

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Materiais - SMM

Beatriz Landgraf Gomes

Aplicação da análise das variantes e critério de Ashby para seleção de material de um prato assistivo

São Carlos
2021

Beatriz Landgraf Gomes

Aplicação da análise das variantes e critério de Ashby para seleção de material de um prato assistivo

Versão Original

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

.

Orientadora: Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira

São Carlos
2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

G633a Gomes, Beatriz Landgraf
Aplicação da análise das variantes e critério de Ashby para seleção de material de um prato assistivo / Beatriz Landgraf Gomes; orientador Zilda de Castro Silveira . São Carlos, 2021.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

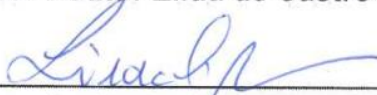
1. projeto focado em customização. 2. open manufacturing. 3. materiais de engenharia . 4. tecnologia assistiva. 5. auxílio para vida diária. 6. sistematização de projeto. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Beatriz Landgraf Gomes
Título do TCC: Aplicação da análise das variantes e critério de Ashby para um prato adaptado fabricado com conceito de open manufacturing
Data de defesa: 23/07/2021

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Doutor Zilda de Castro Silveira (orientador)	Aprovado
Instituição: EESC - SEM	
Professor Doutor Antonio Wagner Forti	Aprovado
Instituição: Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (FEG-UNESP) - Engenharia Mecânica	
Especialista Artur Valadares de Freitas Santos	Aprovado
Instituição: EESC - SEM	

Presidente da Banca: **Professor Doutor Zilda de Castro Silveira**



(assinatura)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e irmã que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos e Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura, assim como todos os seus professores e funcionários pelo suporte e por indubitavelmente serem responsáveis pelo meu crescimento intelectual.

À Professora Doutora Zilda de Castro Silveira que, tanto durante a graduação quanto na elaboração deste trabalho, foi um exemplo de dedicação e profissionalismo.

À Alina e Bruna, pelo trabalho em conjunto do projeto e a todos aqueles que me ajudaram direta e indiretamente a concluir este trabalho.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram e estiveram presentes ao longo de todo meu percurso, me ajudando na realização dos meus sonhos e celebrando cada conquista ao meu lado.

À minha irmã, pela significativa fonte de motivação, por toda a ajuda, apoio e paciência em todos os momentos da minha trajetória, se assegurando que esta fosse a mais proveitosa possível e contribuindo para que eu evoluísse pessoal e profissionalmente.

Aos amigos que cultivei durante a graduação, que fizeram desta caminhada mais alegre, cheia de boas memórias e que carregarei comigo em todas as conquistas que procederão.

RESUMO

Gomes, B, L. **Aplicação da análise das variantes e critério de Ashby para a seleção de material de um prato assistivo, 93p.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais e Manufatura) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Esse trabalho apresenta um procedimento para escolha de materiais de engenharia para a fabricação de protótipos funcionais para Tecnologia Assistiva na categoria de auxílio à vida diária. A abordagem sistemática utiliza a técnica de projeto “Análise das Variantes de Solução” e o diagrama de Ashby para escolha de potenciais materiais, a partir dos atributos e funções de projeto obtidos por meio de uma lista de requisitos do usuário. Para o desenvolvimento do procedimento foi escolhido um estudo de caso baseado em um prato adaptado para auxiliar a alimentação de pessoas acometidas de algum tipo de desordem motora. A partir da lista de requisitos do usuário previamente definidos, a análise das variantes de solução foi aplicada, a qual estabeleceu níveis com diferentes domínios técnicos que podem ser expandidos e correlacionados com as funções/requisitos de maior importância para o usuário (seja profissional da área da saúde ou usuário final). Com as funções evidenciadas em termos de valor de importância, foi utilizado o método de Ashby para escolha da matéria-prima (na forma filamentar) para fabricação do protótipo funcional do prato adaptado. Cabe ressaltar que, dentro do contexto de *open manufacturing*, com equipamentos de impressão 3D do tipo *desktop*, diferentemente das impressoras industriais, não há certificações para uso dos materiais na área de Tecnologia Assistiva, nem mesmo para aplicações que considerem contato de alimento com a peça fabricada por impressão 3D. Entretanto, o procedimento indicou, dentro desse contexto, o uso do polímero termoplástico PETG (Polietileno Tereftalato modificado por Glicol) como o material mais adequado para fabricação do protótipo funcional do prato adaptado quando comparado com o PLA e o ABS.

Palavras-chave: Projeto focado em customização; *open manufacturing*; materiais de engenharia; tecnologia assistiva; auxílio para vida diária; análise das variantes de solução.

ABSTRACT

Gomes, B, L. **Application of the variants analysis and Ashby's criterion for material's selection of an adapted dish, 93p.** 2021. Completion of Course Work (Bachelor's Degree in Materials and Manufacturing Engineering) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2021.

This work presents a procedure for supporting the choice of engineering materials based on assistive technology attributes for fabricating functional prototype to the daily life aid of people affected with some type of motor disorder. The systematic approach employs the design technique called “Evaluating Solution Variants”, where was possible attribute weight to the set of analysed goals, and the Ashby diagram to select promising materials according to characteristics and functions of project and requirements list of users. In this context, the case study of a device to support eat people affected with some type of motor disorder was chosen for the procedure demonstration. Considering user's requirements, Evaluating Solution Variants furnished different technical levels that may be expanded and correlated with important functions and requisites to the user (for both health care professional or end consumers). With the main functions defined (*e.g.*, thermoplastic polymers, proper food contact materials and good mechanical strength), the Ashby method was used to identify the less harmful feedstock in the filament form for the manufacture of the functional prototype of the adapted dish. It is noteworthy that the expression “less harmful” is used, within the context of open manufacturing and desktop type 3D printing equipment, because the feedstock (in filament form), in this case, do not have certification for use in assistive devices, especially for applications that consider food contact with the part manufactured by 3D printing and contact with mucous membranes. However, in this restricted domain, the procedure indicated the Polyethylene Terephthalate modified by Glycol (PETG) thermoplastic polymer as the most suitable material for manufacturing the functional prototype of the adapted dish when compared to PLA and ABS.

Keywords: *Design for customization; open manufacturing; engineering materials, assistive technology; daily life devices; evaluating solution variants.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde.....	30
Figura 2 – Porcentagem da população por tipo e grau de dificuldade e deficiência.....	31
Figura 3 - Fluxograma geral da metodologia de projeto.....	36
Figura 4 - Estrutura do sistema de metas	42
Figura 5 - Determinação de todos os níveis dos fatores de ponderação das metas de um sistema de metas.....	43
Figura 6 - Lista de avaliação que correlaciona critérios de avaliação e parâmetros	44
Figura 7 - Lista de avaliação com todos os campos completos	45
Figura 8 – Classificações de tecnologias de manufatura aditiva.....	50
Figura 9 – Esquema do processo FFF utilizando filamento como matéria-prima (FDM).....	51
Figura 10 - Os aspectos dos materiais relacionados com as fases do processo de desenvolvimento de produto na seleção de materiais	56
Figura 11 – Diagrama de Ashby	58
Figura 12 – Modelo virtual do protótipo assistivo	60
Figura 13 - Estrutura do sistema de características técnicas	65
Figura 14 – Fluxograma de análise das variantes de solução e seus respectivos pesos	65
Figura 15 – Materiais e suas respectivas faixas de temperatura de serviço máxima	71
Figura 16 - Diagrama de Ashby para a seleção de materiais em projetos mecânicos correlacionando módulo de Young e densidade	72
Figura 17 - Diagrama de Ashby para a seleção de materiais em projetos mecânicos correlacionando resistência e densidade	74
Figura 18 - Diagrama de Ashby para a seleção de materiais em projetos mecânicos correlacionando resistência e temperatura máxima de serviço	75
Figura 19 - Estrutura química do Poli(ácido lático).....	77
Figura 20 - Estrutura química do ABS.....	79
Figura 21 - Estrutura química do PETG	81
Figura 22 – Comparação do ensaio mecânico do PLA, ABS e PETG	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atividades do processo de avaliação e seleção da concepção do produto.....	38
Tabela 2 – Escala de valores da análise de valor	45
Tabela 3 – Materiais comerciais para processamento em equipamentos de Manufatura Aditiva	53
Tabela 4 – Requisitos do usuário	63
Tabela 5 - Características técnicas desdobradas a partir dos requisitos do usuário	64
Tabela 6 – Critérios organizados por nível de relevância	66
Tabela 7 – Possíveis variantes de solução.....	67
Tabela 8 - Lista de avaliação com todos os campos completos e seus respectivos cálculos de valores globais.....	68
Tabela 9 - Variantes de soluções e seus respectivos valores globais	69
Tabela 10 – Classes de Propriedades	70
Tabela 11 - Propriedades térmicas e mecânicas do PLA, ABS e PETG.....	83

LISTA DE SIGLAS

- ABS:** Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
- ADA:** *American With Disabilities Act*
- APAE:** Associação de Pais e Amigos dos Excepcionais
- ASA:** Acrilonitrila-Estireno-Acrilato
- ASTM:** *American Society for Testing and Materials*
- AT:** *Assistive Technology*
- CAA:** Comunicação Aumentativa Alternativa
- CAD:** *Computer-Aided Design*
- CAT:** Comitê de Ajudas Técnicas
- CDPD:** Convenção sobre Direitos das Pessoas com Deficiência das Nações Unidas
- CIF:** Classificação Internacional de Funcionalidade
- CSA:** Comunicação Suplementar Alternativa
- DMD:** *Direct Metal Deposition*
- EBM:** *Electron Beam Melting*
- FDM:** *Fused Deposition Modeling*
- FEF:** *Freeze-form Extrusion Fabrication*
- IBGE:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IM:** Índice de Mérito
- IUPAC:** *International Union of Pure and Applied Chemistry*
- LDM:** *Laser Metal Deposition*
- LENS:** *Laser Engineered Net Shaping*
- LOM:** *Laminated Object Manufacturing*
- MJM:** *Multi-Jet Modeling*
- OMS:** Organização Mundial da Saúde
- PA:** Poliamida
- PC:** Policarbonato
- PEI:** Polieterimida
- PET:** Polietileno Tereftalato
- PETG:** Polietileno Tereftalato Modificado por Glicol
- PLA:** Poliacido láctico
- PP:** Polipropileno

PVC: Policloreto de Vinila

RFP: *Rapid Freezing Prototyping*

SEDH: Secretaria Especial dos Direitos Humanos da Presidência da República

SLA: Esterolitografia

SLM: *Selective Laser Melting*

SLS: *Selective Laser Sintering*

STL: *Surface Tessellation Language*

TA: Tecnologia Assistiva

3DP: Impressão Tridimensional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	25
1.2 Objetivo.....	26
2. EMBASAMENTO TEÓRICO	29
2.1 Contexto da Deficiência.....	29
2.2 Tecnologia Assistiva	31
2.3 Técnica de Projeto de Análise das Variantes de Solução	35
2.3.1 Seleção de Variantes da Solução.....	38
2.3.2 Avaliação de Variantes da Solução.....	39
2.3.3 Fundamentos dos Métodos de Avaliação.....	40
2.3.4 Identificação de Critérios de Avaliação	41
2.3.5 Análise da Relevância para o Valor Global	42
2.3.6 Composição dos Parâmetros	43
2.3.7 Avaliação Segundo Noções de Valor.....	44
2.3.8 Determinação do Valor Global	46
2.4 Manufatura Aditiva.....	46
2.4.1 Conceitos de Manufatura Aditiva	47
2.4.2 Evolução da Manufatura Aditiva	48
2.4.3 Tecnologias de Manufatura Aditiva.....	49
2.5 Seleção de Materiais	54
3. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	59
4. PROPOSTA DO MÉTODO.....	63
4.1 Aplicação do Método de Projeto.....	63
4.2 Seleção do Material de Acordo com a Aplicação do Método	70
5. CONCLUSÃO.....	85
REFERÊNCIAS	87

1. INTRODUÇÃO

Os dispositivos assistivos (DAs) e as inovações técnicas terapêuticas associadas a eles possuem a capacidade de minimizar doenças neuromusculares e neurodegenerativas de indivíduos que sofrem para realizar atividades fundamentais do cotidiano como comer, beber, escovar os dentes, entre outros inúmeros exemplos, como no caso de pessoas afetadas por derrames, as quais apresentam fraqueza muscular severa caracterizada pela rigidez dos movimentos.

Com o intuito de promover a participação ocupacional dos pacientes nas inúmeras e diversas atividades diárias, os profissionais de saúde, em especial os fisioterapeutas e terapeutas ocupacionais, prescrevem a utilização de dispositivos assistivos. É possível, portanto, constatar que estes dispositivos constituem uma importante ferramenta para melhorar a capacidade e independência funcional dos portadores de deficiência (Boiselle; Graio, 2018).

A utilização dos recursos de Tecnologia Assistiva (TA) acarreta benefícios físicos, psicológicos e econômicos e promove, além de maior independência, um aumento na qualidade de vida, inclusão social e redução de gastos com profissionais da saúde (Squires et al., 2019). Ademais, a TA também proporciona maior participação das pessoas nos mais diversos contextos como educação, mercado de trabalho e vida social, restabelecendo suas vidas produtivas (OMS, 2018).

Contudo, apesar de sua extrema importância na vida de pessoas portadoras de deficiências, a grande maioria dos DAs e TAs são projetados através de um processo não sistemático e não atendem todas as necessidades de requisitos dos usuários finais, sendo uma das principais causas da elevada taxa de abandono. Esta taxa, de acordo com Riemer-Reiss e Wacker (2018), é próxima a 32,4%, percentual que ressalta a seriedade e relevância em envolver o usuário no processo de desenvolvimento destes DAs.

Gherardini et al. (2000) adicionam ainda às causas de abandono o acesso restrito aos DAs por conta do alto custo e baixa oferta e a falta de customização dos produtos comercialmente disponíveis. Como resultado, não só o processo de reabilitação dos indivíduos é prejudicado como também nos deparamos com um elevado desperdício de recursos (Barbosa et al., 2021).

Para auxiliar nas atividades cotidianas e fornecer qualidade de vida a estas pessoas, comumente recorre-se a produtos de tecnologia assistiva. Segundo Bersh e Tonolli (2006),

considera-se um recurso de tecnologia assistiva qualquer artefato ou recurso que forneça o mínimo necessário de estrutura para melhorar suas funcionalidades mirando no aumento de autonomia e maior grau de independência aos portadores de deficiência.

No planejamento e desenvolvimento de dispositivos assistivos, é essencial que as áreas de pesquisa foquem no usuário, suas necessidades e na opinião dos profissionais da área da saúde que auxiliam diariamente estas pessoas. Desta forma, para a obtenção de um dispositivo de qualidade que atenda a todos os requisitos necessários, o projeto deve envolver profissionais das mais diversas áreas do conhecimento como engenharia, saúde, gerontologia, humanas, entre outras e, principalmente, um consumidor que valide as necessidades como usuário (CHENG; MELO FILHO, 2010).

Pode-se dizer, portanto, que os projetos de TA possuem caráter multidisciplinar e alto grau de personalização, porém visando sempre manter a redução de custos como uma das prioridades, juntamente com atributos importantes de projeto como conforto, ergonomia, segurança e independência. Para tal, as soluções técnicas contam com o auxílio do conceito de projeto universal no desenvolvimento do projeto de produtos e com o apoio de metodologias sistemáticas (SOUZA, 2016).

Com este contexto, este trabalho propõe um estudo sistemático para escolha do material mais indicado com conceito de *open manufacturing* para fabricação aditiva do protótipo funcional de um prato adaptado por meio do estudo das funções de projeto a partir da aplicação da análise das variantes de solução, para nortear a escolha do material de engenharia a partir do critério de Ashby. É importante ressaltar que, por conta das impressoras do tipo desktop não possuem certificação para contato com os alimentos, o material será posteriormente revestido com PVC para os testes com usuários.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo, por meio da técnica de projeto de análise das variantes de solução, apresentar um procedimento para a escolha do material mais indicado segundo o conceito de *open manufacturing*, baseado em características técnicas e critérios de Ashby, para impressão 3D de um dispositivo assistivo para auxílio diário de alimentação focado em usuários portadores de distúrbios motores, os quais apresentam dificuldade no ato

de alimentar-se pela baixa palatabilidade ocasionada pelo longo tempo demandado e consequente perda de calor dos alimentos.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Contexto da Deficiência

No Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o crescimento em 2020 superou em 0,77% o número estimado inicialmente no ano anterior e ultrapassou a marca de 211,8 milhões de pessoas (CARTILHA DO CENSO, 2010). Consequentemente, o aumento também se dá no número de pessoas com algum tipo de deficiência, seja ela de natureza física, mental, intelectual ou sensorial.

De acordo com a Convenção Internacional sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência, tais pessoas “têm impedimentos de longo prazo, os quais, em interação com diversas barreiras, podem obstruir sua participação plena e efetiva na sociedade em iguais condições com as demais pessoas”, sendo assim necessário promover, proteger e assegurar o exercício pleno e equitativo de todos os direitos humanos e liberdades fundamentais para todas as pessoas com deficiência e promover o respeito pela sua dignidade inerente.

A deficiência está diretamente atrelada à existência humana, seja ela temporária, permanente ou por consequência da funcionalidade debilitada de nossos corpos atrelada ao envelhecimento e alcance, cada vez maior, de idades mais avançadas por conta do desenvolvimento da medicina. Independentemente da situação, é imprescindível discutirmos a importância da inclusão e apoio a estas pessoas. A Convenção sobre Direitos das Pessoas com Deficiência das Nações Unidas (CDPD) ajuda, desde que passou a vigorar, a considerarmos, cada vez mais, a deficiência como uma questão de direitos humanos e a aumentar a consciência e os estudos acerca das questões relacionadas a ela (WHO, 2011).

No passado, o segregacionismo era a solução mais comum, por meio de escolas especiais e instituições de abrigo. Porém, constatou-se que o ambiente em que uma pessoa está inserida exerce significativo impacto sobre a dimensão da deficiência e de sua experiência cotidiana: cita-se como exemplo um usuário de cadeira de rodas em um ambiente sem elevador acessível. Dessa forma, pode-se dizer que tanto os fatores ambientais (que incluem serviços, suporte, políticas públicas, tecnologias, ambiente natural ou construído, produtos, entre outros) quanto os fatores pessoais (como autoestima e motivação) podem ser vistos como barreiras ou facilitadores (WHO, 2011).

A Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde (CIF),

desenvolvida por médicos clínicos, acadêmicos e pessoas com deficiências, estabeleceu que “as funções do corpo são as funções fisiológicas dos sistemas orgânicos (incluindo as funções psicológicas); as estruturas do corpo são partes anatômicas do corpo, tais como órgãos, membros e seus componentes; e deficiência são problemas nas funções ou na estrutura do corpo, tais como, um desvio importante ou uma perda” (CIF, 2004).

Esta enfatiza o surgimento de deficiências atrelado aos fatores ambientais, categorizando os problemas de funcionalidade humana, conforme explicitado na Figura 1, em problemas de funções e estruturas corporais, limitações (execução de atividades com dificuldades, como alimentação e caminhada) e restrições relacionadas à participação em determinadas atividades, principalmente por discriminação (WHO, 2011). Assim, a inclusão social e educacional auxilia a inserção destas pessoas em todos os ambientes, melhorando sua qualidade de vida.

Representação da Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde

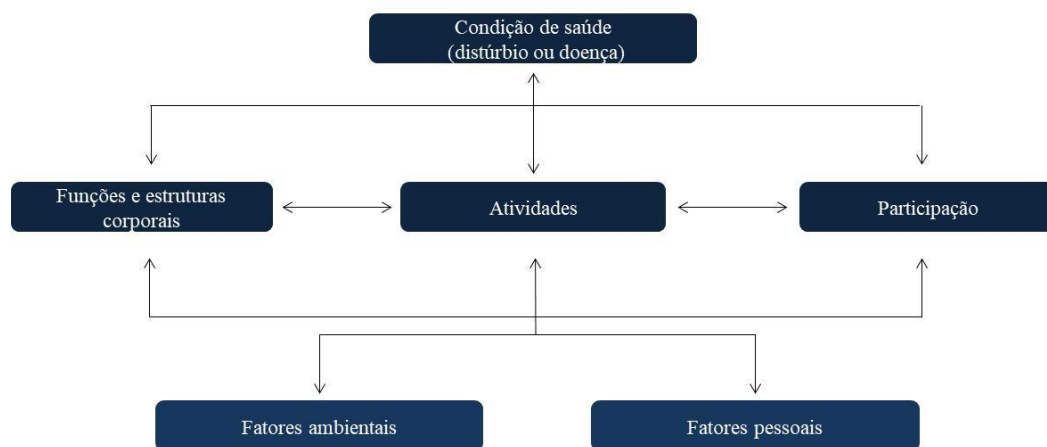


Figura 1 - Representação da Classificação Internacional de Funcionalidade, Incapacidade e Saúde

(Fonte: CIF, 2004)

Segundo dados do Censo Demográfico Brasileiro contabilizado em 2010, explicitado na Figura 2, aproximadamente 24% da população (quase 46 milhões de brasileiros) alegaram possuir no mínimo uma das deficiências contempladas na pesquisa, sendo elas visual, auditiva, mental ou intelectual e motora, sendo esta última dificuldades principalmente em caminhadas ou locomoção em degraus. Estas pessoas necessitam de outras as auxiliando na realização de suas tarefas corriqueiras exercidas com dificuldade.

Porcentagem da população brasileira por natureza de deficiência (IBGE, 2010)

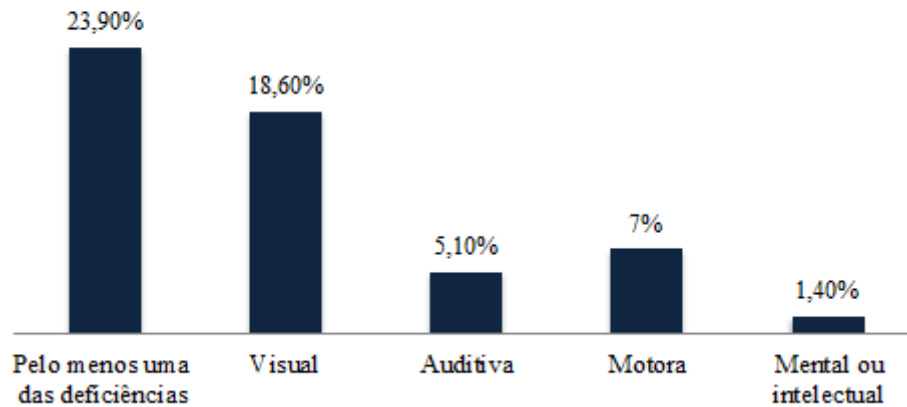


Figura 2 – Porcentagem da população por tipo e grau de dificuldade e deficiência

(Fonte: CARTILHA DO CENSO, 2010)

Fica evidenciada através da Figura 2 que a deficiência motora é a segunda maior ocorrência na população brasileira, correspondendo - em 2010 - a 7% da população. Esse tipo de deficiência pode ser proveniente de má formação, lesões ortopédicas, neuromusculares, neurológicas, perda sensorial, paralisia motora, deformidades ou síndromes, podendo ser, portanto, classificado como de caráter adquirido ou congênito. O presente trabalho tem como foco estes distúrbios de movimentos que abrangem alterações de motilidade (LOUREIRO, 2019).

Mary Pat Radabaugh salientou que: “Para as pessoas sem deficiência, a tecnologia torna as coisas mais fáceis. Para as pessoas com deficiência, a tecnologia torna as coisas possíveis” (RADABAUGH, 1993). É imprescindível que aconteça um processo de apropriação das experiências vivenciadas em sua cultura para o desenvolvimento humano de um indivíduo. Contudo, os problemas de funções e estruturas corporais e as limitações funcionam como um obstáculo para esse aprendizado através da vivência. Com a finalidade de quebrar este obstáculo, é necessário desenvolver e ofertar recursos de acessibilidade, mais conhecidos como Tecnologia Assistiva (VYGOTSKY, 1987).

2.2 Tecnologia Assistiva

Um conceito ainda em constante mudança e construção, a TA está presente na história da humanidade há muito tempo (GALVÃO FILHO, 2009). Para Manzini, “os recursos de

tecnologia assistiva estão muito próximos do nosso dia-a-dia. Ora eles nos causam impacto devido à tecnologia que apresentam, ora passam quase despercebidos. Para exemplificar, podemos chamar de tecnologia assistiva uma bengala, utilizada por nossos avós para proporcionar conforto e segurança no momento de caminhar, bem como um aparelho de amplificação utilizado por uma pessoa com surdez moderada ou mesmo veículo adaptado para uma pessoa com deficiência” (MANZINI, 2005, p. 82).

O termo Tecnologia Assistiva ou *Assistive Technology* (AT) foi oficialmente criado nos Estados Unidos em 1988 por meio de um conjunto de leis - denominado ADA - *American With Disabilities Act* através de uma legislação chamada *Public-Law* 100-407 (BERSCH, 2005) -, que visam garantir às pessoas com deficiência benefícios e recursos que favoreçam a independência no cotidiano das mesmas e, conseqüentemente, maior inclusão social. Esta legislação descreve Tecnologia Assistiva como Serviços e Recursos. De Serviços, entende-se “aqueles que auxiliam diretamente uma pessoa com deficiência a selecionar, comprar ou usar os recursos”. De Recursos, “todo e qualquer item, equipamento ou parte dele, produto ou sistema fabricado em série ou sob medida, utilizado para aumentar, manter ou melhorar as capacidades funcionais das pessoas com deficiência” (PUBLIC LAW, 1988, p.03, tradução nossa).

O termo *Assistive Technology* foi introduzido, no Brasil, complementado com expressões como “Ajudas Técnicas”, “Inclusão”, “Acessibilidade”, “Adaptações”, “Tecnologia de Apoio”, entre outros (GALVÃO FILHO, 2009). Em 1996, o autor Romeu Sasaki escreveu:

Mas como traduzir *assistive technology* para o português? Proponho que esse termo seja traduzido como tecnologia assistiva pelas seguintes razões: Em primeiro lugar, a palavra assistiva não existe, ainda, nos dicionários da língua portuguesa. Mas também a palavra *assistive* não existe nos dicionários da língua inglesa. Tanto em português como em inglês, trata-se de uma palavra que vai surgindo aos poucos no universo vocabular técnico e/ou popular. É, pois, um fenômeno rotineiro nas línguas vivas. Assistiva (que significa alguma coisa "que assiste, ajuda, auxilia") segue a mesma formação das palavras com o sufixo "tiva", já incorporadas ao léxico português.[...] Nestes tempos em que o movimento de vida independente vem crescendo rapidamente em todas as partes do mundo, o tema tecnologia assistiva insere-se obrigatoriamente nas conversas, nos debates e na literatura. Urge, portanto, que haja certa uniformidade na terminologia adotada, por exemplo com referência à confecção/fabricação de ajudas técnicas e à prestação de serviços de intervenção tecnológica junto a pessoas com deficiência. (SASSAKI, 1996)

A padronização desta terminologia foi adotada com a publicação de uma obra do Comitê de Ajudas Técnicas (CAT), da Secretaria Especial dos Direitos Humanos da Presidência da República (SEDH) ligado a um de seus órgãos, a Coordenadoria Nacional para a Integração da Pessoa Portadora de Deficiência (CORDE), o qual aprovou por unanimidade que:

Tecnologia Assistiva é uma área do conhecimento, de característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação de pessoas com deficiência, incapacidades ou mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social (GALVÃO FILHO *et alii*, 2009, p. 26)

A Tecnologia Assistiva é uma área atribuída a profissionais das mais diversas áreas do conhecimento que trabalham em conjunto durante toda a etapa de estudo e fabricação de um produto com o objetivo de potencializar as aptidões funcionais das pessoas com deficiência (CAT, 2007.b). Estes produtos advindos da TA são comumente denominados dispositivos assistivos. Estes, segundo o Relatório Mundial Sobre a Deficiência (2011), são “quaisquer dispositivos criados, fabricados ou adaptados para ajudar a pessoa a desempenhar uma tarefa em particular. Os produtos podem ser produzidos especificamente ou estar genericamente disponíveis para pessoas com deficiência”.

No Decreto nº 3.298 de 20 de dezembro de 1999, referente ao direito do cidadão brasileiro às Ajudas Técnicas, tem-se que: “Consideram-se ajudas técnicas, para os efeitos deste Decreto, os elementos que permitem compensar uma ou mais limitações funcionais motoras, sensoriais ou mentais da pessoa portadora de deficiência, com o objetivo de permitir-lhe superar as barreiras da comunicação e da mobilidade e de possibilitar sua plena inclusão social” (BRASIL, 1999).

Assim, pode-se considerar um recurso de tecnologia assistiva qualquer artefato ou recurso empregado para propiciar as habilidades funcionais de indivíduos com deficiência e fornecer o mínimo de estrutura necessária para aprimorar suas funcionalidades com a finalidade de aumentar a autonomia e a independência destas (BERSH; TONOLLI, 2006). Como destaca Lauand (2005):

[...] No sentido amplo, o objeto da tecnologia assistiva é uma ampla variedade de recursos destinados a dar suporte (mecânico, elétrico, eletrônico, computadorizado, etc.)

à pessoas com deficiência física, visual, auditiva, mental ou múltipla. Esses suportes podem ser, por exemplo, uma cadeira de rodas [...], uma prótese, uma órtese, e uma série infindável de adaptações, aparelhos e equipamentos nas mais diversas áreas de necessidade pessoal (comunicação, alimentação, transporte, educação, lazer, esporte, trabalho, elementos arquitetônicos e outras). (LAUAND, 2005, p. 30)

Também no Decreto nº 3.298 de 1999 são descritos os grupos nos quais as assistências técnicas se enquadram:

- I. Próteses físicas, visuais e auditivas;
- II. Órteses que contribuem na adequação funcional;
- III. Equipamentos e elementos necessários à terapia e reabilitação da pessoa portadora de deficiência;
- IV. Equipamentos, maquinarias e utensílios de trabalho especialmente desenhados ou adaptados para uso por pessoa portadora de deficiência;
- V. Elementos de mobilidade, cuidado e higiene pessoal necessários para facilitar a autonomia e a segurança da pessoa portadora de deficiência;
- VI. Elementos especiais para facilitar a comunicação, a informação e a sinalização para pessoa portadora de deficiência;
- VII. Equipamentos e material pedagógico especial para educação, capacitação e recreação da pessoa portadora de deficiência;
- VIII. Adaptações ambientais e outras que garantam o acesso, a melhoria funcional e a autonomia pessoal;
- IX. Bolsas coletoras para os portadores de ostomia (BRASIL, 1999).

Complementarmente, Bersch e Tonolli (2006) definiram as classificações como:

- I. Auxílios para a vida diária: materiais e produtos para auxílio em tarefas rotineiras;
- II. CAA (CSA): Comunicação aumentativa (suplementar) e alternativa: recursos que permitem a comunicação das pessoas com limitações de fala;
- III. Recursos de acessibilidade ao computador: recursos que permitem às pessoas com deficiência a usarem o computador;
- IV. Sistemas de controle de ambiente: sistemas eletrônicos que permitem pessoas com limitações moto-locomotoras controlar remotamente aparelhos e sistemas;
- V. Projetos arquitetônicos para acessibilidade: Adaptações estruturais que facilitam a locomoção da pessoa com deficiência;

- VI. Órteses e próteses: troca ou ajuste de partes do corpo por membros artificiais ou outros recursos ortopédicos;
- VII. Adequação postural: adaptações de sistemas para propiciar estabilidade e postura adequada;
- VIII. Auxílios de mobilidade: veículo utilizado na melhoria da mobilidade pessoal;
- IX. Auxílios para cegos ou com visão subnormal: recursos que facilitem a comunicação, leitura de documentos, entre outros;
- X. Auxílios para surdos ou com déficit auditivo: recursos que auxiliem portadores de deficiência auditiva, como aparelhos para surdez;
- XI. Adaptações em veículos: acessórios e adaptações que possibilitam a condução de equipamentos.

Dado que este trabalho baseia seu projeto em um dispositivo assistivo que visa auxiliar na alimentação de portadores de deficiência motora, a classificação de TA a ser utilizada é a de “Auxílios para a vida diária”. Proporcionar condições mínimas aos portadores de deficiência é essencial e incontestável, ainda assim é de suma importância a realização de estudo prévio desses dispositivos assistivos a fim de não acarretar em posterior abandono por parte dos usuários. Para tal fim, é fundamental a aplicação correta das ferramentas de análise e etapas de projeto mecânico, levando em consideração a opinião do usuário com a finalidade de solucionar os desafios e barreiras impostas pela utilização desses dispositivos (CRUZ; EMMEL, 2016).

2.3 Técnica de Projeto de Análise das Variantes de Solução

A engenharia busca contribuir com a humanidade por meio da conversão de fontes de energia e recursos naturais em estruturas, produtos e máquinas. Pode-se dizer, portanto, que os projetos de engenharia foram desenvolvidos com a finalidade de suprir as necessidades e desejos humanos (SOUZA, 2017). Para Ashby (2005), os produtos podem ser gerados por meio de um processo de conversão de uma necessidade de mercado ou nova ideia em informação detalhada.

Todo projeto de engenharia, até a obtenção do produto final, deve obedecer a algumas etapas de projeto como: (I) definição da função do produto; (II) escolha dos tipos de materiais a serem utilizados; (III) criação de um projeto experimental; (IV) realização do protótipo; (V) reavaliação e (VI) refino sistemático do produto de acordo com as regras e normas

necessárias, além de compará-lo a soluções já existentes no mercado (SOUZA, 2017).

Se, durante a etapa de seleção dos materiais, houver alguma escolha errada, todas as etapas posteriores do produto se comprometem, inviabilizando o produto final. Com o descobrimento de novos materiais a cada dia e com as diversas alternativas em relação a como elaborar um projeto, a seleção de materiais é uma das etapas de maior cuidado, complexidade e importância do projeto (SCHELESKI, 2015).

A Figura 3 representa o esquema para a elaboração de um projeto.

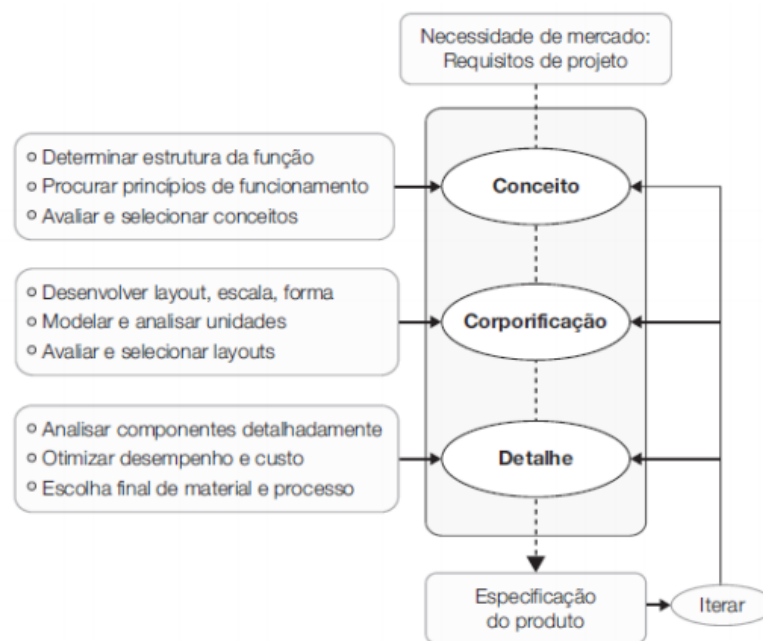


Figura 3 - Fluxograma geral da metodologia de projeto

(Fonte: ASHBY; JONES, 2007)

A utilização de um procedimento metódico de projeto é pertinente para que o engenheiro projetista elabore uma solução de maneira sistemática com o auxílio de métodos apropriados e não tenha simplesmente uma ideia de solução apropriada (PAHL et al. 2005).

Um dos métodos a serem empregados no contexto de desenvolvimento de um produto é o de avaliação de variantes da solução. Esta metodologia está incluída no conjunto de métodos para busca, planejamento e avaliação da solução e, portanto, é a última etapa da sequência de métodos.

As fases comumente empregadas no desenvolvimento de um produto são (I) o planejamento do produto em si, onde reúnem-se todos os requisitos necessários que o produto

deve cumprir e (II) a fase de busca da solução, onde estes requisitos são analisados individualmente e pensa-se na melhor alternativa para cada ponto, contemplando todos os atributos imprescindíveis na proposta de solução do produto. São, também nesta etapa, levadas em consideração outras exigências como custo do produto, restrições impostas pelo fabricante, possibilidade de produção, prazos de entrega, entre outros (PAHL et al. 2005).

De acordo com Pahl et al. (2005), os métodos convencionais para a busca desta solução percorrem processos de coleta, como pesquisas bibliográficas, de patentes, de produtos já existentes, muitas vezes encontrados em catálogos dos concorrentes, entre outros; análise de sistemas naturais, de sistemas técnicos conhecidos, analogias e medições e testes com modelos.

Tendo o conceito das soluções pretendidas e as inúmeras soluções possíveis em mãos, a próxima etapa engloba os processos de seleção e avaliação da solução. É neste estágio que os métodos de seleção e avaliação de variantes da solução estão inseridos. Retirada de Back *et alii* (2008), a Tabela 1 mostra atividades de processos sistematizados, na qual são indicados métodos de múltiplos atributos para a escolha da melhor concepção.

Tabela 1 - Atividades do processo de avaliação e seleção da concepção do produto

<u>Nº</u>	<u>Atividades</u>	<u>Métodos</u>	<u>Resultados</u>
1	Descrição e Apresentação das Concepções Alternativas	Reunião da Equipe de Projeto	Concepções Apresentadas
2	Apresentação e Seleção de Critérios Generalizados	Análise da Lista de Critérios Generalizados	Critérios Generalizados do Produto
3	Escolha do Método de Triagem	Métodos: passa-não-passa, Atendimento de Limites, Método de Pugh	Método de Triagem Selecionado
4	Elaboração da Triagem das Concepções	Método de Triagem Selecionado	Concepções que Passaram a Triagem
5	Detalhar e Reapresentar as Concepções Viáveis	Descrição Escrita e Verbal, com Desenhos Esquemáticos	Concepções Reapresentadas e Analisadas
6	Definição dos Critérios Especificados	Dimensionamento dos Atributos Generalizados	Critérios Específicos Dimensionados
7	Escolha do Método de Valorização das Concepções	Método da Função Utilidade	Método de Valoração Escolhido
8	Determinação dos Pesos dos Critérios	Método de Delphi e de Comparação de Critérios	Valores de Importância dos Critérios
9	Valoração dos Critérios	Avaliação das Soluções e Valoração dos Critérios	Critérios Valorados
10	Determinação do Valor da Função Utilidade e Ordenação das Concepções	Ordenação por Valores Absolutos ou Relativos	Concepções Ordenadas
11	Análise das Melhores Concepções	Análise de Sensibilidade e dos Perfis das Concepções	Seleção da Melhor Concepção

Fonte: Adaptado de Back (2008)

2.3.1 Seleção de Variantes da Solução

No procedimento metodológico deseja-se elencar a mais extensa gama de soluções possível, apresentando uma grande quantidade de propostas de solução para os critérios considerados. Muitas destas soluções são teoricamente concebíveis, contudo na prática não são realizáveis e, portanto, indesejáveis. Estas devem ser desconsideradas o mais precocemente possível, porém é necessário se atentar para não desconsiderar os princípios de trabalho adequados. Para que a seleção seja administrada de maneira descomplicada, a ajuda de um método de seleção sistemático e verificável é essencial (PAHL et al., 2005).

Segundo Pahl et al. (2005) este método conta com o emprego da eliminação e da priorização. Desta maneira, primordialmente são eliminadas as soluções completamente inadequadas e, em seguida, priorizadas as melhores. As soluções remanescentes devem ser avaliadas para se aprovarem somente as propostas de solução que atendam aos seguintes critérios:

- I. Ser compatível com a tarefa global e/ou entre si;
- II. Satisfazer as necessidades da lista de requisitos;
- III. Possibilitar pressentir uma possibilidade de realização com relação ao nível de trabalho, tamanho, arranjo necessário, além de outros itens;
- IV. Permitir antecipar um custo aceitável.

Os critérios são excludentes e devem ser analisados na ordem proposta, sendo os I e II respondidos por sim ou não, enquanto os critérios III e IV exigem uma análise de cunho quantitativo. Logo, se uma proposta não passa em algum dos critérios, os demais não são aplicados e esta é automaticamente retirada da lista de possíveis soluções. Ao término do processo, deve-se obter uma pequena quantidade de propostas, que serão ponderadas através destes mesmos critérios. Esse procedimento de triagem fornece um registro completo acerca dos motivos de seleção (PAHL et al., 2005).

2.3.2 Avaliação de Variantes da Solução

De acordo com Vladu, Dobre e Mirica (2013), com o intuito principal de produção em larga escala e conformidade com os requisitos dos clientes, a análise e avaliação de diferentes conceitos ou variantes de solução de um produto, e também a determinação da solução ótima se torna uma questão muito atual no processo de desenvolvimento de um produto.

As variantes de solução apontadas pelo processo de seleção como aptas a uma continuação de seu desenvolvimento necessitam de maiores análises a fim de serem concretizadas antes da avaliação final, que envolve a atribuição de valores técnicos, ecológicos, econômicos e de segurança. Para tal, foram elaborados procedimentos de avaliação aplicáveis em qualquer fase do desenvolvimento de um produto mediante a apropriada escolha dos critérios de avaliação. Para Eifler et al. (2011), o trabalho é mais eficaz se, para a avaliação das soluções, somente forem levadas em consideração as soluções que atendam às necessidades dos clientes.

O cálculo do “valor” de importância de uma solução é feito no final da etapa conceitual, sendo, portanto, preciso já ter concluído as etapas de trabalho anteriores. Nesta avaliação deve-se calcular o valor, benefício ou potência de uma solução proposta quando comparada a um objetivo predeterminado. Esse valor calculado deve ser sempre analisado utilizando como referência os requisitos. Ademais, a avaliação também inclui comparações entre as diversas soluções analisadas, denominadas também de variantes da solução, ou entre

essas soluções e uma solução ideal hipotética, através de uma pontuação, como grau de aproximação das soluções analisadas e da hipotética (PAHL et al., 2005).

Os métodos de avaliação abrangem etapas de identificação dos critérios de avaliação para posterior análise das soluções identificadas (variantes da solução), análise tanto da relevância destas soluções para o valor global do projeto quanto de acordo com as noções de valor e comparação entre estas variantes para identificação da melhor solução. Vários são os métodos existentes para a obtenção da avaliação das variantes de uma solução, porém neste trabalho o método apresentado e utilizado será o de análise com base nos valores da engenharia de sistemas, presente em Pahl et al. (2005).

2.3.3 Fundamentos dos Métodos de Avaliação

Para Pahl et al. (2005), uma avaliação deve calcular o valor, benefício ou a potência de uma solução em relação a um objetivo predeterminado, sendo este indispensável uma vez que o valor de uma solução é mensurado em relação a este objetivo e alguns requisitos para que tal seja satisfeito.

Eifler et al. (2011) consideram que possíveis soluções são alcançadas através da variação de efeitos, assim como através da variação de propriedades e, com frequência, engenheiros de projeto procuram por efeitos que abrangem as propriedades necessárias. Para a escolha da solução mais promissora, uma avaliação em cada nível de materialização é necessária. Dessa maneira, somente soluções que satisfaçam os requisitos dos clientes são futuramente elaboradas e usadas para a geração de novas variantes. Assim, o esforço para elaboração e avaliação de soluções é reduzido.

Atualmente, a análise com base nos valores da engenharia de sistemas e a avaliação técnico-econômica de acordo com a diretriz VDI 2225 são os métodos mais utilizados para a avaliação das variantes de uma solução (PAHL et al., 2005).

São necessários métodos que permitam uma avaliação mais abrangente, uma vez que esta deve estar em conformidade com os objetivos gerais e levar em conta todas as influências na justa proporção, não se baseando somente em aspectos pontuais como custos de produção, segurança, meio ambiente ou questões de ergonomia. A avaliação deve se iniciar pela identificação de critérios de avaliação pelos quais as variantes poderão ser avaliadas. Em seguida, é feita uma análise da relevância dessas variantes para o valor global do projeto,

como também uma avaliação de acordo com as noções de valor. Por fim, é realizada uma comparação entre as variantes de solução propostas.

2.3.4 Identificação de Critérios de Avaliação

Pahl et al. (2005) defendem que, primeiramente, deve-se construir o conjunto de objetivos para, com base neles, elencar os consequentes critérios que serão utilizados para a avaliação das variantes. Esse processo de avaliação deve abranger a maior quantidade de critérios de projeto possível, como custo de produção, segurança, ergonomia, prazos, requisitos de clientes, meio-ambiente, normas técnicas, entre outros. Durante a estipulação e identificação desses objetivos, algumas condições como as especificadas abaixo devem ser satisfeitas, além de a meta traçada abarcar muitas outras que incorporem fatores de segurança, técnicos, econômicos, entre outros fatores de atenção customizados.

- I. Para que todos os critérios essenciais sejam contemplados, as metas precisam satisfazer tanto as condicionantes gerais quanto os requisitos decisivos relevantes;
- II. A avaliação é direcionada pelas metas individuais. Estas, por sua vez, devem ser independentes;
- III. As características devem ser expressas em termos verbais quantitativos ou qualitativos em relação aos objetivos.

A etapa do projeto, assim como o nível de inovação do produto e do propósito da avaliação em questão, interferem na seleção desses objetivos. Para eles, devem ser atribuídos sentidos de avaliação uniformes como “baixo ruído” ao contrário de “barulhento”; “maior eficiência” ao invés de “grandes perdas”, para posterior atribuição de valores (PAHL et al., 2005).

Em seguida, conforme exemplificado na Figura 4, cada um dos objetivos é segmentado em categorias para a elaboração de uma árvore de objetivos, na qual os mesmos são colocados horizontalmente de acordo com os setores relacionados no desenvolvimento (econômico, técnico, meio ambiente, etc.) ou importâncias (principal, secundária...) e, verticalmente, são colocadas as metas em grau decrescente de complexidade (PAHL et al., 2005).

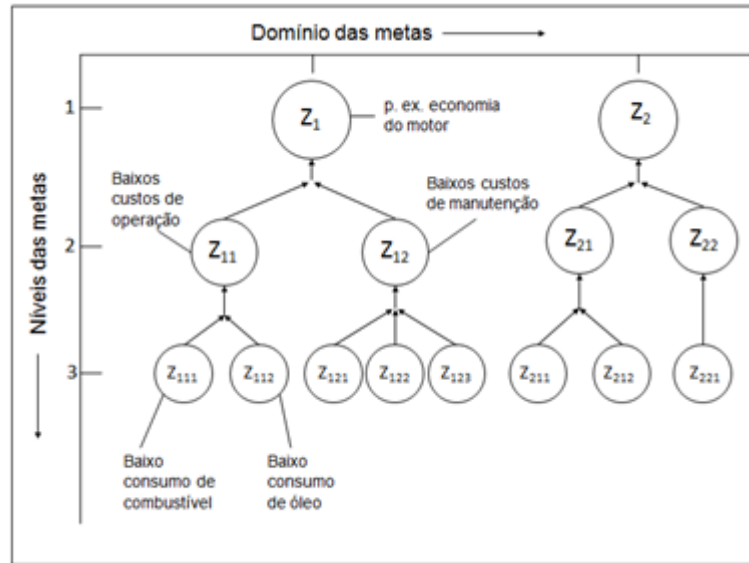


Figura 4 - Estrutura do sistema de metas

(Fonte: PAHL et al., 2005)

As metas somente se interligam entre níveis adjacentes, conforme apresentado acima, para facilitar não só o trabalho do projetista ao averiguar que todas as metas relevantes foram englobadas, mas também no cômputo de suas importâncias relativas para a análise do valor global (PAHL et al., 2005).

Pode-se dizer, portanto, que as metas das etapas de menor complexidade são responsáveis pela criação dos critérios-alvo (ou critérios de avaliação) (PAHL et al., 2005).

2.3.5 Análise da Relevância para o Valor Global

Para formulação dos critérios de avaliação, é preciso primeiramente analisar o peso (importância relativa) dos critérios de avaliação para o valor global da solução com o intuito de eliminar os de nenhuma relevância. Com os restantes, determina-se números reais entre 0 e 100 ou 0 e 1 que correspondam a sua contribuição relativa, intitulados “fatores de ponderação ou peso”. Esta nota deve ser distribuída entre todos os critérios (também denominados metas) de forma a, ao terminar, gerar uma importância percentual das metas (logo, a soma dos fatores de todos os critérios deverá somar 100 ou 1) (PAHL et al., 2005).

Para simplificar, Pahl et al. (2005) sugeriu estruturar as metas em um formato de árvore, conforme exemplificado na Figura 5. Aos objetivos são atribuídos fatores ponderais e divide-os em níveis de ordem decrescente de complexidade, ordem esta que também será seguida na avaliação das metas. No exemplo, os objetivos foram dispostos em quatro níveis e

preenchidos com fatores ponderais. A avaliação deve ser iniciada no nível de objetivos de maior complexidade (nível 4) e avançar sequencialmente aos de menor complexidade. Desta forma, as metas Z1111 e Z 1112 serão analisadas primeiramente em relação à Z111. É importante salientar que a soma desses fatores ponderais de qualquer nível é obrigatoriamente igual a 1.

Para analisar o fator de ponderação de uma meta com relação à meta de nível 1, basta multiplicar o fator da meta analisada pelos fatores das metas superiores. Tendo como exemplo ainda a figura 5, a meta Z1111 tem fator de ponderação 0,25 quando comparada a Z111. Já quando comparada a Z1, seu fator de ponderação é $0,25 \times 0,67 \times 0,5 \times 1 = 0,083$. Este método permite a identificação de um valor mais legítimo sobre qual é a real importância de um objetivo quando comparado aos demais e, conseqüentemente, quais devem ser priorizados (PAHL et al., 2005).

Assim, na árvore, preenche-se o numeral do fator de ponderação propriamente dito no quadrante da esquerda, enquanto o numeral do quadrante da direita significa o peso do fator de ponderação da respectiva meta em relação à ponderação do nível 1.

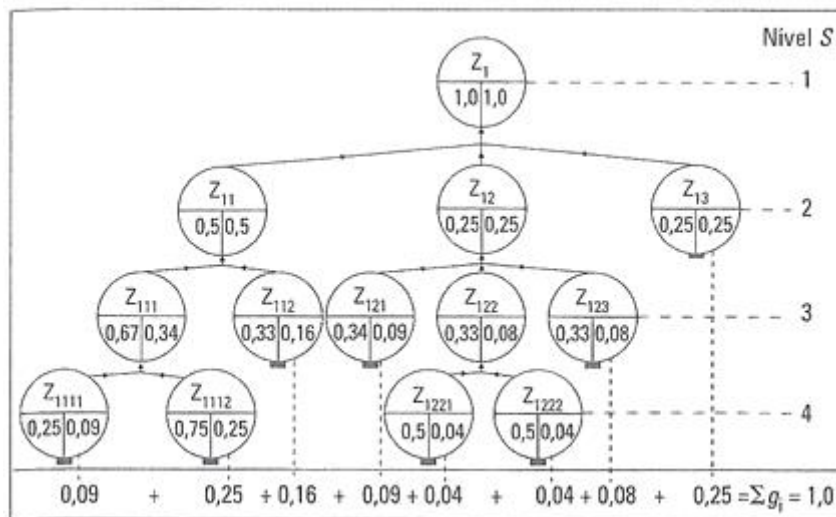


Figura 5 - Determinação de todos os níveis dos fatores de ponderação das metas de um sistema de metas
(Fonte: PAHL et al., 2005)

2.3.6 Composição dos Parâmetros

Definidos os critérios e suas respectivas relevâncias, o passo seguinte é compará-los

aos parâmetros anteriormente determinados de maneira analítica. Para tal, utiliza-se uma folha de avaliação, conforme representada na Figura 6 por meio de um exemplo de avaliação de motores de combustão interna. Os critérios de avaliação (também chamados de critérios-alvo) e os parâmetros (ou variáveis-alvo) selecionados são colocados nas duas primeiras colunas e, nas demais, as variantes de solução. Preenchem-se nas respectivas colunas das variantes os respectivos valores dos parâmetros e critérios (PAHL et al., 2005).

Critérios de avaliação			Parâmetros		Variante V_1 (p.ex. M_1)			Variante V_2 (p.ex. M_2)			...	Variante V_j			...	Variante V_m		
Nr.		fator		unidade	carac- terística	valor	valor ponderado	carac- terística	valor	valor ponderado	...	carac- terística	valor	valor ponderado	...	carac- terística	valor	valor ponderado
					e_{11}	w_{11}	wg_{11}	e_{12}	w_{12}	wg_{12}	...	e_{1j}	w_{1j}	wg_{1j}	...	e_{1m}	w_{1m}	wg_{1m}
1	baixo consumo de combustível	0,3	consumo de combustível	g/kWh	240			300			...	e_{1j}			...	e_{1m}		
2	construção leve	0,15	potência específica	kg/kW	1,7			2,7			...	e_{2j}			...	e_{2m}		
3	fácil fabricação	0,1	simplicidade das peças fundidas	—	baixo			médio			...	e_{3j}			...	e_{3m}		
4	elevado tempo de vida	0,2	tempo de vida	quilome- tragem	80.000			150.000			...	e_{4j}			...	e_{4m}		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮			⋮			⋮	⋮			⋮	⋮		
i		g_i			e_{i1}			e_{i2}			...	e_{ij}			...	e_{im}		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮			⋮			⋮	⋮			⋮	⋮		
n		g_n			e_{n1}			e_{n2}				e_{nj}				e_{nm}		
		$\sum_{i=1}^n g_i = 1$																

Figura 6 - Lista de avaliação que correlaciona critérios de avaliação e parâmetros

(Fonte: PAHL et al., 2005)

2.3.7 Avaliação Segundo Noções de Valor

Passado pela atribuição de ideias de valor e dos parâmetros previamente determinados, deve-se realizar uma avaliação pela metodologia definida pela análise com base nos valores da engenharia de sistemas com a finalidade de obtenção dos valores desses parâmetros. Para a determinação dos valores é utilizado um sistema de pontos de 0 a 10, conforme exposto na Tabela 2, sendo 0 insatisfatório e 10 extremamente satisfatório (PAHL et alii, 2005).

Tabela 2 – Escala de valores da análise de valor

Pontuação	Análise do Valor Útil (Significado)
0	Solução absolutamente não utilizável
1	Solução muito deficiente
2	Solução fraca
3	Solução sustentável
4	Solução suficiente
5	Solução satisfatória
6	Solução boa com poucas falhas
7	Solução boa
8	Solução muito boa
9	Solução excedendo os requisitos
10	Solução ideal

Fonte: Adaptado de PAHL et al., 2005

Os valores atribuídos para cada uma das variantes são, então, adicionados em suas respectivas colunas na lista de avaliação (W_{ij}), como mostra a Figura 7 (PAHL et al., 2005).

Nr.	Critérios de avaliação		Parâmetros		Variante V_1 (p.ex. M_1)			Variante V_2 (p.ex. M_2)			... Variante V_j			... Variante V_m				
		Fator		Unidade	carac- terística	valor	valor ponderado	carac- terística	valor	valor ponderado	carac- terística	valor	valor ponderado	carac- terística	valor	valor ponderado		
					e_{n1}	w_{n1}	wg_{n1}	e_{n2}	w_{n2}	wg_{n2}	...	e_{nj}	w_{nj}	wg_{nj}	...	e_{nm}	w_{nm}	wg_{nm}
1	baixo consumo de combustível	0,3	consumo de combustível	g/kWh	240	8	2,4	300	5	1,5	...	e_{1j}	w_{1j}	wg_{1j}	...	e_{1m}	w_{1m}	wg_{1m}
2	construção leve	0,15	potência específica	kg/kW	1,7	9	1,35	2,7	4	0,6	...	e_{2j}	w_{2j}	wg_{2j}	...	e_{2m}	w_{2m}	wg_{2m}
3	fácil fabricação	0,1	simplicidade das peças fundidas	—	complicado	2	0,2	médio	5	0,5	...	e_{3j}	w_{3j}	wg_{3j}	...	e_{3m}	w_{3m}	wg_{3m}
4	elevado tempo de vida	0,2	tempo de vida	quilometragem	80.000	4	0,8	150.000	7	1,4	...	e_{4j}	w_{4j}	wg_{4j}	...	e_{4m}	w_{4m}	wg_{4m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
i		g_i			e_{i1}	w_{i1}	wg_{i1}	e_{i2}	w_{i2}	wg_{i2}	...	e_{ij}	w_{ij}	wg_{ij}	...	e_{im}	w_{im}	wg_{im}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n		g_n			e_{n1}	w_{n1}	wg_{n1}	e_{n2}	w_{n2}	wg_{n2}	...	e_{nj}	w_{nj}	wg_{nj}	...	e_{nm}	w_{nm}	wg_{nm}
		$\sum_{i=1}^n g_i = 1$				Gw_1 W_1	Gwg_1 Wg_1		Gw_2 W_2	Gwg_2 Wg_2			Gw_j W_j	Gwg_j Wg_j			Gw_m W_m	Gwg_m Wg_m

Figura 7 - Lista de avaliação com todos os campos completos

(Fonte: PAHL et al., 2005)

Pahl et al. (2005) descrevem que os fatores de ponderação estipulados na segunda etapa dos critérios de avaliação com relevâncias distintas para o valor global da solução também são levados em consideração. Portanto, atribuídos os valores, é necessário determinar o valor ponderado de cada critério de avaliação dentro de cada variante. Para este cálculo, basta multiplicar os valores conferidos para cada variante pelo fator de ponderação do critério de avaliação. Ou seja, devem-se multiplicar seus valores parciais W_{ij} pelos fatores de ponderação G_i referentes, conforme explicitado na equação 1

$$WG_{ij} = G_i \times W_{ij} \quad \text{Eq. (1)}$$

Sendo W_{ij} o valor parcial de avaliação de cada critério e G_i o respectivo valor de ponderação.

2.3.8 Determinação do Valor Global

Com os subvalores de cada variante, o passo seguinte é a determinação de seus respectivos valores globais. Por meio do somatório dos valores das colunas “Valor W_{ij} ” de cada variante é possível obter os valores globais não ponderados, enquanto os ponderados são conseguidos através do somatório dos valores das colunas “Valor Ponderado WG_{ij} ”, conforme mostrado abaixo nas equações 2 e 3.

$$Gw_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$Gwg_j = \sum_{i=1}^i g_i \cdot w_{ij} = \sum_{i=1}^n wg_{ij} \quad \text{Eq. (3)}$$

Avaliam-se, com base na regra do somatório, as variantes de inúmeras maneiras. Segundo Pahl et al. (2005), o melhor método para identificação da melhor variante é o de Determinação do Valor Global Máximo, o qual será utilizado neste trabalho. Nele, defende-se que a melhor variante é a que possui maior valor global.

Para Callister (2002), a escolha de um material não pode ser realizada sem considerar os processos de fabricação exigidos. Assim, tendo em mãos a melhor variante segundo a técnica de projeto de análise das variantes de solução, é possível estudar o melhor material para fabricação do produto que cumpra os requisitos da variante de acordo com sua escolha de fabricação.

2.4 Manufatura Aditiva

2.4.1 Conceitos de Manufatura Aditiva

Manufatura Aditiva (MA) foi definida por Frazier (2014) e Huang et al. (2013) como um processo de unir materiais para fazer objetos a partir de informações do modelo tridimensional, geralmente camada após camada, em oposição às metodologias de manufatura subtrativas. A Manufatura Subtrativa por sua vez consiste na remoção de materiais a partir da matéria-prima, tal como os processos de fresagem, moagem e perfuração (MAHAMOOD et al., 2014). Tal definição de Manufatura Aditiva é aplicável a todas as classes de materiais, incluindo metais, polímeros, cerâmicas, compósitos e sistemas biológicos (FRAZIER, 2014).

Segundo Huang et al. (2013), a Manufatura Aditiva – também conhecida como fabricação rápida ou prototipagem rápida – cria a forma final por meio da adição de materiais, ao contrário dos processos de fabricação convencionais onde a forma final é criada a partir da retirada (subtração) de materiais. Diversos autores (GOODRICH, 2014; MINETOLA et al., 2015; PEARSONS, 2015) utilizam como base o conceito de Manufatura Aditiva da *American Society for Testing and Materials* (ASMT), organização estadunidense que tem como objetivo desenvolver e publicar normas técnicas para uma ampla gama de materiais, produtos, sistemas e serviços. A fim de complementar esse conceito, Ford (2014) ressaltou que a Manufatura Aditiva é um conjunto de tecnologias emergentes que fabrica objetos tridimensionais, e não somente a impressão em 3D.

A utilização da manufatura aditiva por parte de indivíduos e empresas pode fornecer inúmeros benefícios, acarretando assim em uma crescente adoção nos últimos anos. A viabilidade econômica e personalização do design de cada produto fabricado permitem mudanças no design em um pequeno lote de peças com maior velocidade, proporcionando assim uma cadeia logística simplificada (HOLMSTROM et al., 2010). Segundo Berman (2012), a capacidade de produzir peças com design complexo, facilidade de compartilhamento de projetos, a otimização da utilização de material, a produção automatizada e a capacidade de produzir peças funcionais são aspectos em que a manufatura aditiva se destaca. Em concordância com todos os fatores apresentados, alia-se também a sustentabilidade já que o processo da manufatura aditiva utiliza menos material, gera menos resíduo de produção e consome pouca energia elétrica.

Apesar das vantagens, é possível identificar alguns fatores limitantes na utilização da manufatura aditiva, tal como a menor precisão dimensional em relação aos métodos convencionais de produção, a pequena variedade de materiais e cores disponíveis para

utilização e a resistência limitada à tensão, ao calor e à umidade elevada (BERMAN, 2012).

Os altos custos de equipamentos, manutenção e materiais constituem uma das principais barreiras à utilização da manufatura aditiva, contudo a crescente adoção da tecnologia pela indústria vem causando a redução de custos e surgimento de equipamentos menos caros no mercado (HOPKINSON; DICKENS, 2013). Carter (2014) destaca que o emprego da manufatura aditiva por parte de indústrias e empresas em peças finais possibilita aumentos da velocidade de produção de vinte vezes. Esse aumento da produtividade consequentemente levará a uma redução de custos totais de produção.

As etapas necessárias para a produção utilizando manufatura aditiva foram definidas por Gibson et al. (2009) como sendo:

- I. Modelagem CAD (*Computer-aided design*): definição da geometria externa por meio de um modelo numérico (software)
- II. Conversão para STL (*Surface Tessellation Language*): padrão de formato da indústria
- III. Transferência para a máquina de manufatura aditiva e manipulação do arquivo
- IV. Configuração da máquina: definição de parâmetros como tempo de produção e espessura das camadas, entre outros.
- V. Produção: baixa necessidade de supervisão por parte de um funcionário
- VI. Remoção: retirada da peça da máquina
- VII. Pós-processamento: atividades adicionais como a retirada de estruturas de suporte e limpeza
- VIII. Aplicação: peça pronta para uso

2.4.2 Evolução da Manufatura Aditiva

Apesar de ser uma tecnologia evidenciada simultaneamente à indústria 4.0, a Manufatura Aditiva não é uma tecnologia nova. No final da década de 80, foi utilizada para a fabricação de protótipos conceituais e funcionais, inicialmente conhecida como prototipagem rápida (ZHANG, 2014). Os protótipos que antes levavam dias, ou até mesmo meses para serem desenvolvidos devido ao elevado número de passos ou fases, passaram a ser realizados de forma rápida em algumas horas por meio da Prototipagem Rápida (MAHAMOOD et al.,

2014). A utilização da manufatura aditiva no desenvolvimento de protótipos por parte de universidades e grandes empresas cresceu, contudo o elevado custo dos equipamentos e dos materiais além das aplicações limitadas impediu o acesso para empresas na década de 80 (MILLER, 2014).

Já na década de 1990, o *Wake of Regenerative Medicine* nos Estados Unidos utilizou a Manufatura Aditiva para imprimir estruturas em três dimensões, reproduzindo órgãos humanos (PRINCE, 2014). Nesse mesmo período, estudos voltados para a identificação de novos materiais que pudessem ser utilizados com essa tecnologia emergiram, assim como os polímeros. Segundo Crump (2016), ao longo desses últimos 20 anos, as tecnologias de Manufatura Aditiva migraram desse processo de Prototipagem Rápida para uma solução de manufatura digital direta, aplicada na produção de bens finais e não apenas de protótipos.

Veit (2018) ressalta que “a história da Manufatura Aditiva pode ser dividida em quatro correntes”. A primeira delas é a prototipagem, em outros termos, se trata da sua utilização de maneira tímida para criação de protótipos, porém com custos elevados de materiais e de equipamentos. A segunda corrente aborda as aplicações da manufatura aditiva propriamente ditas, por meio de pesquisas que procuravam evidenciar onde a tecnologia poderia ser empregada no contexto das empresas. Uma vez que as aplicações eram pertinentes, a terceira corrente de pesquisas inclinou-se para os materiais e equipamentos. Por sua vez, a corrente de estudos mais recente está voltada para a preocupação da substituição dos processos de fabricação tradicionais da manufatura aditiva.

2.4.3 Tecnologias de Manufatura Aditiva

Huang et al. (2013) apresenta a tecnologia de Manufatura Aditiva em três etapas básicas: (i) um modelo sólido em 3D computadorizado é desenvolvido e convertido em um arquivo padrão com o formato tradicional e linguagem padrão; (ii) o arquivo é enviado para um equipamento de manufatura aditiva onde será produzido; e (iii) será construído camada a camada no equipamento.

Existem diversas formas de classificação da Manufatura Aditiva considerando a maneira de endurecimento ou tecnologia da fonte de calor utilizada para fusão (GARDAN, 2016). As tecnologias se subdividem em sistemas baseados em líquido, em sólido e em pó, logo, há diferentes gamas de materiais com as quais estas tecnologias trabalham, além de produzirem produtos com características diferentes (LEONG, 2010). O detalhamento das

técnicas de impressão neste trabalho será baseado na classificação proposta por Rodrigues et al. (2016), que classifica as tecnologias de manufatura aditiva pela matéria-prima como: líquido, filamento/pasta, pó e placa sólida, conforme a Figura 8 a seguir.

Líquido	Filamento/Pasta	Pó	Placa sólida
<ul style="list-style-type: none"> • SLA • MJM • RFP 	<ul style="list-style-type: none"> • FDM • Robocasting • FEF 	<ul style="list-style-type: none"> • SLS • SLM • EBM • LDM, LENS, DMD • 3DP 	<ul style="list-style-type: none"> • LOM

Figura 8 – Classificações de tecnologias de manufatura aditiva

(Fonte: Adaptado de Rodrigues et al., 2016)

As técnicas apresentadas utilizam (i) a fotopolimerização para a matéria-prima líquida como método de fabricação dos produtos, ou seja, a resina líquida passa por um processo de cura por meio da incidência de luz ultravioleta; (ii) a extrusão para matéria-prima em filamento, que consiste na deposição do material através de um bocal extrusor responsável pela fusão da matéria-prima que será solidificada depois de depositada; (iii) a fusão em cama de pó, quando realiza-se a fusão seletiva de regiões em uma camada de pó depositado; (iv) e a laminação de folhas, que realiza a união de placas ou folhas através de oscilação ultrassônica.

Segundo Rodrigues et al. (2016) as técnicas de maior utilização comercial são a estereolitografia (SLA), sinterização seletiva a laser (*selective laser sintering* - SLS) e modelagem por deposição de material fundido (FDM). A técnica SLA consiste na produção de um objeto tridimensional por meio da foto-polimerização de uma resina líquida sobre uma plataforma pela incidência de um feixe de laser ultravioleta direcionado por um sistema de espelhos galvanométricos, causando assim, o endurecimento da resina, formando a camada do produto final. Após a formação desta camada, a plataforma é abaixada em uma cuba preenchida com resina e uma nova camada surge sobre a anterior, reiniciando-se o processo até a formação do objeto final. Após o processo de fabricação na máquina de SLA, o excesso de resina é retirado da peça a fim de aumentar o grau de cura da peça quando inserida em fornos ultravioletas (LAN et al., 1997).

A sinterização seletiva a laser foi desenvolvida com o objetivo de permitir a utilização

de diferentes materiais como polímeros, cerâmicas e metais na manufatura aditiva. Utiliza-se de um feixe de laser, direcionado por um sistema de espelhos, para a sinterização seletiva do material em pó sobre uma plataforma, formando as camadas do objeto tridimensional desejado. Após a formação desta camada, a plataforma é abaixada, uma nova camada de pó é adicionada e o processo se repete até a formação do produto final. (DICKENS, 2006). Ao longo do processo, a plataforma de apoio do produto é aquecida a uma temperatura próxima daquela de sinterização do material, facilitando assim a sinterização pelo feixe de laser e conseqüentemente ocorre a diminuição do gradiente de temperatura entre o material sinterizado e o não-sinterizado (HOPKINSON, 2006).

2.4.3.1 Considerações Sobre Técnica Aditiva de Fabricação por Filamento Fundido (FFF)

A impressão por deposição de material fundido (FDM) é um dos métodos aditivos por extrusão. Esse método, cuja patente denominada FDM expirou em 2007, é caracterizado por utilizar um cabeçote no qual o filamento, termoplástico ou elastômero, é tracionado até uma câmara de aquecimento na qual é fundido e conduzido até um bico calibrado e, então, depositado no substrato (base). A Figura 9 apresentada abaixo ilustra o esquema do processo FFF.

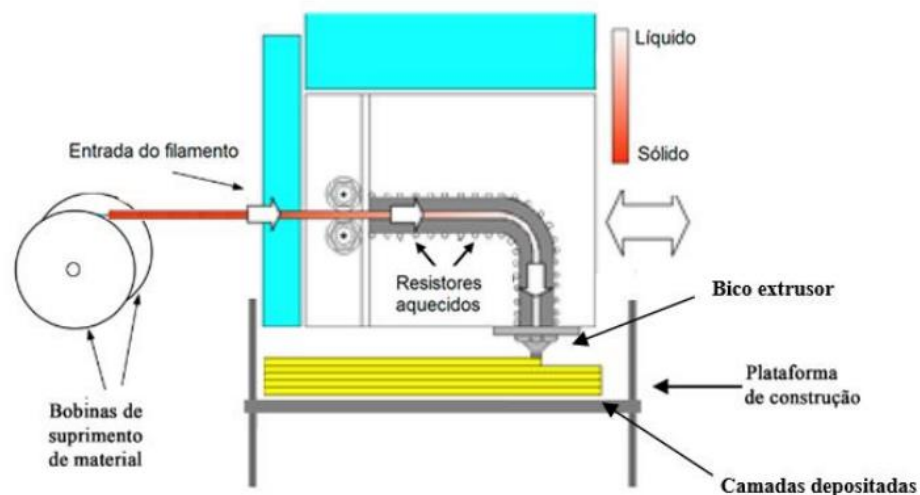


Figura 9 – Esquema do processo FFF utilizando filamento como matéria-prima (FDM)

(Fonte: Adaptado de Singh et al., 2017)

Nesta técnica, a matéria-prima sólida, normalmente um termoplástico, é geralmente fornecida em forma filamentar. Para ocorrer a fusão do material, são colocados resistores no bocal do equipamento os quais têm o papel de manter o polímero a uma temperatura acima de

seu ponto de fusão, facilitando assim com que ele flua através do bico e forme a camada (KURIC, 2012). O bico extrusor está ligado a um cabeçote que se movimenta no plano X-Y, paralelo ao plano da plataforma, distribuindo o material de acordo com a geometria da camada em construção.

Ao entrar em contato com a plataforma, cuja temperatura é inferior à do material extrudado, o filamento depositado rapidamente endurece e forma uma camada da peça a ser produzida. Ao término da deposição, a plataforma é abaixada na direção do eixo Z, reiniciando-se o processo de deposição e formando uma nova camada sobre a anterior, repetindo-se sucessivamente até a formação do produto final (FLETCHER, 2003). Segundo Gibson, Rosen e Stucker (2015) e Volpato et al. (2017), o filamento pré-processado deve apresentar as propriedades físicas adequadas, a fim de garantir o escoamento contínuo de fios ou pontos que mantenham a forma após deposição e boa adesão entre si à medida que sucessivas camadas de material são depositadas.

Os processos baseados em extrusão apresentam limitações pela dependência de polímeros amorfos como matéria-prima, restringindo a variedade de materiais compatíveis e, conseqüentemente, a aplicabilidade das peças fabricadas. (TORRADO PEREZ; ROBERSON, 2014). Sendo assim, os materiais empregados comumente no processo FDM são polímeros termoplásticos sob a forma filamentar de estrutura semicristalinas ou amorfas, sendo os mais conhecidos o acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), poli(ácido lático) (PLA), acrilonitrila-estireno-acrilato (ASA), policarbonato (PC), Poliamida (PA) e polipropileno (PP) (TURNER, 2013). De acordo com Ahrens et al. (2007), através da tecnologia FDM é possível criar peças funcionais que apresentam 85% da resistência das peças produzidas a partir do processo de injeção do mesmo material.

A Tabela 3 a seguir apresenta uma relação dos materiais utilizados no processo de modelagem por deposição de material fundido, bem como outros que podem ser aplicados em outras técnicas dentro da tecnologia da manufatura aditiva.

Tabela 3 – Materiais comerciais para processamento em equipamentos de Manufatura Aditiva

	<u>Amorfo</u>	<u>Semi-Cristalino</u>	<u>Termofixo</u>	<u>Extrusão de Material</u>
Acrlonitrila-Butadieno-Estireno (ABS)	X			X
Polycarbonato	X			X
Blenda PC/ABS	X			X
Políácido Láctico (PLA)	X			X
Polieterimida (PEI)	X			X
Acrílicos			X	
Acrilatos			X	
Epóxis			X	
Poliamida Nylon 11 e 12		X		
Organizado		X		
Preenchido com Vidro		X		
Preenchido com Carbono		X		
Preenchido com Metal (Alumínio)		X		
Ligado à Polímero	X	X		X
Poliestireno	X			
Polipropileno		X		
Poliéster				
Poli(éter-éter-cetona)		X		X
Poliuretano Termoplástico				X
Elastômeros				

Fonte: Adaptado de Bourell et al., 2009

O processo de manufatura aditiva baseado no mecanismo FDM apresenta como principais vantagens o mecanismo simplificado de derretimento e deposição das camadas no substrato para formação da peça, o uso de materiais de grau de engenharia e termoplásticos, não requisitar a pós-cura após o processamento do objeto. Somado a essas vantagens, os equipamentos industriais – que possuem matéria-prima controlada – permitem a geração de peças funcionais, com propriedades mecânicas adequadas para certas aplicações nas áreas de bens de consumo, mecânica e até mesmo de grau médico. Os equipamentos 3D do tipo desktop podem ser utilizados desde em escritórios de engenharia, laboratórios de graduação e ensino técnico, até em ambiente doméstico, sempre se atentando para a possível exalação de monômeros tóxicos à saúde no uso de certos polímeros (VOLPATO et al., 2017).

Em contrapartida, existem limitações técnicas no processo que incluem: (i) a precisão e a resolução dimensionais são restritas devido ao diâmetro controlado do bico de deposição, uma vez que ele é quem define a faixa de diâmetro do filamento depositado e as espessuras de camadas; (ii) necessidade de estrutura de suportes para casos de regiões suspensas ou com geometrias negativas, com ângulos de inclinação inferior ao ângulo de suporte, ocasionando assim o aumento do uso de matéria-prima; (iii) em casos de necessidade das estruturas de suporte, é necessário pós-processamento da peça de forma mecânica ou química; e (iv) além da limitação de materiais, é também considerado o processo aditivo mais lento, uma vez que é

limitado pela vazão do material no bico de extrusão e pela cinemática cartesiana do equipamento.

Estabelece-se assim a manufatura aditiva como economicamente viável para produções de poucas unidades, processos de prototipagem durante o desenvolvimento de projetos, ou até mesmo dispositivos assistivos que necessitam de grande personalização. Segundo Rodrigues et al. (2016) existem sete principais áreas de aplicação da manufatura aditiva: equipamentos de baixo custo (*low end*), bens de consumo, dispositivos voltados para a área da saúde, prototipagem industrial, peças de manutenção e reposição, ferramental e inserção em processos produtivos para customização e personalização.

2.5 Seleção de Materiais

A grande relevância dos materiais para o desenvolvimento da sociedade é indiscutível, uma vez que foi por meio deles que o homem materializou os artefatos que o ajudariam em sua sobrevivência. No primeiro milhão de anos de sua existência, foram utilizados primordialmente a madeira, pedra, ossos, chifres e couro na construção de ferramentas e objetos, porém no decorrer dos anos foi possível notar o surgimento de novos materiais – como os metais – que viriam a ser os mais empregados pela humanidade (MANZINI, 1989).

A Revolução Industrial acarretou inúmeras transformações em âmbitos social, cultural e econômico, tornando acelerada a multiplicidade de materiais disponíveis para a produção de produtos, além do impulso do design devido à necessidade de planejamento e criação de produtos com base no desenvolvimento em série (FALLER, 2009).

Os materiais desempenham papel essencial no processo de concepção dos produtos, pois concretizam ideias, conceitos e desenhos criados pelos designers. Ashby e Johnson (2010) evidenciaram a relação entre materiais e design, uma vez que “materiais são a matéria de que é feito o design de produto” e “interagimos com materiais por intermédio de produtos”. Em conformidade com a ótica apresentada, Ferrante e Walter (2010) argumentam que a ligação entre a ideia e a produção é o material, que deve ser selecionado e processado até a reprodução física da ideia na forma de produto, levando em consideração as mais diversas condições de uso que o material precisa prever e atender.

Ao passo que a ciência e a tecnologia avançam, o surgimento de diversos novos materiais aumenta o espectro de possibilidades e combinações entre eles para a obtenção de

diferentes propriedades e desempenhos infinitos (CALEGARI, 2014). Diante desse cenário, a seleção de materiais pode ser o diferencial para um produto ter sucesso, uma vez que se trata de uma tarefa de suma importância dentro do projeto. Segundo Ashby (2012) um projeto de sucesso requer a utilização inovadora de materiais e a exploração inteligente de suas propriedades de engenharia e estéticas. Em consonância com Ashby, Callister (2008) afirma que selecionar materiais é uma das tarefas mais importantes de um engenheiro, uma vez que decisões inapropriadas sobre a utilização de materiais podem causar desastres, dos pontos de vista econômico e de segurança.

É de fundamental importância para o entendimento do processo de seleção de materiais elucidar quais os principais requisitos envolvidos nessa tarefa, os quais segundo Callister (2008) podem ser divididos em quatro grupos essenciais: condições de serviço, deterioração das propriedades em serviço, fatores econômicos, fatores ambientais e sociais. Em concordância com Callister, Patton (1968) e Ashby (2012) destacam que os requisitos de serviço são supremos, também chamados de requisitos do projeto mecânico, indicando assim que o material precisa cumprir com este ou ser descartado.

Segundo Callegari (2014), durante o processo de projeto, a seleção de materiais acontece de forma gradativa. Primeiramente concentra-se em uma família de materiais, por exemplo, polímeros, metais, e é focada nas propriedades sensoriais e em aspectos intangíveis dos materiais, como por exemplo, a estética. Já na fase do projeto detalhado, são levadas em consideração as propriedades técnicas e selecionado o material com maior precisão, conforme apresentado no esquema da Figura 10 a seguir:

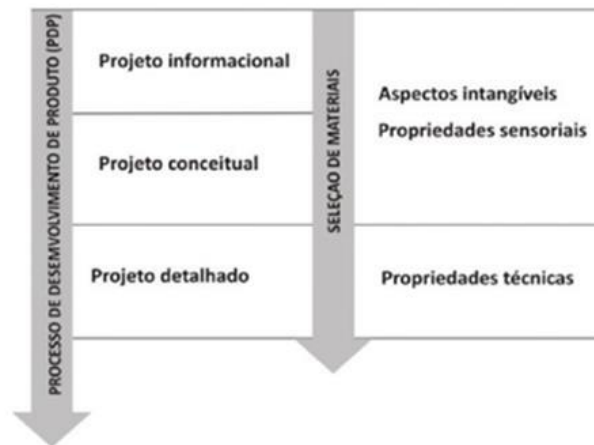


Figura 10 - Os aspectos dos materiais relacionados com as fases do processo de desenvolvimento de produto na seleção de materiais

(Fonte: CALLEGARI, 2014)

A evolução da seleção de materiais de tarefa empírica para metodologia estruturada deve-se a Michael Farries Ashby (1935), da Universidade de Cambridge. Ela começou a ser desenvolvida no fim da década de 1980 e tem como base os mapas de propriedades dos materiais, que permitem comparar qualquer conjunto de materiais a partir de suas propriedades (FERRANTE; WALTER, 2010).

De acordo com Ferrante (2002), é necessário inicialmente levar em consideração a função do material para que seja realizada uma adequada seleção de um material ou processo frente a outro. Em seguida, considerar os requisitos de projeto, as condições de serviço e ambientais, e por fim obter as propostas alternativas de diferentes materiais e processos que atendam aos fatores condicionantes estabelecidos.

O procedimento básico de seleção de materiais, apresentado por Ashby (2012) envolve quatro etapas básicas: (i) método para tradução dos requisitos de um projeto em uma especificação para o processo e materiais; (ii) processo de triagem para eliminar aqueles que não podem satisfazer as especificações, restando assim um pequeno conjunto; (iii) sistema de classificação dos materiais e processos sobreviventes, identificando aqueles de maior potencial, e (iv) procura por informações de apoio (documentação) sobre os materiais melhor classificados a fim de reunir o máximo de informação sobre os seus pontos fortes e fracos, históricos de uso e potencial futuro.

Sendo assim, para Ashby (2012) é necessária a concretização das etapas de tradução,

triagem, classificação e documentação para sair do ponto de partida, com todos os materiais, e chegar a um único material. A fim de se percorrer esse caminho da melhor forma, existem ferramentas e procedimentos de auxílio, além de ressaltar que a seleção de materiais deve sempre ser feita em conjunto com a seleção do processo de fabricação.

Na busca por ferramentas que simplifiquem o processo de seleção de materiais, Ashby desenvolveu em 1992 uma metodologia de seleção de materiais. Com esse recurso cada material pode ser especificado por diversos atributos, como densidade, módulo de elasticidade e resistência. Durante a seleção de materiais, é necessário avaliar estes multicritérios que na maioria das vezes são conflitantes, de uma forma a satisfazer todos eles simultaneamente (CRUZ, 2018).

A metodologia em questão desenvolve Índices de Mérito (IM), obtidos a partir de equações que possuem como finalidade associar as propriedades que serão responsáveis pelo máximo desempenho do material em determinada função. Na sua forma mais básica, este índice é normalmente uma fração, tendo no numerador a propriedade ou característica que se quer potencializar e no denominador a que se deseja diminuir. A equação (4) representa o índice de mérito entre o módulo de Young (E), propriedade mecânica que mede a rigidez de um material sólido e a densidade (ρ):

$$IM = \frac{E}{\rho} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

E = Módulo de Young ou Módulo de Elasticidade (GPa)

ρ = Densidade (kg/m^3)

Para Ferrante (2002), “a essência desse conceito de Seleção de Materiais encontra-se nos Mapas de Propriedades desenvolvidos por M. F. Ashby. Eles procuram agrupar todas as famílias de materiais em gráficos cujas coordenadas compõem, sempre que possível, índices de mérito utilizados em cálculos de dimensionamento e seleção”. Os diagramas de Ashby - também conhecidos como mapas de propriedades - são gráficos onde se representa uma propriedade ou característica de um material contra a outra, tornando-se muito úteis na seleção dos materiais. Foram construídos a partir da compilação de dados tabelados e

apresentados na literatura de forma gráfica, facilitando a visualização e identificação do material (ou classe) mais adequado(a).

Dentre os diversos Diagramas de Ashby existentes, uma das representações gráficas é a apresentada abaixo (Figura 11), a qual correlaciona o módulo de Young (GPa) *versus* densidade, podendo ser empregado em processos de seleção que têm o objetivo de reduzir a massa em projetos orientados pela elasticidade por exemplo.

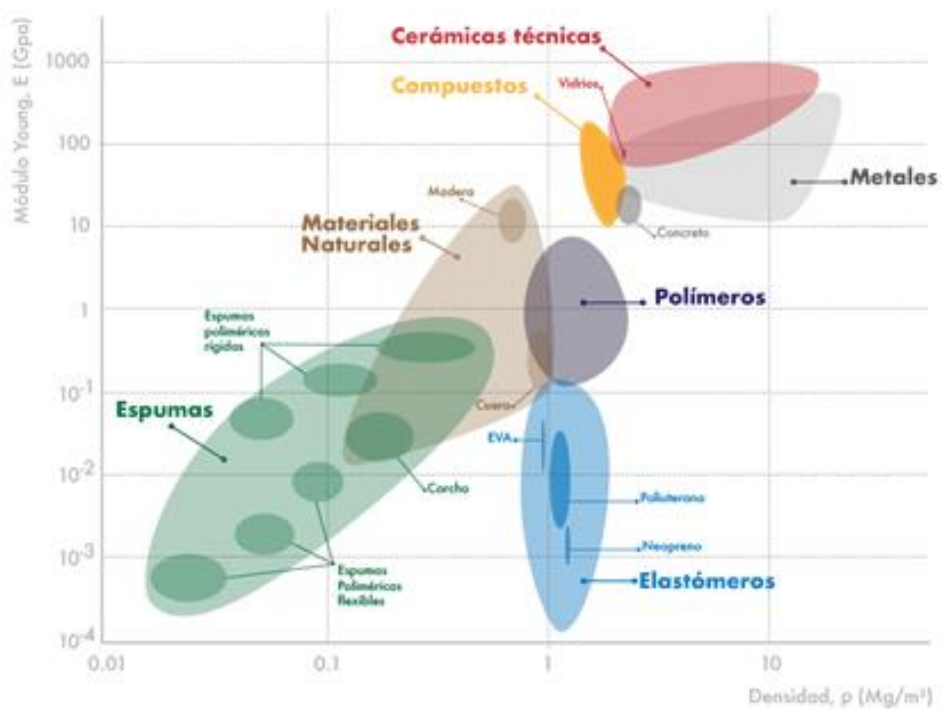


Figura 11 – Diagrama de Ashby

(Fonte: <https://www.lugae.cl/diagrama-de-ashby/>)

A vantagem da utilização dos mapas de propriedades é a possibilidade de facilitar a visualização do amplo número de materiais e suas classes, permitindo assim encontrar os materiais que demonstram a melhor relação entre as propriedades requeridas pelo projeto mecânico de determinado componente.

3. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Em continuidade ao trabalho de Loureiro (2019), o produto cujo material de fabricação será estudado se trata de um dispositivo assistivo que evita a perda de temperatura dos alimentos e possui mecanismo de fornecimento de calor com a intenção de tornar a alimentação mais palatável por tempos mais longos e proporcionar maior conforto ao alimentar-se. Uma vez que pode ser utilizado desde pessoas com tremores essenciais a crianças em fase de aprendizagem, o público não é restrito, e caracteriza-se por apresentar dificuldade de movimentação de membros superiores, não somente pessoas portadoras de deficiência, tornando assim o projeto de caráter universal.

A fim de mapear as necessidades do público alvo, o foco do projeto será em pessoas com doenças que afetam a movimentação de membros superiores, podendo ser o tremor essencial - onde por um período de pelo menos 3 anos compromete a firmeza dos braços - bem como a doença de Parkinson, degenerativa, crônica e progressiva do Sistema Nervoso Central, causando rigidez de membros e tremores que podem variar de intensidade, chegando a prejudicar o movimento dos braços, comprometendo assim o tempo e qualidade de alimentação do usuário.

O desenvolvimento do projeto seguiu as etapas informacionais e conceituais de um projeto mecânico, desde a identificação de oportunidade, busca de patentes e soluções comerciais até o contato com potencial usuário com o intuito de mapear as necessidades que deveriam ser atendidas, as quais posteriormente foram traduzidas em características técnicas.

O projeto consistiu no desenvolvimento de um prato para auxiliar pessoas com limitações motoras a se alimentar, confeccionado em duas placas paralelas, sendo que a placa inferior é para a alocação da bolsa térmica que contém água morna dentro de um compartimento e isolado - com a função de aquecer e manter a comida em uma temperatura constante - e a placa superior, onde o alimento será depositado.

O modelo geométrico, apresentado na Figura 12, visa atender da melhor forma possível aos requisitos do usuário, oferecendo design ergonômico e acessível. A base do prato foi projetada larga com a finalidade de conferir estabilidade, o perfil apresenta diversas curvas conferindo conforto e facilitando a pega, assim como a borda do prato é larga a fim de evitar que a comida caia para fora do prato com facilidade, tornando o transporte mais seguro. A

cavidade de formato côncavo auxilia a alimentação de pessoas com mobilidade de membros superiores reduzida uma vez que direciona a comida sobre o talher, além de facilitar o transporte no interior do prato de forma segura.

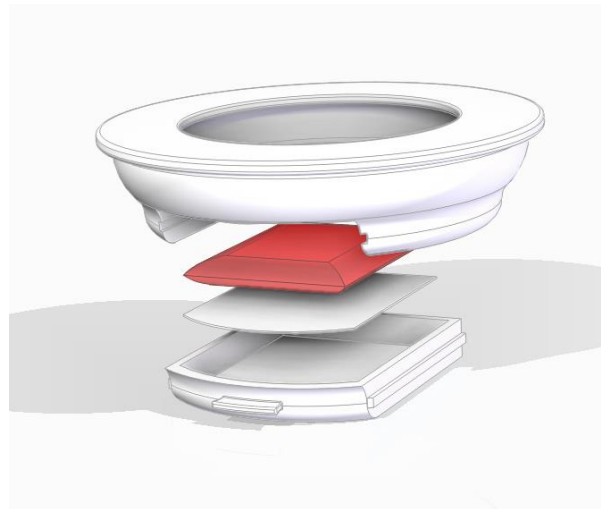


Figura 12 – Modelo virtual do protótipo assistivo

(Fonte: Autora, 2021)

A solução para aquecimento do dispositivo assistivo consiste no fornecimento de energia a partir de uma reação química exotérmica, na qual ocorre liberação de energia (entalpia, $\Delta H < 0$). A reação ocorre no interior de uma bolsa térmica confeccionada em PVC, que consiste em uma solução supersaturada de acetato de sódio anidro cujo equilíbrio é perturbado através do acionamento de um disco metálico que inicia a cristalização da solução, a qual é revertida por meio da imersão da bolsa em água fervente. A solução utilizada na bolsa térmica apresenta água como solvente, que efetua a dissolução, e acetato de sódio como soluto. Ao adicionar acetato de sódio na água em temperatura elevada, obtém-se maior nível de dissolução quando comparado à temperatura ambiente, contudo ao resfriar a solução, o acetato de sódio não cristaliza, permanecendo solubilizado (LOUREIRO, 2019).

O revestimento da bolsa é realizado com policloreto de vinila (PVC – Polyvinylchloride, nome IUPAC policloroeteno), resina termoplástica cuja polimerização pode ocorrer em suspensão e em emulsão. Apresenta boa durabilidade, sendo amplamente aplicado a bens duráveis; não é inflamável devido à presença do cloro; é quimicamente estável viabilizando sua utilização na indústria hospitalar e alimentícia; apresenta baixa

permeabilidade ao oxigênio e gás carbônico além de ser 100% reciclável (PIRES et al., 2011). A temperatura da bolsa não ultrapassa 55 °C e o aquecimento dura cerca de 40 minutos, considerado adequado para atender o tempo médio de alimentação de 30 minutos (dado fornecido pela professora Luciana Bolzan Agnelli Martinez, do Departamento de Terapia Ocupacional da Universidade Federal de São Carlos). O design do prato foi desenvolvido a fim de evitar a perda de calor por condução e convecção, de forma que o sistema de aquecimento torna-se auxiliar, fornecendo calor ao dispositivo a fim de manter a temperatura do alimento.

Cabe ressaltar que a manipulação do protótipo durante os testes de qualidade, com instrumento de Tecnologia Assistiva denominado B-Quest, será feita com o uso de um filme plástico que revestirá sua cavidade interna. Essa avaliação é feita com a intervenção do Terapeuta Ocupacional que orienta o uso e avalia o desempenho também funcional do dispositivo assistivo.

Considerando i) o aumento significativo da expectativa de vida da população em geral nas próximas décadas (no TOP 10 do ranking de países com maior expectativa de vida, a idade das pessoas em 2040 estará entre 84,1 a 85,8 anos) e consequente demanda por tecnologias assistivas, ii) a versatilidade dos materiais poliméricos e suas múltiplas aplicações, iii) o potencial, avanço e disseminação da manufatura aditiva (a receita gerada pela manufatura aditiva alcançou US \$ 7,3 bilhões em 2017, podendo atingir 20 bilhões em 2021) (REVISTA FAPESP, 2019), iv) a importância do movimento dos membros do corpo na qualidade de vida das pessoas, a autonomia que isso acarreta e a possibilidade de se alimentar com mais qualidade, e v) o tamanho do mercado atual e a tendência de crescimento de mercado futuro de produtos assistivos, visualiza-se como relevante e promissor o estabelecimento de um procedimento para desenvolvimento de boas soluções, que seja planejável, flexível, otimizável e verificável. Para tal, o presente trabalho consiste em realizar a seleção do material e escolher soluções que entregam um produto que satisfaça aos requisitos de usuário apresentados por meio de ferramentas e procedimentos metodológicos de desenvolvimento de um produto.

4. PROPOSTA DO MÉTODO

4.1 Aplicação do Método de Projeto

O principal objetivo do produto é ser funcional e tornar o processo de alimentação agradável a indivíduos portadores de distúrbios motores, por meio do aquecimento prolongado do alimento no interior do dispositivo. Para satisfazer o principal objetivo do produto, os requisitos identificados por Loureiro (2019) estão reportados na Tabela 4 e referem-se a requisitos previamente obtidos via questionário aplicado na APAE (Associação de Pais e Amigos dos Excepcionais) de Entre Rios - MG.

Tabela 4 – Requisitos do usuário

<u>Requisitos do Usuário</u>
Não quebrar com facilidade
Manter a temperatura durante o tempo de uso
Não esquentar muito
Não se movimentar facilmente
Facil higienização
Facilidade de manutenção
Sustentabilidade
Produto Personalizado

Fonte: Loureiro, 2019

O detalhamento dos requisitos do usuário é explicitado abaixo:

- I. Não quebrar com facilidade: o material deve ser resistente a batidas e quedas acidentais;
- II. Manter a temperatura durante o tempo de uso: dado que o tempo médio de alimentação é de 30 minutos, o material escolhido deve conseguir conservar o alimento aquecido pelo mesmo tempo;
- III. Não esquentar muito: o material deve manter o alimento aquecido, porém sem aquecer demais o produto, para que as pessoas possam segurar manualmente o produto sem incômodos;
- IV. Não se movimentar facilmente: o material deve apresentar rugosidade em sua parte inferior para auxiliar no atrito com a superfície de contato e, conseqüentemente, não deslizar;

- V. Fácil higienização: em seu interior, o produto não deve apresentar rugosidade para facilitar a limpeza e não impregnar restos de alimentos;
- VI. Facilidade de manutenção: o material deve ser suficientemente resistente para, no manuseio do dia a dia, não sofrer nenhum tipo de dano como trincas e rachaduras;
- VII. Sustentabilidade: em um mundo onde a preservação e o desenvolvimento sustentável estão cada vez mais presentes no dia a dia das pessoas, é importante escolher alternativas mais sustentáveis, evitando, por exemplo, a utilização de materiais derivados do petróleo;
- VIII. Produto personalizado: com o intuito de tornar este um projeto replicável e personalizável de acordo com as necessidades individuais de cada um, sua solução deve envolver um método de fabricação que consiga fornecer essa personalização.

As características técnicas, também denominadas critérios de avaliação, obtidas a partir dos requisitos apresentados estão indicadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características técnicas desdobradas a partir dos requisitos do usuário

<u>Características Técnicas</u>
Resistência ao Impacto
Perda por Convecção e Condução
Variação de Temperatura
Rugosidade
Acabamento Superficial
Biodegradável
Manufatura Aditiva

Fonte: Autora, 2021

Essas características técnicas, derivadas dos requisitos dos usuários, são segmentadas em categorias e elabora-se uma árvore de objetivos, conforme mostrada na Figura 13.

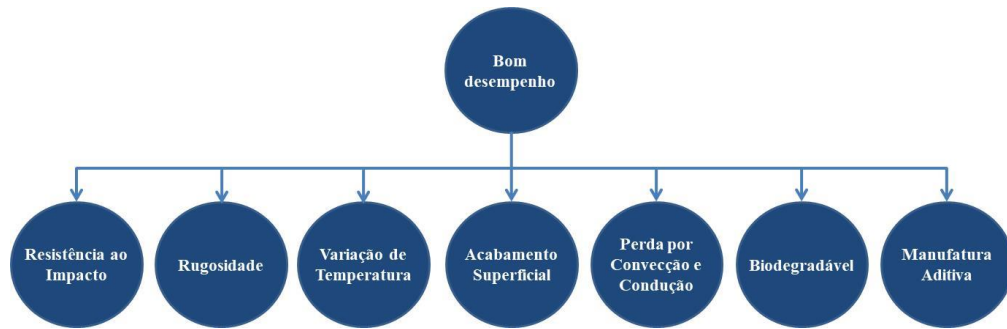


Figura 13 - Estrutura do sistema de características técnicas

(Fonte: Autora, 2021)

Para analisar cada um dos critérios de avaliação, é necessário determinar seus pesos, ou seja, suas importâncias relativas. Esses pesos, que variam de 0 a 1, foram distribuídos conforme fluxograma indicado na Figura 14.

Para a determinação dos valores dos pesos, foram considerados os critérios de maior importância para o produto. Assim, pelo protótipo ser produzido em impressoras desktop, a manufatura aditiva é o parâmetro mais relevante e, conseqüentemente, de maior peso. A solução foi pensada e desenvolvida para manter a temperatura dos alimentos e propiciar uma melhor alimentação dos usuários. Portanto, os critérios que envolvem temperatura são os segundo em ordem de importância.

Em seqüência, a resistência ao impacto é importante pois os portadores de distúrbios motores podem bater ou derrubar o dispositivo; juntamente com o acabamento superficial, necessário para se obter superfície lisa e impedir a deposição de restos de alimentos nas estrias do produto. Por fim, a rugosidade da parte inferior do material para atritar com a superfície de contato e evitar deslizamentos e encontrar um polímero sustentável.

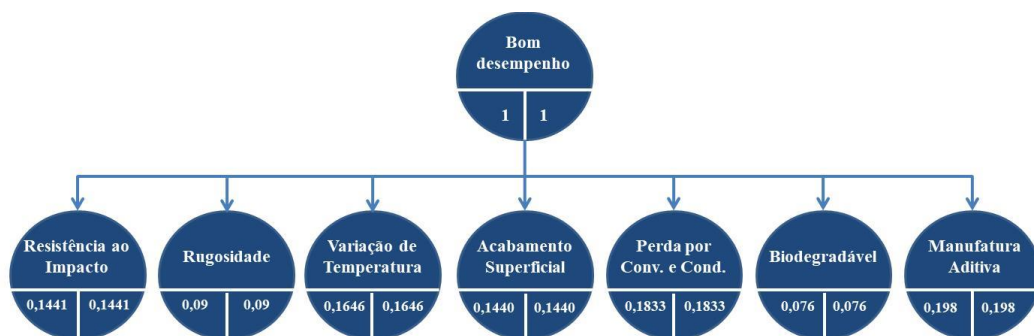


Figura 14 – Fluxograma de análise das variantes de solução e seus respectivos pesos

(Fonte: Autora, 2021)

Determinados os pesos das variantes, estas devem ser organizadas em ordem de importância, assim como mostrado na Tabela 6, para facilitar a análise de quais os parâmetros mais relevantes e, assim, evitar erros de priorização e avaliação.

Tabela 6 – Critérios organizados por nível de relevância

<u>Características Técnicas</u>	<u>Importâncias</u>
Manufatura Aditiva	19,8%
Perda por Convecção e Condução	18,3%
Variação de Temperatura	16,5%
Resistência ao Impacto	14,4%
Acabamento Superficial	14,4%
Rugosidade	9,0%
Biodegradável	7,6%

Fonte: Autora, 2021

Organizados os critérios, é necessário elencar as possíveis soluções encontradas que satisfaçam esses critérios, também denominadas possíveis variantes de solução. As soluções ponderadas estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Possíveis variantes de solução

<u>Soluções Para as Características Técnicas</u>	<u>Explicação</u>
Materiais Qualificados para Contato com Alimentos	O produto estará em contato direto com alimentos e, portanto, seu material de fabricação deve ser considerado seguro para tal função.
Materiais Estáveis	O funcionamento básico de impressoras FDM é por meio de uma extrusora a quente na qual ocorre a fusão de um material e deposição do mesmo em uma superfície. Sendo assim, o material selecionado deve ser estável para ser facilmente trabalhável.
Materiais de Fácil Impressão	Para obtermos produtos personalizados, a melhor forma é por meio da manufatura aditiva. Desta forma, os materiais escolhidos devem ser de fácil impressão.
Polímeros Termoplásticos	Os polímeros termoplásticos são facilmente recicláveis por suportarem múltiplas conformações quando reaquecidos. Ademais, a classe mais utilizada de polímeros na técnica FDM são os termoplásticos.
Polímeros Termofixos	Os polímeros termorrígidos possuem elevada resistência à altas temperaturas, resistência mecânica e química. Sua estrutura molecular é rígida, diferentemente da estrutura molecular dos termoplásticos, que é maleável. Por essas características, os termofixos não são utilizados na técnica FDM.
Materiais Acessíveis Economicamente	O intuito do projeto é atender e auxiliar o maior número de pessoas possível. Para tal, o material utilizado para a fabricação do dispositivo assistivo deve ser acessível para que o produto se torne economicamente viável.
Materiais Condutores	Os materiais condutores possibilitam a movimentação de cargas elétricas em seu interior com facilidade, por terem uma grande quantidade de elétrons livres. Para manter a temperatura do alimento durante o período de alimentação das pessoas, o material deve conduzir a temperatura da bolsa de gel para o alimento e, portanto, deve ser condutor.
Polímeros Recicláveis	Os polímeros recicláveis são uma alternativa sustentável, dentro dos polímeros derivados do petróleo, o que os torna uma excelente opção.
Biopolímeros	Os biopolímeros são uma ótima alternativa para evitarmos as opções de polímeros derivados do petróleo.
Materiais Isolantes	Os materiais isolantes oferecem oposição à passagem de cargas elétricas, por terem uma grande quantidade de elétrons fortemente ligados à núcleos atômicos. Com o intuito de ninguém se machucar durante o manuseio do dispositivo, seu material externo (onde as pessoas seguram) não deve conduzir calor e, portanto, apresentar característica isolante.
Materiais com Superfície de Qualidade	O interior do dispositivo será preenchido com alimentos de diversas naturezas. Sua limpeza, portanto, é de extrema importância, assim como a superfície de contato do interior do produto. Se seu interior apresentar fissuras ou ranhuras, poderá acumular restos de alimentos e, por conseguinte, desenvolver bactérias prejudiciais à saúde da pessoa. Assim, o material escolhido deve ter qualidade e apresentar superfície de fácil limpeza.
Materiais Duráveis	Este dispositivo assistivo será personalizado e utilizado em todas as refeições da pessoa. Logo, seu material precisa ser resistente para aguentar múltiplos usos por um período longo de tempo.
Materiais Resistentes ao Impacto	Por ser utilizado com maior frequência, está mais sujeito a quedas e impactos e, portanto, o material empregue no dispositivo deve apresentar resistência à quedas e batidas acidentais.
Materiais Resistentes ao Atrito	O material selecionado precisa resistir ao manuseio de talheres no momento da alimentação e à bucha, na hora da limpeza do dispositivo. Assim, é necessário que seja resistente ao atrito.
Materiais com Alta Resistência Mecânica	Complementarmente à resistência ao impacto, o material deve também apresentar boa resistência mecânica para o produto ter alta durabilidade.
Materiais com Alta Resistência Química	O termo 'resistência química' é normalmente utilizado para descrever a resistência de um material quanto aos efeitos de produtos químicos. Quando comparados aos metais, algumas das principais vantagens dos polímeros são a resistência química, à corrosão e a compatibilidade química. Escolhendo a família certa de polímeros, é possível ter materiais adequados resistentes a ácidos, meios alcalinos, vapor e água fervente, entre outros meios.

Com os parâmetros previamente determinados e as possíveis variantes de solução listadas, é preciso determinar valores para estes parâmetros em uma escala de pontuação entre 0 (insatisfatório) e 10 (solução ótima), conforme explicado anteriormente. A Tabela 8 apresenta os pontos propostos para cada solução juntamente com o preenchimento da folha de avaliação.

Tabela 8 - Lista de avaliação com todos os campos completos e seus respectivos cálculos de valores globais

Parâmetros		Características Técnicas		Variante 1	
N°	Fator			Valor	Valor Ponderado
1	Manufatura Aditiva	0,20	Produto Personalizado	7	1,39
2	Perda por Convecção e Condução	0,18	Manter a Temperatura Durante o Tempo de Uso	4	0,73
3	Variação de Temperatura	0,16	Não Esquentar Muito	4	0,66
4	Resistência ao Impacto	0,14	Não Quebrar com Facilidade	5	0,72
5	Acabamento Superficial	0,14	Facilidade de Manutenção	4	0,58
6	Rugosidade	0,09	Fácil Higienização	5	0,45
7	Biodegradável ou Reciclável	0,08	Sustentabilidade	7	0,53
				Valor Global	5,06

Variante 2		Variante 3		Variante 4		Variante 5	
Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado
10	1,98	4	0,79	4	0,79	4	0,79
7	1,28	4	0,73	2	0,37	2	0,37
6	0,99	6	0,99	3	0,49	2	0,33
7	1,01	3	0,43	10	1,44	10	1,44
5	0,72	10	1,44	5	0,72	7	1,01
5	0,45	10	0,90	2	0,18	4	0,36
4	0,30	2	0,15	2	0,15	2	0,15
Valor Global	6,73	Valor Global	5,44	Valor Global	4,15	Valor Global	4,45

Variante 6		Variante 7		Variante 8		Variante 9	
Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado
3	0,59	5	0,99	3	0,59	2	0,40
2	0,37	2	0,37	2	0,37	10	1,83
3	0,49	2	0,33	7	1,15	1	0,16
5	0,72	10	1,44	3	0,43	2	0,29
8	1,15	4	0,58	4	0,58	2	0,29
7	0,63	7	0,63	2	0,18	2	0,18
2	0,15	2	0,15	4	0,30	2	0,15
Valor Global	4,11	Valor Global	4,48	Valor Global	3,61	Valor Global	3,30

Variante 10		Variante 11		Variante 12		Variante 13	
Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado
10	1,98	2	0,40	10	1,98	5	0,99
4	0,73	6	1,10	2	0,37	2	0,37
3	0,49	10	1,65	2	0,33	2	0,33
2	0,29	2	0,29	2	0,29	2	0,29
2	0,29	2	0,29	5	0,72	3	0,43
2	0,18	2	0,18	5	0,45	3	0,27
2	0,15	2	0,15	2	0,15	10	0,76
Valor Global	4,12	Valor Global	4,05	Valor Global	4,29	Valor Global	3,44

Variante 14		Variante 15		Variante 16	
Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado	Valor	Valor Ponderado
5	0,99	5	0,99	0	-
2	0,37	2	0,37	-	-
2	0,33	2	0,33	-	-
2	0,29	2	0,29	-	-
3	0,43	2	0,29	-	-
3	0,27	2	0,18	-	-
10	0,76	2	0,15	-	-
Valor Global	3,44	Valor Global	2,59	Valor Global	-

Determinam-se assim os respectivos valores globais para cada solução, os quais foram classificados em ordem de importância na Tabela 9, para análise de quais soluções devem ser priorizadas.

Tabela 9 - Variantes de soluções e seus respectivos valores globais

<u>Nº</u>	<u>Soluções Para as Características Técnicas</u>	<u>Valor Global</u>
1	Polímeros Termoplásticos	6,73
2	Materiais com Superfície de Qualidade	5,44
3	Materiais Qualificados para Contato com Alimentos	5,06
4	Materiais com Alta Resistência Mecânica	4,48
5	Materiais Resistentes ao Impacto	4,45
6	Materiais de Fácil Impressão	4,29
7	Materiais Duráveis	4,15
8	Materiais Estáveis	4,12
9	Materiais Resistentes ao Atrito	4,11
10	Materiais Isolantes	4,05
11	Materiais com Alta Resistência Química	3,61
12	Polímeros Recicláveis	3,44
13	Biopolímeros	3,44
14	Materiais Condutores	3,30
15	Materiais Acessíveis Economicamente	2,59
16	Polímeros Termofixos	0,00

Fonte: Autora, 2021

Com os fatores observados na análise das variantes de soluções, é necessário realizar a escolha do material que melhor contemple as soluções das características do dispositivo.

4.2 Seleção do Material de Acordo com a Aplicação do Método

A partir dos requisitos do usuário, da aplicação dos procedimentos de análise do desenvolvimento de um produto e do desdobramento das funções do prato assistivo, a seleção de materiais deve contemplar boa resistência mecânica, ou seja, capacidade de um material em resistir a uma força aplicada a ele, associada ao acabamento superficial que torne o produto confortável, de peso adequado para conferir estabilidade sem tornar-se excessivo, e com maior adesão à superfície, além da possibilidade de fabricação de protótipos ou poucas unidades fazendo uso da manufatura aditiva como técnica de processamento.

Dado que existem inúmeros materiais disponíveis para os profissionais de engenharia, o projetista deve selecionar as propriedades mais relevantes à seleção do material, conforme exemplificado abaixo na Tabela 10.

Tabela 10 – Classes de Propriedades

Aspecto Econômico	Preço e Disponibilidade
Física Geral	Capacidade de Reciclagem Densidade Módulo de Elasticidade
Mecânica	Resistência à Deformação e à Tração Dureza Tenacidade à Fratura Limite de Fadiga Limite de Resistência à Deformação à Quente Característica de Amortecimento
Térmica	Condutividade Térmica Calor Específico Coeficiente de Expansão Térmica
Elétrica e Magnética	Resistividade Constante Dielétrica Permeabilidade Magnética
Interação Ambiental	Oxidação Corrosão Desgaste
Produção	Facilidade no Processamento União Acabamento
Estética	Cor Textura Sensação Táctil
Óticas	Índice de Refração Energia Incorporada
Propriedades Ecológicas	Pegada de Carbono

Sabendo que a temperatura da bolsa térmica não ultrapassa a temperatura de 55°C, a princípio há uma ampla gama de materiais que podem ser utilizados na fabricação deste dispositivo. A figura 15 abaixo compara as temperaturas de serviço máxima (°C) das diversas classes de materiais.

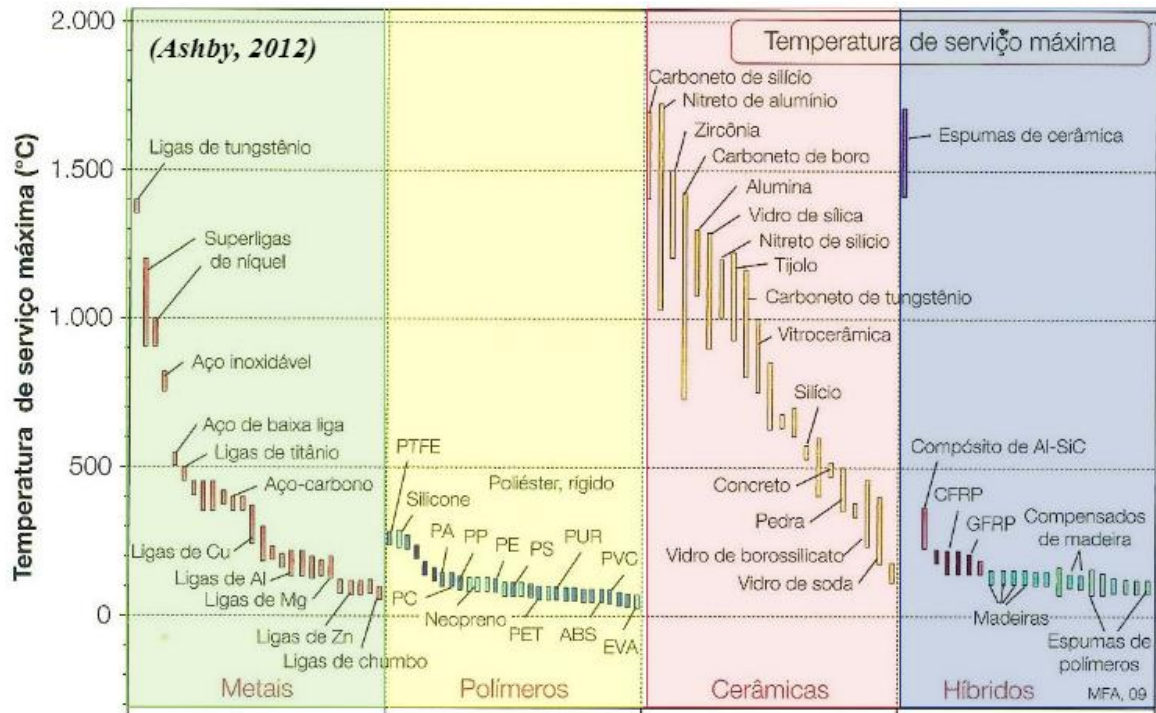


Figura 15 – Materiais e suas respectivas faixas de temperatura de serviço máxima

(Fonte: MOLISANI, 2017)

Para direcionar e auxiliar a escolha do material mais adequado fez-se uso dos diagramas de Ashby, amplamente utilizados na seleção de materiais em projetos mecânicos. O diagrama da Figura 16 apresenta a correlação entre o Módulo de Elasticidade ou Young (GPa) e Densidade (kg/m^3) em um campo cartesiano.

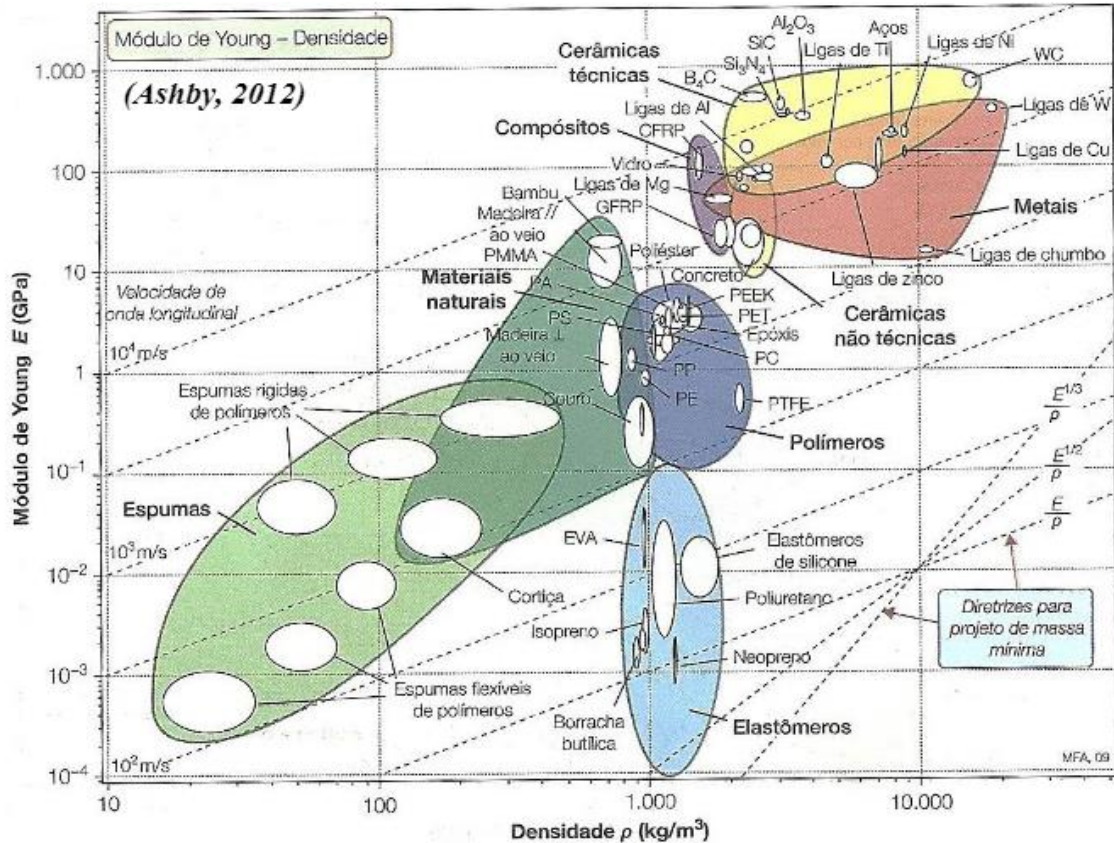


Figura 16 - Diagrama de Ashby para a seleção de materiais em projetos mecânicos correlacionando módulo de Young e densidade

(Fonte: MOLISANI, 2017)

A resistência de um polímero pode ser determinada de diversas formas, como resistência à tração, compressão, flexão, cisalhamento, entre outras. Os parâmetros mais relevantes para se analisar a resistência mecânica dos polímeros em ensaios de tensão x deformação são o módulo de elasticidade, tenacidade, tensão e deformação no escoamento, tensão máxima, tensão e deformação na ruptura.

A equação (5) abaixo representa o cálculo do Módulo de Young ou Elasticidade (E).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

E = Módulo de Elasticidade ou Young (GPa)

σ = Tensão (MPa)

ε = Deformação (mm/mm)

O gráfico de tensão x deformação de um material resulta em uma relação linear. A inclinação deste segmento de reta equivale ao módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade é um parâmetro-chave e fator importante para se analisar, visto que é uma grandeza proporcional à rigidez de um material quando submetido à uma tensão externa de tração ou compressão e expressa a dificuldade oferecida às deformações elásticas. Em projetos nos quais a plasticidade é uma limitação, uma das propriedades de interesse é a resistência mecânica. Aplica-se um coeficiente de segurança para evitar que a tensão de escoamento seja superada e, conseqüentemente, evitar uma deformação irreversível e perda do componente. A procura por um material com maior resistência mecânica se deve à relação conhecida de tensão: $\sigma = F/A$, onde F é a carga aplicada e A, a seção transversal que efetivamente a suporta. Assim, um material com maior módulo de elasticidade suporta uma tensão maior para o mesmo grau de deformação quando comparado a outro com módulo de elasticidade inferior.

Sendo uma medida de rigidez na região elástica, é interessante que o material escolhido apresente características intermediárias de módulo de elasticidade, pois quanto maior o módulo, mais rígido é o material e, conseqüentemente, menor a deformação elástica.

A densidade é definida através do quociente entre a massa e o volume de um corpo, medindo, portanto, o grau de concentração da massa de um material em um determinado volume. Logo, quanto menor a massa de um material, menor será sua densidade. Na escolha do material mais adequado, deve ser levada em consideração a densidade do material, a qual não pode ser nem muito baixa, nem muito alta, para facilitar o manuseio dos indivíduos portadores de deficiência.

O diagrama a seguir apresenta a classificação dos materiais quanto a Resistência (MPa) e Densidade (kg/m^3), posicionando-os no campo cartesiano, conforme ilustra a Figura 17. O parâmetro de resistência σ_f precisa ser definido com cuidado, pois este assume formas diversas para cada uma das famílias de materiais. Para polímeros e ligas metálicas, σ é a tensão de escoamento. Ou seja, o ponto da curva tensão/deformação em que não mais existe linearidade entre estas grandezas. Nos elastômeros, σ é a tensão de rasgamento.

É importante salientar que a resistência das peças impressas em 3D através da tecnologia FDM é influenciada diretamente pela configuração com que a mesma é produzida, como a temperatura de extrusão, percentual de preenchimento, altura da camada, tipo de preenchimento, geometria da peça e orientação de impressão.

O ponto onde ocorre o fenômeno de escoamento é o ponto onde há a mudança de regime elástico para o plástico. Materiais com baixo limite de escoamento são bons para conformar e dobrar, enquanto materiais com alto limite de escoamento são mais difíceis de conformar. Para calcular o limite de escoamento, traça-se uma linha reta, normalmente a partir de uma pré-deformação de 0,002, paralela à porção elástica da curva tensão x deformação do material a ser analisado. O limite de escoamento convencional é encontrado no ponto de encontro da linha paralela com a curva.

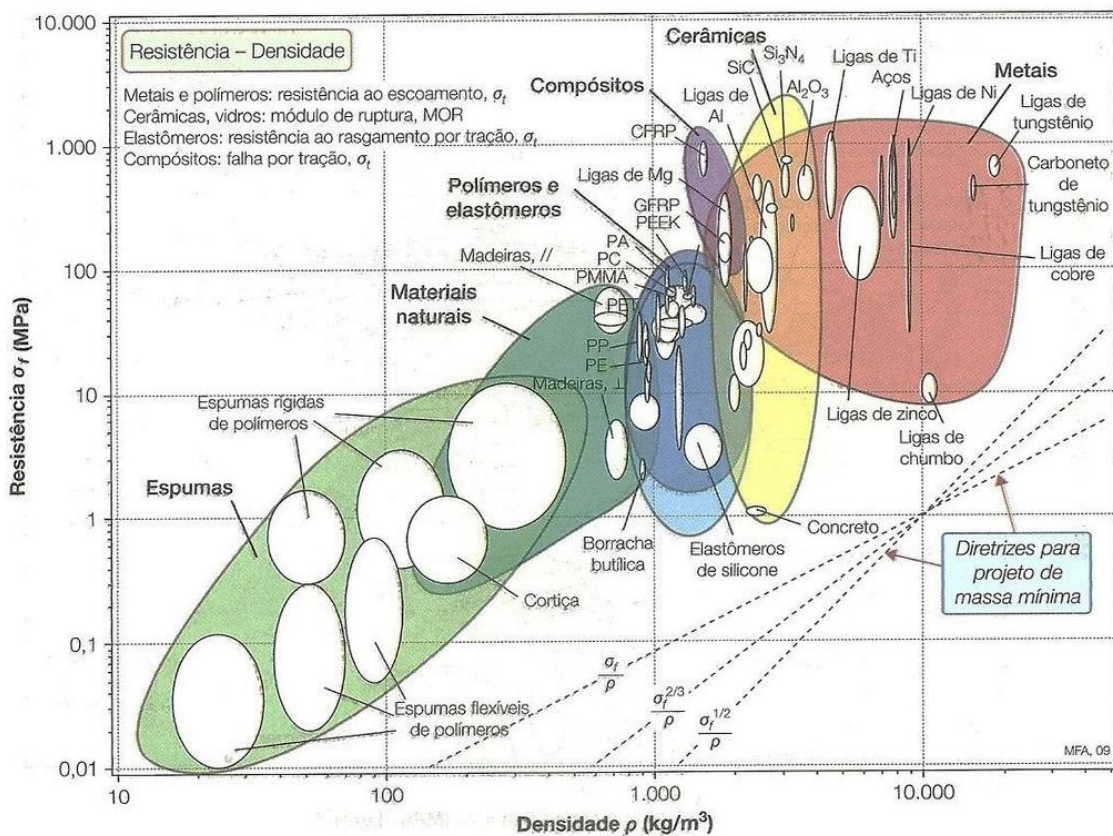


Figura 17 - Diagrama de Ashby para a seleção de materiais em projetos mecânicos correlacionando resistência e densidade

(Fonte: MOLISANI, 2017)

A temperatura máxima de serviço também é um fator que deve ser analisado na hora

de escolher o material mais adequado, pois a temperatura afeta os materiais de diversas maneiras, como por exemplo, através da decomposição, degradação, alteração da estrutura química, entre outras características que podem não só interferir no desempenho da função do produto, como também inutilizá-lo. A temperatura máxima de serviço de um material é a temperatura aproximada na qual é inseguro utilizá-lo. O diagrama da Figura 19 correlaciona a resistência (MPa) e temperatura máxima de serviço ($^{\circ}\text{C}$).

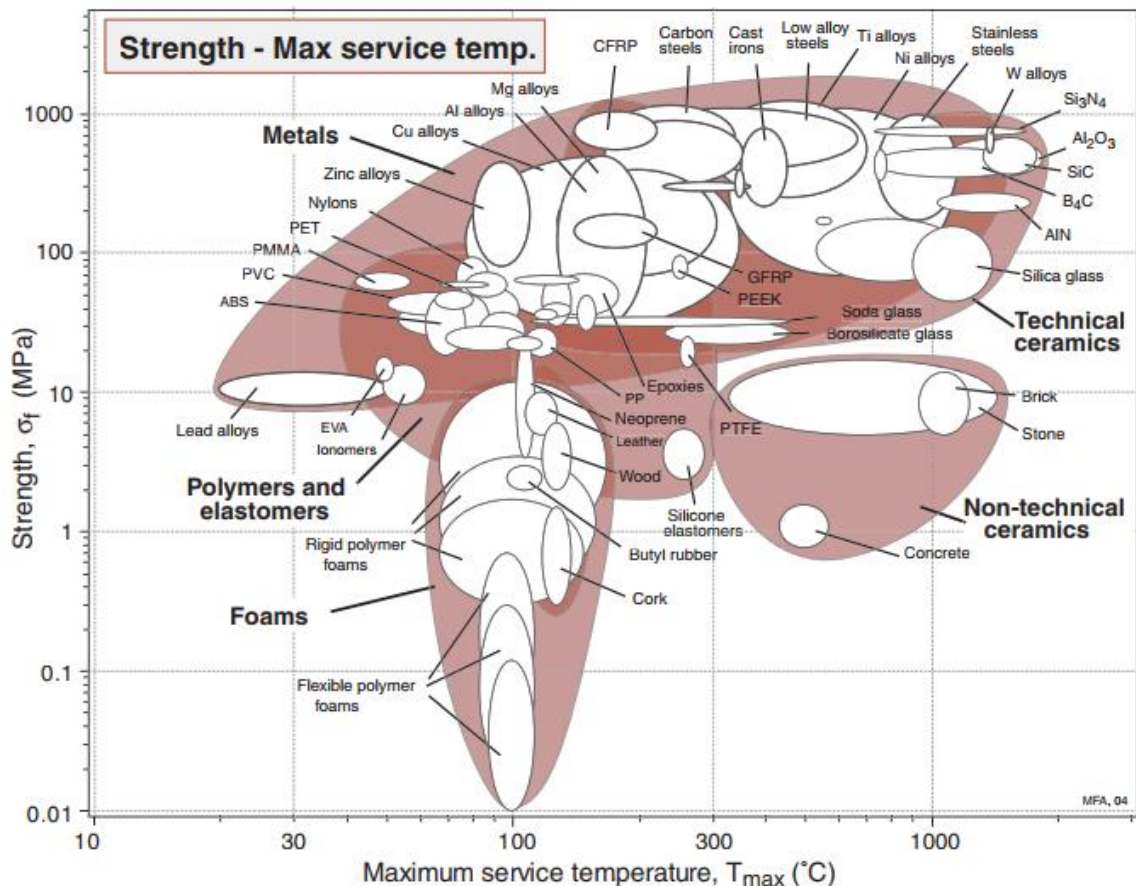


Figura 18 - Diagrama de Ashby para a seleção de materiais em projetos mecânicos correlacionando resistência e temperatura máxima de serviço

(Fonte: ASHBY, 2004)

Analisando as considerações acima, as variantes de solução e a proposta deste trabalho, a classe de materiais poliméricos foi a escolhida, uma vez que materiais cerâmicos não devem ser expostos a movimentos bruscos devido ao seu caráter frágil, e os materiais metálicos por sua vez possuem alta densidade, além de não possuir o conforto térmico necessário para o dispositivo assistivo em questão. Materiais compósitos e demais materiais

avançados não foram considerados visto que o objetivo do projeto é tornar a fabricação do produto viável e com custo acessível. Os materiais poliméricos apresentam resistência à corrosão e baixo coeficiente de atrito, textura, condutividade térmica e densidade adequados.

Existem hoje materiais próprios para fabricação de utensílios de alimentação e que possuem certificação para uso alimentício, porém são materiais de uso em equipamentos industriais e patenteados pelas próprias empresas, como o PC-ISO, material de policarbonato biocompatível desenvolvido e patentado pela empresa Stratasys. Este possui certificação ISO 10993 e USP Classe VI, podendo ser esterilizado por radiação gama ou óxido de etileno (EtO), sendo adequado para aplicações em peças fabricadas por impressão 3D biocompatíveis ou esterilizadas nas indústrias farmacêutica, médica e alimentícia. Materiais como o PC-ISO, contudo, são de difícil acesso e apresentam custo mais elevado. Serão, portanto, levados em consideração neste trabalho apenas os materiais disponíveis dentro do conceito de *open manufacturing*.

Para os materiais poliméricos, a unidade fundamental é a macromolécula, a qual é composta por vários monômeros que se unem por ligações fortes, primárias, do tipo valência compartilhada. Seu peso molecular quase não influencia na resistência mecânica, porém controla as propriedades de ruptura como tensão, módulo e energia de ruptura. Logo, a tenacidade aumenta conforme o aumento do peso molecular.

Os materiais poliméricos podem apresentar estrutura cristalina, as quais tendem a aumentar a resistência e a rigidez, amorfa ou uma mistura de ambas, sendo as não-cristalinas responsáveis pela elasticidade e tenacidade.

Como apresentado anteriormente, os processos baseados em extrusão apresentam limitações pela alta dependência de polímeros em sua grande maioria amorfos como matéria-prima, restringindo assim a disponibilidade de materiais compatíveis. Dessa forma, os materiais empregados comumente no processo de modelagem por deposição de material fundido (FDM) são polímeros termoplásticos sob a forma filamentar de estrutura semicristalinas ou amorfas.

Os materiais termoplásticos, como destacado por Manrich (2005), possuem a característica de quando aquecidos ao ponto de amolecimento não sofrerem alterações na sua estrutura química, dessa forma após resfriados podem ser reaquecidos e reutilizados para uma nova aplicação. Em contrapartida, os termofixos quando aquecidos ao estado de

amolecimento sofrem transformações químicas em sua estrutura que impossibilitam a reversão ao estado original e conseqüentemente a sua reutilização (HARADA; UEKI, 2012).

Dentre os requisitos de usuário listados anteriormente, tem-se a sustentabilidade como um fator importante, pensando em minimizar os problemas ambientais causados com o descarte persistente e inadequado de resíduos sólidos poliméricos que assolam os países de uma maneira geral, e aqueles em desenvolvimento em particular (FRANCHETTI; MARCONATO, 2006).

Inúmeras são as possibilidades de materiais possíveis para a impressão deste produto, porém atendendo aos requisitos mencionados, foram analisados três polímeros, amplamente e comumente utilizados em impressão 3D, como potenciais escolhas para o desenvolvimento do produto: (i) poli (ácido lático) (PLA); (ii) acrilonitrila butadieno estireno (ABS); (iii) PETG.

O PLA é um biopoliéster alifático, termoplástico, biocompatível, biodegradável, compostável e reciclável, cujo monômero (Figura 20) é derivado de fontes renováveis, como açúcar, milho, batata e cana de açúcar (DUBEY et al., 2017).

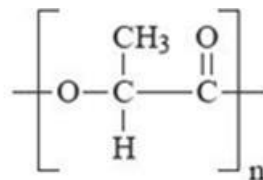


Figura 19 - Estrutura química do Poli(ácido lático)

(Fonte: Autora, 2021)

As principais formas de obtenção do ácido lático para a produção do PLA são a fermentação de açúcares a partir de fontes de carboidratos, como cana-de-açúcar, milho, beterraba e mandioca, sendo o PLA comercial produzido majoritariamente a partir do milho (AURAS et al., 2010). Por ser produzido a partir de fontes naturais, o PLA é classificado como um polímero verde (material renovável) e ecologicamente adequado (HASHIMA et al., 2010).

O poli(ácido lático) é um polímero termoplástico semicristalino que possui alto módulo de elasticidade em torno de 4,3GPa, densidade de 1,24g/cm³, resistência à tração entre 50-70MPa e resistência à flexão por volta de 100 MPa. A temperatura de fusão (T_m), temperatura de transição vítrea (T_g) e temperatura máxima de serviço situam-se em

aproximadamente 180°C, 67°C e 55°C, respectivamente, e a tensão de escoamento é de 66 MPa. Além de ecologicamente correto, o PLA apresenta boa transparência, biodegradabilidade, biocompatibilidade (não produz efeitos tóxicos na maioria dos seres vivos) e é biorreabsorvível (BRITO et al., 2015), apresentando assim, potencial para diversas aplicações, desde as mais simples, como embalagens (flexíveis e rígidas) até as mais especializadas como as biomédicas (LASPRILLA, 2012).

Com relação ao processamento por FDM, o PLA é um dos materiais mais utilizados para impressão, pelo nível de detalhe, pelas diferentes pigmentações e temperaturas de impressão menores que as de outros filamentos. Por outro lado, esse polímero possui algumas propriedades que limitam a sua aplicação mais ampla, como baixa barreira a gases, baixa estabilidade térmica, baixa tenacidade, fragilidade e baixa resistência mecânica para esforços que exijam resistência ao impacto devido à sua alta dureza e baixa ductilidade, o que restringe sua utilização quando há a necessidade de alta tenacidade e deformação plástica (SODERGARD; STOLT, 2002). Por conta disso, as peças produzidas a partir do PLA na manufatura aditiva são de difícil acabamento, formando lacunas ou cavidades que ocasionam o acúmulo de sujeira e alimentos os quais não saem com a simples lavagem da peça. Logo, o PLA não é indicado para confeccionar recipientes de comidas.

Outra opção a ser considerada para o desenvolvimento do produto foi o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). O ABS é um copolímero formado por unidades derivadas de três monômeros diferentes, cuja proporção de formação define as características gerais do polímero. O ABS é amorfo com estrutura complexa constituída de três fases diferentes: "uma fase borrachosa de polibutadieno, dispersa numa matriz vítrea formada por copolímero acrilonitrila e estireno (SAN), e uma terceira fase constituída de moléculas de polibutadieno grafitizadas com moléculas de SAN" (FERREIRA; PESAN; JUNIOR, 1997).

Ainda de acordo com FERREIRA et al. (1997), o ABS possui excelente resistência ao impacto a baixas temperaturas, entretanto tem como desvantagem a baixa resistência a solventes. A representação do ABS é dada pela Figura 21.

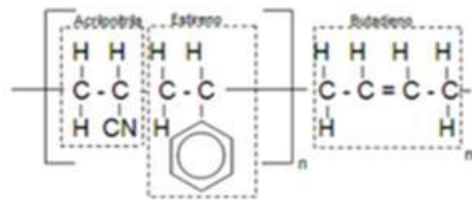


Figura 20 - Estrutura química do ABS

(Fonte: KLEIN, 2009)

O ABS pode ser definido também como um termoplástico derivado do petróleo que é amplamente utilizado na indústria, sendo um dos principais e primeiros materiais utilizados na impressão 3D. Suas características permitem boa rigidez, elevada estabilidade dimensional, porém baixa resistência a intempéries ambientais (CANEVAROLO, 2006).

Cada um dos monômeros utilizados contribuem para que o copolímero apresente uma determinada característica. No polímero ABS, a adição de acrilonitrila propicia resistência térmica e química ao material, enquanto o estireno contribui para a ductilidade, rigidez e brilho e o polibutadieno proporciona flexibilidade, tenacidade e resistência ao impacto. Uma das grandes vantagens do ABS é a facilidade de processamento deste material, podendo ser moldado por injeção, extrusão, termoformagem e compressão, por exemplo (SILVA, 2017).

O ABS é um polímero termoplástico amorfo que possui módulo de elasticidade em torno de 2,2GPa, densidade de 0,99g/cm³, resistência à tração entre 27,6-55,2MPa, resistência à flexão em torno de 66MPa, tensão de ruptura entre 25,2 a 45,6 MPa e tensão de escoamento de 38 MPa. A temperatura de fusão (Tm), temperatura de transição vítrea (Tg) e temperatura máxima de serviço situam-se em aproximadamente 220°C, 100°C e 80°C, respectivamente. Além disso, o ABS é um polímero reciclável, satisfazendo o requisito de sustentabilidade apresentado no projeto.

O ABS é superior ao PLA em relação às suas propriedades mecânicas, é durável, forte e é considerado leve. Suporta temperaturas mais elevadas, é ligeiramente flexível - facilitando assim o acabamento da peça - e sua maior vantagem em relação ao PLA, deve-se ao fato de ser o termoplástico mais barato no mercado de filamentos para impressão 3D. A desvantagem do ABS reside em pequena geração de fumaça, que é considerada tóxica, durante o processo de impressão. Por conta disso, deve-se operar a impressora 3D com segurança e uma capela de exaustão ou em áreas bem ventiladas.

Objetos feitos em ABS apresentam maior ductilidade, resistência à deformação, maior fase plástica por conta de características como a presença de elementos de borracha sintética (butadieno) em sua composição e menor rigidez durante o ensaio de tração (ou seja, possuem recuperação elástica maior do que o PLA), além de serem levemente flexíveis, tornando-o ideal para a produção de peças que precisem suportar cargas mecânicas e impactos. Também são consideravelmente resistentes à umidade e à temperatura. Por estas características, costumam ser escolhidos para protótipos industriais. Além disso, por possuir uma baixa dureza superficial, são mais fáceis para dar acabamento com lixas e aceitam tratamento com acetona, que deixa a peça com aspecto brilhante.

Entretanto, o ABS, possui uma característica que dificulta e cria empecilhos para a sua utilização: ele retrai durante o seu resfriamento. Isso pode deformar as peças e representar erros significativos em relação a sua precisão, principalmente em peças maiores. Para conseguir resultados melhores com este material, a impressora deve auxiliar a estabilizar o resfriamento do material, como, por exemplo, possuir mesa aquecida, utilizar materiais aderentes na base e utilizar gabinetes fechados.

A terceira opção que foi levantada como potencial material para o desenvolvimento do projeto é o PETG.

O PETG é um termoplástico variante do Polietileno Tereftalato (PET), onde o “G” significa “modificado por glicol”, sendo adicionado à composição do material durante a polimerização. Como resultado da adição desse novo glicol, é possível observar a redução de cristalinidade da resina final, aumento da ductilidade e da resistência ao impacto quando comparado à sua forma básica, o PET (ALL3DP, 2018). O PETG, quimicamente descrito como *poly(ethylene terephthalate-co-1, 4-cyclohexylenedimethylene terephthalate)*, representado pela Figura 22, é um polímero amorfo, o qual mantém seu estado semissólido quando aquecido, o que o torna adequado para a Impressão 3D; além de estar ganhando espaço e sendo amplamente utilizado nesse tipo de manufatura, principalmente quando há a necessidade de construir peças flexíveis e duráveis.

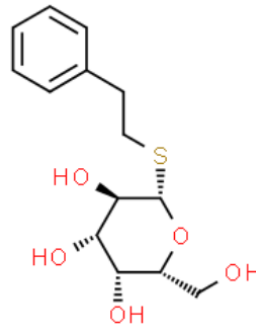


Figura 21 - Estrutura química do PETG

(Fonte: MORGIRWIN, 2019)

O PETG é considerado um material nobre para a impressão 3D pelas suas características de alta resistência mecânica, química e a altas temperaturas. Este tem a reputação de combinar a funcionalidade do ABS (mais resistente à deformação, resistente à temperatura, mais durável) e a confiabilidade do PLA (fácil de imprimir, com menor potencial de deformação ou encolhimento na impressão). Possui baixa dureza superficial, possibilitando acabamentos tão bons quanto em modelos feitos em ABS.

Castanheira (2016) define o PETG como um material de fácil impressão, que não possui grandes problemas de adesão na mesa. Outra característica do PETG é seu caráter higroscópico, sendo que absorve a umidade do ar, e torna-se pegajoso durante a impressão, o que contribui para uma boa adesão entre as camadas da peça produzida (ALL3DP, 2018).

Em um aspecto geral, o PETG consiste em um polímero com temperatura de transição vítrea próxima a 80°C e temperatura máxima de serviço de 75°C, com propriedades mecânicas semelhantes às do PET, tendo como vantagens uma notável tenacidade, flexibilidade, boa resistência ao impacto, maior resistência a intempéries e menor propensão a deformações do tipo *cracking*, ou seja, delaminação das camadas. Estudos como os de FOCKE et al. (2009) encontraram valores de resistência à tração, densidade, alongamento até a ruptura e módulo de elasticidade para o PETG próximos a 50,4 MPa, 1,23g/cm³, 73%, e 2,1 GPa, respectivamente. Sua tensão de escoamento é de 51 MPa.

Associado a boa resistência mecânica, também possui uma resistência à temperatura que suporta exposição ao sol. Para uma boa aderência na mesa, não é necessário aquecer muito – algo em torno de 85°C, podendo ser impresso até em mesa fria. Seu warp (empenamento) é baixo, possibilitando a utilização em impressora aberta. Sua dureza

superficial é baixa, o que gera um acabamento por lixa tão bom quanto o ABS.

Quimicamente, o PETG é um material muito resistente, o que dificulta o acabamento com alguns produtos como a acetona. Porém, para o transporte ou contato com materiais químicos, ele é o mais indicado. É importante dizer que o filamento PETG para impressoras industriais possui documentação e o selo de *Material Food Safety*, ou seja, indicado para objetos que precisem entrar em contato com alimentos.

Uma comparação de ensaio de tração com corpos de prova impressos (ASTM D 638) nos três materiais (Figura 21) evidencia que o PLA é o material que suporta maior carga estática (215daN ou 215kg de força) quando comparado ao ABS (em 100daN deformou 2mm) e ao PETG (suportou 162kg), contudo praticamente não possui deformação antes do rompimento, ou seja, é pouco dúctil. Por outro lado, se comparado ao PLA, o ABS se apresenta como um material mais dúctil, uma vez que possuiu um período de deformação bem maior. Nota-se que o PETG, se comparado ao ABS, suporta mais carga e é mais dúctil, já que apresentou uma deformação superior aos outros dois polímeros analisados, reforçando assim sua melhor resistência mecânica frente aos outros dois materiais analisados, aumentando o espectro de possibilidades de impressão de peças pela manufatura assistida.

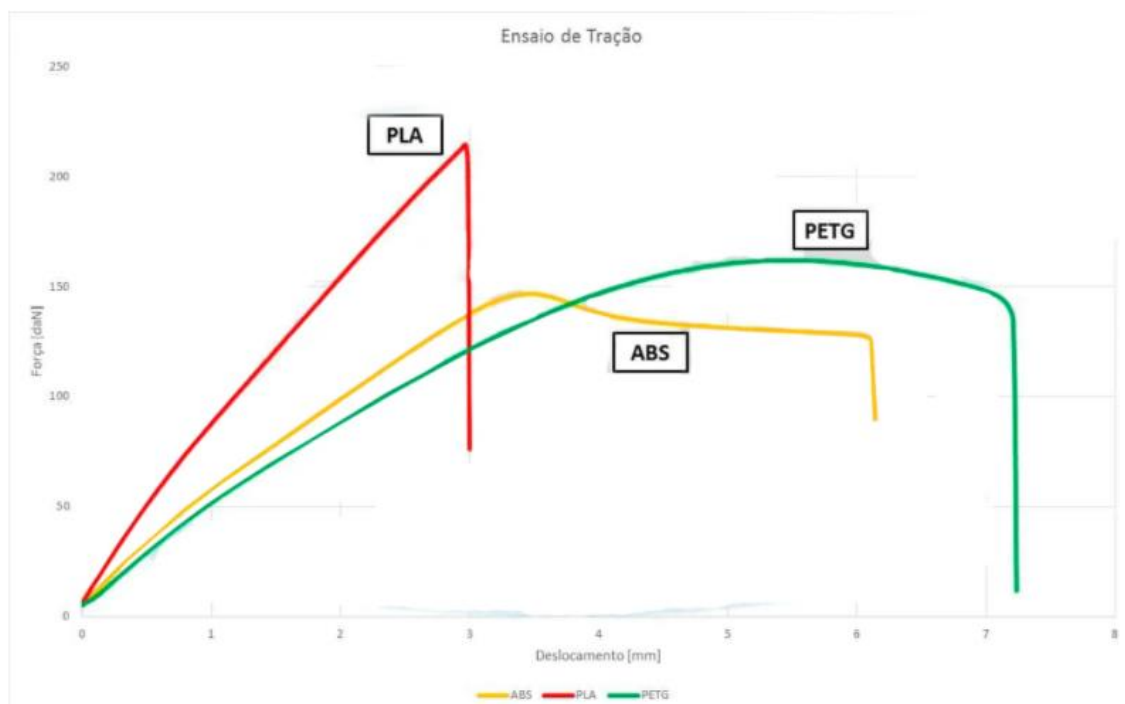


Figura 22 – Comparação do ensaio mecânico do PLA, ABS e PETG

(Fonte: ALL3DP, 2018)

O PLA é um material que apresenta rigidez e resistência à tração superiores, quando comparado ao PETG em aplicações de impressão 3D, conforme reportado por Santana et al. (2018). Entretanto aquele também é biodegradável, característica não desejável neste projeto, uma vez que o produto teria contato frequente com diversos fluidos e alimentos, agentes que poderiam acelerar a degradação do produto desenvolvido.

Para fins comparativos, foram levantados valores de algumas propriedades térmicas e mecânicas do PETG, do ABS e do PLA que estão compiladas na Tabela 11. É possível notar que o PETG possui características mecânicas próximas ao ABS, porém com propriedades térmicas melhores para a condução do calor, além de não ser prejudicial à saúde humana caso entre em contato com alimentos.

Tabela 11 - Propriedades térmicas e mecânicas do PLA, ABS e PETG

<u>Propriedades</u>	<u>PLA</u>	<u>ABS</u>	<u>PETG</u>
Módulo de Elasticidade	4,3 GPa	2,2 GPa	2,1 GPa
Densidade	1,24 g/cm ³	0,99 g/cm ³	1,23 g/cm ³
Resistência à Tração	50-70 MPa	27,6-55,2 MPa	50,4MPa
Resistência à Flexão	100 MPa	66 MPa	72 MPa
Temperatura de Fusão	180°C	220°C	240°C
Temperatura de Transição Vítre	67°C	100°C	80°C
Temperatura Máxima de Serviço	55°C	80°C	75°C
Tensão de Escoamento	66 MPa	38 MPa	51 MPa
Tensão de Ruptura	46 MPa	29 MPa	32,6 MPa
Temperatura de Deflexão Térmica	55°C	86°C	67°C
Dureza Shore D	85 Shore D	74 Shore D	75 Shore D

Fonte: Autora, 2021

O PETG é mais indicado para casos em que peças precisam de certa flexibilidade, alta resistência mecânica, alta resistência química, boa resistência térmica (até aproximadamente 85°C), peças sujeitas a pressão ou até mesmo em peças que serão esterilizadas. Além disso, respeitando o requisito de sustentabilidade, o PETG também é um polímero reciclável. Seguindo essas características, alguns exemplos de peças que podem ser feitas com o filamento PETG são recipientes de alimentos, protótipos mecânicos, peças de alto desgaste, reservatório de combustível de pequenos veículos, entre outras aplicações.

O PETG se mostrou como um material de mais fácil processamento que o ABS, além

de apresentar também resistência química e mecânica. Apesar de ser menos rígido e resistente que o PLA (SANTANA et al., 2018), a aplicação em pratos assistivos não necessita de elevada resistência mecânica. O fato de ser menos rígido e, portanto, menos frágil, também contribui para um maior amortecimento e redução da probabilidade de quebra em caso de quedas. Desta maneira, o PETG foi o material selecionado para este projeto.

5. CONCLUSÃO

A utilização de ferramentas sistemáticas auxilia nas tomadas de decisões ao longo do desenvolvimento do projeto, principalmente as técnicas de projeto nas atividades de projeto, propriamente ditas, em especial na fase conceitual. O uso de um procedimento sistemático para escolha de potenciais materiais de engenharia complementa a escolha de materiais para fabricação de protótipos e peças finais.

A área de tecnologia assistiva pode se beneficiar desses tipos de procedimentos, principalmente categorias de ajudas técnicas voltadas para atividades da vida diária, órteses e até mesmo mobilidade, pela maior qualidade e agilidade do projeto e pela fabricação do produto, tanto com relação ao design quanto ao material utilizado ser altamente personalizável e, conseqüentemente, apresentar menor taxa de abandono.

A manufatura aditiva, em especial a técnica FFF (*Fused Filament Fabrication*) se apresenta como uma opção de *Open Design*, especificamente na categoria DIY (*Do-It-Yourself*), a partir das quais comunidades abertas, como por exemplo, (*e-enabling*) e Thingiverse disponibilizam projetos para uso e melhoria constantes.

Portanto, reunir atributos de projetos focados em Tecnologia Assistiva com um método para escolha de materiais para fabricação dessas ajudas técnicas é bastante relevante, mesmo que a matéria-prima para essa categoria de equipamento ainda seja limitada.

Nesse contexto, a escolha do termoplástico PETG para a fabricação do protótipo funcional é apropriada, pois o polímero satisfaz os parâmetros identificados através da análise das variantes como tenacidade à fratura, temperatura máxima de serviço, condutividade térmica, densidade, módulo de elasticidade, rigidez, resistência, facilidade de impressão, entre outros.

O PETG combina a funcionalidade do ABS (apresenta maior ductilidade, resistência à deformação, menor rigidez durante o ensaio de tração e maior temperatura de transição vítrea) com a confiabilidade do PLA (maior fluidez, com menor potencial de deformação ou encolhimento na impressão). O fato de ser tenaz contribui para um maior amortecimento e redução da probabilidade de quebra em caso de quedas. Ademais, dentre os três materiais estudados, é o único que possui o selo de *Material Food Safety*, habilitando-o a compor objetos que entram em contato com alimentos.

Cabe ressaltar que a manipulação do protótipo durante os testes de qualidade, com instrumento de Tecnologia Assistiva denominado B-Quest, será feita com o uso de um filme plástico que revestirá sua cavidade interna. Essa avaliação é feita com a intervenção do Terapeuta Ocupacional que orienta o uso e avalia o desempenho também funcional do dispositivo assistivo.

REFERÊNCIAS

ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. 4 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. **Materials and design: the art and science of material selection in product design**. Amsterdam: Elsevier/ButterworthHeinemann, 2010.

BARBOSA, I.M; Alves, P.R.; Silveira, Z.C. (2021) Upper limbs' assistive devices for stroke rehabilitation: A systematic review on design engineering solutions. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. DOI: 10.1007/s40430-021-02919-4. ISSN 1678-5878.

BERMAN, Barry. 3-D printing: **The new industrial revolution**. Business Horizons, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>> Acesso em 9 mar. 2021

BERSCH, R., 2005. **Introdução à Tecnologia Assistiva**. Disponível em <http://www.cedionline.com.br/artigo_ta.html> Acesso em 23 fev. 2021.

BERSCH, R.; TONOLLI, J. C. **Introdução ao conceito de Tecnologia Assistiva e modelos de abordagem da deficiência**. Porto Alegre: CEDI - Centro Especializado em Desenvolvimento Infantil; 2006. Disponível em: < <http://www.bengalalegal.com/tecnologiaassistiva> >. Acesso em: 6 abr. 2021

BOISELLE AK, Grajo L C (2018) **They Said: A Global Perspective on Access to Assistive Technology**. *The Open Journal of Occupational Therapy*, 6 (3), Paper 2, July 2018.

BORILLE, A. V.; GOMES, J. O. **Selection of Additive Manufacturing Technologies Using Decision Methods, Rapid Prototyping Technology: Principles and Functional Requirements**. InTech, DOI: 10.5772/24045, 2011. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/rapid-prototyping-technology-principles-and-functional-requirements/selection-of-additive-manufacturing-technologies-using-decision-methods>. Acesso em: 04 fev. 2021

BOURELL, David L.; LEU, Ming C.; ROSEN, David W.. **Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing**. Austin: The University Of Texas At Austin Laboratory For Freeform Fabrication Advanced Manufacturing Center,

2009. Disponível em: <<https://wohlersassociates.com/roadmap2009A.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2021.

CALEGARI, Eliana Paula; OLIVEIRA, Branca Freitas de. **Aspectos que influenciam a seleção de materiais no processo de design**. Arcos Design. Rio de Janeiro: PPD ESDI - UERJ. Volume 8 Número 1 Junho 2014. pp. 1-19. Disponível em: [<http://www.epublicacoes.uerj.br/index.php/arcosdesign>]

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. São Paulo: LTC, 2006

CANEVAROLO, S. V. **Polímeros como materiais de engenharia**. In: . São Paulo: Artliber, 2006.

CARTER, W. **Additive manufacturing at GE: opportunities and challenges**. In: ABIMAQ INOVA – INDÚSTRIA DO FUTURO, 2014, São Paulo. Disponível em: <http://www.ipdmaq.org.br/site.aspx/Abimaq_Inova> Acesso em 26 jan. 2021

CARTILHA DO CENSO 2010 – **Pessoas com Deficiência** / Luiza Maria Borges Oliveira / Secretaria de Direitos Humanos da Presidência da República (SDH/PR) / Secretaria Nacional de Promoção dos Direitos da Pessoa com Deficiência (SNPD) / Coordenação-Geral do Sistema de Informações sobre a Pessoa com Deficiência; Brasília : SDH-PR/SNPD, 2012. Disponível em <<https://inclusao.enap.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/cartilha-censo-2010-pessoas-com-deficiencia-reduzido-original-eleitoral.pdf>> Acesso em 11 jan. 2021

CAT, 2007a. Ata da Reunião III, de abril de 2007, **Comitê de Ajudas Técnicas**, Secretaria Especial dos Direitos Humanos da Presidência da República (CORDE/SEDH/PR). Disponível em:

<<http://www.mj.gov.br/corde/arquivos/doc/Ata%20III%2019%20e%2020%20abril2007.doc>>

Acesso em: 17 fev. 2021.

CAT, 2007b. Ata da Reunião V, de agosto de 2007, **Comitê de Ajudas Técnicas**, Secretaria Especial dos Direitos Humanos da Presidência da República (CORDE/SEDH/PR). Disponível em: <http://www.mj.gov.br/corde/arquivos/doc/Ata_V_CAT1.doc> Acesso em: 21 jan. 2021.

CAT: **Comitê de Ajudas Técnicas**. Subsecretaria Nacional de Promoção dos Direitos da Pessoa com Deficiência. Tecnologia Assistiva. Brasília: CORDE, 2009.

CHENG, L.C.; MELO FILHO, L.D.R. **QFD: Desdobramento da função qualidade na gestão de desenvolvimento de produtos**. São Paulo: Editora Edgard BlücherLtda, 2010.

CRUMP, S. **Manufatura Assistiva: 20 anos de evolução na indústria**. 2016. Disponível em: <<http://www.cadxpert.com.br/ideias/manufatura-aditiva-20-anos-de-evolucao-na-industria/>>. Acesso em: 20 abril 2021

CRUZ, J. L. A. **Seleção de materiais e processos em um protótipo de eficiência energética pelo método Ashby: estudo de caso de uma biela de motor**. Universidade tecnológica federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

DUBEY, S. P., THAKUR, V. K., KRISHNASWAMY, S., et al. “**Progress in environmental-friendly polymer nanocomposite material from PLA: Synthesis, processing and applications**”, *Vacuum*, v. 146, pp. 655-663, 2017

FALLER, R. R. DA. **Engenharia e design: contribuição ao estudo da seleção de materiais no projeto de produto com foco nas características intangíveis**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

FERRANTE, M.; WALTER, Y. **A materialização da ideia: noções de materiais para design de produto**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

FERREIRA, L. A. S.; PESSAN, L. A.; JUNIOR, E. H. **Comportamento mecânico e termo-mecânico de blendas poliméricas pbt/abs**. In: . *Polímeros*: [s.n.], 1997. v. 7, n. 1, p. 67–97.

FOCKE, W.W., JOSEPH, S., GRIMBEEK, J., *et al.*, **Mechanical properties or ternary blends of ABS+HIPS+PETG**, *Polymer Plastics Technology and Engineering*, v. 48, n. 8, pp. 814-820, Jul. 2009.

FORD, S. L. N. **Additive Manufacturing Technology: Potential Implications por U.S. Manufacturing Competitiveness**. *Journal of International Commerce & Economics*, p. 1-35, set. 2014.

FRAZIER, W. **Metal Additive Manufacturing: A Review**. *Journal of Materials Engineering & Performance*, v.23, n.6, p. 1917-1928, jun.2014.

GALVÃO FILHO, T. A. **A Tecnologia Assistiva: de que se trata?** In: MACHADO, G. J. C.; SOBRAL, M. N. (Orgs.). *Conexões: educação, comunicação, inclusão e interculturalidade*. 1 ed. Porto Alegre: Redes Editora, p. 207-235, 2009.

GARDAN, J. **Additive manufacturing technologies: state of the art and trends**. *International Journal of Production Research*, v. 54, n. 10, 2016.

GHERARDINI F, Mascia, M T, Bettelli V, Leali F (2018) **A co-design method for the additive manufacturing of customized assistive devices for hand pathologies**. *Journal of Integrated Design and Process Science* 22 (1):21-37

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct Digital manufacturing**. 1. ed. Nova York: Springer, 2009.

GOODRICH, M. **3D Revolution**. Research (Michigan Technological University), p. 8-11, jan. 2014

HÖLMSTROM, J.; PARTANEN, J.; TUOMI, J.; WALTER, M. **Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: alternative approaches to capacity deployment**. *Journal of Manufacturing Technology Management*. v. 21, n. 6, p. 687-697. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1108/17410381011063996>> Acesso em 13 mar. 2021

HOPKINSON, N.; DICKENS, P.M. **Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production**. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, London, p.31–39, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1243/095440603762554596>> Acesso em 21 mar. 2021

HUANG, S. et al. **Additive manufacturing and its societal impact: a literature review**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.67, n.5-8, p. 1191-1203, 2013.

IBGE. Estatísticas Sociais. **IBGE divulga estimativa da população dos municípios para 2020**. [S. l.], 27 ago. 2020. Disponível em <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/28668-ibge-divulga-estimativa-da-populacao-dos-municipios-para-2020>> Acesso em 13 mai. 2021.

KLEIN, F. R. **Estudo da degradação termomecânica e fotooxidativa de**

poli(acrilonitrilabutadieno-estireno) para fins de reciclagem primária. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

LAN, P.T.; CHOU, S. Y.; CHENT, L.L.; GEMMILL, D. **Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus.** ComputerAided Design, v. 2, n. 1, p. 53-62, 1997.

LAUAND, G. B. A. **Fontes de informação sobre tecnologia assistiva para favorecer à inclusão escolar de alunos com deficiências físicas e múltiplas.** Tese (Doutorado em Educação Especial) Programa de Pós- graduação em Educação Especial, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

LOUREIRO, I. M. **Projeto e desenvolvimento do protótipo funcional de um prato de alimentação adaptado para pessoas com distúrbios neuromotores e tremor essencial.** Tese de TCC, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2019.

MAHAMOOD, R. M. et al. **Revolutionary Additive Manufacturing: An Overview.** Lasers in Engineering (Old city publishing), v.27, n. 3, p.161-178, 2014.

MANZINI, E. J. **Tecnologia assistiva para educação: recursos pedagógicos adaptados.** In: Ensaio pedagógicos: construindo escolas inclusivas. Brasília: SEESP/MEC, p. 82-86, 2005.

MANZINI, E. **The material of invention.** London: The design council, 1989.

MILLER, R. **Additive Manufacturing (3D Printing): Past, Present and Future.** Industrial Heating, v.82, n.5, p.39-43, 2014.

MINETOLA, P. et al. **Impact of additive manufacturing on engineering education – evidence from Italy.** Rapid Prototyping Journal, v.21, n.5, p.535-555, 2015.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Política Nacional de Saúde da Pessoa Portadora de Deficiência.** Brasília; 2008. Disponível em:

<http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/politica_nacional_saude_pessoa_deficiencia.pdf>

. Acesso em: 09 mar 2021.

PRINCE, J. D. **3D Printing: An Industrial Revolution.** Journal of Electronic Resources in Medical Libraries, v.11, n.1, 2014.

PAHL, G., BEITZ, W., WALLACE, K.; BLESSING, L. **Engineering Design: A Systematic Approach**. Springer Science & Business Media; 2007.

PUBLIC LAW 108-364. **108th Congress, 2004**. Tradução Rita Bersch. Disponível em <http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getdoc.cgi?dbname=108_cong_public_laws&docid=f:publ364.108> Acesso em 17 fev. 2021.

RADABAUGH, M. P. **Study on the Financing of Assistive Technology Devices of Services for Individuals with Disabilities** - A report to the president and the congress of the United State, National Council on Disability, Março 1993. Disponível em <<http://www.ccclivecaption.com>> Acesso em 15 fev. 2021.

RADABAUGH, M.P. NIDRR's Long Range Plan - **Technology for Access and Function Research** Section Two: NIDDR Research Agenda Chapter 5: TECHNOLOGY FOR ACCESS AND FUNCTION

RIEMER-REISS ML, Wacker R R (2000) **Factors associated with assistive technology discontinuance among individuals with disabilities**. *Journal of Rehabilitation*, 66 (3).

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a melhoria do processo**. 1a. ed. Saraiva, 2006.

RUZ, D. M. C.; EMMEL, M. L. G. **Assistive technology accessibility and abandonment: challenges for occupational therapists**. *The Open Journal of Occupational Therapy*. v. 4, n. 1; 2016

SASSAKI, R. K. 1996. **Por que o termo “Tecnologia Assistiva”?** Disponível em <<http://www.assistiva.com.br/>> Acesso em 22 fev. 2021.

SILVA, C. M. D. **Elaboração de uma linha de extrusão para reciclagem de polímeros (abs e pla)**. Projeto apresentado no 17o Congresso Nacional de Iniciação Científica - CONIC/SEMESP, 2017.

SOUZA, J. J. F. **Sistema metodológico aplicado para a seleção de materiais**. Dissertação

de mestrado. Centro Universitário de Volta Redonda. Volta Redonda, 2017.

SQUIRES LA.; Willians N, Morrison VL (2019) **Matching and accepting assistive technology in multiple sclerosis: A focus group study with people with multiple sclerosis, carers and occupational therapists.** *Journal of Health Psychology*, 24 (4):480-494. Disponível em <<https://doi.org/10.1177/1359105316677293>> Acesso em 08 jun. 2021.

VEIT. D. R. **Impactos da Manufatura Aditiva nos sistemas produtivos e suas repercussões nos critérios competitivos.** Dissertação de doutorado. Unisinos, 2018.

World Health Organization (WHO), The World Bank. Relatório mundial sobre a deficiência; tradução Lexicus Serviços Lingüísticos. – São Paulo : SEDPcD, 2012. 334 p. Disponível em https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44575/9788564047020_por.pdf?sequence=4 > Acesso em 06 jan. 2021.

World Health Organization – WHO. (2018) **Global Cooperation on Assistive Technology (GATE).** Disponível em < <https://www.who.int/news-room/papers-detail/open-consultation-assistive-product-specification-drafts>> Acesso em 08 jun. 2021.

ZAPAROLLI, Domingos. **O avanço da impressão 3D:** Aplicações na área da saúde e na indústria impulsionam crescimento de 25% ao ano dessa técnica de manufatura aditiva. **Pesquisa FAPESP**, [s. l.], ed. 276, fev. 2019. Disponível em <<https://revistapesquisa.fapesp.br/o-avanco-da-impressao-3d/>> Acesso em 10 mai. 2021.