora e ele pode ser visto na figura 60.

Figura 60 – Teste de baropodometria

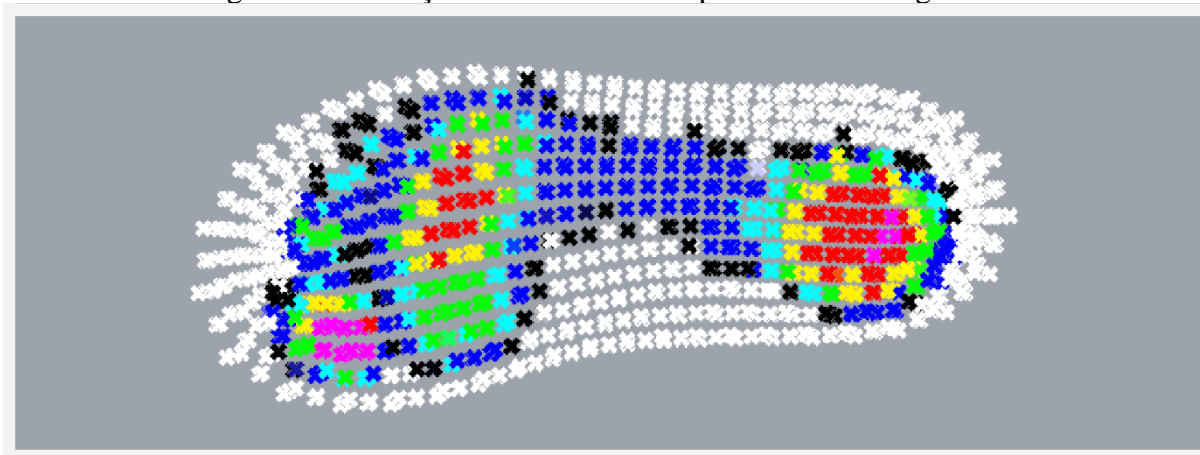


Fonte: Pés Sem Dor (2022)

A imagem do mapa de pressão obtida pelo exame de baropodometria é inserida na definição por meio do *image sampler*, um componente que lê os valores RGB da imagem para

que essas informações possam ser usadas no *script*. As cores do mapa de pressão são representadas por valores distintos e ordenados, que funcionam como *attractor points*, em que cada cor influenciará na espessura da treliça da entressola (Figura 61).

Figura 61 – Inserção do exame de baropodometria no algoritmo



Fonte: A autora

### 5.3.10 Espessura da entressola

Esta etapa diz respeito à criação de uma espessura variável para a entressola. Inicialmente, foi testado o protótipo do *plug-in* *Fattener*, que transforma as arestas das células unitárias em *quad meshes*. Apesar de essa ferramenta ser leve, fácil de usar e gerar geometrias fluidas, foram identificados erros de construção no modelo 3D quando mais de 4 curvas dividem o mesmo vértice. O *plug-in* de modelagem volumétrica *Dendro* também foi considerado. Com ele, foi possível gerar geometrias fluidas e sem erros, porém, exigiu um alto processamento do computador para a produção de uma estrutura com espessura variável, inviabilizando seu uso neste momento.

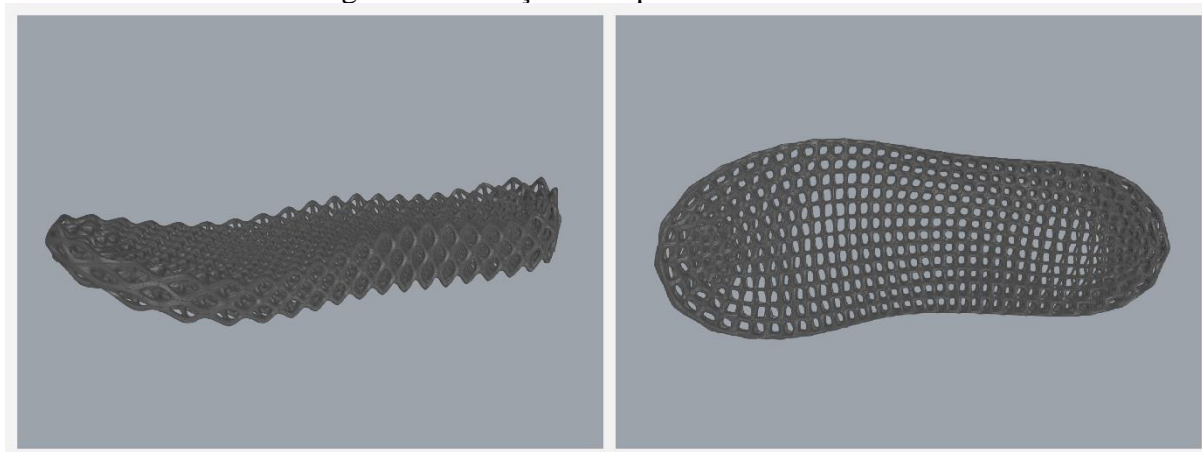
Por último, foi utilizado o *MultiPipe*, um componente nativo do Grasshopper 3D em que foi possível dar uma espessura às curvas sem apresentar erros ou exigir um alto tempo de processamento do computador. Tanto o *Fattener* quando o *Dendro* são *plug-ins* que podem ser usados futuramente, mas que dependem de atualizações do desenvolvedor ou do desempenho do próprio computador.

Como mencionado na etapa anterior, a espessura da treliça varia de acordo com as cores do mapa de pressão, sendo que cada cor equivale a um valor em kPa. Para representação,

neste algoritmo, as unidades de pressão e de volume foram estabelecidas como sendo grandezas inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior o valor em kPa, menor a espessura das curvas da estrutura a fim proporcionar mais amortecimento nas áreas com maior pressão. Porém, os valores adequados da espessura irão variar de acordo com o tipo de célula unitária escolhida, material, processo de fabricação e inclusive a finalidade de uso da entressola.

Além disso, deve-se enfatizar a importância de uma futura análise estrutural realizada por engenheiros, juntamente com médicos ortopedistas, fisioterapeutas ou outros profissionais qualificados para determinar o amortecimento adequado em cada região da entressola. O processo de criação da espessura pode ser visto na figura 62.

Figura 62 – Adição de espessura na entressola

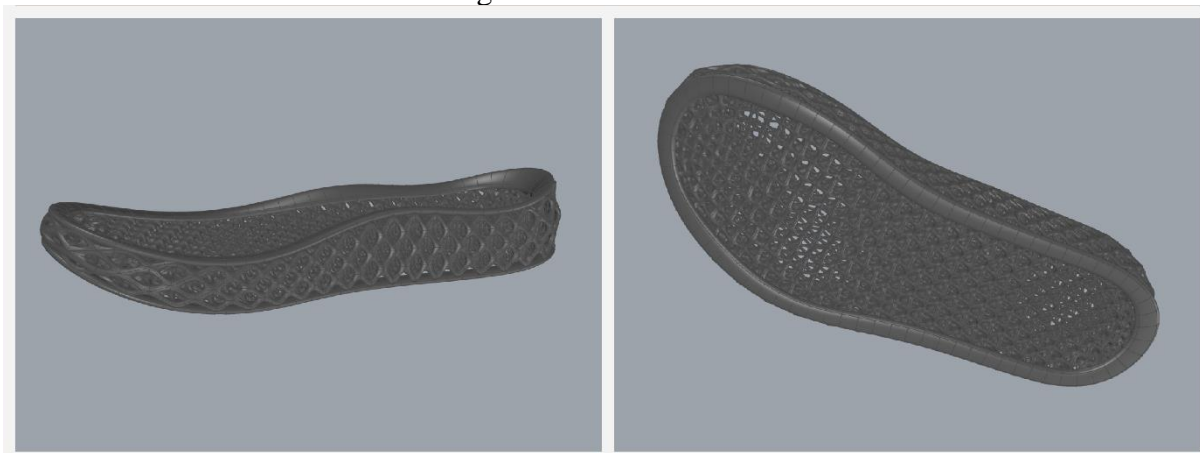


Fonte: A autora

### 5.3.11 Acabamento

Por fim, foram adicionadas duas faixas de material na parte superior e inferior do produto para dar acabamento e criar uma superfície de contato que possibilite a montagem da entressola com o cabedal e a sola (Figura 63).

Figura 63 – Acabamento



Fonte: A autora

A partir do algoritmo, foi possível desenvolver um modelo digital interativo que reage a alterações sofridas em seus parâmetros de maneira coordenada. Assim, o projeto pode ser modificado de acordo com as necessidades do consumidor sem que a estrutura principal seja perdida.

#### 5.4 RENDERINGS

A partir da modelagem 3D, foi possível gerar imagens do produto utilizando o *software* de renderização Keyshot. Foi desenvolvida uma imagem do conjunto das alternativas (Figura 64), bem como um render para cada uma delas, como pode ser visto nas figuras 65, 66, 67 e 68). Também foi criada uma imagem que representasse a tecnologia, leveza e conforto buscada no desenvolvimento deste projeto (Figura 69).

Figura 64 – Renderização do conjunto



Fonte: A autora

Figura 65 – Renderização da alternativa 5



Fonte: A autora

Figura 66 – Renderização da alternativa 11



Fonte: A autora

Figura 67 – Renderização da alternativa 8



Fonte: A autora

Figura 68 – Renderização da alternativa 7



Fonte: A autora

Figura 69 – Render conceitual



Fonte: A autora



## 5.5 MEMORIAL DESCRITIVO

Ao final do projeto, Pazmino (2015) recomenda a elaboração de um memorial descritivo, um documento descritivo e explicativo acerca do produto desenvolvido. Neste memorial, o projeto será detalhado de acordo com: conceito, fator social-tecnológico, fator estético-simbólico, fator de uso, fator técnico-construtivo, fator estrutural e funcional, protótipo e fator de custo.

### 5.5.1 Conceito

Inspirado na era produção artesanal, mas aliado aos sistemas e tecnologias avançados, este projeto trata do desenvolvimento de uma proposta de entressola customizável por meio de algoritmos generativos, visando satisfazer as necessidades e desejos do consumidor. Este projeto explora as tecnologias de modelagem e materialização disponíveis a fim de oferecer um produto personalizado, elevando seus níveis de conforto e desempenho e contribuindo com o bem-estar e qualidade de vida das pessoas.

### 5.5.2 Fator Social-Tecnológico

Mesmo com as melhores adequações antropométricas possíveis, os calçados produzidos em escala ainda apresentam problemas em relação à ergonomia devido à complexidade e grande variação dimensional da estrutura dos pés entre as pessoas. E, além de dor e desconforto, o uso de tênis mal ajustados ou inadequados pode causar lesões e deformidades nos pés (DEMELLO, 2009, GOMES FILHO, 2010; GOONETILLEKE, 2013).

Com a disponibilidade de novas tecnologias, a indústria atualmente está indo em direção à tendência da customização em massa, oferecendo soluções que se adequem de forma eficiente às necessidades e desejos dos usuários por meio de produtos personalizados.

Dessa forma, este projeto combina design computacional, manufatura aditiva, tecnologias de digitalização 3D e baropodometria para o desenvolvimento de uma entressola customizável nos níveis estético, de ajuste e conforto e de funcionalidade que corresponda aos desejos e necessidades dos usuários.

### **5.5.3 Fator Estético-Simbólico**

Estruturas treliçadas são estruturas formadas por células unitárias interligadas que se repetem consecutiva e periodicamente (HELOU; VONGBUNYONG; KARA, 2016). Independentemente do tipo de padrão escolhido para compor o produto final, a estética da entressola, em razão de sua estrutura vazada, traz a sensação de leveza e conforto buscada em um tênis.

Levando em consideração o que a pesquisa com o público revelou e aproveitando ao máximo as possibilidades da manufatura aditiva, a estética deste projeto foi guiada pela inovação e tecnologia em que foi possível desenvolver um produto composto por geometrias que dificilmente poderiam ser fabricadas a partir de métodos de produção tradicionais.

### **5.5.4 Fator de Uso**

Além da customização de estilo e de ajuste e conforto, neste projeto foi gerado um processo em que é possível o desenvolvimento de entressolas que correspondam ao uso que os consumidores darão a elas, como caminhar, correr ou treinar. Sabe-se que as células unitárias possuem propriedades mecânicas distintas entre si e, dessa forma, elas podem ser indicadas para funcionalidades específicas.

Para estabelecer a relação entre tipo de célula unitária e funcionalidade, recomenda-se uma análise futura por uma equipe multidisciplinar composta por engenheiros, fisioterapeutas ou médicos ortopedistas e designers.

A respeito das questões ergonômicas, as entressolas começam a partir da numeração 32 e vão até a 48, variando em 0,5 pontos, garantindo que os usuários que usem numerações quebradas encontrem um produto adequado aos seus pés. A partir do escaneamento 3D do pé do usuário, é possível obter suas medidas antropométricas, definindo, assim, a numeração correta do consumidor.

Além disso, a fim de aumentar o conforto e personalização, a entressola é gerada a partir do modelo do pé digitalizado, acomodando completamente o arco do pé do usuário no produto. Sabendo que cada pé é único, o par de entressolas projetados para um usuário é tratado como dois produtos independentes, ou seja, para um mesmo usuário, os parâmetros usados para a entressola do pé direito serão distintos dos do pé esquerdo.

Por fim, neste projeto também foi usado o recurso da baropodometria para a obtenção de informações sobre a pressão do pé do usuário, em que foi possível criar zonas de desempenho específicas na entressola. A imagem da simulação de uso pode ser vista abaixo, na figura 70.

Figura 70 – Simulação de uso



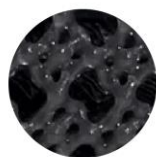
Fonte: A autora

### 5.5.5 Fator Técnico-Construtivo

Para o processo construtivo, considerou-se a produção da entressola por meio da manufatura aditiva. Dentro das tecnologias de impressão 3D disponíveis, a DLS (*Digital Light Synthesis*) se mostrou a mais adequada para o projeto em razão da produção de peças com propriedades mecânicas isotrópicas e, principalmente, pela sua capacidade de fabricar objetos de 20 a 100 vezes mais rápido que outros processos baseados em fotopolimerização, abrindo caminho para customização em massa e estoque sob demanda.

Entre os materiais disponibilizados pela Carbon, a desenvolvedora da tecnologia *Digital Light Synthesis*, o EPU 44 (poliuretano elastomérico) se mostrou o mais adequado por ser um elastômero altamente resiliente, resistente a rasgos e mais sustentável devido à sua formulação ser 40% de base biológica (CARBON, 2022). Para esse material, as cores disponíveis pelo fabricante são o EPU 44 Gray e o EPU 44 White (Figura 71).

Figura 71 – Cores disponíveis para o EPU 44



EPU 44 Gray



EPU 44 White

Fonte: Adaptado de Carbon (2022)

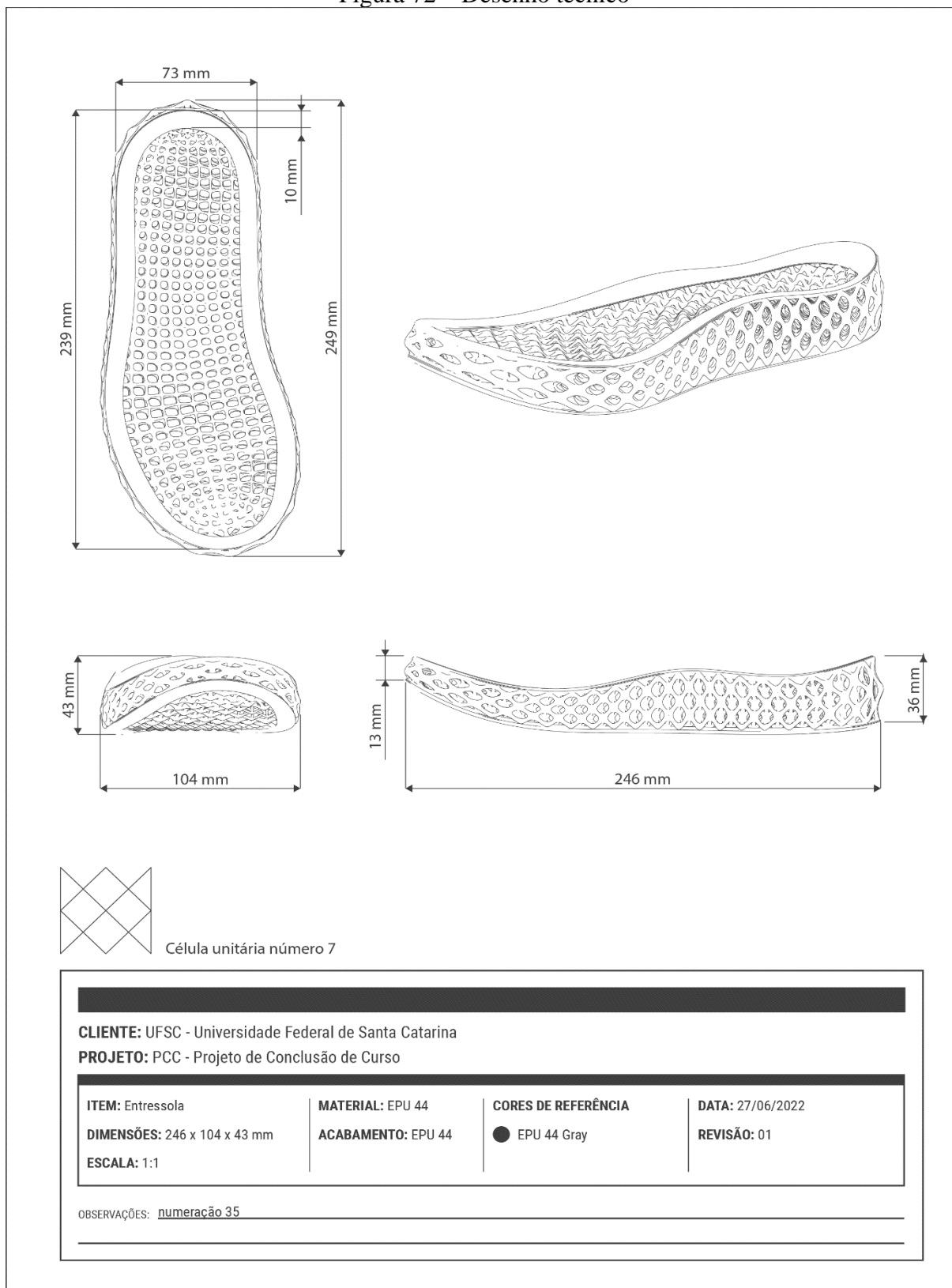
### 5.5.6 Fator Estrutural e Funcional

O produto final se trata de uma peça formada de um mesmo material e sem encaixes ou junções. Porém, deve-se lembrar que este produto é um dos elementos que compõe a estrutura de um tênis e, por isso, foram adicionadas faixas na parte superior e inferior pensando criar uma área de contato para facilitar junção da entressola com o cabedal e o solado do tênis que poderá vir a ser projetado a partir dela.

O dimensionamento do produto é definido a partir do sistema de numeração usado no Brasil, o ponto francês, em que cada unidade equivale a 6,66 mm. Porém, para melhor acomodação dos pés na entressola, o comprimento da curva base do perímetro possui 10 milímetros a mais do que o valor estabelecido pelo sistema de numeração.

Na figura 72, pode ser visto o desenho técnico da entressola desenvolvida a partir do pé escaneado utilizado neste projeto, composta pela célula unitária número 7.

Figura 72 – Desenho técnico

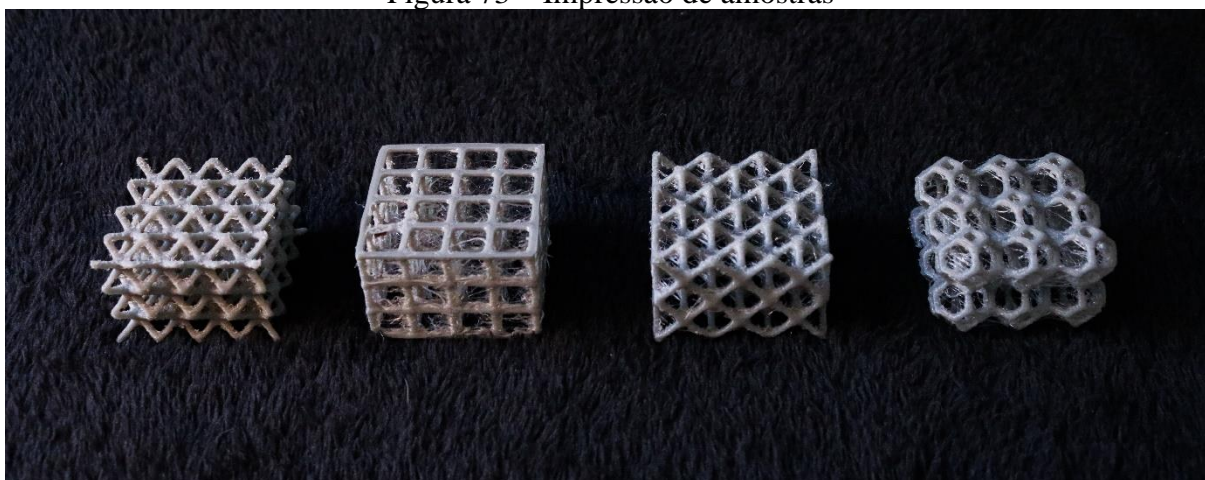


Fonte: A autora

### 5.5.7 Protótipo

A fim de observar e analisar o comportamento do artefato quando aplicado, em um primeiro momento, foram impressas amostras das estruturas de treliça selecionadas após a fase de geração de alternativas. As estruturas foram fabricadas em uma impressora 3D do tipo FDM usando o material TPU (poliuretano termoplástico). Cada amostra impressa possui uma dimensão de 40x40x30mm com uma espessura de 1.2 mm (Figura 73).

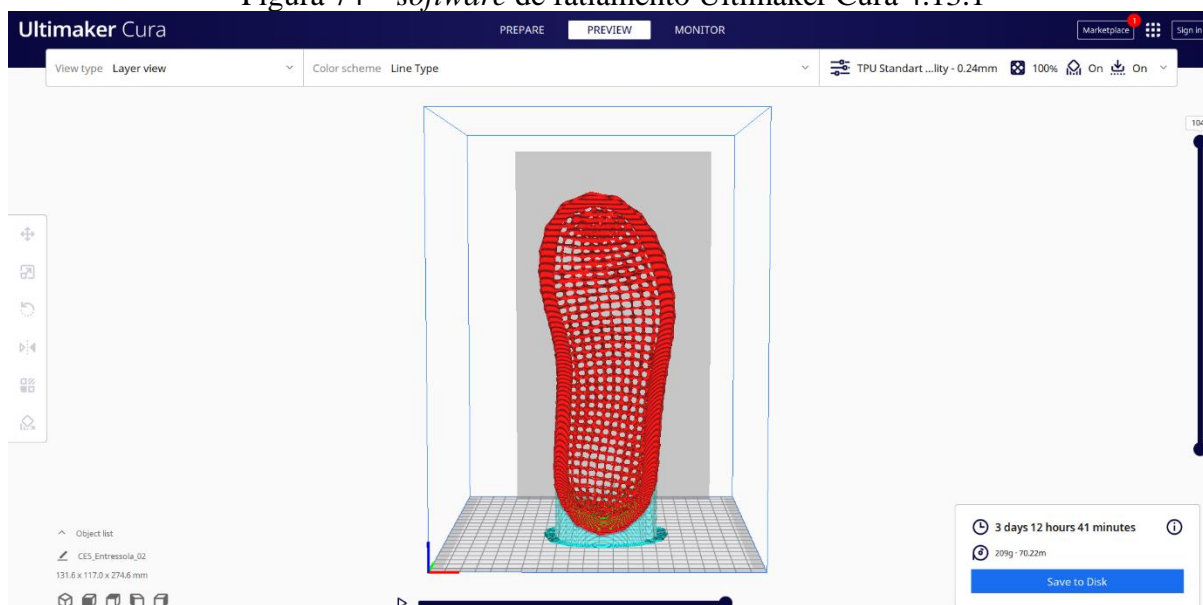
Figura 73 – Impressão de amostras



Fonte: A autora

Por apresentar uma estética compatível com as preferências do usuário e um bom amortecimento quando testada de maneira empírica, foi desenvolvido um protótipo da entressola a partir da célula unitária número 7.

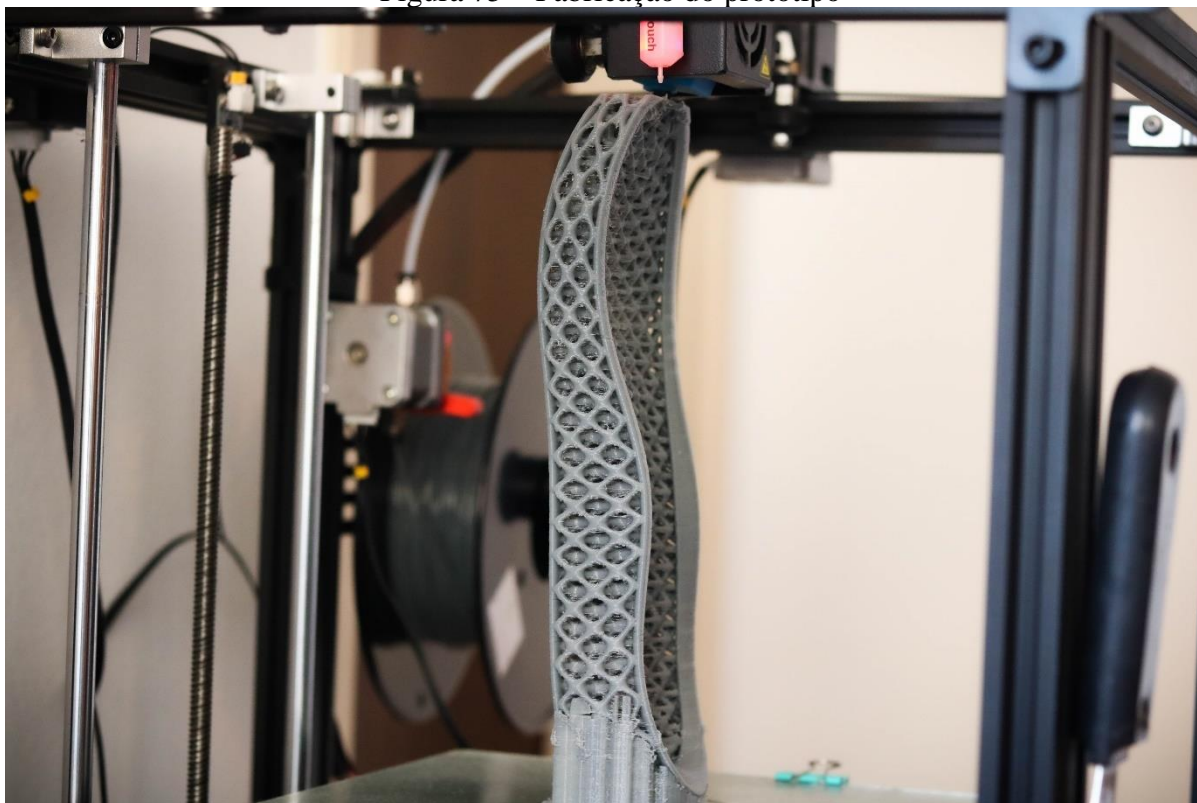
Para a preparação da impressão, o arquivo foi convertido para o formato STL e levado ao *software* de fatiamento Ultimaker Cura 4.13.1 (Figura 74). A peça foi impressa usando um parâmetro de altura de camada de 0,24mm e com um preenchimento de 100%. O tempo de impressão de protótipo foi de aproximadamente 85 horas e teve um gasto de 209g de material. Descontando o peso da parte de suporte, o peso do protótipo é de 183g.

Figura 74 – *software* de fatiamento Ultimaker Cura 4.13.1

Fonte: A autora

Assim como as amostras, o protótipo do produto foi impresso usando a impressora Ender 5 da fabricante Creality 3D usando o material TPU da marca Slim 3D. O protótipo foi produzido usando as mesmas medidas apresentadas no desenho técnico do tópico interior, com uma dimensão de 246x104x43 mm. Algumas imagens do protótipo podem ser vistas nas figuras 75, 76, 77 e 78.

Figura 75 – Fabricação do protótipo



Fonte: A autora

Figura 76 – Protótipo: imagem 1



Fonte: A autora

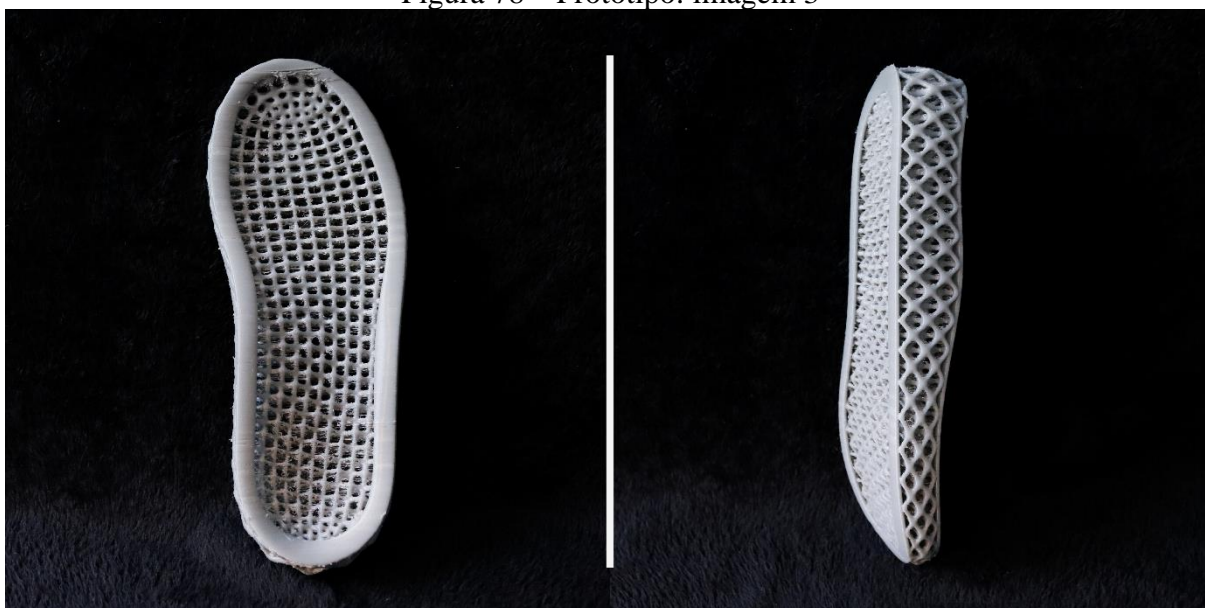


Figura 77 – Protótipo: imagem 2



Fonte: A autora

Figura 78 – Protótipo: imagem 3



Fonte: A autora

### 5.5.8 Fator de custo

O fator de custo foi estabelecido com base no protótipo desenvolvido, porém sabe-se que ele deve variar de acordo com a tecnologia de manufatura aditiva utilizada. Por meio de

uma tabela disponibilizada pela Acelera 3D, empresa que fornece produtos para impressoras 3D, foi possível calcular o custo médio de fabricação de uma unidade do produto, levando em consideração o preço do filamento utilizado e o tempo de impressão com base na taxa de energia da distribuidora e o consumo médio da impressora 3D. A partir dos cálculos, concluiu-se que o custo de filamento foi de R\$ 52,25 e o consumo de energia elétrica foi de R\$ 12,21, levando a um custo total de fabricação do protótipo de R\$ 64,46 (Figura 79).

Figura 79 – Custo de fabricação do protótipo

The image shows a web-based calculator interface for 3D printing costs. It is organized into several sections:

- FILAMENTO:** Price per kilo of filament: 250 reais.
- FATIADOR:** Quantity of material used in printing: 209 grams; Duration of printing: 85 Horas.
- ENERGIA:** Energy rate from distributor: 0,53224 (with a link "Ver aqui"); Average consumption of the 3D printer: 270 W. Examples listed: Ender 3 - 110W, Prusa i3 MK3 - 180W.
- LUCRO:** Profit margin: 0 %.

Below the input fields is a blue "Calcular" button. To the right, a "RESULTADOS" panel displays the calculated values:

- Consumo de filamento: R\$52,25
- Consumo de energia elétrica: R\$12,21
- Cada grama da sua peça custará: R\$0,31
- Custo total: R\$64,46
- Considerando suas despesas e margem de lucro você deverá cobrar: R\$64,46

At the bottom of the results panel, it says: "Próximas atualizações: Inclusão de opções de despesas avançadas."

Fonte: Acelera 3D (2022)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Projeto de Conclusão de Curso buscou desenvolver uma proposta de entressola customizável com o objetivo de atender as demandas e desejos do usuário. Por meio da revisão de literatura, foram identificadas tendências tecnológicas aplicadas na fabricação de calçados que validaram a possibilidade de desenvolvimento e produção em lotes de entressolas personalizadas.

Em razão da grande diversidade dimensional dos pés entre a população, durante a pesquisa, compreendeu-se que os tênis ainda apresentam diversos problemas ergonômicos. Esse fator ressalta a importância do desenvolvimento de entressolas customizadas a fim de diminuir os prejuízos causados à saúde e o bem-estar dos usuários causados pelo uso de produtos inadequados.

Dessa forma, a solução final deste projeto não diz respeito apenas ao desenvolvimento de um produto específico, mas também à geração de um processo construído a partir de algoritmos generativos em que o usuário participa do processo. Além disso, este trabalho teve a intenção de evidenciar a importância e expor as possibilidades do uso da modelagem paramétrica como ferramenta de projeto no Design de Produto.

Em pesquisas futuras, recomenda-se uma análise estrutural de resistências das diferentes estruturas de treliça a fim de estabelecer uma relação entre tipo de célula unitária e finalidade de uso da entressola. Ainda, é importante a realização de um estudo para compreender de forma mais detalhada a associação entre os níveis de pressão indicados no teste de baropodometria e a espessura da treliça. Também, aconselha-se que a entressola seja testada em conjunto com os outros elementos que compõem um tênis com o objetivo de validar a eficácia e eficiência do produto desenvolvido. Por fim, sugere-se a criação ou uso de uma plataforma que possibilite a conversão do *script* desenvolvido em uma interface intuitiva em que os parâmetros do projeto possam ser alterados e ajustados por qualquer pessoa.

## REFERÊNCIAS

3D SYSTEMS. **3D Systems**. 2022. Disponível em: <https://www.3dsystems.com/>. Acesso em: 20 de maio de 2022.

3D SYSTEMS. **New Balance Hits its Stride in Tech with 3D Printed Midsoles**. 2015. Disponível em: <https://www.3dsystems.com/blog/2015/11/new-balance-hits-its-stride-tech-3d-printed-midsoles>. Acesso em: 05 de maio de 2022.

ACELERA 3D. **Calculadora de custos de impressão 3D**. Disponível em: <https://acelera3d.com/calculadora-de-custos-de-impressao-3d/>. Acesso em: 09 julho 2022.

ADIDAS. **Tênis Adidas Futurecraft 4D**. Disponível em: <https://www.adidas.com.br/tenis-adidas-futurecraft-4d/FZ2560.html>. Acesso em: 05 maio 2022.

AETREX. **Albert 2 Pro Scanner**. Disponível em: [https://www.aetrex.com/albert-foot-scanner.html?lang=en\\_US](https://www.aetrex.com/albert-foot-scanner.html?lang=en_US). Acesso em: 29 abr. 2022.

AGKATHIDIS, Asterios. **Generative Design: form-finding techniques in architecture**. [S. L.]: Laurence King, 2015. 160 p.

ALVES, Carlos Henrique. Processos de AM por fotopolimerização em cuba. In: VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3d**. São Paulo: Blucher, 2017. Cap. 6. p. 129-144.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15159: Conforto de Calçados e Componentes - Determinação de diferentes perfis para o mesmo número - Fôrma**. 4 ed. Rio de Janeiro: 2013. 5 p.

BAXTER, Mike. **Projeto de Produto**: guia prático para o design de novos produtos. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2000. 259 p.

BOËR, Claudio Roberto; DULIO, Sergio. **Mass Customization and Footwear: Myth, Salvantion or Reality?**: a comprehensive analysis of the adoption of the mass customization paradigm in footwear, from the perspective of the euroshoe (extended user oriented shoe enterprise) research project.. Londres: Springer-Verlag, 2007.

BOSSAN, Marie-Josèphe. **The Art of the Shoe**. New York: Parkstone International, 2015.

BRIDGER, R. S.. **Introduction to Human Factors and Ergonomics**. 4. ed. Boca Raton: Crc Press, 2018. 713 p.

CALAIS-GERMAIN, Blandine. **Anatomy of Movement**. Seattle: Eastland Press, 2007. 313 p.

CARBON. **The perfect fit: Carbon + adidas collaborate to upend athletic footwear**. Disponível em: <https://www.carbon3d.com/resources/case-study/adidas/>. Acesso em: 05 maio 2022.

CARBON. **EPU 44**. Disponível em: <https://www.carbon3d.com/materials/epu-44>. Acesso em: 25 de junho de 2022.

CHESKIN, Melvyn P.; SHERKIN, Kel J.; BATES, Barry T.. **The Complete Handbook of Athletic Footwear**. New York: Fairchild Publications, 1987.

CHOKLAT, Aki. **Diseño de Calzado**. Barcelona: Gustavo Gili, 2012.

DEMELLO, Margo. **Feet and footwear**: a cultural encyclopedia. Santa Barbara: Greenwood Press, 2009.

DRAKE, Richard L.; VOGL, A. Wayne; MITCHELL, Adam W. M.. **Gray's Anatomy for Students**. 4. ed. Philadelphia: Elsevier, 2020.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle. **Design Science Research**: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DUL, Jan; WEERDMEEESTER, Bernard. **Ergonomics for Beginners**: a quick reference guide. 3. ed. Boca Raton: Crc Press, 2008. 147 p.

FARAH, Behnaz; LEACH, Neil (ed.). **3D-Printed Body Architecture**. 6. ed. [S. L.]: John Wiley & Sons, 2017. 136 p.

FINLEY, M. I.; PLEKET, H. W.. **The Olympic Games**: the first thousand years. New York: Dover Publications, 2005.

FORMOSO, Carlos Torres. Apresentação 2. In: DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle. **Design Science Research**: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015. p. 12-13.

FU, Feng. **Design and Analysis of Tall and Complex Structures**. [S. L.]: Butterworth-Heinemann, 2018. 304 p.

FRALIX, Michael T.. From Mass Production to Mass Customization. **Journal Of Textile and Apparel, Technology and Management**, Cary, v. 1, n. 2, p. 1-7, 2001.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies**: 3d printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2. ed. [S. L.]: Springer, 2014. 510 p.

GOMES FILHO, João. **Ergonomia do Objeto**: sistema técnico de leitura ergonômica. 2. ed. São Paulo: Escrituras, 2010. 272 p.

GOONETILLEKE, Ravindra S.. **The Science of Footwear**. Boca Raton: Crc Press, 2013.

GUPTA, Deepti. New directions in the field of anthropometry, sizing and clothing fit. In: ZAKARIA, Norsaadah; GUPTA, Deepti (ed.). **Anthropometry, Apparel Sizing and Design**. 2. ed.: Elsevier, 2020. p. 3-27.

HALL, Susan J.. **Basic Biomechanics**. 8. ed. [S. L.]: McGraw-Hill Education, 2019. 523 p.

HAMILL, Joseph; KNUTZEN, Kathleen M.; DERRICK, Timothy R.. **Biomechanical Basis of Human Movement**. 4. ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health, 2015.

HELOU, Mark; VONGBUNYONG, Supachai; KARA, Sami. Finite Element Analysis and Validation of Cellular Structures. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 50, p. 94-99, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.018>.

HERRING, Kirk. Running Footwear: triathlon and duathlon. In: WERD, Matthew B.; KNIGHT, E. Leslie; LANGER, Paul R.. **Athletic Footwear and Orthoses in Sports Medicine**. 2. ed. [S. L.]: Springer International, 2017. Cap. 2. p. 223-256.

HOPKINSON, Neil; DICKENS, Phill. Emerging Rapid Manufacturing Processes: stereolithography. In: HOPKINSON, Neil; HAGUE, Richard; DICKENS, Phill (ed.). **Rapid Manufacturing: an industrial revolution for the digital age**. [S. L.]: John Wiley & Sons, 2006. Cap. 5. p. 55-81.

ISTOOK, Cynthia L.; HWANG, Su-Jeong. 3D body scanning systems with application to the apparel industry. **Journal Of Fashion Marketing And Management: An International Journal**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 120-132, jun. 2001.

JABI, Wassim. **Parametric Design for Architecture**. [S. L.]: Laurence King, 2013. 208 p.

KAI, Chua Chee; FAI, Leong Kah; SING, Lim Chu. **Rapid Prototyping: principles and applications**. 2. ed. [S. L.]: World Scientific, 2003. 420 p.

KEYSER, Amber J. **Sneaker Century**: a history of athletic shoes. Minneapolis: Twenty-First Century Books, 2015.

KIDD, Bruce. The myth of the ancient Games†. **Sport In Society**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 416-424, maio 2013. Informa UK Limited.

KIM, Inki *et al.* Nanophotonics for light detection and ranging technology. **Nature Nanotechnology**, [S.L.], v. 16, n. 5, p. 508-524, maio 2021. Springer Science and Business Media LLC.

KOLAREVIC, Branko; DUARTE, José Pinto. **Mass Customization and Design Democratization**. Abingdon: Routledge, 2019. 289 p.

KOR, Alex. Sport-Specific Athletic Footwear and Orthoses: tennis. In: WERD, Matthew B.; KNIGHT, E. Leslie; LANGER, Paul R.. **Athletic Footwear and Orthoses in Sports Medicine**. 2. ed. [S. L.]: Springer International, 2017. Cap. 3. p. 285-292.

LASI, Heiner *et al.* Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 239-242, 19 jun. 2014. Springer Science and Business Media LLC.

LEARY, Martin. **Design for Additive Manufacturing**. [S. L.]: Elsevier, 2019. 359 p.

LEVINE, David. Athletic Shoe Evaluation. In: WERD, Matthew B.; KNIGHT, E. Leslie (ed.). **Athletic Footwear and Orthoses in Sports Medicine**. 2. ed. [S. L.]: Springer International, 2017. Cap. 5. p. 55-62.

LOSITO, James M. Sport-Specific Athletic Footwear and Orthoses: basketball and volleyball. In: WERD, Matthew B.; KNIGHT, E. Leslie; LANGER, Paul R.. **Athletic Footwear and Orthoses in Sports Medicine**. 2. ed. [S. L.]: Springer International, 2017. Cap. 3. p. 381-388.

LU, J; WANG, M. Automated anthropometric data collection using 3D whole body scanners. **Expert Systems With Applications**, [S.L.], v. 35, n. 1-2, p. 407-414, jul. 2008.



LUXIMON, Ameersing; JIANG, Lanyin; LUXIMON, Yan. Sizing and Grading Methods with Consideration of Footwear Styles. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Hong Kong, v. 78, p. 1-10, jul. 2020.

NERVOUS SYSTEM. **Data-customized midsoles with New Balance**. 2015. Disponível em: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/blog/?p=7048>. Acesso em: 05 maio 2022.

NEW BALANCE. **New Balance Sell First 3D Printed Running Shoe**. 2016. Disponível em: <https://newbalance.newsmarket.com/running/new-balance-to-sell-first-3d-printed-running-shoe/s/c795df88-b76f-4ed4-8a02-b186981dadf7?cultureSeoName=GLOBAL>. Acesso em: 05 maio 2022.

NORDIN, Margareta; FRANKEL, Victor H.. **Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System**. 4. ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2012.

NOVEL. **Emed**: pressure distribution under the foot. Disponível em: <https://www.novel.de/products/emed/>. Acesso em: 27 maio 2022.

OXMAN, Rivka; GU, Ning. Theories and Models of Parametric Design Thinking. In: ECAADE (EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE), 33., 2015, Viena. **Proceedins**. Viena: Ecaade (Education And Research In Computer Aided Architectural Design In Europe) And Faculty Of Architecture And Regional Planning, Tu Wien., 2015. v. 2, p. 477-482.

PAZMINO, Ana Veronica. **Como Se Cria**: 40 métodos para design de produtos. [S. L.]: Blucher, 2015. 278 p.

PILLER, Frank T; MÜLLER, Melanie. A New Marketing Approach to Mass Customisation. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, [S.L.], v. 17, n.7, p. 583-593, out. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/0951192042000273140>.

PUPO, Regiane Trevisan. **Inserção da Prototipagem e Fabricação Digitais no Processo de Projeto**: um novo desafio para o ensino de arquitetura. 2009. 240 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

ROMA, Annalisa di. Footwear Design: the paradox of "tailored shoe" in the contemporary digital manufacturing systems. **The Design Journal**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 2689-2699, 28 jul. 2017.

SCHMELTZPFENNING, Timo; BRAUNER, Torsten. Foot Biomechanics and Gait. In: LUXIMON, Ameersing (ed.). **Handbook of footwear design and manufacture**. [S. L.]: Woodhead Publishing, 2013. Cap. 2. p. 27-48.

SCHMIDT, Mauri Rubem. **Modelagem Técnica do Calçado**. [S. L.]: Fiergs, 2007. 33 p.

SHAH, Kanishk; SOLAN, Matthew; DAWE, Edward. The Gait Cycle and its Variations With Disease and Injury. **Orthopedics And Trauma**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 153-160, jun. 2020

SILVA, F. P. da; DUARTE, L. C.; ROLDO, L.; KINDLEIN JUNIOR, W.. A Digitalização Tridimensional Móvel e Sua Aplicação no Design de Produto. **Design & Tecnologia**, Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 6065, 2010.

SILVA, Jorge Vicente Lopes da. Processos de AM por fusão de leito de pó não metálico. In: VOLPATO, Neri (org.). **Manufatura Aditiva**: tecnologias e aplicações da impressão 3d. São Paulo: Blucher, 2017. Cap. 9. p. 213-247

SIMON, Herbert Alexander. **The Sciences of the Artificial**. 3. ed. Cambridge: MIT Press, 1996.

STRATASYS. **Stratasys**. 2022. Disponível em: <https://www.stratasys.com/>. Acesso em: 18 maio 2022.

SUBOTNICK, Steven I. *et al.* Evolution of Athletic Footwear. In: WERD, Matthew B.; KNIGHT, E. Leslie (ed.). **Athletic Footwear and Orthoses in Sports Medicine**. [S. L.]: Springer International, 2017. Cap. 1. p. 3-18.

TAO, Wenjin; LEU, Ming C.. Design of Lattice Structure for Additive Manufacturing. In: 2016 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION (ISFA), 2016, Cleveland. **Proceedings**. Cleveland: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Ieee), 2017. v. 1, p. 325-332.

TEDESCHI, Arturo. **AAD Algorithms-Aided Design**: parametric strategies using grasshopper®. [S. L.]: Le Penseur, 2014. 495 p

TERZIDIS, Kostas. **Algorithmic Architecture**. [S. L.]: Princeton Architectural Press, 2006. 159 p.

TSENG, Mitchell M.; JIAO, Jianxin; MERCHANT, M. Eugene. Design for Mass Customization. **Cirp Annals**, [S.L.], v.45, n. 1, p.153-156, 1996. Elsevier BV. [dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)63036-4](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63036-4).

UKOBITZ, Desirée; FAULLANT, Rita. Leveraging 3D Printing Technologies: the case of Mexico's footwear industry. **Research-Technology Management**, [S.L.], v. 64, n. 2, p. 20-30, 1 mar. 2021. Informa UK Limited.

VOLPATO, Neri (org.). **Manufatura Aditiva**: tecnologias e aplicações da impressão 3d. São Paulo: Blucher, 2017. 385 p.

VORUM. **Yeti 3D Scanner**. Disponível em: <https://vorum.com/yeti-3d-foot-scanner/>. Acesso em: 29 abr. 2022.

XIAO, Ma; LUXIMON, Yan; LUXIMON, Ameersing. Foot Structure and Anatomy. In: GOONETILLEKE, Ravindra S. (ed.). **The Science of Footwear**. Boca Raton: Crc Press, 2013. Cap. 1. p. 3-18

XIONG, Shuping; ZHAO, Jianhui. Foot Models and Measurements. In: LUXIMON, Ameersing (ed.). **Handbook of footwear design and manufacture.**: Woodhead Publishing, 2013. Cap. 4. p. 72-86.

WANG, Chenjie; TSENG, Mitchell M.. Mass Customization and Footwear. In: GOONETILLEKE, Ravindra S. (ed.). **The Science of Footwear**. Boca Raton: Crc Press, 2013. Cap. 7. p. 625-642.

WERD, Matthew B.; KNIGHT, E. Leslie; LANGER, Paul R.. **Athletic Footwear and Orthoses in Sports Medicine**. 2. ed. [S.I]: Springer International, 2017.

WOODBURY, Robert. **Elements of Parametric Design**. [S. L.]: Routledge, 2010. 300 p.

ZHANG, Yifan; LUXIMON, Ameersing. Shoe-last design for mass-customized footwear. In: LUXIMON, Ameersing (ed.). **Handbook of Footwear Design and Manufacture**: Woodhead Publishing, 2013. Cap. 12. p. 1-427.