

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS - PPGEPS

NAIRANA APARECIDA ALBERTON DISNER

**MODELO DE TOMADA DE DECISÃO PARA AUXILIAR NA ESCOLHA DA
MELHOR TECNOLOGIA DE MANUFATURA ADITIVA PARA A PRODUÇÃO DE
PEÇAS MRO DE APOIO A PRODUÇÃO**

CURITIBA

2017

NAIRANA APARECIDA ALBERTON DISNER

**MODELO DE TOMADA DE DECISÃO PARA AUXILIAR NA ESCOLHA DA
MELHOR TECNOLOGIA DE MANUFATURA ADITIVA PARA A PRODUÇÃO DE
PEÇAS MRO DE APOIO A PRODUÇÃO**

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia de Produção e
Sistemas da Pontifícia Universidade
Católica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Deschamps

CURITIBA

2017

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR

D612m 2017	Disner, Nairana Aparecida Alberton Modelo de tomada de decisão para auxiliar na escolha da melhor tecnologia de manufatura aditiva para a produção de peças MRO de apoio a produção / Nairana Aparecida Alberton Disner ; orientador, Fernando Deschamps. – 2017. 131 f. : il. ; 30 cm Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2017 Bibliografia: 108-113 1. Produtos industrializados. 2. Processo decisório. 3. Planejamento da produção. 4. Engenharia de produção. I. Deschamps, Fernando. II. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. III. Título. CDD 20. ed. – 670
---------------	---

Biblioteca Central

ERRATA

DISNER, Nairana A. A. Modelo de tomada de decisão para auxiliar na escolha da melhor tecnologia de manufatura aditiva para a produção de peças MRO de apoio a produção. 2017. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2017.

Folha	Linha/Referência	Onde se lê	Leia-se
70	Figura 25	MJT	MJM
115	Apêndice 2	MJT	MJM
117	Apêndice 4	MJT	MJM
118	Apêndice 5	MJT	MJM



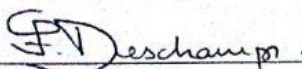
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas

TERMO DE APROVAÇÃO

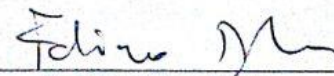
Nairana Aparecida Alberton Disner

MODELO DE TOMADA DE DECISÃO PARA AUXILIAR NA ESCOLHA DA MELHOR TECNOLOGIA DE MANUFATURA ADITIVA PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS MRO DE APOIO A PRODUÇÃO.

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:


Presidente da Banca
Prof. Dr. Fernando Deschamps
(Orientador)


Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures
(Membro Interno PPGEPS/PUCPR)


Prof. Dr. Fabiano Drozda
(Membro Externo PPGEPS/UFPR)

Curitiba, 25 de agosto de 2017.

Dedico esse trabalho ao meu orientador, Fernando Deschamps; aos meus pais e irmãos; ao meu namorado; às minhas amigas, Stephanie, Suzana e Hanay e aos meus colegas, Maurício Britto, Marcos Loest e Alfredo Marczynski.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos meus pais, por me ensinarem que precisamos sempre lutar por aquilo que desejamos e, mais do que tudo, por me ensinarem que além da luta precisamos também ter fé em Deus e na vida.

Agradeço ao meu orientador, Fernando Deschamps, por me proporcionar a oportunidade em participar do programa, por toda a orientação e compreensão ao longo do mestrado e por todo o conhecimento passado. Sua orientação foi de extrema importância para o desenvolvimento de pontos críticos da dissertação.

Agradeço também aos professores, Fabiano e Loures, por aceitarem o convite e participarem da banca de defesa, agregando com as críticas construtivas.

Agradeço aos meus amigos e colegas, principalmente, a Hanay, a Suzana, ao Gabriel, ao Alfredo, ao Britto e ao Marcos, por todo o auxílio ao longo dos projetos relacionados a impressão 3D que vivenciamos juntos na empresa e por todo o conhecimento compartilhado que proporcionou parte da dissertação.

Agradeço, mais que especialmente, a minha amiga, Stephanie, por tudo que compartilhamos durante toda essa jornada (que iniciou na graduação). Obrigada por estar por perto sempre.

Agradeço a minha irmã, Alexandra, ao meu irmão, Renan, ao meu cunhado, Fernando, e a minha cunhada, Julia, por estarem torcendo e rezando por mim, por me escutarem, algumas vezes, falando sobre a dissertação e demonstrarem (ou ao menos tentarem) interesse, até mesmo contribuírem. Agradeço ao meu sobrinho, Ruan, por simplesmente saber como demonstrar o amor (muitas vezes um abraço salva o dia).

Agradeço ao meu namorado, Caio, por sempre estar comigo, acreditando em mim e me incentivando a continuar e dar o meu melhor.

Agradeço as minhas amigas, Jaqueline, Roberta, Franciele e Thais, por estarem torcendo por mim e dando forças sempre que precisei.

A todos, o meu mais sincero e humilde, muito obrigada de todo o coração. Vocês fizeram e fazem diferença em minha vida.

RESUMO

Uma das principais vantagens das tecnologias de manufatura aditiva (em inglês, *additive manufacturing* – AM) é a redução de custos de produção e com ferramental e a fabricação de peças com geometrias complexas. Partindo disso, tem-se que é possível que esses benefícios sejam resultados dos processos industriais, e uma das formas disso acontecer é através da produção de peças de apoio a produção (gabaritos, suportes, dispositivos e outros). Porém, existem diversos tipos de tecnologias de AM cada qual com sua peculiaridade. Além disso, quando se fala em produção de peças entende-se que essas deverão apresentar características específicas para desenvolver sua função. Sendo assim, criou-se um modelo de tomada de decisão para auxiliar as indústrias a definirem qual a melhor tecnologia de AM para investir na produção de peças de apoio a produção considerando quais as principais características físicas (critérios prioritários) que cada peça deve apresentar. As tecnologias consideradas no modelo são: FDM, MJM, SLA e SLS; e os critérios: custo, precisão, propriedade dos materiais (resistência mecânica), rugosidade e tempo de produção. Para auxiliar no projeto, foi realizado um estudo da literatura sobre as principais tecnologias de manufatura aditiva e alguns modelos de tomada de decisão; e um estudo de casos exploratórios envolvendo peças de apoio a produção de uma montadora de veículos. Após o modelo desenvolvido, as peças do estudo de caso foram aplicadas no próprio modelo e o resultado obtido foi a seleção da tecnologia MJM para a produção de todas as peças, indicando que essa poderá suprir da melhor forma possível os critérios prioritários. A relevância do modelo baseia-se está no fato de que com ele é possível otimizar os benefícios que a produção via impressão 3D oferece por considerar como cada tecnologia atende cada critério, a relação dos critérios prioritários para cada peça e a importância de cada peça para a organização. Com isso, o ciclo de correlações tanto de critérios quanto de peças e tecnologias se completa e o retorno financeiro acaba sendo maior, pois o número de peças a ser atingido é maior e, não só isso, mas a qualidade das peças oferecidas fará com que se tenha maior abrangência dos benefícios e, conseqüentemente, retorno mais rápido do investimento.

Palavras-chave: Tecnologias de Manufatura Aditiva. Modelo de Tomada de Decisão. Peças de apoio a produção.

ABSTRACT

One of the main advantages of additive manufacturing technologies is the cost reduction, of production and tooling, and the manufacture of complex geometries parts. It is believed that it is possible that these benefits are the results of industrial processes, and one of the ways for this to happen is through the production of production support parts (jigs, supports, devices and others). However, there are several types of AM technologies and each with their own peculiarities. In addition, it is understood that the parts produced must have specific characteristics to perform their function. Thus, a decision-making model was created to help the industries to define the best AM technology to invest in the production of production support parts, considering the main physical characteristics (priority criteria) that each part must presente. The technologies considered in the model are: FDM, MJM, SLA and SLS; and criteria: cost, accuracy, property of materials (mechanical strength), roughness and production time. To assist in the project, a literature study on the main additive manufacturing technologies and some models of decision making was carried out; and an exploratory case study involving production support parts from a vehicle assembler was also developed. After the developed model, the case study's parts were applied in the model and the selected technology was the MJM, for the production of all parts, indicating that it will best meet the priority criteria. The relevance of the model is based on the fact that it is possible to optimize the benefits that the production via 3D printing offers by considering how each technology meets each criteria, the relation of the priority criteria for each part and the relevance of each part for the organization.

Keywords: Additive Manufacturing Technologies. Model of Decision Making. Production Support Parts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Relação custo x demanda – Manufatura Convencional e Aditiva	16
Figura 2: Processo produtivo genérico	21
Figura 3: Tipos de tecnologias (a)	22
Figura 4: Tipos de tecnologias (b)	23
Figura 5: Evolução das tecnologias.....	24
Figura 6: Principais setores e aplicações atingidos pela AM.....	24
Figura 7: Caminhos estratégicos.....	27
Figura 8: Processo SLA	30
Figura 9: Processo FDM.....	33
Figura 10: Processo SLS.....	35
Figura 11: Processo 3DP	37
Figura 12: Processo LENS	38
Figura 13: Processo LOM.....	42
Figura 14: Processo MJM.....	44
Figura 15: Fluxo MADM e MODM	48
Figura 16: Tipos de problemáticas	49
Figura 17: Passos Método SAW	50
Figura 18: Matriz de decisão	51
Figura 19: Estrutura método AHP	56
Figura 20: Escala Fundamental de Saaty	57
Figura 21: Matriz B	57
Figura 22: Matriz A	57
Figura 23: Cálculo prioridade relativa global	59
Figura 24: Método Promethee: Função de preferência	62
Figura 25: Ranking das tecnologias - Dados da Pesquisa aplicada.....	70
Figura 26: Compilado de critérios – análise da literatura	71
Figura 27: Ranking dos critérios.....	72
Figura 28: Modelo conjunto de peças MRO x Tecnologias de AM.....	72
Figura 29: Pesquisa - Uso da impressão 3D	74
Figura 30: Pesquisa sobre dimensão de equipamentos.....	75
Figura 31: Etapa III: Estrutura AHP	76
Figura 32: Critérios – AHP	79

Figura 33: Etapa V: Método Promethee	81
Figura 34: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Bico de Mastic	84
Figura 35: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Bico de Mastic	85
Figura 36: Etapa III: AHP Resultado – Bico de Mastic	85
Figura 37: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Apoio de solda.....	87
Figura 38: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Apoio de solda.....	87
Figura 39: Etapa III: AHP Resultado – Apoio de solda.....	87
Figura 40: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Transportador de laterais.....	89
Figura 41: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Transportador de laterais	89
Figura 42: Etapa III: AHP Resultado – Transportador de laterais.....	89
Figura 43: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Apoio de escapamento central	91
Figura 44: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Apoio escapamento central	91
Figura 45: Etapa III: AHP Resultado – Apoio escapamento central	91
Figura 46: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Batente de centragem	93
Figura 47: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Batente de centragem	93
Figura 48: Etapa III: AHP Resultado – Batente de centragem	93
Figura 49: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Bucha antigiro.....	95
Figura 50: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Bucha antigiro.....	96
Figura 51: Etapa III: AHP Resultado – Bucha antigiro.....	96
Figura 52: Etapa IV: AHP Comparação par a par dos critérios gerais	98
Figura 53: Etapa IV: AHP Prioridade relativa dos critérios	98
Figura 54: Etapa IV: Método AHP - Comparação par a par por critério	99
Figura 55: Etapa IV: Método AHP – Matriz final.....	99
Figura 56: Etapa V: Tabela inicial método Promethee	100
Figura 57: Etapa V: Software Visual Promethee	101
Figura 58: Etapa V: Resultado Promethee - Tecnologia FDM.....	101
Figura 59: Etapa V: Resultado Promethee - Tecnologia MJM.....	102
Figura 60: Etapa V: Resultado Promethee - Tecnologia SLA.....	102
Figura 61: Etapa V: Resultado Promethee - Tecnologia SLS.....	102

Figura 62: Etapa V: Resultado Promethee I103

Figura 63: Etapa V: Resultado Promethee II103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre manufatura convencional e aditiva.....	17
Tabela 2: Linha do tempo das principais aplicações da AM.....	25
Tabela 3: Aplicações de AM.....	25
Tabela 4: Tabela Comparativa - Tecnologias de AM	45
Tabela 5: Características gerais dos modelos MADM e MODM	48
Tabela 6: Métodos família ELECTRE.....	55
Tabela 7: Índice aleatório ICR	58
Tabela 8: Critérios compilados - Casos exploratórios	67
Tabela 9: Etapas do modelo.....	72
Tabela 10: Resultado da Pesquisa - Critério Custo vs. Tecnologias	77
Tabela 11: Resultado da Pesquisa - Critério Precisão vs. Tecnologias	77
Tabela 12: Resultado da Pesquisa - Critério Resistência Mecânica vs. Tecnologias.....	77
Tabela 13: Resultado da Pesquisa - Critério Rugosidade vs. Tecnologias	77
Tabela 14: Resultado da Pesquisa - Critério Tempo vs. Tecnologias	77
Tabela 15: Relação Critérios e Tecnologias - Descrição desempate	79
Tabela 16: Etapa II: relação de todas as peças	82
Tabela 17: Etapa IV: Informações dos critérios x conjunto de peças	97
Tabela 18: Etapa IV: Tabela de referência - comparação par a par por critérios	99

LISTA DE SIGLAS

3DP	Impressão Tridimensional
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i> (Manufatura Aditiva)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BCG	<i>Boston Consulting Group</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CR	Razão da Consistência
EBM	Fusão por Feixe de Elétrons
ELECTRE	<i>ELimination Et Choix Traduisant la REalité</i>
FDM	Modelagem por Deposição de Material Fundido
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
JIT	<i>Just in Time</i>
LENS	Conformação Próxima ao Formato Final via Laser
LOM	Manufatura de Objetos em Lâminas
MADM	Tomada de Decisão Multiatributo
MCDM	Métodos de Tomada de Decisão Multicritério
MJM	<i>Multi-jet Modeling</i>
MODM	Tomada de Decisão Multiobjetivo
MRO	Peças de Manutenção, Reparo e Operação
Ni	Níquel
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations</i>
PU	Poliuretano
RP	Prototipagem rápida
SAW	Ponderação Simples Aditiva
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1.1 PROBLEMA.....	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 JUSTIFICATIVA.....	19
1.4 MÉTODO.....	20
TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA	21
2.1 APLICAÇÕES.....	24
2.2 PARÂMETROS DE ESCOLHA.....	28
2.3 TECNOLOGIAS ESTUDADAS.....	29
2.3.1 Estereolitografia (SLA).....	29
2.3.2 Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)	32
2.3.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	34
2.3.4 Impressão Tridimensional (3DP)	36
2.3.5 Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS)	38
2.3.6 Fusão por Feixe de Elétrons (EBM)	39
2.3.7 Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM).....	41
2.3.8 Multi-jet Modeling (MJM).....	43
2.4 QUADRO COMPARATIVO DAS TECNOLOGIAS DE AM	45
MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO	47
3.1 PONDERAÇÃO SIMPLES ADITIVA (SAW)	50
3.2 TOPSIS	51
3.3 ELECTRE	53
3.4 AHP	56
3.5 PROMETHEE	59
ESTUDO – CASOS EXPLORATÓRIOS.....	63
4.1 BICO DE MASTIC	64
4.2 PEÇA APOIO SOLDA	65
4.3 TRANSPORTADOR LATERAL	65
4.4 APOIO ESCAPAMENTO CENTRAL	66
4.5 BATENTE DE CENTRAGEM	66
4.6 BUCHA ANTIGIRO	67

4.7	QUADRO COMPARATIVO	67
MODELO 68		
5.1	ETAPAS	73
5.1.1	ETAPA 1	73
5.1.2	ETAPA 2	73
5.1.3	ETAPA 3	76
5.1.3.1	Etapas 4 e 5	80
5.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO	82
CONCLUSÕES		104
REFERENCIAS.....		108
APÊNDICE 1: PESQUISA – PARTE A		114
APÊNDICE 2: PESQUISA – PARTE B		115
APÊNDICE 3: PESQUISA – PARTE B		116
APÊNDICE 4: PESQUISA – PARTE D		117
APÊNDICE 5: PESQUISA – PARTE E.....		118
APÊNDICE 6: ARTIGO ICIEOM, 2016		119
APÊNDICE 7: ARTIGO ISPE, 2016.....		124

INTRODUÇÃO

Em um universo de ampla concorrência o objetivo relevante das organizações é assumir uma posição de principal *player* do mercado/segmento em que atua, atingindo os objetivos estratégicos traçados. No entanto, o fator preocupante é como atingir essa posição visto que as tecnologias e inovações mercadológicas, que geralmente proporcionam vantagens, estão disponíveis com maior acessibilidade para todos. Ou seja, não é vantagem apenas ter a tecnologia, mas sim saber onde e como usar e, o principal, se a tecnologia adquirida irá proporcionar à organização o que esta deseja obter. Portanto, para ter o resultado que se espera, é essencial analisar de forma coerente qual tecnologia utilizar e como utilizar de acordo com as necessidades, diferenciais e deficiências da organização.

Além de olhar para as necessidades dos clientes, deve-se também atentar-se para o que o mercado como um todo está exigindo. Geralmente essas exigências giram em torno de responsabilidade ambiental, social e tendências tecnológicas e inovadoras. Partindo desse ponto, tem-se um assunto em destaque no ambiente mercadológico, a chamada indústria 4.0, a qual vem com o intuito de interligar toda a rede de uma organização, ponta a ponta, agregando valor a toda a cadeia. O conceito parece simples, porém são diversos fatores que devem ser considerados e analisados. Segundo o *Boston Consulting Group* (BCG, 2015), dentre eles estão: robôs autônomos, simulação, sistema de integração horizontal e vertical, Internet das Coisas (em inglês, *Internet of Things* - IoT), *cybersecurity*, *cloud*, manufatura aditiva (AM), realidade aumentada, *big data* e *analytics*. Esses pontos, cada qual com a sua peculiaridade, são capazes de auxiliar ao fortalecimento da competitividade nas organizações.

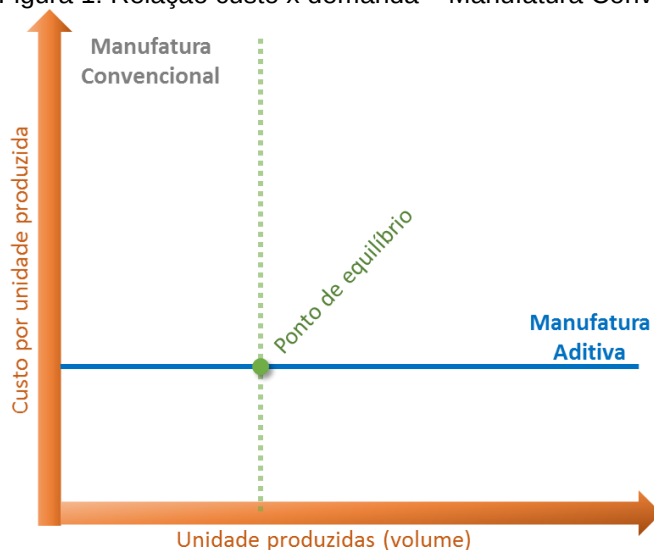
A constante inovação, o que inclui a Indústria 4.0, vem do fato das empresas buscarem sempre por produtos/serviços que além de atender as necessidades dos clientes, tragam diferencial para o mercado; e para as empresas de manufatura a busca é, principalmente, por abordagens que otimizem os processos produtivos em termos de velocidade, redução de custos e qualidade do produto, com o intuito de aumentar as margens de lucro (Barros, 2014).

Considerando os fatores mencionados pela BCG (2015) que estão em ascensão, juntamente com o que as organizações buscam, acredita-se que dentre os listados a manufatura aditiva é capaz não somente de produzir protótipos e

componentes individuais, mas utilizar a tecnologia para a produção de pequenos lotes de produtos personalizados que oferecem vantagens, como: a redução com transportes e estoques; a flexibilidade de mudanças em projeto; a capacidade de visualização sofisticada (Barros, 2014); a produção de peças complexas geometricamente; a velocidade para o mercado e redução de resíduos (Cotteleer, Holdowsky e Mahto, 2014). Entretanto, devemos considerar que para atingir esses benefícios há uma série de análises a serem realizadas, inclusive a decisão de produzir as peças, em questão, pela manufatura aditiva ou tradicional.

Geralmente quando há uma decisão a ser tomada de qual meio produtivo será utilizado para a produção de determinada peça, um dos fatores analisados é o custo, e isso também ocorre quando a manufatura aditiva está envolvida. Porém, esse caso deve ser analisado considerando certas peculiaridades como, por exemplo, que o custo da produção via tecnologias de AM é mais baixo que por meios convencionais quando o lote a ser produzido é baixo e o contrário quando a demanda é alta, essa relação é evidenciada na Figura 1 (Hagel et al, 2015). Isso ocorre pelo fato que o custo relacionado a manufatura aditiva permanece sempre o mesmo independente da demanda, em contrapartida o custo da manufatura convencional é diluído com a demanda em larga escala. Sendo assim, é essencial identificar o ponto de equilíbrio entre as tecnologias e qual a demanda corresponde a cada meio de produção. Além do fator custo outros pontos são analisados durante a escolha, como por exemplo: a variedade de materiais, o tamanho da peça e outros. As principais diferenças entre a manufatura convencional e a aditiva constam na Tabela 1.

Figura 1: Relação custo x demanda – Manufatura Convencional e Aditiva



Fonte: Adaptado de Cotteleer e Joyce (2014).

Tabela 1: Comparação entre manufatura convencional e aditiva

Característica	Manufatura convencional	Manufatura aditiva
Tecnologia de Manufatura	Baseado em pré montagem de peças modulares com diferentes combinações ou diferenciação atrasada	Manufatura automatizada baseada em software CAD e manufatura aditiva
Supply Chain Integração Requerimentos	Necessário gerenciamento do <i>supply chain</i> altamente integrada para garantir produtos certos nos tempos certos de múltiplos fornecedores	Utiliza fontes prontamente disponíveis de vários fornecedores
Benefícios econômicos	Capacidade de produzir produtos personalizados a com preços relativamente baixos. Baixo risco de inventário. Melhoria da gestão de capital de giro.	
Range de produtos	Computadores, relógios, janelas, sapatos, jeans	Protótipos, <i>mockups</i> , peças de substituição, coras (dental), membros artificiais

Fonte: Adaptado de Berman (2012).

Logo, baseado nas constatações da Tabela 1 e da Figura 1, entende-se que a manufatura aditiva não veio para substituir a manufatura convencional, pelo menos não por enquanto, mas sim como meio alternativo e vantajoso para a produção de determinados itens. Entretanto, vale ressaltar que a AM (ou a chamada impressão 3D) é uma das tecnologias em maior destaque atualmente, atingindo as áreas alimentícias, automobilísticas, construção civil, varejo, dentre outras. Considerando o mercado automobilístico, de acordo com Giffi *et al.* (2014), existem duas formas de entrada das tecnologias de AM nas montadoras de automóveis que podem gerar grande influência competitiva e torná-las grandes players no mercado, são elas:

- Fonte de inovação de produtos: produção de componentes com menos restrições de design (muitas vezes condicionado pelo processo produtivo). A tecnologia proporciona a produção de peças em diversos materiais, geometrias complexas, melhoria na funcionalidade do componente, entre outros. Esse tipo de tecnologia pode proporcionar a criação mais rápida de veículos, mais segura e mais eficiente.
- Condutor de transformação da cadeia de suprimentos: as tecnologias de AM utilizam somente o que precisam para produzir a peça, dessa forma há uma redução de desperdícios. A produção por meio dessas tecnologias, geralmente, é feita sobre encomenda e, pode ser dentro das próprias instalações da organização, com isso há redução com custos relacionados a inventários, logística, processo de compras, e o próprio custo unitário da peça produzida.

Portanto, o presente trabalho será desenvolvido considerando a transformação na cadeia de suprimentos, mais precisamente em peças de manutenção, reparo e operação (MRO). Segundo Murray (2016), peças MRO são usadas na produção e manutenção da planta e podem ser itens como suprimentos de manutenção, peças de reposição e consumíveis usados no processo de produção. Ou seja, peças que não fazem parte do produto final, mas são de extrema importância para a fabricação do mesmo. Encaixam-se nessa definição peças como gabaritos, suportes, peças de proteção para equipamentos, bicos ou ferramentas acopladas aos equipamentos, dentre outras. O estoque desses materiais é necessário, pois são eles que garantem que as linhas de produção não parem de produzir devido a falhas em máquinas ou falta de materiais de apoio a produção, ou seja, peças que não pertencem ao produto final, mas auxiliam na produção do mesmo. Porém, a gestão desse tipo de estoque é muitas vezes dificultada pela grande quantidade de itens, por demandas pequenas e esporádicas no tempo, mas com custo elevado (Oliveira, 2013; Pova, 2013).

Com base na área mencionada acima e considerando a variedade de tecnologias de AM existentes, aproximadamente treze tipos (Cotteleer, Holdowsky e Mahto, 2014), as quais se diferenciam por características como: 1) forma física da matéria prima, 2) processo de produção, 3) tipos de matéria prima, 4) resistência física e 5) temperatura, velocidade de impressão, custo, entre outros; como definir qual a melhor tecnologia de manufatura aditiva para a produção de peças MRO de apoio a produção, seja uma única peça ou um conjunto de peças, considerando critérios que são essenciais ao funcionamento dessas?

1.1 PROBLEMA

Como definir qual a melhor tecnologia de manufatura aditiva para a produção de peças MRO de apoio a produção considerando critérios que são essenciais ao funcionamento dessas?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo que permita identificar qual a melhor tecnologia para a produção de um conjunto de peças MRO de apoio a produção considerando alguns critérios prioritários para a funcionalidade dessas peças e a importância de cada peça para a organização.

1.2.2 Objetivos Específicos

Logo, os objetivos específicos se desdobram em:

- 1) Definir os principais critérios a serem analisados tanto no processo de tomada de decisão para a seleção de itens MRO, quanto na seleção das tecnologias de manufatura aditiva a serem utilizadas para a produção desses;
- 2) Definir as técnicas de tomada de decisão que podem ser usadas dentro do contexto de produção de peças MRO por manufatura aditiva;
- 3) Desenvolver um modelo para a seleção de itens MRO e das tecnologias de manufatura aditiva mais adequadas para a produção desses;
- 4) Avaliar a aplicação do modelo desenvolvido.

1.3 JUSTIFICATIVA

Caso os objetivos específicos sejam realizados com sucesso será possível obter os principais critérios técnicos que devem ser analisados tanto em componentes MRO, quanto nas tecnologias de AM; e uma análise com os principais métodos de tomada de decisão baseados na análise de multicritérios. Com isso, será possível definir um modelo de tomada de decisão, elaborado com base nos métodos estudados e, também, na análise obtida através dos casos exploratórios realizados. O modelo tem como principal objetivo, a partir de um conjunto de peças, auxiliar na tomada de decisão de qual tecnologia de AM investir para atingir de maneira eficiente a produção das peças, proporcionando a compatibilidade com os critérios que as mesmas devem apresentar. O uso de impressoras 3D para a produção de peças MRO pode facilitar a gestão de estoques dessas peças, visto que com o uso da tecnologia a produção pode

ser realizada conforme a demanda e o mais próximo possível do uso, ou seja, *just in time* (JIT).

1.4 MÉTODO

Este trabalho tem como método a pesquisa exploratória. Esse tipo de pesquisa, segundo Gil (2002), envolve três pontos: a) levantamento bibliográfico; b) entrevistas; e c) análise de exemplos. Os detalhes do método serão demonstrados durante a explicação das etapas que envolver o modelo. Para elaborar o modelo, será necessário:

- 1) Revisão da literatura sobre tecnologias de manufatura aditiva com foco nos critérios de tomada de decisão da aplicação de cada tecnologia e o estudo dos casos exploratórios realizados e demonstrados tanto no trabalho quanto no artigo do Apêndice 7 ISPE, essas ações permitem que o objetivo específico 1 seja atingido;
- 2) Revisão da literatura sobre os métodos de tomada de decisão com foco nos métodos de multicritério, o que permite que o objetivo específico 2 seja atingido.
- 3) Estudos de caso exploratórios sobre a aplicação da manufatura aditiva para a produção de partes consumíveis em processo, que permitem que o objetivo específico 3 seja atingido.
- 4) Caso de aplicação do modelo proposto, que permite que o objetivo específico 4 seja atingido.

Os estudos de casos exploratórios foram realizados em uma montadora automobilística localizada no estado do Paraná (Brasil) na cidade de São José dos Pinhais. Tais exemplos auxiliarão na ponderação dos parâmetros e benefícios alcançados com o uso de impressoras 3D.

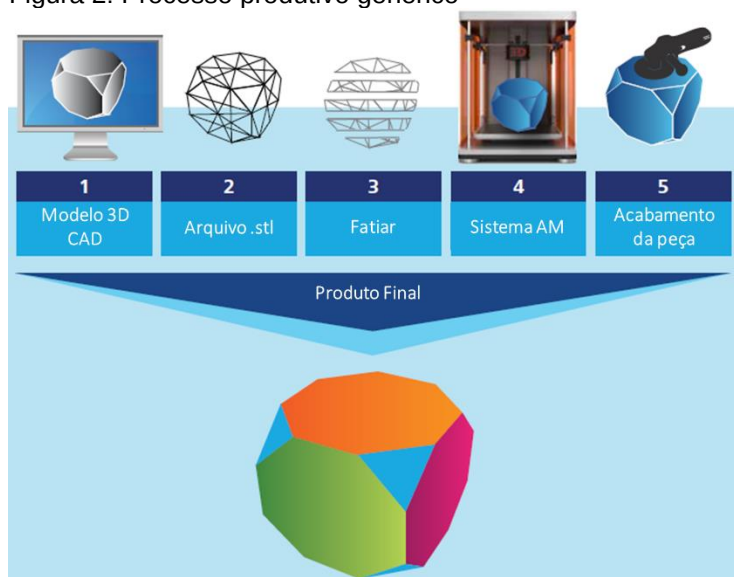
TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA

A *ASTM International* (2013), rotula a AM como sendo um processo de unir materiais para fazer objetos a partir de dados do modelo 3D, camada sobre camada, ao contrário de metodologias de fabricação de subtração.

Barros (2014), afirma que o termo AM surgiu quando o processo de Prototipagem Rápida (RP) sofreu desenvolvimentos em termos de matérias-primas, tecnologias e melhoria da qualidade final, deixando de produzir apenas protótipos e produzindo, também, peças de produto final.

O processo produtivo concebido pelas tecnologias de manufatura aditiva tem como essência o “fatiamento” de um modelo CAD (*Computer Aided Design*) realizado por um software. Ou seja, o CAD será transformado em um modelo de camadas, cuja extensão, geralmente, é stl; e é por meio dessas camadas que é possível identificar onde existe ou não material a ser adicionado. A partir do .stl um arquivo (g.code) é gerado com os parâmetros definidos para a impressão da peça, o g.code é o responsável por orientar o equipamento com as coordenadas. O fluxo genérico do processo produtivo é ilustrado na Figura 2, entende-se por fluxo genérico, pois atualmente existem diversos tipos de tecnologias cada qual com a sua peculiaridade o que pode gerar modificações no processo produtivo.

Figura 2: Processo produtivo genérico



Fonte: Adaptado de Cotteleer et al. (2014).

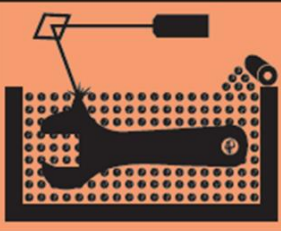
É possível agrupar os tipos de tecnologias por características em que se assemelham, e um tipo de agrupamento é por meio do estado físico da matéria prima. Partindo desse ponto, os autores Volpato et al. (2007) e Chee et al. (2010) dividem as tecnologias de AM em: líquido, sólido e em pó. Por outro lado, a *ASTM F42 Committee on Additive Manufacturing Technologies*, divide as tecnologias de acordo com sete processos básicos, conforme Figura 3 e 4.

Figura 3: Tipos de tecnologias (a)

LAMINAÇÃO DE FOLHAS	EXTRUSÃO	DEPÓSITO DE ENERGIA DIRECIONADA (DED)
Tecnologias: LOM SDL UAM	Tecnologias: FFF FDM™	Tecnologias: LMD LENS™ DMD™
Descrição: Folhas de material são empilhadas e laminadas juntas para formar um objeto. O método pode ser adesivo ou químico (papel/plásticos), solda ultra-sônica ou brasagem (metais). As regiões não utilizadas são cortadas.	Descrição: O material é extrusado através de um bico. As variedades comuns de tecnologia incluem extrusão termoplástica (semelhante a uma pistola de cola quente) e distribuição.	Descrição: O pó ou o fio é depositado na superfície da peça onde ele adere às peças ou às camadas subjacentes usando uma fonte de energia como um laser ou feixe de elétron. Esta é essencialmente uma forma de soldagem automatizada.
Forças: Elevadas taxas de construção volumétrica; Baixo custo (não-metais); Combinações de folhas metálicas.	Forças: Barato e econômico; Permite cores múltiplas; Pode ser usado em escritórios; Boas propriedades estruturais.	Forças: Não limitado pela direção ou eixo; Eficaz para reparos e adição de características; Múltiplos materiais em uma única peça; Altas taxas de deposição de ponto único.
Materiais típicos: Folhas de papel, de plástico e metálicas.	Materiais típicos: Filamentos termoplásticos e pastilhas (FFF); líquidos e pastas.	Materiais típicos: Fio metálico e pó com cerâmica.

Fonte: Adaptado de *Hybrid Manufacturing Technologies*.

Figura 4: Tipos de tecnologias (b)

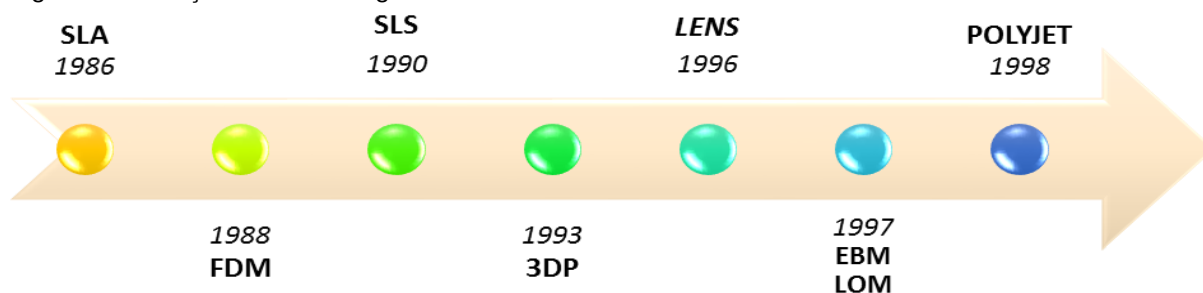
			
FOTOPOLIMERIZAÇÃO	FUSÃO EM PÓ	AGLUTINANTE	JATO DE MATERIAL
Tecnologias: SLA™ DLP™ 3SP™ CLIP™	Tecnologias: SLS™ DMLS™ SLM™ EBM™ SHS™ MJF™	Tecnologias: 3DP™ ExOne Voxeljet	Tecnologias: Polyjet™ SCP™ MJM Projet™
Descrição: Uma cuba de resina líquida fotopolimérica é curada através de exposição seletiva à luz (através de um laser ou projetor), que então inicia a polimerização e converte as áreas expostas em uma peça sólida.	Descrição: Os materiais em pó são seletivamente sinterizados usando uma fonte de calor, como um feixe de elétrons ou laser. O pó não sinterizado atua como um material de suporte.	Descrição: Os agentes de ligação líquida são aplicados seletivamente em camadas finas após cada camada de pó. As peças metálicas ou em cerâmicas, geralmente, vão para um forno após serem impressas.	Descrição: A tecnologia utiliza gotículas de material fotocurável que são depositadas camada a camada e curadas com luz UV ou gotículas de materiais termicamente fundidos que se solidificam em temperatura ambiente.
Forças: Alto nível de precisão e complexidade; Acabamento superficial liso; Grandes áreas de construção.	Forças: Alto nível de complexidade; O pó funciona como material de suporte; Ampla variedade de materiais.	Forças: Permite a impressão em cores; Alta produtividade; Usa uma ampla variedade de materiais.	Forças: Alto nível de precisão; Permite peças completamente coloridas; Permite a impressão de vários materiais em uma única peça.
Materiais típicos: Resinas de fotopolimérica curável por UV.	Materiais típicos: Pó de plástico, de metal e de cerâmica; e areia.	Materiais típicos: Pó de plástico, de metal, de cerâmica, de vidro e areia.	Materiais típicos: Fotopolímeros, polímeros e ceras.

Fonte: Adaptado de *Hybrid Manufacturing Technologies*.

Atualmente encontra-se uma infinidade de tipos de tecnologias de AM, tal diversidade é o resultado da necessidade em atender as exigências do mercado que permeiam em termos de redução de custos e de tempo de processo, mantendo a qualidade e a flexibilidade. Porém, essa variedade de tecnologia conduz ao fato que cada uma atende melhor uma necessidade específica conforme a peça que se quer produzir. Desse modo, é de extrema importância ter conhecimento, se não de todas, das principais tecnologias existentes, bem como as principais características, vantagens e limitações.

Dessa maneira, o autor Cotteleer (2014) define três tecnologias de AM mais comuns entre os estudos sobre impressão 3D, as quais são: a Estereolitografia (SLA), a Modelagem por Depósito de Material Fundido (FDM) e a Sinterização Seletiva a Laser (SLS). Além dessas três, foram selecionadas mais cinco tecnologias das quais mencionadas pela ASTM (Figuras 2 e 3) para serem detalhadas, a fim de construir um pequeno portfólio comparativo eficiente das tecnologias de AM mais utilizadas atualmente (vide Figura 5). Entretanto, antes de estudar os métodos de impressão 3D, é importante conhecer as principais aplicações das impressoras no mundo atual.

Figura 5: Evolução das tecnologias

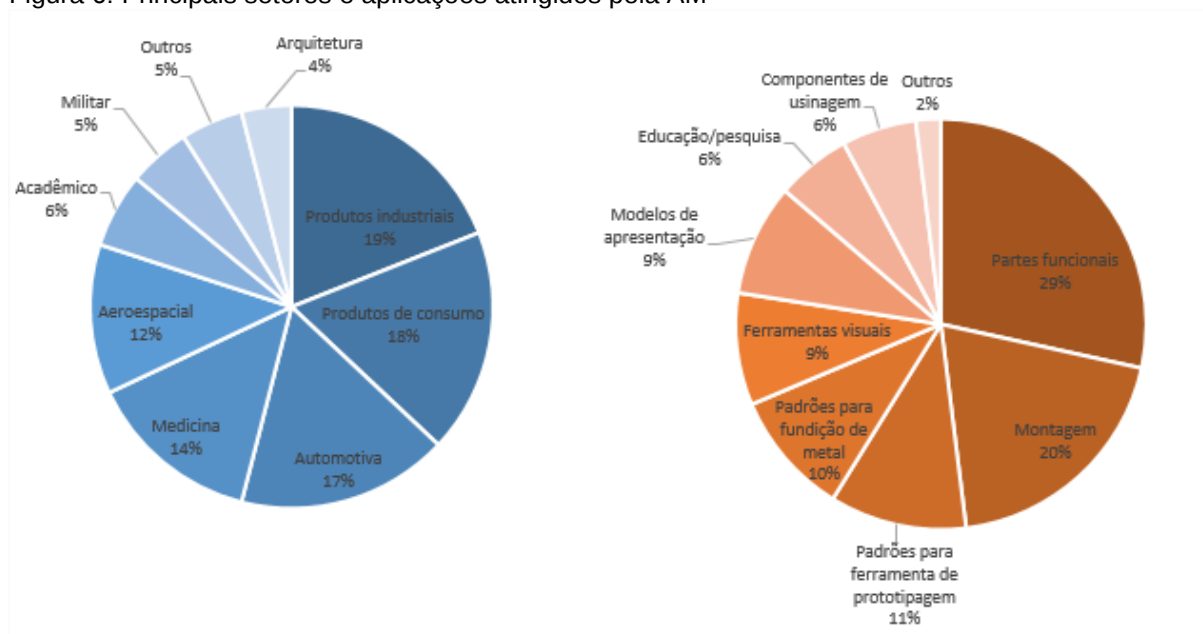


Fonte: Autora (2017).

2.1 APLICAÇÕES

As tecnologias de AM foram anunciadas como a próxima grande tecnologia disruptiva, semelhante a computação pessoal, dando a todos no planeta a capacidade de imaginar, projetar e criar produtos personalizados (Cotteleer, Holdowsky e Mahto, 2014). As AM têm alcançado diversos mercados e isso está representado na Figura 6 através do percentual do uso das impressoras 3D em diversos setores no ano de 2013 e das principais aplicações.

Figura 6: Principais setores e aplicações atingidos pela AM



Fonte: Adaptado de Worhlers Report (2013).

Já a *Royal Academy of Engineering* (2013), publicou em sua revista uma linha do tempo com as principais aplicações que a AM atingiu e atingirá ao longo dos anos, como segue na Tabela 2.

Tabela 2: Linha do tempo das principais aplicações da AM

Ano	Aplicação
1988-1994	Prototipagem rápida
1994	Modelagem rápida
1995	<i>Rapid tooling</i>
2001	AM para automotiva
2004	Aeroespaço (polímeros)
2005	Medicina (guias de polímeros)
2009	Implantes médicos (metais)
2011	Aeroespaço (metais)
2013-2016	Nano manufatura
2013-2017	Arquitetura
2013-2018	Implantes biomédicos
2013-2022	Biomanufatura
2013-2032	Órgãos do corpo completos

Fonte: Adaptado de Royal Academy of Engineering (2013).

Com uma abordagem mais genérica e conceitual, a 3D Systems destaca como principais aplicações das tecnologias de AM: a produção de modelos conceituais, de verificação e de pré-produção; cada um dos conceitos tem suas particularidades descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Aplicações de AM

APLICAÇÕES	DESCRIÇÃO
Modelos Conceituais	Modelos conceituais melhoram as decisões iniciais do projeto que afetam todas as próximas atividades de projeto e engenharia. Testando um modelo conceitual no início do projeto é possível reduzir as alterações a serem realizadas ao longo do projeto e assim reduzir o tempo de entrega e lançamento do mesmo no mercado.
Modelos de Verificação	Verificar se os produtos garantem a função a qual está destinada a realizar. Essa verificação pode incluir aplicações como forma e ajuste, desempenho funcional, e verificação de montagem.
Aplicações de Pré-Produção	Aplicações de pré-produção incluem ferramentas de curto prazo, peças e acessórios que permitam a produção precoce e montagem de produtos finais, bem como utilização final de peças.

Fonte: Adaptado de 3D Systems.

Os diversos tipos de AM existentes proporcionam à organização escolher a que melhor se adapta a produção requisitante, conforme as diversas aplicações

supracitadas. Além disso, os autores Murphy et al. (2015), destacam que a AM é uma inovação tecnológica que quebra *trade-offs* de desempenho existentes de duas maneiras fundamentais, sendo:

- a) capital *versus* escala: AM tem o potencial para reduzir o capital necessário para alcançar escala de eficiência mínima para a produção, diminuindo assim as barreiras à entrada para a fabricação de um determinado local; e
- b) capital *versus* escopo: a flexibilidade da AM facilita o aumento da variedade de produtos que o capital pode produzir, reduzindo os custos associados com trocas de produção e personalização e/ou a quantidade total de capital necessário.

Além desse ponto, o impacto estratégico da AM nos negócios depende de compreender como a tecnologia rompe os *trade-offs* entre o capital e as economias de escala e escopo (Giffi et al., 2014). Para auxiliar nessa tarefa os autores criaram um quadro que identifica os caminhos estratégicos que as empresas podem seguir considerando o valor para os negócios, conforme demonstrado na Figura 7.

Para melhor entendimento segue as principais características, relatadas pelos autores Cottleer e Joyce (2014), de cada caminho a ser seguido:

- Caminho I: as empresas não procuram alterações radicais em quaisquer cadeias de fornecedores ou produtos, mas podem explorar tecnologias de AM para melhorar a entrega de valor para os produtos atuais dentro cadeias de abastecimento existentes;
- Caminho II: as empresas tiram proveito da economia de escala oferecida pela AM como um facilitador potencial de transformação da cadeia de abastecimento para os produtos que oferecem;
- Caminho III: as empresas tiram vantagem da economia de escopo oferecida pelas tecnologias AM para alcançar novos níveis de desempenho ou de inovação nos produtos que oferecem;
- Caminho IV: as empresas alteram ambas as cadeias de fornecimento e produtos na busca de novos modelos de negócios.

Figura 7: Caminhos estratégicos



Fonte: Adaptado de Cotteleer et al. (2014).

Sendo assim cabe a cada organização decidir por qual caminho optar, conforme os objetivos estratégicos já traçados, olhando o impacto que cada caminho pode ter dentro da organização. Além desse ponto é importante analisar os desafios que o uso das tecnologias de AM pode apresentar, os autores Cotteleer, Holdowsky e Mahto (2014) destacam alguns desses, como segue:

- Exuberância vs. evolução natural e verdadeiro potencial da tecnologia;
- Considerações éticas (por exemplo: armas, impressões de células humanas);
- Questões de propriedade intelectual e privacidade;
- Incerteza regulatória em diferentes países;
- Escolha limitada de materiais;
- Materiais e processo de fabricação com padrões de certificação e qualidade;

- Pequenas produções e limitações de escala

Considerando os caminhos táticos representados como facilitadores no uso das impressoras 3D, outro ponto importante e que auxilia principalmente na escolha de qual tipo de tecnologia optar são os parâmetros de processo e produtos. Um levantamento desses fatores é discorrido no subitem abaixo.

2.2 PARÂMETROS DE ESCOLHA

Bland e Conner (2015), citam três atributos como principais para serem analisados na escolha de uma AM, são eles:

- complexidade do produto (complexidade geométrica e dos vários tipos de materiais que compõe a peça);
- customização; e
- volume de produção

Outros autores, como Byun e Lee (2004), citam critérios a serem avaliados na peça que serão produzidas, e não no processo produtivo, como:

- precisão dimensional;
- rugosidade da superfície;
- custo;
- tempo de fabricação; e
- propriedades dos materiais (resistência à tração e alongamento)

Seguindo a linha de análise da peça, os autores Junior, Sant'Anna e Machado (2015), defendem que a análise de critérios deve ser baseada nas seguintes características:

- propósito do produto;
- material necessário em sua composição;
- dimensão do produto;
- custo unitário do produto produzido pelo método tradicional (afim de comparar posterior com o custo gerado a partir da AM);
- tempo de produção (processo tradicional e AM);
- detalhe necessário (precisão dos detalhes que se deve obter);

- acabamento superficial.

A organização 3D Systems, destaca os que seguem como principais fatores a serem considerados:

- velocidade de impressão;
- custo unitário;
- resolução do recurso;
- acurácia;
- propriedades dos materiais; e
- cor.

Para concluir a busca por parâmetros, Roberson et al. (2013) consideraram como principais características as que seguem:

- custo unitário;
- quantidade de material utilizado;
- tempo utilizado para a construção da peça;
- quantidade de suporte necessário;
- acurácia; e
- acabamento superficial (rugosidade).

Diante dos fatores mencionados pelos autores, se faz necessário selecionar quais os principais pontos que devem ser observados na eleição de uma tecnologia de AM e entender melhor como cada tecnologia trabalha diante dos parâmetros.

2.3 TECNOLOGIAS ESTUDADAS

2.3.1 Estereolitografia (SLA)

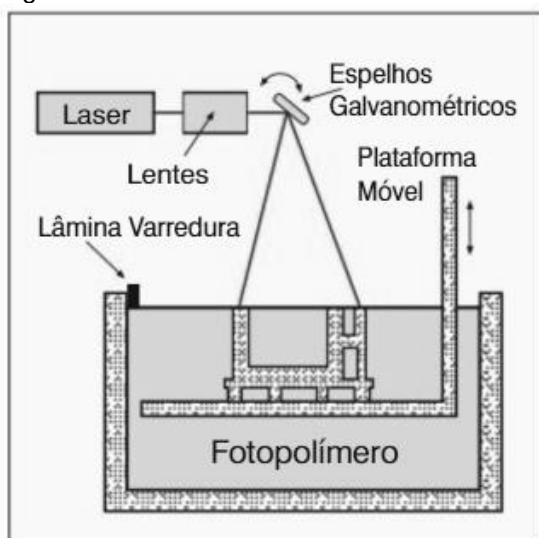
A SLA pertence ao grupo de tecnologias cujo processo é de fotopolimerização, foi desenvolvida pelo Charles W. Hull (fundador da 3D Systems) e o empreendedor Raymond S. Freed em 1986 e lançada no mercado em 1988. A tecnologia é considerada como a pioneira no setor de tecnologias de AM. O processo funciona similar ao fluxo genérico, comentado anteriormente nesse trabalho, o equipamento

realiza a impressão de uma peça de acordo com a geometria representada no CAD. Para melhor entendimento, o processo é ilustrado na Figura 8.

O Processo

Para iniciar o processo, a cuba do equipamento é preenchida com resina líquida fotocurável e o software do equipamento é carregado com o arquivo .stl gerado a partir do CAD. Com a leitura do arquivo, o software envia os comandos para o equipamento e este dirige e foca o feixe de laser para que ele solidifique uma secção transversal 2D correspondente a camada que está sendo lida pelo software. Após a primeira camada ter sido solidificada o elevador, que está conectado com a base a qual está dentro da cuba, abaixa a mesa em uma altura que possa resultar em uma nova camada. Para que a resina esteja nivelada conforme o necessário uma lâmina é passada em toda a nova superfície. Após esse procedimento, o software envia novas coordenadas que estão relacionadas com a próxima camada a ser impressa, assim o laser é acionado e dispara o feixe nos pontos a serem solidificados formando a segunda camada. Após a segunda camada finalizada, a mesa desce novamente e todo o processo se repete até que a peça seja finalizada. Quando a peça é finalizada a mesa sobe até o topo, a peça é removida e se necessário finalizada com algum acabamento, geralmente ela é imersa em um líquido químico para que fique limpa e os suportes, caso tenha, são removidos nessa fase também.

Figura 8: Processo SLA



Fonte: Grellmann (2006).

As Aplicações

A SLA oferece às organizações um método que reduz o tempo de entrega ao mercado e os custos de desenvolvimento de produto; além disso, há um maior ganho com o controle do processo de design e melhoria na concepção do produto. A 3D Systems destaca que, geralmente, as peças produzidas por SLA são usadas como padrão mestre (processo de transferência padrão), ou seja, o padrão é transferido para algum molde podendo utilizar as técnicas de fundição de metal ou areia, ou outros. Ademais, existem outras aplicações, como:

- Modelos de design;
- Protótipos para Prova de Conceito;
- Projeto de Avaliação Modelos;
- Prova de modelos de engenharia; e
- Peças e acessórios.

A Stratasys destaca como algumas aplicações da SLA:

- Modelos anatômicos
- Modelos de conceito
- Modelos arquitetônicos
- Padrões de fundição

As vantagens e desvantagens

Chua et al. (2010) e Volpato et al. (2007), classificaram alguns pontos como vantagens e desvantagens da tecnologia, como segue:

Vantagens:

- O equipamento funciona 24 horas por dia de forma autônoma;
- Permite a construção em grandes volumes: as máquinas de SLA podem construir peças com diferentes volumes que pode variar de pequeno ($250 \times 250 \times 250$ mm) a grande ($737 \times 635 \times 533$ mm);
- Boa precisão;
- A tecnologia proporciona um dos melhores acabamentos de superfície entre as tecnologias de AM;
- Vasta variedade de materiais.

- Processo mais difundido, com representante e assistência na maioria dos países;

Desvantagens:

- Requer estruturas de suporte: a tecnologia produz suporte nos locais em que não há sustentabilidade na peça e o material de suporte é a mesma matéria prima utilizada para fazer a peça principal;
- Pós-processamento: inclui a remoção de suportes e outros materiais não desejados, o processo é demorado e pode danificar a peça final;
- Pós-cura: pode ser necessário para curar o objeto de forma completa, assegurando a integridade da estrutura.
- Trabalha apenas com resinas poliméricas fotocuráveis;
- Resina tóxica.

2.3.2 Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)

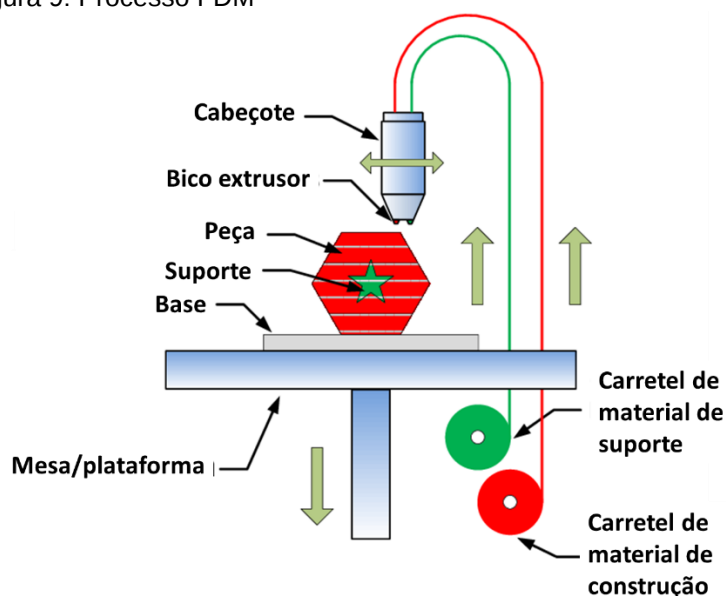
A FDM foi criada em 1988, pelo Scott Crump (fundador da Stratasys), a tecnologia é uma das mais baratas quando comparada com as demais. A FDM, diferentemente da SLA, trabalha com a extrusão e deposição de materiais, geralmente são polímeros.

O Processo

A tecnologia, de forma geral, é composta por filamento, extrusor, bico extrusor, conjunto de engrenagens e mesa. O processo é iniciado com o desenho CAD transformado em um arquivo .stl da peça, transformando o modelo em um conjunto de camadas. Quando o arquivo é enviado para o equipamento, as engrenagens rotacionam levando o filamento para o extrusor, o qual é responsável por aquecer a matéria prima, deixando-a em um estado pastoso; então o bico extrusor é responsável por expelir a matéria prima. A extrusão ocorre juntamente com a movimentação dos eixos e com isso o desenho da peça é formado camada por camada. A cada camada finalizada a mesa desce ou, em outros casos, o eixo Z sobe; conforme o material é depositado na mesa ele vai resfriando e endurecendo novamente, formando assim a peça e sendo possível depositar outras camadas acima das anteriores. A Figura 9 ilustra a forma como o processo ocorre.

Existem vários modelos de equipamentos de FDM que podem variar em diversas características que influenciam na qualidade final da peça, bem como nas aplicações, por exemplo: dois bicos extrusores; movimentação da mesa ou do eixo Z; material de suporte solúvel.

Figura 9: Processo FDM



Fonte: Adaptado de Ning et al. (2015).

As aplicações

De acordo com a Stratasys, a tecnologia pode ser utilizada em diversas indústrias, segue algumas:

- Aeroespacial: a tecnologia é utilizada para prototipagem, ferramentaria e fabricação de componentes;
- Automotiva: protótipos resistentes e peças feitas em termoplásticos de alto desempenho;
- Arquitetura: modelos arquitetônicos;
- Produtos comerciais: produção de peças de baixo volume e de uso final duráveis;
- Produtos de consumo: produção de produtos personalizados conforme a demanda do mercado.

As vantagens e desvantagens

Uma das principais vantagens da FDM quando comparado com as demais tecnologias é o baixo custo do equipamento e do material. Além desse ponto, há um grande número de materiais que podem fabricar peças resistentes, incluindo peças de aeronaves; e a tecnologia é capaz de produzir geometrias complexas com facilidade (quando comparado a processos tradicionais).

De acordo com Stratasys, a tecnologia pode apresentar deficiências em termos de detalhes e superfície final. Esses dois fatores podem ser considerados como limitações quando comparado com as demais tecnologias de manufatura aditiva. Outro fator a considerar é o pós processo que deve ser realizado para remoção do material de suporte (quando há), pois em equipamentos mais simples, que não possuem dois bicos extrusores, o material de suporte é produzido com o mesmo da peça, logo a remoção é por meio de ferramentas de corte, lixa e outros. Já em equipamentos com dois bicos, o material de suporte é solúvel em solução química, e é removido quando a peça fica imersa nessa solução por algumas horas.

2.3.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

A tecnologia foi criada por Joe Beaman, Carl Deckard e Dave Bourell nos anos 80, na Universidade do Texas pelo departamento de Engenharia Mecânica, mas foi comercializada nos anos 90. Em 2001 a empresa 3D Systems comprou a empresa que estava comercializando a tecnologia, passando a deter os direitos.

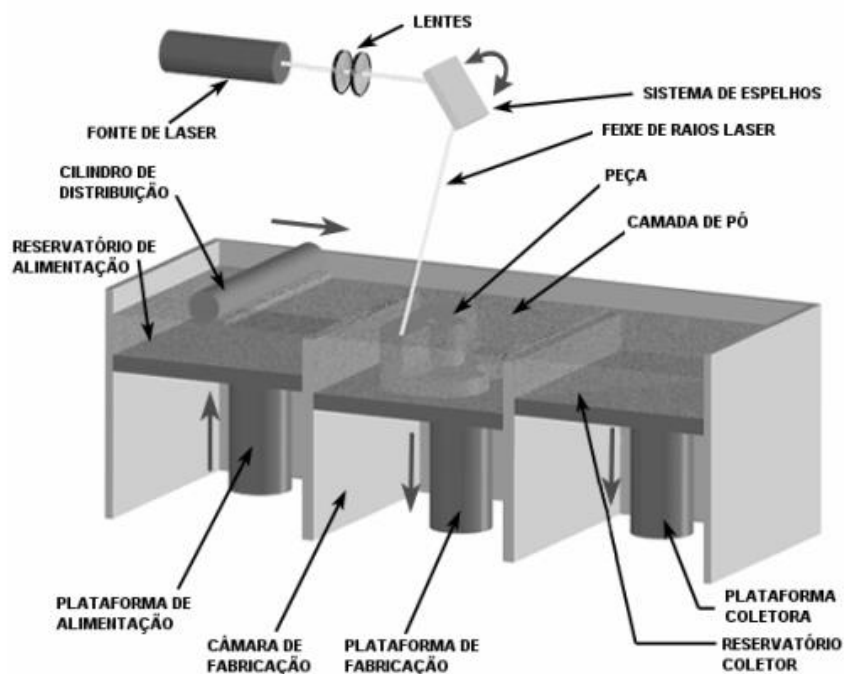
O Processo

Segundo Kruf et al. (2006), o processo inicia quando uma camada de pó é espalhada sobre uma cuba de pó pré-aquecida, então um laser solidifica seletivamente as áreas desejadas. Quando a primeira camada é solidificada, uma nova camada de pó é aplicada e o processo é repetido até que a peça esteja pronta.

Para saber em qual local o laser deve disparar o feixe, um modelo stl é gerado e enviado para o equipamento, assim como as demais tecnologias mencionadas no presente trabalho e, como o fluxo genérico demonstrado anteriormente. O processo é similar ao da SLA, como pode ser visto na Figura 10. A principal diferença é que o equipamento comporta outras duas cubas que armazenam o pó para que este possa

ser adicionado acima da camada solidificada. Mas, assim como na SLA, existe uma plataforma que desce conforme a camada é finalizada.

Figura 10: Processo SLS



Fonte: Santos (2009).

.As aplicações

A 3D Systems identifica três grandes grupos de aplicações para a tecnologia, que são: as peças de manufatura rápida, utilizadas na indústria aeroespacial, médica e militar, e também na produção de componentes eletrônicos; os protótipos, para testes de engenharia, provas de conceito e testes de modelo; e as ferramentas e padrões, para gabaritos e dispositivos, padrões de fundição e outros. De acordo com Ohji et al. (2013), a tecnologia é uma das mais indicadas entre as tecnologias de manufatura aditiva para fabricar peças em cerâmica.

As vantagens e desvantagens

Segundo Volpato et al. (2007), as principais vantagens da SLS, são: materiais não tóxicos e possibilidade de trabalhar com diversos tipos de materiais, seja cerâmica, metais ou polímeros; isso resulta na produção de peças finais e funcionais como: secadores de cabelo, cafeteiras, correias dentadas, e outros.

O processo de sinterização não precisa de pós cura, mas exige pós processamento para a retirada do suporte; nesse caso o suporte é apenas o pó que

não foi sinterizado; sendo assim, a remoção do suporte ocorre por espátulas, escovas e ar comprimido, e esse material retirado pode ser reutilizado como matéria prima para a produção de outra peça. Além desses pontos, a 3D Systems destaca que a tecnologia traz benefícios na produção de peças duráveis, com geometrias complexas e com necessidade de ser resistente a produtos e processos químicos.

Em contrapartida, uma das principais desvantagens é o fato do equipamento ter um custo elevado e a peça final não ter um excelente acabamento superficial devido ao tamanho das partículas da matéria prima.

2.3.4 Impressão Tridimensional (3DP)

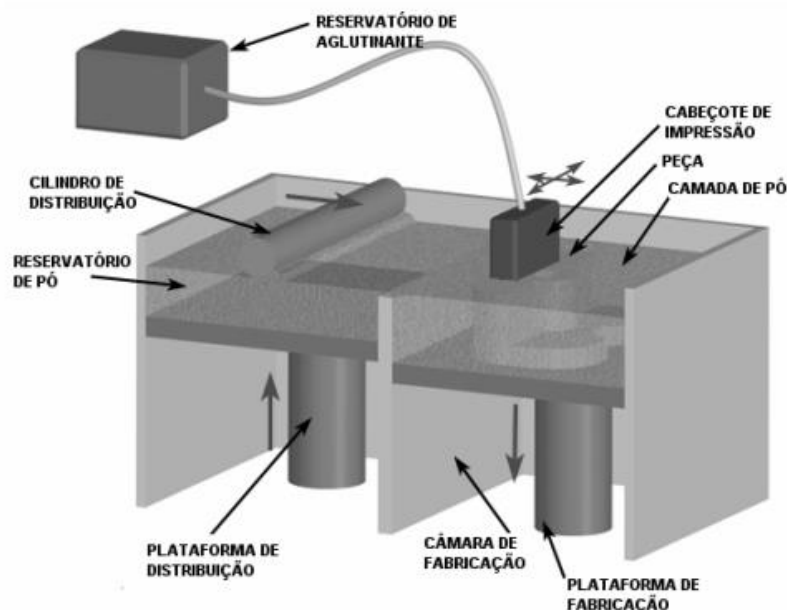
A tecnologia 3DP, criada pela *ZCorporation* por volta dos anos 90, oferece um processo de impressão de resina em pó por camadas, a principal diferença entre essa tecnologia e a SLS é que essa não utiliza laser para solidificar as partículas, mas uma liga aglutinante.

O Processo

Segundo Goyanes et al. (2014), a 3DP foi desenvolvida como uma ferramenta para prototipagem rápida. Uma camada de um pó é espalhada sobre uma mesa e uma solução de ligação é depositada utilizando um cabeçote de eixos x-y para consolidar o pó. Após a consolidação dessa camada a mesa desce para que uma nova camada de pó seja depositada e solidificada também, esse é um processo cíclico (como as demais tecnologias) e só é finalizado quando a última camada da peça for solidificada.

Os autores Volpato et al. (2007), destacam em seu livro que o processo pode ser utilizado com diversos tipos de materiais, como: cerâmica, metal, polímero, gesso, material à base de amido e outros; e a solução de ligação deve ser desenvolvida conforme cada tipo de pó. O processo é ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Processo 3DP



Fonte: Santos (2009).

As aplicações

Os autores Goyanes et al. (2014), afirmam que a tecnologia tem sido utilizada, amplamente, na indústria farmacêutica para a dosagem de fórmulas, produção de comprimidos, inclusive com várias camadas, e implantes. Além dessas aplicações, os autores Srivatsan e Sudarshan (2016) destacam: a fabricação de brinquedos, suportes e itens decorativos para casa; produção de moldes para o processo de fundição; produção de dispositivos médicos; e produção de aeronaves.

As vantagens e desvantagens

Srivatsan e Sudarshan (2016), destacam que uma das vantagens da 3DP é a velocidade de fabricação da peça e o baixo custo do material. Os autores Volpato et al. (2007) incluem como vantagens da tecnologia: a não necessidade de laser para realizar o processo, o suporte ser da mesma matéria prima e o não desperdício do material que não foi solidificado.

Uma das limitações destacada pelos autores Goyanes et al. (2014), é o fato de não ser possível produzir peças ocas, pois o pó que não recebeu a solução de ligação irá ficar solto dentro do objeto construído. Para complementar, tem-se que é necessário um pós processamento para limpeza e retirada do suporte e que o

acabamento superficial possui certas rugosidades devido ao tamanho das partículas, assim como a SLS.

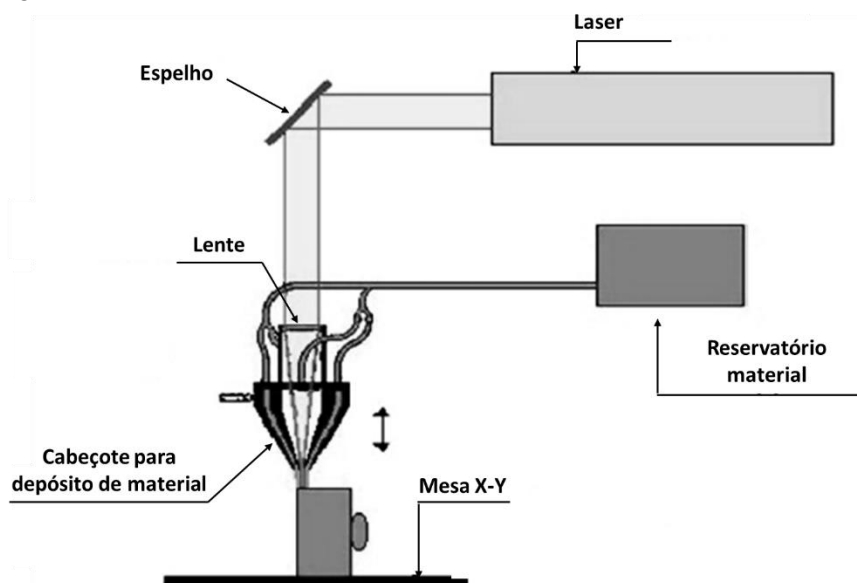
2.3.5 Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS)

A principal vantagem da tecnologia, criada em 1996, é produzir protótipos de metal densos, com boas propriedades metalúrgicas e sob velocidades razoáveis de construção (Almeida, 2007), a tecnologia é similar a SLS.

O Processo

Segundo Gorni (2001), um cabeçote, similar ao da FDM, deposita o pó metálico na mesa e um gerador de raio laser de alta potência é usado para fundir tal pó metálico, o detalhe desse processo é que o cabeçote que deposita o pó está anexo ao gerador de laser e que enquanto a mesa que se movimenta para que o raio laser passe por toda a camada, o cabeçote é movido para cima. Além disso, o raio laser pode ser direcionado até o local que deve ser solidificado através de espelhos. Como em todos os outros processos, esse também utiliza o arquivo .stl e o código com as coordenadas. A esquemática do funcionamento da técnica, pode ser visto na Figura 12.

Figura 12: Processo LENS



Fonte: Adaptado de *National Research Council*, 2013.

As aplicações

As aplicações incluem a reparação de componentes desgastados, a performance "*near-net-shape*" (técnica de fabricação industrial em que a produção inicial do produto é muito perto à forma final reduzindo a necessidade de acabamento de superfície), e o revestimento de materiais.

As vantagens e desvantagens

A versatilidade e a flexibilidade do processo são evidentes em aplicações onde a variedade de materiais são depositados em várias geometrias diferentes de uma ampla variedade de taxas de deposição (Mudge e Wald, 2007). É possível utilizar diversas ligas metálicas, tais como: aço inoxidável, cobre, alumínio e titânio (Gorni, 2001).

Uma das desvantagens da tecnologia destacada por Gorni (2001), é que o processo necessita ter sempre uma corrente de gás para transportar o pó metálico ou para proteger a poça de metal líquido do oxigênio atmosférico, de modo a garantir as propriedades metalúrgicas e promover melhor adesão entre camadas através de melhor aderência superficial. Outra limitação da tecnologia é que os protótipos produzidos requerem usinagem para acabamento.

2.3.6 Fusão por Feixe de Elétrons (EBM)

A tecnologia EBM está sendo comercializada pela Arcam AB. De acordo com o site da empresa, o processo é realizado camada por camada, com o uso de pó de metal derretido por um feixe de elétrons. Cada camada é fundida com a geometria exata definida por um modelo CAD.

O Processo

A máquina EBM lê dados de um modelo CAD 3D e estabelece sucessivas camadas de material em pó. Estas camadas são fundidas em conjunto utilizando um feixe de elétrons controlados por computador. Segundo Cormier et al. (2004), o processo inicia com uma camada de pó metálico espalhada em toda a plataforma de construção. Então, um feixe de elétrons pré-aquece a camada usando uma baixa corrente a uma velocidade relativamente alta. Este passo de pré-aquecimento serve a dois propósitos: 1) sinteriza o pó de metal para segurar a camada no lugar durante

a fusão subsequente em potências de feixe mais elevadas; 2) transmite o calor para a parte que ajuda a reduzir o gradiente térmico entre a camada derretida e o resto da peça. Após esta etapa de pré-aquecimento, a camada é fundida através do aumento da potência do feixe e/ou redução da velocidade.

Depois da primeira camada ser fundida, a plataforma é abaixada em um ponto que assegure a espessura adequada da próxima camada de pó. Então, uma nova camada de pó de metal é espalhada, e o processo é repetido até que a peça esteja concluída. Após a conclusão do processo de construção, a peça é removida da base, o pó solto para apoio à peça é removido e a peça é refrigerada com ar à temperatura ambiente. Se necessário para o acabamento final pode utilizar técnicas de usinagem.

As aplicações

Segundo Arcam AB, as principais aplicações da EBM são os implantes ortopédicos, para a indústria médica; e peças de aeronaves. Fink (2014) destaca, além dessas, outras aplicações: componentes metálicos de superfícies complexas e produção de peças com paredes finas; e para a indústria automotiva seriam as peças de turbo compressor das rodas.

As vantagens e desvantagens

Uma das vantagens que Cormier et al. (2004) destaca, que pode ser percebida também com a tecnologia SLS, é que o pó solto (ou seja, não fundido) é o que suporta todas as superfícies aéreas e formas geométricas. Portanto, a tecnologia pode produzir facilmente peças com alta complexidade geométrica. A alta temperatura de construção proporciona uma boa estabilidade e baixa tensão residual na peça final.

De acordo com Hiemenz (2007), a tecnologia permite fazer múltiplas peças para montagem; projetar e produzir peças para aeronaves com uma melhor relação resistência-peso; e produzir peças ocas reforçadas internamente, assim as peças podem ser resistentes com uma massa menor, o que é impossível para outras tecnologias. Esse último ponto resulta em uma redução de custo da peça final.

Algumas desvantagens da tecnologia apresentadas por Rico e Engel (2013), são: os materiais são condutores; é complicado trabalhar com pó fino; a manutenção é cara; e trabalha com apenas pó de metal.

2.3.7 Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM)

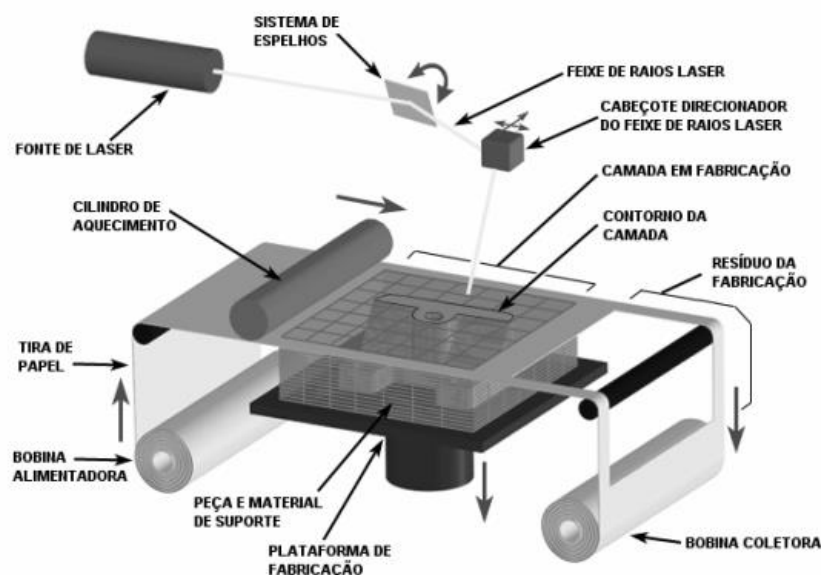
Wang et al. (1999), destacam que o processo de LOM é rotineiramente usado para criar recursos positivos e negativos das ferramentas para fundição em areia. A tecnologia foi patenteada pela organização Helisys Inc. em 1996.

O Processo

Nessa técnica as camadas são produzidas a partir de papel laminado revestido com cola ativada pelo calor, ou seja, as camadas são produzidas a partir da aderência de uma folha de papel à outra. O funcionamento consiste nos seguintes passos: um rolo avança com a lâmina de papel para cima da base de construção; a seguir outro rolo aquecido aplica pressão sobre essa primeira folha para fixá-la a base. Com a primeira camada aderida à base, um raio laser é ativado para cortar o contorno da primeira camada do desenho que se tornará a peça no final; e a área em excesso (que não será usada) é quadriculada pelo raio laser.

Após o contorno da primeira camada finalizado, a base é abaixada e o rolo avança novamente depositando uma nova folha, após o depósito da segunda camada o rolo aquecido é ativado para que possa auxiliar na aderência da segunda à primeira camada; após essa etapa o raio laser é acionado novamente e esse processo todo é repetido até que a peça esteja finalizada; a Figura 13 ilustra tal processo. Como as folhas são folhas de papel é necessário um acabamento pós processo, geralmente o material é selado e revestido com tinta ou verniz (Almeida, 2007).

Figura 13: Processo LOM



Fonte: Santos (2009).

As aplicações

Segundo Mueller et al. (1999), as principais aplicações da tecnologia são voltadas a peças grandes, modelos compactos e geometrias complexas não com muito detalhes e rebaixos. A LOM geralmente é aplicada para uso em que a madeira é a matéria prima convencional. As principais aplicações são: para o processo de moldes de plásticos; para as tecnologias de fundição; para a indústria de cerâmicas, arquitetura, engenharia e medicina.

As vantagens e desvantagens

Como principais vantagens da tecnologia, o autor Mueller et al. (1999) destaca os seguintes: o procedimento evita distorções, encolhimento e deformação; as peças produzidas têm uma elevada durabilidade e baixa fragilidade; a LOM permite a produção de peças grandes como 500x800x500 mm; as peças produzidas tem propriedades comparáveis à madeira compensada; vários materiais orgânicos e inorgânicos com diferentes propriedades químicas e mecânicas podem ser processadas; as peças, geralmente, têm um bom acabamento final; a matéria prima não é tóxica, nem reativa o que facilita o manuseio e o descarte; os custos com material, equipamentos e processos são baixos.

Além desses pontos, os autores também citam algumas desvantagens identificadas, são elas: um esforço elevado deve ser aplicado para os processos de formação, selagem e acabamento das peças; o controle da precisão pode ser

comprometido; as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais não são homogêneas devido à estrutura laminada; a reprodução de detalhes e a durabilidade de peças pequenas é relativamente baixa; e há certo desperdício de matéria prima.

2.3.8 Multi-jet Modeling (MJM)

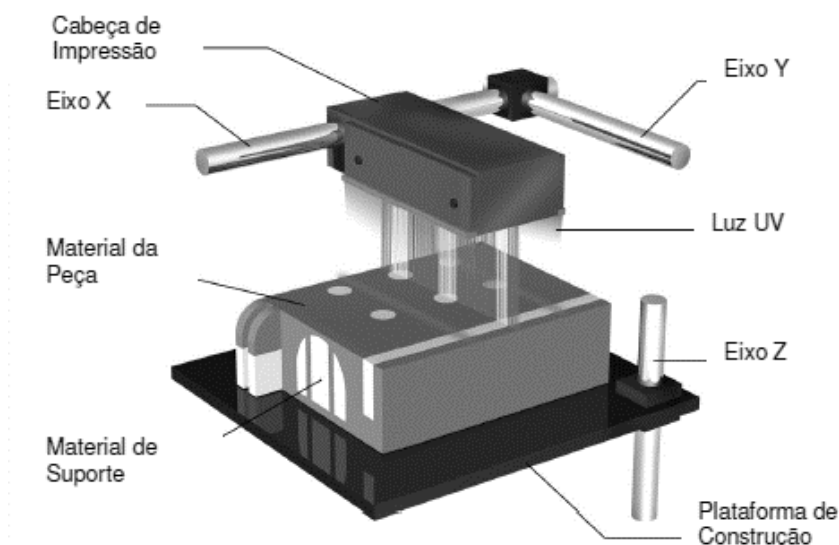
A tecnologia foi desenvolvida para trabalhar com resinas fotocuráveis e o processo pode ser considerado similar ao de impressão de jato de tinta em folhas de papel. Além dessa tecnologia, existem outros equipamentos e tecnologias criadas por outras empresas que trabalham com a tecnologia de AM que diferenciam em alguns pontos (por exemplo, estado físico da matéria prima), mas que possuem o mesmo princípio.

O Processo

Como nas impressoras de papel de jato de tinta, a tecnologia possui um cabeçote com diversas perfurações, por meio desse cabeçote o equipamento utiliza o processo de jato de tinta para depositar a resina camada a camada na bandeja. Após a primeira camada depositada, uma luz UV é lançada para curar a resina; em seguida a bandeja abaixa para que a próxima camada seja depositada e curada pela luz UV. O ciclo se repete até que a peça seja finalizada (Almeida, 2007). O processo é ilustrado na Figura 14.

A tecnologia utiliza suporte solúvel em água, ou seja, o pós processamento é fácil de ser aplicado. O suporte é depositado pelo mesmo cabeçote que deposita a matéria prima principal da peça final.

Figura 14: Processo MJM



Fonte: Adaptado de Lorenzoni, Doubrovski e Verlinden (2013).

As aplicações

De acordo com Chua et al. (2010), as principais aplicações da tecnologia envolvem diversas áreas, como segue:

- aplicações gerais: modelos conceituais usados para prova de design, testes de engenharia, integração e análise de montagem, análises funcionais, exposições e vendas de pré-produção, pesquisa de mercado e comunicação inter-profissional;
- ferramentaria e fundição: peças criadas para fundição de precisão; ferramental rápido. Também podem ser usadas para criar moldes de silicone e alumínio;
- radiologia: operação e planejamento de reconstrução e design prótese personalizada;
- indústria de jóias: apresentação do conceito do projeto, prova de concepção, e pesquisa de mercado;
- embalagem: moldes a vácuo, proporciona redução de custos.

As vantagens e desvantagens

Os autores Chua et al. (2010) citam algumas vantagens e desvantagens da tecnologia, como vantagens ele citam:

- alta qualidade e precisão: a tecnologia permite camadas finas com espessura de 16 microns, resultando em detalhes precisos;

- processo rápido: requerem apenas uma lavagem fácil do material de suporte que é uma força fundamental;
- acabamento final: as peças construídas têm superfície lisa e detalhes finos sem qualquer pós-processamento;
- vasta variedade de materiais;
- processo seguro: a matéria prima utilizada não é tóxica.

As duas principais desvantagens ou limitações destacadas pelos autores, são:

- pós-processamento: utilização de jato de água para remoção do suporte, ou seja, é necessário ter um abastecimento de água próxima a área em que a máquina fica instalada. O jato de água pode danificar peças pequenas ou com detalhes finos, por isso o cuidado no pós-processamento deve ser exercido.
- desperdício: o material de suporte que é retirado da peça final por um jato de água não pode ser reutilizado, o que significa custos adicionais são adicionados ao suporte material.

Segundo Vaupotič et al. (2006), a tecnologia uni vários aspectos importantes na AM como resolução, precisão, velocidade e variedade de materiais; e que as outras tecnologias, geralmente, não conseguem unir.

2.4 QUADRO COMPARATIVO DAS TECNOLOGIAS DE AM

A Tabela 4 correlaciona cada tecnologia de AM com as suas características principais e tem o intuito de facilitar a identificação dos diferenciais entre as tecnologias estudadas nos tópicos anteriores.

Tabela 4: Tabela Comparativa - Tecnologias de AM

Tecnologia	Material típico	Vantagens	Desvantagens
Estereolitografia (SLA)	Polímeros líquidos e compósitos fotossensíveis	Rápido Boa resolução (partes detalhadas) Não precisa de material de suporte Propriedades mecânica relativamente boa Geometrias complexas	Alto custo de equipamento Alto custo dos materiais Conjunto de materiais é limitado a resinas Necessário pós-cura

Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)	Termoplásticos (ABS, PLA, PC, Ultem, etc)	Matéria prima de baixo custo Peças resistentes Geometrias complexas	Limitação de materiais Acabamento superficial inferior e construção lenta em relação a SLA
Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	Plástico, metal, vidro, cerâmica e compósitos	Vasta variedade de materiais estruturais para além de polímeros Não há necessidade de materiais de suporte Mais barato do que EBM Uma das duas tecnologias que permitem peças complexas em metais Peças resistentes a alta temperatura e produtos químicos Alta velocidade	Custo elevado em relação a FDM e a 3DP Qualidade das peças de metal não é tão elevada como com EBM Precisão limitada ao tamanho de partícula em pó Acabamento superficial rugoso
Impressão Tridimensional (3DP)	Gesso, areia, cerâmica, açúcar e amido para a impressão de alimentos	Pode criar peças multi-cor Pode gerar componentes complexos com graus de liberdade internos Econômico Versátil	Conjunto limitado de materiais Baixa resolução (mais baixa de todas as tecnologias de AM) Propriedades mecânicas desprezíveis (inutilizáveis para qualquer aplicação estrutural)
Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS)	Pó de metais: aço inoxidável, cobre, alumínio e titânio	Produz peças com boas propriedades mecânicas Não precisa de tratamento térmico após o processamento Produz geometrias complexas Reparos em peças	Processo necessita de uma corrente de gás Necessário processo para realizar acabamento na peça final
Fusão por Feixe de Elétrons (EBM)	Pó de metais: titânio, tungstênio, aço inoxidável, cromo cobalto, superligas à base de Níquel (Ni)	Método de escolha para peças metálicas de alta qualidade Ampla variedade de metais Peças totalmente densas com microestruturas homogêneas Operação em alta temperatura resulta em estruturas livres de tensões internas Alta velocidade Menos distorção de peças Menos desperdício de material	Processo/equipamento com elevado custo (mais que SLS) Necessário usinagem convencional para realizar o acabamento superficial Requer funcionamento a vácuo Difícil de limpar a máquina
Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM)	Folhas de papel, plástico e de metal	Processo relativamente de alta velocidade Baixo custo de equipamento Materiais não tóxicos Possível de produzir peças grandes Não é necessário material para suporte Não tem procedimento após o processo	Não tão precisa quanto as demais tecnologias Baixa resolução do eixo Z Conjunto limitado de materiais
Multi-jet modeling (MJM)	Resinas fotocuráveis	Boa precisão e qualidade Combinação de mais de um material na mesma peça (além do material de suporte) Obtenção de peças com partes lisas e detalhadas Processo de alta velocidade	Material de suporte não pode ser reutilizado Pós processamento para remoção do suporte Limite do conjunto de materiais

Fonte: Adaptado de Cotteleer, Holdwsky e Mahto (2014); Loughborough University; Volpato (2007).

Com as diversas tecnologias identificadas é possível considerar que essas abrangem uma grande parte das necessidades provenientes dos mercados existentes nas indústrias, porém é necessário questionar até que ponto que a impressão 3D pode substituir a manufatura tradicional, fato mencionado na introdução do presente documento. Além desse ponto, a conciliação entre peça a ser produzida e tecnologia a ser utilizada é essencial para usufruir das vantagens que as impressoras 3D podem e proporcionam às empresas. Sendo assim, para que seja possível construir o modelo que correlacione esses dois tópicos é imprescindível conhecer os principais métodos de tomada de decisão baseado em multicritérios.

MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO

De acordo com Franklin e Fernandes (2012), os Métodos de Tomada de Decisão Multicritério (MCDM) trabalham com um número finito de alternativas para a solução do problema em análise e com múltiplos critérios (atributos) os quais recebem pesos que indicam a sua importância, permitindo assim: identificar quais variáveis são mais relevantes à decisão; possibilitar a análise das alternativas; acumular conhecimento sobre o processo e o problema; e facilitar a comunicação e a análise de resultados.

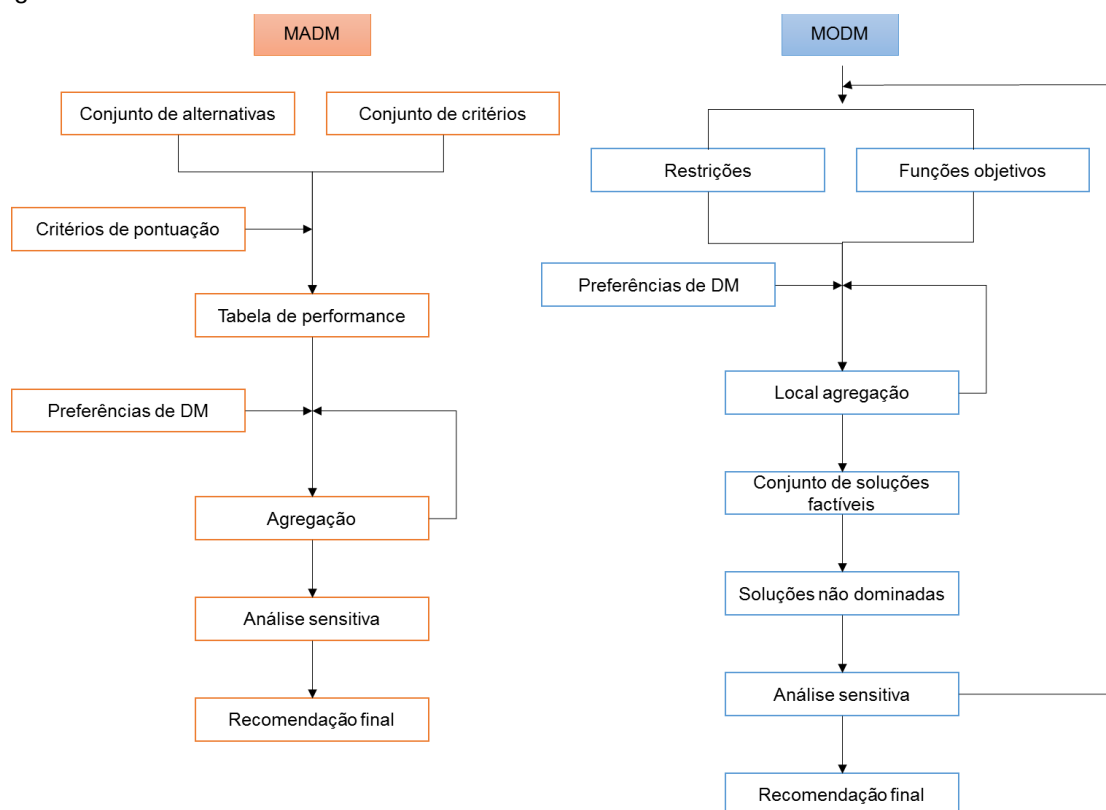
Os MCDM podem ser classificados como: Tomada de Decisão Multiobjetivo (MODM) ou Tomada de Decisão Multiatributo (MADM), a principal diferença entre essas duas classificações é o fato que enquanto uma trabalha voltada ao atributo a outra é ao objetivo. Portanto, para saber em qual categoria a tomada de decisão se encaixa é necessário entender o significado de objetivo e atributo, assim seguem as definições. Objetivos são como reflexos do desejo dos decisores e indicam a direção na qual eles querem trabalhar; e atributos são características que representam propriedades ou capacidades das alternativas, para satisfazer a necessidade e/ou desejos do decisor (Queiroz, 2009). Em complemento, as principais diferenças entre os métodos MODM e MADM constam na Tabela 5 e a representação genérica da funcionalidade dos dois tipos de modelos estão ilustrados na Figura 15.

Tabela 5: Características gerais dos modelos MADM e MODM

Tomada de Decisão Multiatributo (MADM)	Tomada de Decisão Multiobjetivo (MODM)
Conjunto restrito de alternativas	Número alto ou infinito de soluções factíveis
Conjunto de alternativas explicitamente definido	Conjunto de soluções factíveis definido implicitamente
Função de agregação é baseada em uma relação de classificação superior ou em uma função de utilidade	Usa um local e uma interação com algoritmos de agregação
Requer informações a priori sobre as preferências do decisor	Requer bem menos informações a priori sobre as preferências do decisor

Fonte: Adaptado de Chakhar e Martel (2003).

Figura 15: Fluxo MADM e MODM



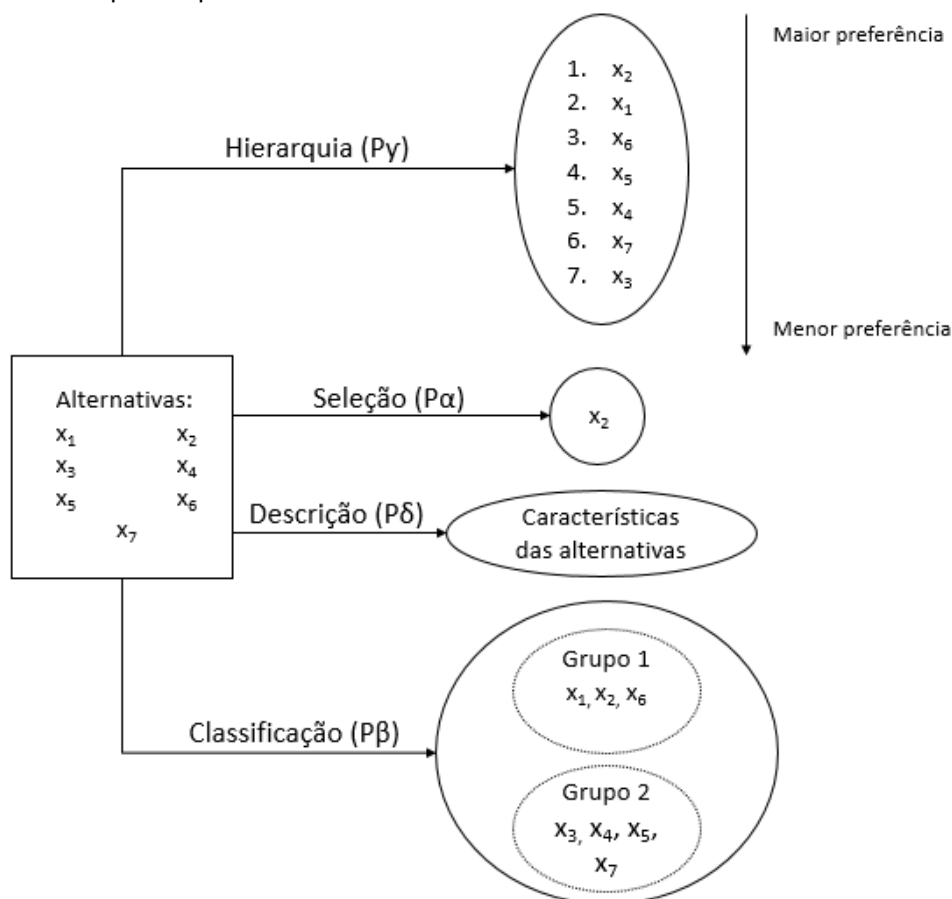
Fonte: Adaptado de Chakhar e Martel (2003).

Deste modo, como o objetivo é criar um modelo que auxilie na identificação da melhor tecnologia de AM para a produção de um conjunto de peças, onde há correlação entre critérios prioritários para as peças, deve-se levar em consideração apenas os métodos existentes relacionados a MADM. Os principais métodos MADM que poderão auxiliar no desenvolvimento no modelo são: Ponderação Simples Aditiva (SAW), TOPSIS, ELECTRE, AHP e PROMETHEE; todos eles têm como principais características a ponderação para cada atributo/critério analisado; e esses pesos são adquiridos a partir das opiniões dos tomadores de decisão, pois eles sabem quais são

os atributos mais sensíveis em relação a mudança no peso e que pode alterar o resultado final da análise (Memariania et al., 2009).

Outro fator decisivo na escolha do método é o tipo de problemática que está sendo envolvida, a qual pode ser classificada em: seleção, classificação, hierarquia (ou ordenação) e descritiva, cada qual com a sua peculiaridade. Segundo Campos (2011), os métodos de decisão que envolvem problemas de seleção (escolha), têm como objetivo selecionar um menor conjunto de melhores alternativas; já os que envolvem problemas de hierarquia (ordenação), o objetivo é ordenar as alternativas da melhor para a pior, gerando um ranking com todas as opções; nos métodos que envolvem problemas de classificação as alternativas são classificadas de acordo com as normas estabelecidas e o resultado do processo de tomada de decisão está na organização das ações; e os modelos que envolvem a problemática descritiva tem por finalidade descrever as consequências das ações para que o decisor possa melhor avaliar as alternativas. A Figura 16 representa os tipos de problemáticas descritos anteriormente.

Figura 16: Tipos de problemáticas



Fonte: Campos (2011).

3.1 PONDERAÇÃO SIMPLES ADITIVA (SAW)

De acordo com Memariania et al. (2009), o método SAW é um dos mais utilizados entre os métodos MADM, é a mais simples e é a base da maioria dos métodos MADM, como AHP e PROMETHEE, para calcular a pontuação final das alternativas.

Segundo Jain et al. (2013), o SAW é composto de quatro passos, sendo que o primeiro é determinar o objetivo e identificar os pesos pertinentes a cada atributo; é importante ressaltar que as somatórias dos pesos devem ser correspondentes a 1 ou 100%. O segundo, representa uma matriz com base em todas as informações disponíveis sobre os atributos, onde cada linha dessa matriz representa uma alternativa e cada coluna um atributo. O terceiro passo corresponde a matriz preenchida considerando os valores associados a cada alternativa em relação ao atributo; como a análise pode variar de decisor para decisor esse passo pode ser realizado considerando algumas abordagens, as quais são: esquemas de ordenação de alternativas, relações de preferência multiplicativas, uso de funções de utilidade, relações de preferência *fuzzy*, entre outros. (Queiroz, 2009). O quarto passo é a aplicação da seguinte fórmula (Rezende, 2012):

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j . r_{ji}$$

Onde:

S_i = a função de utilidade da alternativa (i) , sendo $i = 1, 2, \dots, n$

w_j = o peso do critério e $j = 1, 2, \dots, n$

r_{ji} = o valor normalizado da alternativa em relação ao critério.

A Figura 17 exemplifica a forma como os passos são disponibilizados e integrados.

Figura 17: Passos Método SAW

		Critérios				Fórmula	Resultado
		C1	C2	C3	C4		
	Pesos	0,2	0,15	0,4	0,25		
Alternativas	A1	25	20	15	30	$=(25*0,2)+(20*0,15)+(15*0,4)+(30*0,25)$	21,5
	A2	10	30	20	25	$=(10*0,2)+(30*0,15)+(20*0,4)+(25*0,25)$	20,75
	A3	30	10	30	10	$=(30*0,2)+(10*0,15)+(30*0,4)+(10*0,25)$	22

Melhor alternativa

Fonte: Autora (2017).

3.2 TOPSIS

O TOPSIS é um método que avalia o desempenho das alternativas através da similaridade com a solução ideal (Krohling et al, 2011), ou seja, as alternativas são classificadas de acordo as distâncias entre essas e a solução ideal positiva e a negativa. Logo, a melhor alternativa tem, simultaneamente, a distância mais curta em relação a solução ideal positiva e a mais longa em relação a solução ideal negativa (Sarraf et al., 2013). O método é composto por seis passos, segundo Martins (2012), como segue:

Passo 1: Construir a matriz de decisão (Figura 18) com base nas alternativas e critérios existentes. Onde: as alternativas são representadas por A (linhas) e os critérios por C (colunas); e o conjunto W representa os pesos de cada critério relacionado a cada alternativa.

Figura 18: Matriz de decisão

	C_1	C_2	...	C_j	...	C_n
A_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{1n}
A_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}	...	x_{2n}
...	...	...	...	...	...	...
A_m	x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mj}	...	x_{mn}

W	w_1	w_2	...	w_j	...	w_n
-----	-------	-------	-----	-------	-----	-------

Fonte: Autora (2017).

Passo 2: Calcular a matriz de decisão normalizada. O valor normalizado pode ser calculado através da fórmula:

$$y_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}$$

Onde:

$i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$

m = o número de alternativas

x_{ij} = o escore do j -ésimo critério para a i -ésima alternativa

Passo 3: Calcular a matriz com os respectivos pesos, ou seja, a matriz normalizada é multiplicada pelo peso dos critérios, os quais são geralmente definidos pelos tomadores de decisão e a somatória é sempre igual a 1 ou 100%.

$$vij = wij \cdot yij$$

Onde:

Wij = é o peso definido para cada critério

Passo 4: Determinar os níveis para cada um dos critérios analisados, a fim de identificar o conjunto dos critérios relacionados a solução ideal positiva e à negativa.

$$S^+ = \{(maxvij \mid j \in J), (minvij \mid j \in J')\}$$

$$S^- = \{(minvij \mid j \in J), (maxvij \mid j \in J')\}$$

Onde:

J = conjunto de critérios de benefícios

J' = conjunto de critérios de custos

Passo 5: Determinar as distâncias entre a solução ideal positiva (D+) e cada alternativa, e a solução ideal negativa (D-) e cada alternativa.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (vij - S_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (vij - S_j^-)^2}$$

Passo 6: Calcular a similaridade e definir a hierarquia das alternativas a fórmula abaixo é utilizada.

$$A_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

Para concluir, a alternativa que mais se aproximar de $A_i = 1$ é a ideal, e a que se aproximar de $A_i = 0$ não é a ideal, e a partir dessa informação a alternativa ideal é escolhida.

3.3 ELECTRE

O método ELECTRE consiste em uma família de métodos os quais são denominados I, II, III, IV, IS e TRI; todos eles são baseados nos mesmos conceitos, porém se diferem em termos operacionais e em relação ao tipo de problema no qual se está trabalhando. De modo geral essa família tem duas características típicas: a) o método não é um método compensatório, ou seja, resultados bons para um critério não compensa o resultado ruim em outro; b) o método permite a incomparabilidade, ou seja, quando não é possível realizar comparações entre alternativas a e b, não existe evidência clara a favor de algum tipo de preferência ou indiferença (Infante et al., 2014).

Portanto, o ELECTRE implica na construção de relações de preferência, geração dos índices de concordância e de discordância, e análise dos resultados obtidos de uma avaliação global de todas as relações de preferências derivadas (Calili et al., 2010). Porém para início, como nos demais métodos, o primeiro passo é definir as alternativas, os critérios e os pesos desses critérios, construindo com esses dados uma matriz; e como ponto crítico para que o método seja relevante, considera-se que o tomador de decisão queira incluir no mínimo três critérios para análise (Figueira et al., 2005).

Para a construção das relações é necessário utilizar a matriz a qual correlaciona os valores de desempenho de cada critério com cada alternativa, considerando o peso desses critérios; esta precisa estar normalizada. As relações de preferência são definidas de tal modo que uma alternativa (M_i) é preferível em relação a outra (M_k) se a M_i é tão boa quanto M_k para a maioria dos critérios e que não seja significativamente negativa sobre quaisquer outros critérios. Após a construções das relações são definidos os conjuntos de concordância e discordância, para isso é necessário realizar duas comparações: a) primeira voltado a análise dos critérios (g_j) em M_i que são superiores aos critérios em M_k ; e b) segunda em que $g_j (M_i)$ não é superior a $g_j (M_k)$ (Milani et al., 2006).

Após a construção das relações e os conjuntos de concordância e discordância, é realizado o procedimento de análise que é elaborado para indicar as recomendações a partir dos resultados obtidos. A natureza das recomendações depende do tipo de problemática (a seleção, classificação ou ordenação). Assim, cada

um dos métodos é caracterizado por a sua construção e os seus procedimentos de exploração (Figueira et al., 2005).

O primeiro método que surgiu foi o ELECTRE I e os demais foram derivados desse, portanto, para melhor entendimento o passo a passo desse será desdobrado a seguir e as principais diferenças entre esse e os demais serão mencionados ao final.

Considerando os passos padrões para a maioria dos métodos MCDM, primeiramente são definidos: as alternativas (a_i), os critérios (c_i) e o pesos desses critérios (w_j). Após essas definições é realizado as comparações par a par que define os seguintes conjuntos de índices:

$$J^+(a_i, a_k) = \{j \in J \mid c_j(a_i) > c_j(a_k)\}$$

$$J^=(a_i, a_k) = \{j \in J \mid c_j(a_i) = c_j(a_k)\}$$

$$J^-(a_i, a_k) = \{j \in J \mid c_j(a_i) < c_j(a_k)\}$$

Onde:

J = conjunto de critérios

$c_j(a_i)$ = avaliação da ação a_i pelo critério c_j

As relações estabelecidas devem ser convertidas em valores numéricos pelas seguintes expressões:

$$P^+(a_i, a_k) = \sum_j w_j, j \in J^+(a_i, a_k)$$

$$P^=(a_i, a_k) = \sum_j w_j, j \in J^=(a_i, a_k)$$

$$P^-(a_i, a_k) = \sum_j w_j, j \in J^-(a_i, a_k)$$

Em seguida o cálculo do índice de concordância é realizado assim como o de discordância, segue, respectivamente, as fórmulas:

$$C_{ik} = \frac{P^+(a_i, a_k) + P^=(a_i, a_k)}{\sum_{i \in J} w_j}, 0 \leq C_{ik} \leq 1$$

$$D_{ik} = \begin{cases} 0, & \text{se } J^-(a_i, a_k) = \emptyset \\ \delta_j \max(c_j(a_k) - c_j(a_i)), & j \in J^-(a_i, a_k), c. c. \end{cases}$$

Tal que δ_j é o fator de escala associado ao critério c_j e $0 \leq D_{ik} \leq 1$.

Obter os melhores resultados das relações de sobreclassificação e alternativas com a seguinte expressão:

$$a_i S a_k \Leftrightarrow \begin{cases} C_{ik} \geq \mathcal{T}_c \\ D_{ik} \leq \mathcal{T}_d \end{cases}$$

$\mathcal{T}_c$: limiar de concordância, em geral $\approx 0,7$;
 $\mathcal{T}_d$: limiar de discordância, em geral $\approx 0,3$.

Para melhor identificação do resultado um grafo pode ser utilizado, onde uma seta de a_i para a_j indica que a alternativa a_i sobreclassifica a_j . Logo, a alternativa a ser escolhida é a_i .

Por fim, as variações dos métodos e principais características constam na Tabela 6.

Tabela 6: Métodos família ELECTRE

Versão	Autor	Ano	Problemática	Tipo de Critério	Utiliza pesos	Observação
I	Roy	1968	Seleção	Simples	Sim	
II	Roy e Bertier	1973	Ordenação	Simples	Sim	Similar ao ELECTRE I, mas modifica a definição das relações de sobreclassificação (forte e fraca); e elimina circuitos
III	Roy	1978	Ordenação	Pseudo	Sim	Similar ao ELECTRE II, mas introduz limiares para as relações de indiferença e preferência estrita entre ações; altamente configurável, sendo esta sua principal limitação
IV	Roy e Hugonnard	1982	Ordenação	Pseudo	Não	Similar ao ELECTRE III, porém elimina a necessidade de definição de pesos pelo decisor
IS	Roy e Skalka	1985	Seleção	Pseudo	Sim	Método ELECTRE I com lógica fuzzy para os índices de concordância e discordância; reduz sensibilidade aos parâmetros definidos pelo decisor

TRI	Yu Wei	1992	Classificação	Pseudo	Sim	Permite classificar as ações com relação a "ações de referência"; possui baixa complexidade computacional.
-----	--------	------	---------------	--------	-----	--

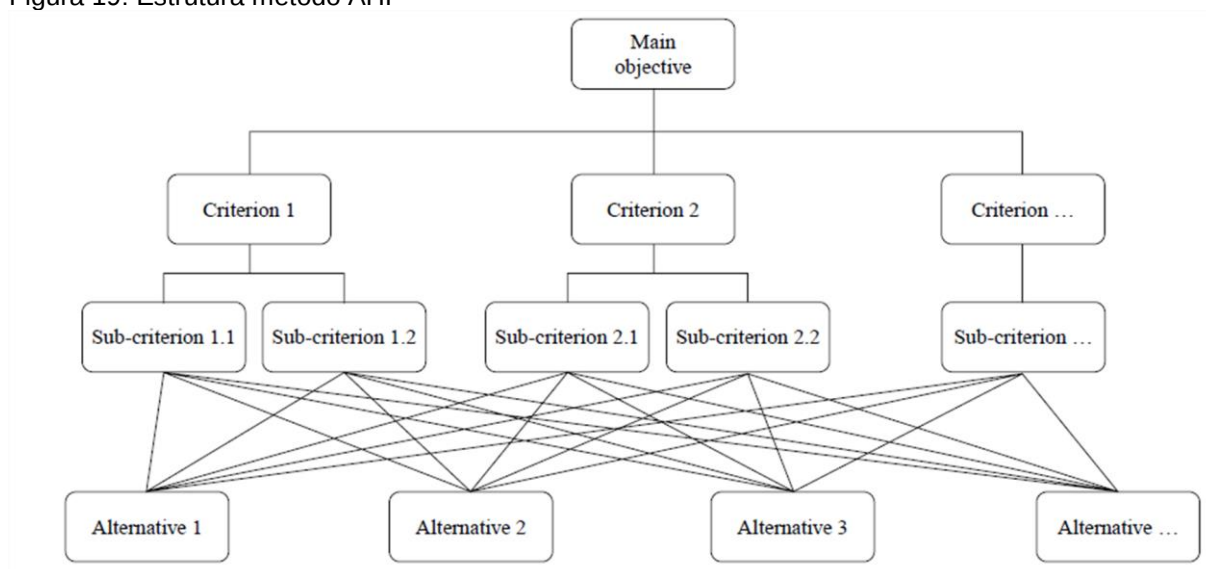
Fonte: Adaptado de Batista (2016) e Gomes, Araya e Carignano (2004).

3.4 AHP

O método AHP é uma ferramenta utilizada para facilitar a análise, compreensão e avaliação do problema de decisão, dividindo-o em níveis hierárquicos (JUNIOR e CHAMON, 2006), de forma geral o AHP tem sua estrutura definida como está ilustrado na Figura 19.

A partir da definição dos objetivos, critérios e a relação desses critérios com as alternativas é realizado um processo de comparação em pares de critérios, as quais recebem os valores de importância com base em uma escala fundamental que reflete a força relativa das preferências e sentimentos (Escala Fundamental criada por T. L. Saaty juntamente com o método AHP nos anos 70 – Figura 20) (Saaty, 1987); a partir dessa análise uma matriz é criada (Figura 21 e 22).

Figura 19: Estrutura método AHP



Fonte: Adaptado de Borille et al (2010).

Figura 20: Escala Fundamental de Saaty

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade sobre outra
5	Importância essencial ou forte	Experiência e julgamento favorecem claramente uma atividade sobre outra
7	Forte importância	Experiência e julgamento mostram que um critério é predominante para o objetivo
9	Extrema importância	Um dos critérios é absolutamente predominante para o objetivo
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre os dois julgamentos adjacentes	Quando é necessário um compromisso

Fonte: Borille et al (2010).

Figura 21: Matriz B

<i>Critérios</i>	c_1	c_2	c_3	c_4
c_1	1	c_1/c_2	c_1/c_3	c_1/c_4
c_2	c_2/c_1	1	c_2/c_3	c_2/c_4
c_3	c_3/c_1	c_3/c_2	1	c_3/c_4
c_4	c_4/c_1	c_4/c_2	c_4/c_3	1

Fonte: Autora (2017).

Figura 22: Matriz A

<i>Critérios</i>	c_1	c_2	c_3	c_4
c_1	1	0,25	0,5	0,33
c_2	4	1	2	1
c_3	2	0,5	1	1
c_4	3	1	1	1
<i>Soma</i>	10	2,75	4,5	3,33

Fonte: Autora (2017).

Onde:

c_i = critérios

c_i/c_j = comparação entre o critério c_i e o c_j , consultando a Tabela Fundamental. Sendo que c_i/c_i é sempre igual a 1, pois tem a mesma importância de acordo com a Tabela Fundamental; e, por exemplo, se: $c_2/c_1 = 4$ então $c_1/c_2 = 1/4$.

O processo descrito acima corresponde ao primeiro passo do AHP, para dar continuidade ao método é realizado o processo de criar uma matriz normalizada. Esse

procedimento corresponde a seguinte ação: $c_i/c_j = c_i/\sum(c_i/c_j)$ de cada linha. Ou seja, $c_1/c_1 = 1/10$; $c_2/c_1 = 4/10$; $c_3/c_1 = 2/10$ e assim segue com os demais (Malakooti, 2009). Logo, a matriz normalizada ficará assim:

<i>Crítérios</i>	c_1	c_2	c_3	c_4	<i>Prioridade Relativa</i>
c_1	0,1	0,09	0,11	0,1	0,1
c_2	0,4	0,36	0,44	0,3	0,38
c_3	0,2	0,18	0,22	0,3	0,23
c_4	0,3	0,36	0,22	0,3	0,3
<i>Soma</i>	1	1	1	1	1

A prioridade relativa de cada linha corresponde ao peso desse critério em relação ao problema em questão e para validar se os julgamentos são consistentes e aceitáveis é necessário calcular o CR (razão da consistência). Para que os julgamentos sejam aceitos o $CR \leq 0,10$ ou 10%, caso contrário o decisor deve rever os índices de cada critério (Tchemra, 2009). O CR é cálculo conforme a seguinte fórmula:

$$CR = \frac{CI}{ICR}$$

Onde:

$$CI = (\lambda_{m\acute{a}x.} - n)/(n - 1)$$

$\lambda_{m\acute{a}x.}$ = *matriz quadrada*

$n = n^o$ de critérios na matriz

ICR = *conforme Tabela 7*

Tabela 7: Índice aleatório ICR

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,59

Fonte: Adaptado de Junior (2006).

Após o cálculo do CR para os critérios, o próximo passo é realizar os passos descritos acima (exceto o cálculo do CR) para as alternativas, ou seja, as alternativas serão comparadas par a par em relação a cada critério existente, isso resultará em uma matriz com as prioridades relativas das alternativas para cada critério. Posteriormente a esse processo, uma matriz é montada sendo o resultado da multiplicação das matrizes: prioridade relativa da análise dos critérios com as

alternativas e prioridade relativa dos critérios (primeira análise realizada – critérios com critérios); o resultado dessa operação é a prioridade relativa global (Figura 23) que resultará na identificação da melhor alternativa, sendo que a alternativa que tem a prioridade relativa mais alta é a melhor entre as demais.

Figura 23: Cálculo prioridade relativa global

<i>Critérios/Alternativas</i>	c_1	c_2	c_3	c_4		<i>Prioridade relativa dos critérios</i>		<i>Prioridade relativa Global</i>
A_1						x_1		X_1
A_2						x_2		X_2
A_3						x_3		X_3

Fonte: Autora (2017).

Após os detalhes dos métodos, os casos exploratórios serão apresentados a fim de auxiliar na criação do modelo de tomada de decisão e expor como foram realizados e quais os resultados obtidos.

3.5 PROMETHEE

O método *Promethee* (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations*) foi desenvolvido por Jean-Pierre Brans em 1982 e, assim como o *Electre*, possui uma família que apesar de ter cada qual sua particularidade funcionam, basicamente, com os mesmos conceitos. Ou seja, todos trabalham com critérios e alternativas, como visto nos outros métodos também, logo tem-se que o primeiro passo é montar a matriz de alternativas (linha) x critérios (coluna), definir o peso de cada critério e qual o valor de cada relação alternativa/critério.

A família dos métodos *Promethee* utiliza comparações binárias entre as alternativas considerando o desempenho critério a critério, a fim de montar as alternativas em ordem de prioridade. Além disso, os métodos trabalham com a ideia de grau de preferência e indiferença, fato que delimita se uma alternativa está na área de indiferença, preferência fraca ou preferência forte e auxilia no resultado final (Queiroz, 2009). O decisor deverá realizar a análise de preferência quando o mesmo realizar as comparações por pares, que verificam o desvio na avaliação de duas alternativas, essa análise deve ser realizada seguindo as fórmulas abaixo (Cabral, 2012).

$$P_k(i, j) = F_k[d_k(i, j)]$$

$$d_k(i, j) = g_k(i) - g_k(j)$$

Onde:

i e j são alternativas;

$g_k(i)$ é a avaliação da alternativa i para o critério k ;

$$0 \leq P_k(i, j) \leq 1$$

Com a aplicação das fórmulas e necessária validar qual o tipo de função de preferência para cada conjunto de comparações. São listadas seis funções: (1) *usual*, (2) *U-shape*, (3) *V-shape*, (4) *level*, (5) *V-shape I* e (6) *gaussian*, as quais estão definidas, respectivamente, na Figura 24, onde: q é um limite de indiferença; p é um limite de preferência estrita; e s é um valor intermediário entre q e p .

Após a definição das funções, os índices de preferência e os fluxos de subordinação devem ser estabelecidos. Os índices de preferência são calculados conforme a aplicação da fórmula abaixo.

$$\begin{cases} \pi(i, j) = \sum_{k=1}^m P_k(i, j) \cdot w_k \\ \pi(j, i) = \sum_{k=1}^m P_k(j, i) \cdot w_k \end{cases}$$

Onde:

$\pi(i, j)$ expressa em que grau i é preferível a j com relação a todos os critérios e

$\pi(j, i)$ expressa o quanto j é preferido a i ;

$\pi(i, j) \sim 0 \rightarrow$ preferência global fraca de i sobre j ;

$\pi(i, j) \sim 1 \rightarrow$ preferência global forte de i sobre j .

O fluxo de subordinação pode ser positivo ou negativo, o positivo representa o quanto uma alternativa subordina as demais e quanto mais alto é o valor desse fluxo melhor é a alternativa. Já o fluxo negativo é o inverso do positivo, ou seja, o negativo representa o quanto uma alternativa é subordinada das demais e quanto mais baixo o valor desse fluxo, melhor é a alternativa (Cabral, 2012). Portanto, a decisão final é tomada com base na avaliação desses fluxos calculados. A seguir seguem as fórmulas para os cálculos dos fluxos positivo e negativo.

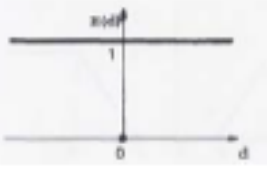
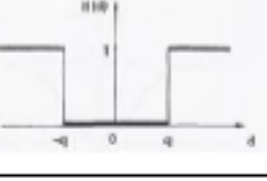
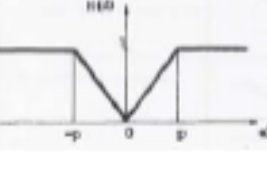
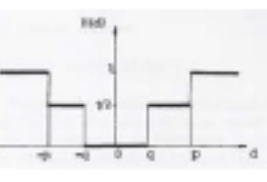
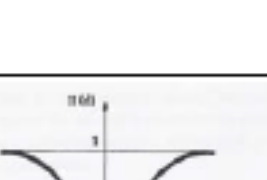
- Fluxo positivo de subordinação:

$$\phi^+(j) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(i, x)$$

- Fluxo negativo de subordinação:

$$\phi^-(j) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, i)$$

Figura 24: Método Promethee: Função de preferência

Critério (onde d é a diferença na performance ($g_i(a) - g_i(b)$))			Parâmetros
I Critério usual		$H(d) = \begin{cases} 0 & \text{se } d = 0 \\ 1 & \text{se } d \neq 0 \end{cases}$ Há uma indiferença entre a e b se e somente se $g(a) = g(b)$ Qualquer diferença entre a avaliação das alternativas, implica em preferência estrita.	Nenhum
II Quase-critério		$H(d) = \begin{cases} 0 & \text{se } -q \leq d \leq q \\ 1 & \text{se } d < -q \text{ ou } d > q \end{cases}$ Duas alternativas são indiferentes enquanto a diferença entre as avaliações (d) não ultrapassar o limiar de indiferença. Acima desse limiar, a preferência é estrita.	Q
III Critério de Preferência Linear		$H(d) = \begin{cases} d/p & \text{se } -p \leq d \leq p \\ 1 & \text{se } d < -p \text{ ou } d > p \end{cases}$ A preferência do decisor cresce linearmente até que o limiar de preferência (p) seja atingido. Após esse limiar, a preferência é estrita.	P
IV Critério nível		$H(d) = \begin{cases} 0 & \text{se } d \leq q \\ 1/2 & \text{se } q < d \leq p \\ 1 & \text{se } p < d \end{cases}$ a e b são considerados como indiferentes até que a diferença (d) entre $g_i(a)$ e $g_i(b)$ não ultrapasse q; entre q e p o grau de preferência é fraco e acima de p a preferência é estrita.	p, q
V Critério de preferência linear com zona de indiferença		$H(d) = \begin{cases} 0 & \text{se } d \leq q \\ (d - q)/(p - q) & \text{se } q < d \leq p \\ 1 & \text{se } p < d \end{cases}$ a e b são considerados como indiferentes até que a diferença (d) entre $g_i(a)$ e $g_i(b)$ não ultrapasse q; acima desse limiar, o grau de preferência cresce linearmente com d até atingir uma preferência estrita a partir de p.	p, q
VI Gaussiana		$H(d) = 1 - e^{-d^2 / 2\sigma^2}$ O desvio padrão (σ) deve ser fixado e a preferência aumenta segundo uma distribuição normal.	σ (desvio padrão)

Fonte: Morais e Almeida (2005).

ESTUDO – CASOS EXPLORATÓRIOS

Os casos exploratórios detalhados a seguir foram realizados em uma montadora de veículos e serão apresentados com o intuito de verificar quais foram os principais parâmetros utilizados na escolha da peça, visto que na empresa há apenas um tipo de tecnologia de AM; e quais mais deveriam ter sido considerados. Com essa análise e com a revisão da literatura é possível criar uma lista de parâmetros mais eficiente para a escolha das peças e utilizar no modelo que será desenvolvido. Além disso, os casos serviram para testar o modelo e demonstrar quais são os ganhos monetários que o uso da tecnologia pode oferecer.

Todas as peças dos casos exploratórios foram produzidas em uma impressora 3D com a tecnologia FDM, a qual fica no laboratório dessa organização. Para a seleção do conjunto de peças, levou-se em consideração os seguintes critérios:

- Peças MRO de apoio a produção;
- Peças são plásticas;
- Peça com tamanho até 20x30x40cm ou maior se houvesse a possibilidade de particionar, visto que esse é o dimensional do equipamento disponível no laboratório;
- Demanda de até 200 unidades por mês. Essa referência foi definida com base em cálculos realizados por especialistas da montadora considerando a demanda de impressões que já existia no laboratório.
- Peças com uso nos últimos três anos;
- Peça com custo unitário acima de R\$11,00, pois a peça com menor custo impressa no laboratório custava R\$10,49 e era a peça de uma maquete cuja medidas eram 2x2x2 cm. O custo unitário da peça foi calculado com base no volume da peça a ser impressa, na mão de obra, no custo do material, no tempo de impressão e em outros custos do laboratório (luz, locação dos equipamentos, e outros).

A partir do resultado desse primeiro filtro, que resultou em 39 peças, um novo foi realizado considerando apenas as peças com maior custo unitário, o que resultou em 10 peças, e a partir dessas foi possível realizar os testes com as 06 que serão expostas a seguir.

4.1 BICO DE MASTIC

A peça selecionada é um bico de aplicação de *mastic* (cola específica) para a colagem do para-brisa dos veículos, como é uma cola que passa por esse bico, o mesmo deve possuir: paredes lisas ou mais lisas possíveis; resistência das paredes, pois estas sofrem pressão durante o tempo que a cola está passando pelo bico; precisão, pois o bico é encaixado em um braço de robô.

Tal peça é provida de fornecedores externos, a qual é produzida através do processo de usinagem via fresas e tornos CNC, e tem um custo de R\$120,00/unidade. O consumo dessa peça é de duas unidades por dia, logo a demanda é de 624 peças/ano, com um custo total de, aproximadamente, R\$74.880,00/ano, em peças que não serão repassadas ao consumidor final, sem considerar custo com compras, gestão de estoque, entre outros. As peças produzidas na impressora 3D tiveram um custo unitário de R\$20,00, gerando uma economia de, aproximadamente, 83% por peça. Nesse caso a peça produzida na impressora tem sua vida útil menor em relação a peça do fornecedor, isso ocorre pois com a peça produzida na 3D acaba resultando em um bico com superfícies mais rugosas (devido as camadas resultantes do processo produtivo) e a cola que passa pelo bico gruda nessas rugosidades e seca; sendo assim cada vez que a cola passa pelo bico deixa mais resíduos grudado na parede do bico. Esses resíduos tornam o bico inutilizável com o passar do tempo, pois diminui o diâmetro de saída e afeta o processo produtivo. Portanto, para que seja possível utilizar a peça produzida na 3D é necessário trocar mais vezes a peça, e a usabilidade que antes era de 2 unidades/dia passa a ser 4; e considerar que a principal característica a ser analisada nessa peça é o acabamento superficial e o tempo de produção da peça.

Com isso, tem-se que a que a produção deve ser de 1248 unidades por ano e um custo total de R\$ 24.960,00, em comparação com a compra de fornecedores externos há uma economia de R\$ 49.920,00 o que equivale a 66,67% considerando apenas o custo unitário, isso resulta em uma economia de R\$0,29 por carro durante um ano (considerando a produção de 170.000 veículos/ano).

4.2 PEÇA APOIO SOLDADA

A peça serve como apoio para suportar as chapas laterais dos veículos que devem ser soldadas durante o processo produtivo. Logo, como as chapas são sensíveis ao toque, a peça de apoio deve ser lisa, absorver impacto e ter resistência mecânica.

A peça é fornecida por terceiros e tem um custo de R\$614,00/unidade. O consumo dessa peça é de, aproximadamente, quatro unidades por ano, isso resulta em um custo total de R\$ 2.456,00/ano, não considerando também custos com compras, gestão de estoque, entre outros. O principal fato dessa peça é que ela é comprada conforme demanda, ou seja, não possui estoque ou o estoque é baixíssimo. Logo, ela só é solicitada assim que os analistas identificam que a peça precisa ser trocada devido ao desgaste, desse modo a organização depende de tal forma do fornecedor que acaba sem ter poder de negociação, muitas vezes pagando por valores maiores do que os anteriores.

A peça foi produzida na impressora 3D por um custo de R\$250,00, gerando uma economia de, aproximadamente, 59% por peça. A vida útil dela não chegou a ser testada, pois como o material utilizado na produção dessa peça na 3D (o PLA) tem um acabamento superficial mais rígido do que o poliuretano (PU), material utilizado pelo fornecedor externo, quando a peça foi colocada para testes danificou a primeira chapa depositada e com isso não foi possível analisar quanto tempo ela dura até precisar ser trocado. Portanto, tem-se que a principal característica que essa peça deve apresentar é a capacidade de receber impacto e não danificar as chapas, ou seja, deve ser avaliado a questão do acabamento superficial.

4.3 TRANSPORTADOR LATERAL

A peça serve como guia para transportar as portas laterais do veículo, devido o processo a peça precisa ser resistente, pois conforme o transporte das portas ocorre, o atrito entre a porta e a peça aumenta, e com isso a peça pode sofrer rupturas. Além disso, a peça pode ter pequenas rugosidade que não afetem a qualidade da porta.

O transportador de laterais é fornecido por terceiros a um custo de R\$ 178,00/unidade e produzido em PU; tem uma demanda de vinte e cinco itens a cada

três meses, o que resulta em uma demanda anual de 100 itens, com um custo total anual de R\$ 17.800,00.

O transportador foi produzido na impressora 3D a um custo de R\$ 65,00 (63% menor que o custo externo) e a demanda foi estimada o dobro, pois a peça produzida sofreu desgaste (corte) antes que a peça de PU. Portanto, um dos fatores a serem analisados para essa peça foi a resistência da peça ao desgaste, porém esse ponto pode ser ajustado conforme o parâmetro ajustável nas configurações da impressão que nesse caso é o parâmetro de preenchimento da peça.

4.4 APOIO ESCAPAMENTO CENTRAL

O apoio de escapamento central serve como apoio para determinado processo de montagem do veículo, um dos principais critérios para manter a funcionalidade da peça é a resistência mecânica e a precisão, logo, as características devem ser similares a peça transportador de laterais.

A peça tem um custo unitário de R\$ 377,00 e uma demanda anual de 28 unidades. Utilizando a impressora 3D a peça teve um custo unitário de R\$ 83,00 o que resulta em uma economia de 78%, com os testes realizados nessa peça identificou que para uma peça do fornecedor são necessárias 1,5 unidades da peça impressa; porém, essa é uma estimativa segura, visto que os testes não foram finalizados ainda. Sendo assim, com a utilização de 42 peças/ano com um custo de R\$ 3.486, resulta em uma economia de R\$ 7.070,00 (equivalente a 67% a menos).

4.5 BATENTE DE CENTRAGEM

A peça batente de centragem é utilizada nos balanceles (responsáveis pela movimentação dos veículos ao longo da linha de montagem) e são responsáveis por proporcionar aos veículos melhor acostagem; portanto um dos critérios prioritários é a resistência ao impacto.

O custo unitário é de R\$ 1.845,00 por conjunto (direito/esquerdo), com uma demanda de 4 conjuntos por ano, totalizando em R\$ 7.380,00. A peça produzida nas impressoras da empresa custa R\$ 368,00, porém a demanda anual está estimada em 6 conjuntos, entretanto o custo é 70% mais baixo, totalizando R\$ 2.208,00. Como a função da peça é proporcionar alinhamento e acostagem dos veículos é essencial que a peça seja precisa e resistente ao desgaste.

4.6 BUCHA ANTIGIRO

A bucha antigiro funciona como uma engrenagem para um sistema específico da montadora e é conectada a várias outras peças do conjunto, portanto as características que a peça deve apresentar são: precisão das medidas, porque precisa encaixar às demais peças do sistema; e resistência ao impacto, porque com o funcionamento do sistema essa peça sofre pressão e impacto das demais parte.

A bucha é importada e o custo unitário gira em torno de R\$ 79,00, a demanda anual é de, aproximadamente, 32 unidades o que resulta em um custo total anual de R\$ 2.528,00, porém a peça é comprada em euros, logo esse valor é variável. A peça produzida internamente tem um custo de R\$ 30,00 e a demanda, considerando redução da vida útil, foi estimada em 64 unidade, gerando um custo total anual de R\$ 1.920,00, com uma economia de 24%.

4.7 QUADRO COMPARATIVO

Considerando os comentários realizados em cada peça dos casos descritos acima, tem-se como resultado um quadro comparativo das principais características das peças que podem ser analisadas na escolha da melhor tecnologia, Tabela 8. Os casos exploratórios complementam a revisão da literatura sobre o assunto e auxiliam como base na criação de um *framework*. Analisando o resultado da tabela, pode-se verificar que os critérios apresentados como características analisadas também aparecem na revisão da literatura.

Tabela 8: Critérios compilados - Casos exploratórios

PEÇA	CARACTERÍSTICAS ANALISADAS	MOTIVO
Bico de mastic	a) Rugosidade b) Precisão	a) Para que a cola não tenha aderência às paredes do bico b) Para garantir o encaixe do bico no robô de aplicação
Peça apoio solda	a) Acabamento superficial (material que absorva impacto) b) Propriedade do material (flexibilidade)	a) Para não danificar as peças que serão soldadas b) A peça deve ser flexível para absorver a pressão

		causada pela clipesagem do processo
Transportador de laterais	a) Flexibilidade b) Resistência	a/b) Para que a peça não sofra desgaste tão rápido com o processo de passagem de portas. Um material mais flexível e resistente aumentaria a vida útil da peça
Apoio escapamento central	a) Precisão	a) Garantir a precisão adequada para assegurar que a peça encaixe no escapamento e não se movimente
Batente de centragem	a) Precisão b) Resistência ao impacto	a) Para garantir uma boa acostagem do veículo à peça b) Para que não tenha problemas com o desgaste do impacto que o veículo tem contra a peça
Bucha antigiro	a) Precisão b) Resistência ao impacto	a) Para garantir que a peça se encaixe as demais sem causar problemas ao restante do conjunto que funciona como uma embreagem b) Para que não ocorra desgaste ou quebra da peça antes do tempo previsto

Fonte: Autora (2017).

MODELO

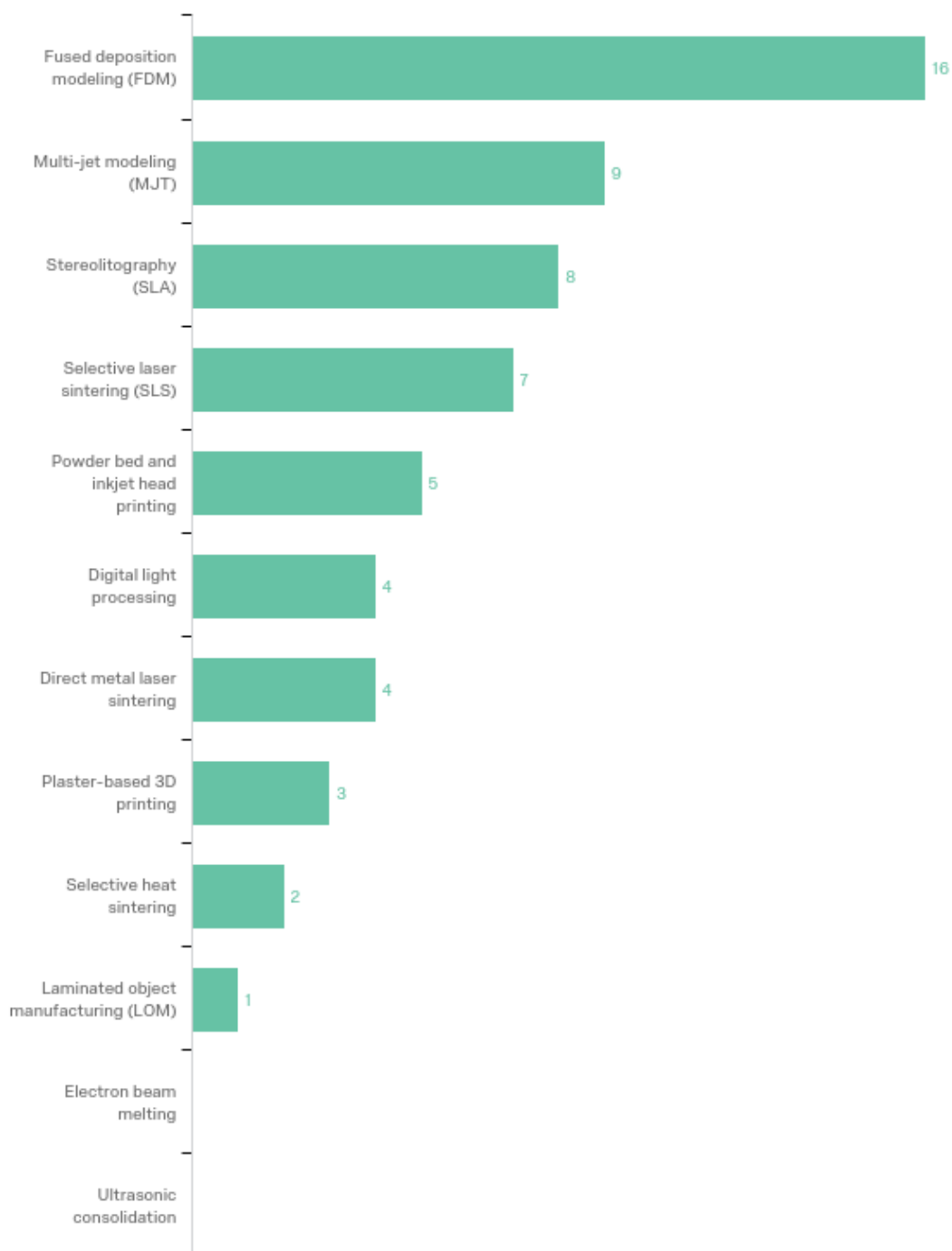
Ressalta-se que o objetivo do modelo é identificar a melhor tecnologia de manufatura aditiva para a produção de determinadas peças MRO, sendo que essas serão avaliadas conforme alguns critérios; e identificar qual a importância de cada peça à organização, pois assim é possível direcionar o tomador de decisão em qual tecnologia investir que garantirá a produção com qualidade do maior número de peças

do conjunto. Ou seja, precisamos de um conjunto limitado de tecnologias e critérios importantes para a avaliação tanto da tecnologia quanto da peça a ser impressa.

Para auxiliar na elaboração dos parâmetros presentes no modelo, uma pesquisa sobre o tema foi realizada com pessoas que tem envolvimento, seja profissional ou acadêmico, com as tecnologias de manufatura aditiva. As questões realizadas estão disponíveis para consulta no Apêndice desse documento.

A partir da pesquisa foi possível definir quais tecnologias o modelo iria envolver, visto que a ideia é garantir que apenas as tecnologias mais populares fossem inseridas, sendo assim, as selecionadas foram: FDM, MJM, SLA e a SLS, como pode ser visto na Figura 25. Além disso, para a escolha dos critérios foi necessário consultar os atributos que os autores citaram como importantes (capítulo da revisão da literatura) e os que foram identificados nos casos exploratórios, o compilado desse conjunto consta na Figura 26; e realizar um ranking dos mais votados, conforme Figura 27. A partir desse ranking, considera-se que os critérios utilizados no modelo, serão: 1) propriedade dos materiais, considerando esse item como sendo o agrupador de resistência dos materiais e flexibilidade, tanto que na pesquisa o item aparece apenas como resistência mecânica; 2) precisão; 3) rugosidade; 4) custo e 5) tempo; visto que o percentual acumulado desses corresponde a 82% do total.

Figura 25: Ranking das tecnologias - Dados da Pesquisa aplicada



Fonte: Autora (2017).

Figura 26: Compilado de critérios – análise da literatura

Fonte	Atributos	ID Agrupador
Bland e Conner	complexidade do produto	Complexidade geométrica
3D Systems	cor	Cor
3D Systems	custo unitário	Custo
Roberson	custo unitário	Custo
Roberson	quantidade de material utilizado	Custo
Byun e Lee	custo	Custo
Junior, Sant'Anna e Machado	custo unitário do produto produzido pelo método tradicional	Custo
Bland e Conner	customização	Customização
Junior, Sant'Anna e Machado	detalhe necessário	Customização
Bland e Conner	volume de produção	Demanda
3D Systems	resolução do recurso	Precisão
3D Systems	acurácia	Precisão
Caso exploratório - Apoio escapamento central	precisão dimensional	Precisão
Caso exploratório - Batente de centragem	precisão dimensional	Precisão
Caso exploratório - Bico de mastic	precisão dimensional	Precisão
Caso exploratório - Bucha antigiro	precisão dimensional	Precisão
Byun e Lee	precisão dimensional	Precisão
Roberson	acurácia	Precisão
3D Systems	propriedades dos materiais	Propriedade dos materiais
Caso exploratório - Batente de centragem	resistência a impacto (desgaste)	Propriedade dos materiais
Caso exploratório - Bucha antigiro	resistência a impacto (desgaste)	Propriedade dos materiais
Byun e Lee	propriedade dos materiais (resistência)	Propriedade dos materiais
Junior, Sant'Anna e Machado	propósito do produto	Propriedade dos materiais
Junior, Sant'Anna e Machado	material necessário em sua composição	Propriedade dos materiais
Caso exploratório - Peça apoio solda	resistência a impacto (flexível)	Propriedade dos materiais
Caso exploratório - Transportador de laterais	flexibilidade	Propriedade dos materiais
Caso exploratório - Transportador de laterais	resistência a fisura (corte)	Propriedade dos materiais
Caso exploratório - Bico de mastic	rugosidade da superfície	Rugosidade
Byun e Lee	rugosidade da superfície	Rugosidade
Junior, Sant'Anna e Machado	Acabamento superficial	Rugosidade
Caso exploratório - Peça apoio solda	acabamento superficial	Rugosidade
Roberson	acabamento superficial	Rugosidade
Roberson	quantidade de suporte necessário	Suporte
Junior, Sant'Anna e Machado	dimensão do produto	Tamanho da peça
3D Systems	velocidade de impressão	Tempo
Byun e Lee	tempo de fabricação	Tempo
Junior, Sant'Anna e Machado	tempo de produção	Tempo
Roberson	tempo utilizado para a construção da peça	Tempo

Fonte: Autora (2017).

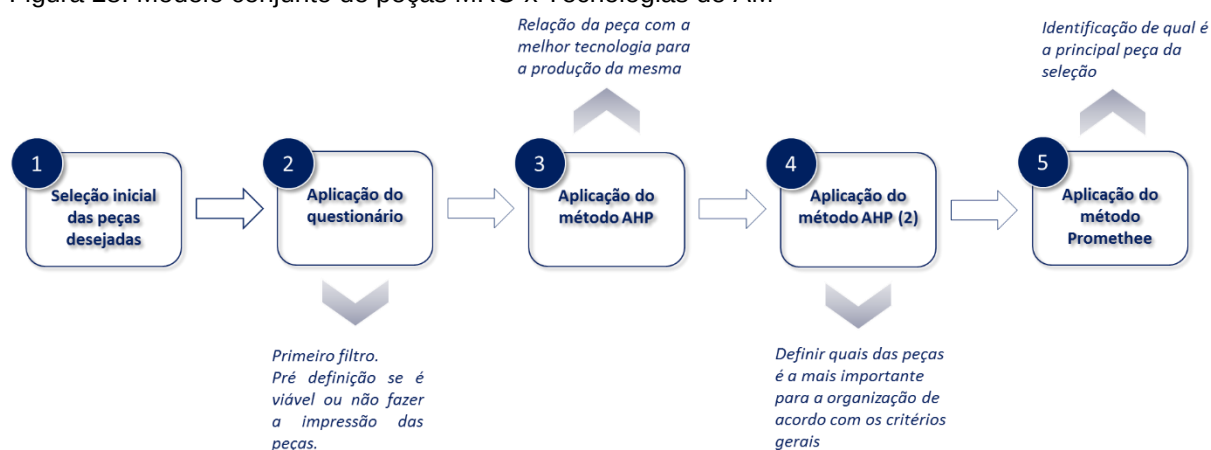
Figura 27: Ranking dos critérios

Atributos	Peso	Acumulado	Qtd
Propriedade dos materiais	24%	24%	9
Precisão	21%	45%	8
Custo	13%	58%	5
Rugosidade	13%	71%	5
Tempo	11%	82%	4
Customização	5%	87%	2
Complexidade geométrica	3%	89%	1
Cor	3%	92%	1
Demanda	3%	95%	1
Suporte	3%	97%	1
Tamanho da peça	3%	100%	1
Soma	100%		38

Fonte: Autora (2017).

A partir da definição de quais seriam as tecnologias e os critérios, criou-se o modelo de seleção de tecnologias, o qual consiste no desenvolvimento de cinco etapas, conforme ilustrado na Figura 28. Os objetivos, *inputs* e *outputs* de cada etapa estão descritos na Tabela 9 e o detalhe de cada etapa será mencionado nos próximos tópicos.

Figura 28: Modelo conjunto de peças MRO x Tecnologias de AM



Fonte: Autora (2017).

Tabela 9: Etapas do modelo

Etapas	Objetivo	Input	Output
1	Selecionar um conjunto de peças pretendentes a serem impressas	Critério livre	Conjunto inicial de peças
2	Identificar se existem possíveis problemas ou pontos relevantes no conjunto de peças que devem serem	Informações/características de cada peça do conjunto de peças	Peças selecionadas na Etapa I filtradas

	considerados como eliminatórios. Ou seja, se por algum motivo é inviável realizar a impressão de determinada peça		
3	Identificar qual a tecnologia é a mais indicada para a produção de cada peça	Análise dos critérios mais importantes para cada peça; análise de como cada tecnologia adere ao critério e aplicação do método AHP	Relação peça vs. tecnologia
4	Definir o peso de cada peça para a organização	Informações de importância de cada peça dentro da organização e aplicação do método AHP	Peso de cada peça
5	Identificar qual tecnologia se deve investir considerando a que mais adere ao conjunto de peças	Análise do peso de cada peça; <i>score</i> calculado na etapa 3 (relação tecnologia vs. peça); e aplicação do método Promethee	Seleção de qual tecnologia a organização deve investir

Fonte: Autora (2017).

5.1 ETAPAS

5.1.1 ETAPA 1

Nessa etapa a seleção é livre, ou seja, não foram estabelecidos critérios eliminatórios, o único objetivo é selecionar um conjunto de peças que se deseja produzir em algum tipo de tecnologia 3D para que o processo traga benefício e inovação à organização.

5.1.2 ETAPA 2

Nessa etapa um pequeno questionário pode ser aplicado para cada peça que se deseja analisar, o objetivo é definir se, de acordo com algumas características, é viável produzir a peça em uma impressão 3D ou não, e se mesmo sendo viável existem alguns cuidados que devem ser respeitados. O questionário foi elaborado considerando o mesmo aplicado na seleção dos casos exploratórios, como comentado anteriormente, conforme segue:

- 1) As peças são MRO de apoio a produção? Ou seja, são dispositivos, gabaritos, suportes ou outros do mesmo estilo?
- 2) São peças plásticas ou precisam conter metal em sua composição?
- 3) O dimensional da peça está entre 30x25x20cm? Se não, a peça pode ser particionada?

- 4) Qual a demanda anual? Tem necessidade de produção diária? O nível de produção chega a ser seriada (em massa)?
- 5) Qual o custo unitário da peça?

Em relação a primeira questão, a finalidade é definir se a peça realmente é uma MRO de apoio a produção, visto que, a maioria do uso de impressão 3D são para protótipos ou componentes de baixo volume, conforme gráfico da Figura 29, e isso está relacionado com o fato do que é possível conseguir produzir atualmente com os equipamentos que temos disponíveis no mercado. Além disso, os critérios listados estão voltados a peças de apoio a produção e não, por exemplo, peças finais.

Figura 29: Pesquisa - Uso da impressão 3D



Fonte: Adaptado de Columbus apud *SCM World-MESA International Survey* (2015).

Sobre a composição do material utilizado, de modo geral os equipamentos disponíveis produzem, em sua grande parte, componentes plásticos. Existe a produção de peças de cerâmica, metal, fibra de vidro e outros, porém não são os mais utilizados e desenvolvidos, logo o custo acaba sendo elevado e pode inviabilizar a produção.

A questão sobre tamanho da peça está atrelada ao fato que, atualmente, os melhores equipamentos em relação a preço e avaliação de usuários tem o tamanho

médio aproximado de 15.000cm³ o que pode ser transferido para 30x25x20cm (largura x comprimento x altura), esses dados foram coletados de uma pesquisa realizada pela 3D Hubs e os 16 equipamentos com melhor nota constam na Figura 30. Então, se a peça for maior que o volume considerado padrão, há a opção de particionar a peça, ou seja, produzi-la em duas ou mais partes e depois montá-las com alguma cola especial ou até mesmo com o uso de canetas impressora 3D.

Figura 30: Pesquisa sobre dimensão de equipamentos

Tecnologia	Marca/Modelo	Nota	Tamanho (cm)			Volume (cm ³)
FDM	Makergear M2	9,2	25,4	20,3	20,3	10.467
FDM	Ultimaker 2+	9,1	22,3	22,3	20,5	10.194
FDM	LulzBot TAZ 6	9,1	28	28	25	19.600
FDM	Zortrax M200	8,9	20	20	18,5	7.400
FDM	BCN3D SIGMA	8,9	21	29,7	21	13.098
FDM	Ultimaker Original Plus	8,8	21	21	20,5	9.041
FDM	Rostock MAX	8,8	22,4	22,4	37,5	18.816
FDM	CraftBot	8,8	25	20	20	10.000
FDM	Dimension 1200	8,8	25,4	25,4	30,5	19.677
FDM	Witbox	8,6	29,7	21	20	12.474
FDM	FlashForge Dreamer	8,6	23	15	14	4.830
SLA	Form 2	9	14,5	14,5	17,5	3.679
SLA	Form 1+	8,4	12,5	12,5	16,5	2.578
SLA	B9 Creator	8,1	20,32	10,24	7,68	1.598
Polyjet	ProJet CJP 660Pro	8	25,4	38,1	20,3	19.645
SLS	EOS P 396	8,2	34	34	60	69.360

Fonte: Adaptado da pesquisa *3D Printer Index - Compare 3D printers by price and reviews* - 3D Hubs.

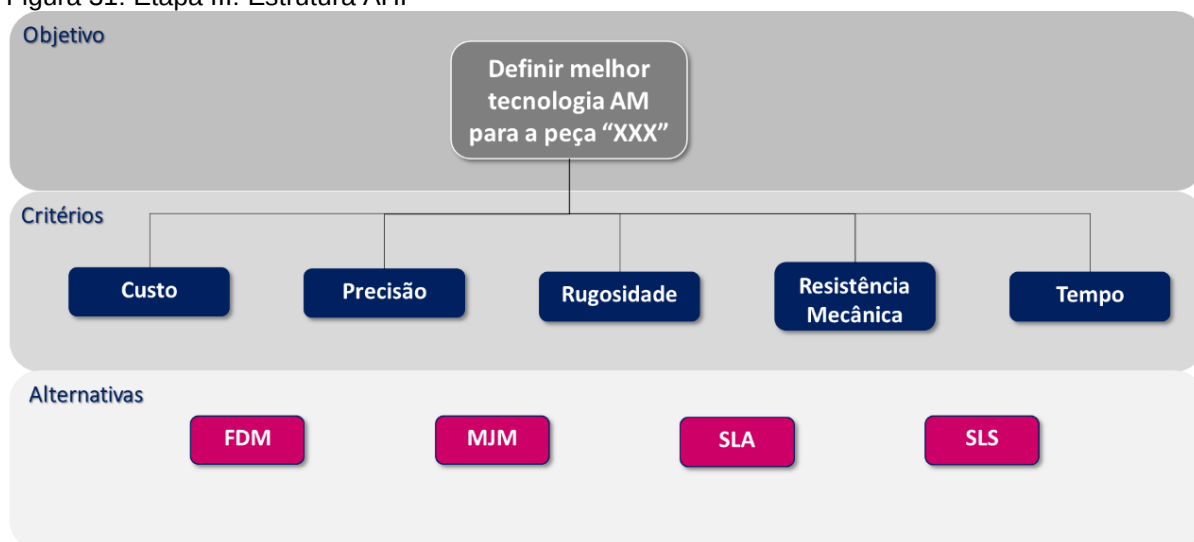
A questão da demanda está relacionada ao fato que dependendo do volume o equipamento pode não ser rápido o bastante para atender ou a produção pode não ser viável financeiramente. O primeiro ponto é devido ao fato que atualmente ainda não temos a possibilidade de produzir peças em massa, ainda que isso esteja em constante estudo e evolução, porque falta velocidade, além disso, deve-se considerar o tempo das demais peças que serão impressas. O segundo ponto está relacionado ao fato que dependendo da demanda, a produção por manufatura aditiva fica inviável, enquanto que por manufatura convencional, por exemplo injeção de plástico, torna-se viável, pois na manufatura convencional, quanto maior a demanda, menor o custo e na manufatura aditiva o custo é padrão independentemente da demanda, como pode ser visto na Figura 01.

A importância sobre saber o valor unitário da peça quando produzida por manufatura convencional está relacionada diretamente a Figura 30. Pois, o custo da peça produzida via manufatura convencional tende a reduzir conforme o volume da peça aumenta, enquanto que com a impressão, independentemente do volume, o custo unitário será o mesmo. Logo, é importante atentar a esse custo, para que esse item seja relevante no momento de viabilizar a produção via impressão 3D.

5.1.3 ETAPA 3

Nessa etapa ocorre a aplicação do método AHP e o objetivo é obter como resultado a relação peça a ser impressa e qual a melhor tecnologia para imprimi-la. Para a aplicação, define-se que as alternativas serão as quatro tecnologias escolhidas (FDM, MJM, SLA e SLS) e os critérios (custo, precisão, resistência mecânica, rugosidade e tempo) já escolhidos anteriormente. A Figura 31 ilustra como o ficará a estrutura AHP para essa fase. Ressalta-se que essa etapa deverá ser reproduzida conforme a quantidade de peças escolhidas, ou seja, se existirem cinco peças, a etapa deverá ser realizada cinco vezes.

Figura 31: Etapa III: Estrutura AHP



Fonte: Autora (2017).

Além disso, para a construção da relação critérios vs. alternativas serão utilizados os dados da pesquisa realizada, a qual obteve resultados de comparações par a par das tecnologias para cada critério e a escala utilizada para classificação foi

a de Saaty (método AHP), o resultado dessa parte da pesquisa consta nas Tabelas 10, 11, 12, 13 e 14.

Tabela 10: Resultado da Pesquisa - Critério Custo vs. Tecnologias

Classificação	Critério: CUSTO					
	(1) FDM e (2) SLA	(1) FDM e (2) SLS	(1) FDM e (2) MJT	(1) SLA e (2) SLS	(1) SLA e (2) MJT	(1) SLS e (2) MJT
(2) atende muito melhor que (1)	1	0	0	1	2	0
(1) atende muito melhor que (2)	5	3	2	1	3	0
(1) atende extremamente melhor que (2)	4	4	6	1	1	2
(2) atende extremamente melhor que (1)	0	0	0	0	0	1
(1) atende pouco melhor que (2)	1	1	1	4	0	1
(2) atende pouco melhor que (1)	0	0	2	0	0	2
(1) e (2) atendem igualmente ao critério	0	0	0	2	4	3
(2) atende bastante melhor que (1)	0	0	0	0	0	1
(1) atende bastante melhor que (2)	1	4	1	3	2	2

Fonte: Autora (2017).

Tabela 11: Resultado da Pesquisa - Critério Precisão vs. Tecnologias

Classificação	Critério: PRECISÃO					
	(1) FDM e (2) SLA	(1) FDM e (2) SLS	(1) FDM e (2) MJT	(1) SLA e (2) SLS	(1) SLA e (2) MJT	(1) SLS e (2) MJT
(2) atende muito melhor que (1)	2	5	2	0	1	1
(1) atende muito melhor que (2)	0	0	0	2	0	0
(1) atende extremamente melhor que (2)	1	1	0	0	1	1
(2) atende extremamente melhor que (1)	4	1	4	1	1	1
(1) atende pouco melhor que (2)	0	0	0	1	1	1
(2) atende pouco melhor que (1)	2	4	0	1	3	2
(1) e (2) atendem igualmente ao critério	1	1	1	6	4	3
(2) atende bastante melhor que (1)	1	0	4	0	1	3
(1) atende bastante melhor que (2)	0	0	1	1	0	0

Fonte: Autora (2017).

Tabela 12: Resultado da Pesquisa - Critério Resistência Mecânica vs. Tecnologias

Classificação	Critério: RESISTÊNCIA MECÂNICA					
	(1) FDM e (2) SLA	(1) FDM e (2) SLS	(1) FDM e (2) MJT	(1) SLA e (2) SLS	(1) SLA e (2) MJT	(1) SLS e (2) MJT
(2) atende muito melhor que (1)	0	3	1	3	2	3
(1) atende muito melhor que (2)	0	1	1	0	2	3
(1) atende extremamente melhor que (2)	4	3	4	0	1	3
(2) atende extremamente melhor que (1)	0	0	0	4	1	1
(1) atende pouco melhor que (2)	0	1	1	0	1	0
(2) atende pouco melhor que (1)	4	1	1	2	1	0
(1) e (2) atendem igualmente ao critério	1	2	1	1	3	1
(2) atende bastante melhor que (1)	0	1	0	1	0	0
(1) atende bastante melhor que (2)	3	0	3	1	1	1

Fonte: Autora (2017).

Tabela 13: Resultado da Pesquisa - Critério Rugosidade vs. Tecnologias

Classificação	Critério: RUGOSIDADE					
	(1) FDM e (2) SLA	(1) FDM e (2) SLS	(1) FDM e (2) MJT	(1) SLA e (2) SLS	(1) SLA e (2) MJT	(1) SLS e (2) MJT
(2) atende muito melhor que (1)	0	3	3	0	1	2
(1) atende muito melhor que (2)	0	2	0	0	1	1
(1) atende extremamente melhor que (2)	3	0	2	2	1	1
(2) atende extremamente melhor que (1)	3	0	4	1	0	2
(1) atende pouco melhor que (2)	0	1	0	3	0	0
(2) atende pouco melhor que (1)	2	5	1	1	4	3
(1) e (2) atendem igualmente ao critério	0	0	0	1	3	1
(2) atende bastante melhor que (1)	4	1	2	1	0	2
(1) atende bastante melhor que (2)	0	0	0	3	2	0

Fonte: Autora (2017).

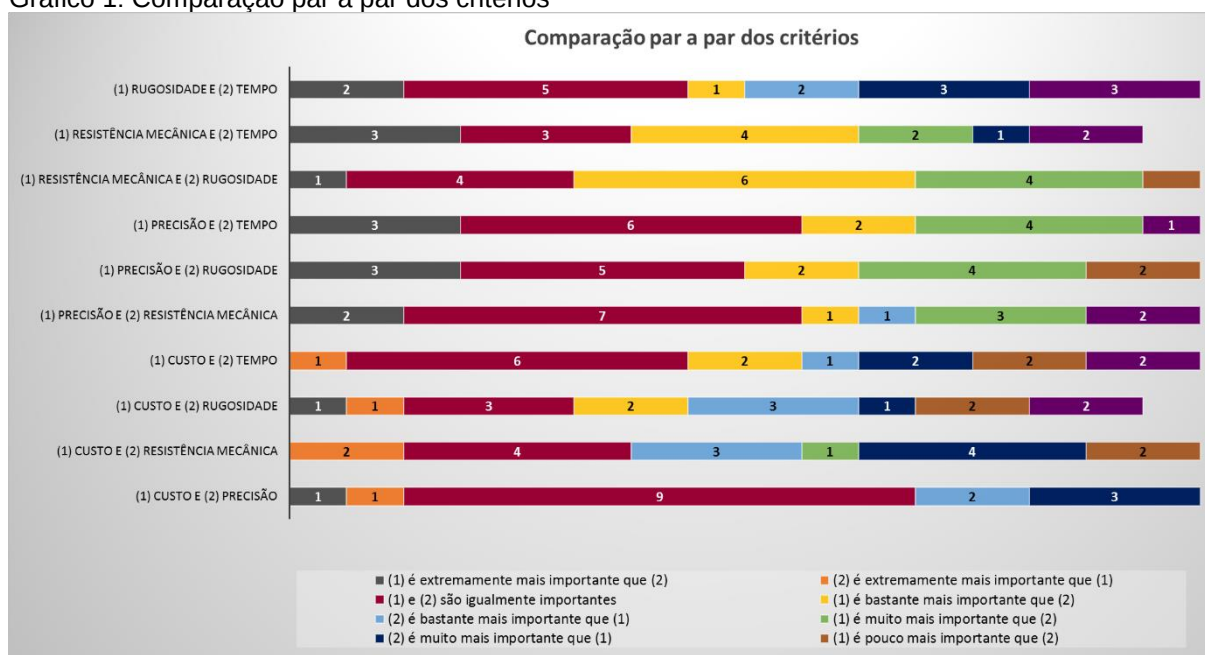
Tabela 14: Resultado da Pesquisa - Critério Tempo vs. Tecnologias

Classificação	Critério: TEMPO					
	(1) FDM e (2) SLA	(1) FDM e (2) SLS	(1) FDM e (2) MJT	(1) SLA e (2) SLS	(1) SLA e (2) MJT	(1) SLS e (2) MJT
(2) atende muito melhor que (1)	1	0	0	0	1	0
(1) atende muito melhor que (2)	0	0	0	1	0	0
(1) atende extremamente melhor que (2)	0	0	2	1	1	0
(2) atende extremamente melhor que (1)	1	1	1	1	1	1
(1) atende pouco melhor que (2)	0	0	1	2	1	1
(2) atende pouco melhor que (1)	3	4	3	2	2	2
(1) e (2) atendem igualmente ao critério	5	6	4	5	5	5
(2) atende bastante melhor que (1)	1	0	1	0	0	2
(1) atende bastante melhor que (2)	1	1	0	0	1	1

Fonte: Autora (2017).

As duas primeiras matrizes do método AHP (matriz de decisão e matriz normalizada) devem ser realizadas conforme a análise individual de cada peça e será calculada com o auxílio *AHP Priority Calculator* do site BPMSG. Mas, caso se tenha alguma dificuldade em relacionar qual critério é mais importante na comparação par a par, pode-se usar como base o Gráfico 1 que foi extraído do resultado da pesquisa. Nele constam todas as avaliações consideradas pelos respondentes conforme cada comparação. Por exemplo, cinco pessoas responderam que a comparação (1) rugosidade e (2) tempo deve ser classificada como (1) e (2) são igualmente importantes, e isso relacionado com a tabela de Saaty indica que a nota para essa comparação é 1. Essa consulta pode ser realiza para todas as comparações, porém, é importante destacar que o critério mais importante na análise depende de qual peça está sendo analisada.

Gráfico 1: Comparação par a par dos critérios



Fonte: Autora (2017).

Para as demais matrizes (relação: tecnologia x tecnologia para cada critério) foram elaboradas considerando os dados da pesquisa. Para essas o processo consistiu em verificar qual a maior nota em cada coluna para cada critério, e a partir disso relacionar com a tabela de Saaty. Por exemplo, para o critério custo a relação FDM x MJM recebeu nota 9, conforme pode ser visto na Figura 32, pois conforme análise da Tabela 10, o maior valor para essa coluna corresponde a avaliação

“extremamente melhor que” e na tabela de Saaty esse item corresponde a escala 9. Esse passo foi realizado para todos os critérios e todas as comparações par a par das tecnologias. Nos casos que houve empate, itens destacados em amarelo na Figura 32, foram utilizadas análises posteriores da literatura para desempatar e a justificativa consta na Tabela 15.

Figura 32: Critérios – AHP



Fonte: Autora (2017).

Tabela 15: Relação Critérios e Tecnologias - Descrição desempate

Critério	Relação	Resultado Pesquisa	Observação	SAATY
Custo	FDM e SLS	FDM atende extremamente melhor que SLS; FDM atende bastante melhor que SLS.	A classificação escolhida foi a primeira, visto que diante da revisão da literatura ficou evidente que a tecnologia SLS é extremamente mais cara que a FDM, considerando equipamento e matéria prima.	9
Precisão	FDM e MJM	MJM atende extremamente melhor que FDM; MJM atende bastante melhor que FDM.	A classificação escolhida foi a primeira, visto que as tecnologias MJM possuem traços extremamente mais finos que as FDM, pois a MJM trabalha com gotículas de material e sua fusão é via raio laser, enquanto que a FDM trabalha com filamentos e sua fusão ocorre com o processo de resfriamento por cooler, por exemplo.	9
Rugosidade	SLA e SLS	SLA atende pouco melhor que SLS;	A classificação escolhida foi a segunda, visto que enquanto a SLA trabalha com gotículas de material a	7

		SLA atende bastante melhor que SLS	SLS trabalha com pós e, justamente por isso, as peças produzidas na SLS, geralmente, possuem uma superfície mais porosa. Logo, mais rugosa que as peças produzidas na SLA.	
Resistência mecânica	FDM e SLA	FDM atende extremamente melhor que SLA; SLA atende pouco melhor que FDM.	A classificação escolhida foi a primeira, visto que em termos de resistência a FDM possui vantagens em relação a SLA.	9
Resistência mecânica	FDM e SLS	FDM atende extremamente melhor que SLS; SLS atende muito melhor que FDM.	A classificação escolhida foi a primeira, visto que em termos de resistência a FDM possui vantagens em relação a SLS.	9

Fonte: Autora (2017).

Com esses pontos, tem-se parte do método AHP pronto. Para conclusão do modelo tem-se duas outras etapas que serão detalhadas a seguir.

5.1.3.1 Etapas 4 e 5

Na etapa IV o método AHP é empregado novamente considerando como critérios o volume de produção/demanda da peça, o nível de investimento empregado necessário para a aquisição da tecnologia mais indicada para a produção da peça e o valor unitário da peça. Considerando os critérios:

- Demanda: quanto maior o volume, maior o benefício que a produção via impressão 3D pode oferecer, desde que, como já mencionado, não seja uma demanda que atinja níveis de produção seriada, porque nesses casos a impressão 3D deixa de ser viável quando comparada a tecnologias convencionais;
- Nível de investimento: quanto menor, maior é o grau de importância da peça quando realizado a comparação par a par. Para saber de qual tecnologia deve-se analisar o nível de investimento, deve-se verificar os resultados obtidos com o passo III, pois nele constarão a tecnologia mais indicada para a produção de cada peça na análise. Para o nível de investimento de cada tecnologia segue a seguinte relação: FDM – baixo; MJM – médio/alto; SLA – médio; e SLS – alto;

- Valor unitário: quanto maior o valor, maior será o grau de importância, visto que existe um limite de valor em que o custo unitário é o maior quando produzido em impressão 3D do que em processos tradicionais, isso pode ser justificado por peças com nível alto de demanda, onde o processo tradicional é a injeção de materiais e, nesse caso, o custo unitário acaba sendo mais baixo.

Essa etapa oferecerá as informações do peso de cada peça para a organização, ou seja, o quanto essa peça é importante para a organização quando se trata de produção via tecnologias de manufatura aditiva. A partir disso, a aplicação do método Promethee (etapa V) é realizada, onde o objetivo é definir qual a melhor tecnologia a ser investida para que essa englobe o mais número de peças importantes, com base na etapa IV, para a organização. Ou seja, o alvo é atingir o maior número de peças importantes com uma única tecnologia.

O método precisará das informações da matriz de prioridade relativa, última matriz montada da etapa III, mais os pesos definidos com a etapa V. Sendo assim, a tabela inicial do Promethee ficará com a estrutura conforme ilustra a Figura 33 e os demais cálculos seguem o padrão do método.

Figura 33: Etapa V: Método Promethee

	PEÇA XY	PEÇA XZ	PEÇA XW
FDM			
MJM	<i>Informações retirada do resultado da ETAPA III</i>		
SLA			
SLS			
PESO	<i>Informações retirada do resultado da ETAPA IV</i>		

Fonte: Autora (2017).

Todos os passos do modelo apresentado serão detalhados na próxima seção usando como exemplo os casos exploratórios apresentados no trabalho, visto que a realidade de cada peça foi vivenciada pela autora, bem como a produção e acompanhamento dos testes.

5.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO

Conforme mencionado ao longo do trabalho, os testes do modelo serão desenvolvidos usando os casos exploratórios estudados e identificados na seção 4, logo a primeira etapa do modelo já está definida. As etapas II e III serão realizadas para cada peça e as duas últimas (etapas IV e V) serão realizadas com o conjunto de peças, pois é justamente para definir qual a peça prioritária para a organização e poder identificar em qual tecnologia pode-se investir para desfrutar dos benefícios das tecnologias de impressão 3D.

ETAPA II: COMPILADO DE TODAS AS PEÇAS

Para a execução da etapa II foi elaborado a tabela 16 compilando todas as respostas de todas as seis peças em estudo. Na primeira coluna consta o número da pergunta que foi descrita na seção de explicação da Etapa II, como segue:

- 1) As peças são MRO de apoio a produção? Ou seja, são dispositivos, gabaritos, suportes ou outros do mesmo estilo?
- 2) São peças plásticas ou precisam conter metal em sua composição?
- 3) O dimensional da peça está entre 30x25x20cm? Se não, a peça pode ser particionada?
- 4) Qual a demanda anual? Tem necessidade de produção diária? O nível de produção chega a ser seriada (em massa)?
- 5) Qual o custo unitário da peça?

Tabela 16: Etapa II: relação de todas as peças

	Bico de mastic	Apoio solda	Transportador de laterais	Apoio escapamento	Batente	Bucha
1	Peça MRO para robô	Suporte	Suporte/guia	Suporte	Apoio	Peça MRO
2	Plástico	Plástico	Plástico	Plástico	Plástico	Plástico
3	Ø04x06 cm	14x09x07cm	10x08x06 cm	11x06x08 cm	20x07x07 cm	Ø05x04 cm
4	1248 un/ano	04 un/ano	100 un/ano	42 un/ano	12 un/ano	64 un/ano
5	R\$120,00	R\$614,00	R\$178,00	R\$377,00	R\$922,50	R\$79,00

Fonte: Autora (2017).

De todas as peças do estudo a única que pode ter algum problema é o bico, porque precisa de uma demanda diária, porém a demanda é baixa, gira em torno de

3 ou 4 peças por dia, considerando 30 dias no mês. Logo, pode-se considerar todas as peças para prosseguir com as demais etapas do modelo.

ETAPA III: BICO DE MASTIC

Considerando os critérios mais importantes para a peça, será calculado as primeiras matrizes do método AHP conforme a seguinte lógica:

- **(1) custo e (2) precisão** → (2) é muito mais importante que (1), pois a peça precisa ter certa precisão para que encaixe no braço do robô;
- **(1) custo e (2) resistência mecânica** → os critérios têm a mesma importância para a peça;
- **(1) custo e (2) rugosidade** → (2) é extremamente mais importante que (1), porque a rugosidade é um critério prioritário para a peça, visto que caso esse critério não seja atendido com perfeição reduz e/ou impossibilita o uso da peça;
- **(1) custo e (2) tempo** → (2) é pouco mais importante que (1), pois a demanda é diária;
- **(1) precisão e (2) resistência mecânica** → (1) é muito mais importante que (2) devido a necessidade de encaixar no braço do robô;
- **(1) precisão e (2) rugosidade** → (2) é extremamente mais importante que (1) pois, conforme já mencionado anteriormente, é um critério prioritário para a peça por impactar diretamente no funcionamento da mesma;
- **(1) precisão e (2) tempo** → (2) é pouco mais importante que (1), porque a demanda é diária e por mais que a precisão também tenha sua importância, a precisão é algo mais fácil de se adquirir quando comparado com o tempo, pois, como já foi comentado, a velocidade é um dos itens que ainda deve ser melhorado nas tecnologias de impressão 3D;
- **(1) resistência mecânica e (2) rugosidade** → (2) é extremamente mais importante que (1) pelo fato de ser um critério prioritário;
- **(1) resistência mecânica e (2) tempo** → (2) é muito mais importante que (1) devido a demanda diária;

- **(1) rugosidade e (2) tempo** → (2) é extremamente mais importante que (1) por ser um critério prioritário para a peça.

A Figura 34 mostra o resultado das comparações par a par dos critérios conforme a análise feita sobre a peça bico de mastic. Ressalta-se que a plataforma utilizada calcula automaticamente a consistência dos julgamentos, item do método AHP, que nesse caso resultou em 9,2%, ou seja, os julgamentos estão consistentes. A partir desses dados monta-se a matriz normalizada e a prioridade relativa dos critérios (Figura 35) que são os pesos de cada critério para a peça. Após essa etapa as outras fases do método devem ser calculadas, isso foi realizado em uma planilha de dados retiradas a partir da pesquisa como mencionado Figura 32. Com todos os cálculos do AHP realizados o resultado obtido foi que para o bico de mastic a tecnologia que seria a mais indicada é a MJM, vide Figura 36.

Figura 34: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Bico de Mastic

A - Importance - or B?			Equal	How much more?
1	☐ Custo	or ☒ Precisão	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2	☐ Custo	or ☒ Resistência mecânica	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3	☐ Custo	or ☒ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☒ 9
4	☐ Custo	or ☒ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5	☒ Precisão	or ☐ Resistência mecânica	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6	☐ Precisão	or ☒ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☒ 7 ☐ 8 ☐ 9
7	☒ Precisão	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
8	☐ Resistência mecânica	or ☒ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☒ 9
9	☐ Resistência mecânica	or ☒ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
10	☒ Rugosidade	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☒ 9

CR = 9.2% OK

☐ dec. comma

Fonte: Autora (2017).

Figura 35: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Bico de Mastic

Passo 1: Qual a peça analisada?

Bico de Mastic

Passo 2: Matriz de comparação (link) dos critérios

	C	P	RM	R	T
C	1,00	0,20	1,00	0,11	0,33
P	5,00	1,00	5,00	0,14	3,00
RM	1,00	0,20	1,00	0,11	0,20
R	9,00	7,00	9,00	1,00	9,00
T	3,00	0,33	5,00	0,11	1,00
Total	19,00	8,73	21,00	1,47	13,53

Matriz normalizada dos critérios

	C	P	RM	R	T	Prioridade relativa (w)
C	0,05	0,02	0,05	0,07	0,02	0,04
P	0,26	0,11	0,24	0,10	0,22	0,19
RM	0,05	0,02	0,05	0,07	0,01	0,04
R	0,47	0,80	0,43	0,68	0,67	0,61
T	0,16	0,04	0,24	0,07	0,07	0,12
Total	1	1	1	1	1	

Fonte: Autora (2017).

Figura 36: Etapa III: AHP Resultado – Bico de Mastic

Matriz final: prioridades relativas das tecnologias x prioridade relativa dos critérios

	C	P	RM	R	T
FDM	0,69	0,04	0,65	0,04	0,25
MJM	0,09	0,48	0,14	0,49	0,25
SLA	0,14	0,31	0,06	0,35	0,25
SLS	0,07	0,18	0,15	0,11	0,25

Prior. Critério

0,04
0,19
0,04
0,61
0,12

Resultado

0,12
0,43
0,31
0,144ª
1ª
2ª
3ª

Conforme dados da Figura 32 e cálculos realizados dentro das etapas do AHP convencional

Prioridade relativa obtida com a matriz normalizada

Fonte: Autora (2017).

ETAPA II: APOIO SOLDA

Considerando que o critério prioritário mais a peça é a rugosidade, pois a peça está em contato constante com a chapa lateral do veículo, segue as análises das comparações par a par dos critérios:

- **(1) custo e (2) precisão** → (2) é muito mais importante que (1), porque a peça precisa encaixar no suporte/berço de solda (base em que a chapa é pousada para que o processo de solda ocorra) para que ela receba a chapa que será soldado. Logo, as medidas dela precisam estar coerentes tanto com o suporte, quanto com a chapa;
- **(1) custo e (2) resistência mecânica** → (2) é pouco mais importante que (1), pois a peça recebe certa pressão, logo precisa ter resistência para que não ocorra nenhuma alteração que impactará o processo;
- **(1) custo e (2) rugosidade** → (2) é extremamente mais importante que (1), pois a peça precisa ser a mais lisa possível para que não cause danos a chapa;

- **(1) custo e (2) tempo** → (1) e (2) são de igual importância;
- **(1) precisão e (2) resistência mecânica** → (1) é muito mais importante que (2), pois conforme mencionado anteriormente, a peça precisa garantir as medidas;
- **(1) precisão e (2) rugosidade** → (2) é bastante mais importante que (1), porque por mais que a peça precise garantir as medidas, o principal fator é a rugosidade da peça para que não exista o risco de danificar a chapa;
- **(1) precisão e (2) tempo** → (1) é muito mais importante que (2);
- **(1) resistência mecânica e (2) rugosidade** → (2) é bastante mais importante que (1);
- **(1) resistência mecânica e (2) tempo** → (1) é pouco mais importante que (2);
- **(1) rugosidade e (2) tempo** → (2) é extremamente mais importante que (1);

Com as ponderações acima montou-se a relação apresentada na Figura 37 que resultou em um cálculo de consistência dos julgamentos de 9,5%, ou seja, como é menor que 10% os julgamentos são consistentes. As demais matrizes do método AHP, conforme os mesmos passos indicados na Etapa II para o bico de mastic, resultaram nas Figuras 38 e 39 e, com isso, identifica-se que para essa peça a tecnologia mais indicada é a MJM.

Figura 37: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Apoio de solda

A - Importance - or B?			Equal	How much more?
1	☐ Custo	or ☒ Precisão	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2	☐ Custo	or ☒ Resistência mecânica	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3	☐ Custo	or ☒ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☒ 9
4	☒ Custo	or ☐ Tempo	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5	☒ Precisão	or ☐ Resistência mecânica	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6	☐ Precisão	or ☒ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☒ 7 ☐ 8 ☐ 9
7	☒ Precisão	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
8	☐ Resistência mecânica	or ☒ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☒ 7 ☐ 8 ☐ 9
9	☒ Resistência mecânica	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
10	☒ Rugosidade	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☒ 9

CR = 9,5% OK

☐ dec. comma

Fonte: Autora (2017).

Figura 38: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Apoio de solda

Passo 1: Qual a peça analisada?
Apoio de solda

Passo 2: Matriz de comparação (link) dos critérios

	C	P	RM	R	T
C	1,00	0,20	0,33	0,11	1,00
P	5,00	1,00	5,00	0,14	5,00
RM	3,00	0,20	1,00	0,14	3,00
R	9,00	7,00	7,00	1,00	9,00
T	1,00	0,20	0,33	0,11	1,00
Total	19,00	8,60	13,66	1,50	19,00

Matriz normalizada dos critérios

	C	P	RM	R	T	Prioridade relativa (w)
C	0,05	0,02	0,02	0,07	0,05	0,05
P	0,26	0,12	0,37	0,09	0,26	0,22
RM	0,16	0,02	0,07	0,09	0,16	0,10
R	0,47	0,81	0,51	0,67	0,47	0,59
T	0,05	0,02	0,02	0,07	0,05	0,05
Total	1	1	1	1	1	

Fonte: Autora (2017).

Figura 39: Etapa III: AHP Resultado – Apoio de solda

Matriz final: prioridades relativas das tecnologias x prioridade relativa dos critérios

$$\begin{pmatrix}
 \text{FDM} & 0,69 & 0,04 & 0,65 & 0,04 & 0,25 \\
 \text{MJM} & 0,09 & 0,48 & 0,14 & 0,49 & 0,25 \\
 \text{SLA} & 0,14 & 0,31 & 0,06 & 0,35 & 0,25 \\
 \text{SLS} & 0,07 & 0,18 & 0,15 & 0,11 & 0,25
 \end{pmatrix}
 \times
 \begin{pmatrix}
 \text{Prior. Critério} \\
 0,05 \\
 0,22 \\
 0,10 \\
 0,59 \\
 0,05
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 \text{Resultado} \\
 0,14 \\
 0,42 \\
 0,30 \\
 0,14
 \end{pmatrix}
 \begin{matrix}
 4^{\text{a}} \\
 1^{\text{a}} \\
 2^{\text{a}} \\
 3^{\text{a}}
 \end{matrix}$$

Fonte: Autora (2017).

ETAPA III: TRANSPORTADOR DE LATERAIS

O principal critério a ser atendido nessa peça é a resistência mecânica, visto que a peça sofre atrito constante. Segue a análise da comparação para a par dos critérios:

- **(1) custo e (2) precisão** → (2) é bastante mais importante que (1), pois como a peça serve como guia, ela precisa manter a precisão para que o encaixe seja preciso de acordo com as configurações do componente a ser transportado;
- **(1) custo e (2) resistência mecânica** → (2) é extremamente mais importante que (1), visto que a peça tende a sofrer grande impacto devido ao atrito que existe entre a peça impressa e o componente a ser transportado. O principal risco que há nessa operação é a ocorrência de cisalhamento;
- **(1) custo e (2) rugosidade** → (2) é muito mais importante que (1), pois caso a peça seja rugosa demais ou tenha muitas imperfeições, isso pode causar danos estéticos ao componente que será transportado;
- **(1) custo e (2) tempo** → (1) e (2) são de igual importância;
- **(1) precisão e (2) resistência mecânica** → (2) é pouco mais importante que (1);
- **(1) precisão e (2) rugosidade** → (1) é pouco mais importante que (2);
- **(1) precisão e (2) tempo** → (1) é bastante mais importante que (2);
- **(1) resistência mecânica e (2) rugosidade** → (1) é bastante mais importante que (2), pois apesar da rugosidade ser importante, a resistência é mais, porque é esse critério que influenciará na inutilização ou não da peça;
- **(1) resistência mecânica e (2) tempo** → (1) é extremamente mais importante que (2);
- **(1) rugosidade e (2) tempo** → (1) é muito mais importante que (2).

O resultado das comparações consta na Figura 40 que informa também que o cálculo de consistência foi de 5,8%, logo os julgamentos foram consistentes. As demais etapas do método AHP estão representados nas Figuras 41 e 42, e o resultado para essa peça é que a tecnologia mais indicada é a FDM.

Figura 40: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Transportador de laterais

A - Importance - or B?			Equal	How much more?								
1	☐ Custo	or ☒ Precisão	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
2	☐ Custo	or ☒ Resistência mecânica	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☒ 9	
3	☐ Custo	or ☒ Rugosidade	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☒ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
4	☒ Custo	or ☐ Tempo	☒ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
5	☐ Precisão	or ☒ Resistência mecânica	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
6	☒ Precisão	or ☐ Rugosidade	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
7	☒ Precisão	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☒ 7	☐ 8	☐ 9	
8	☒ Resistência mecânica	or ☐ Rugosidade	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☒ 7	☐ 8	☐ 9	
9	☒ Resistência mecânica	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☒ 9	
10	☒ Rugosidade	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☒ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	

CR = 5,8% OK

☐ dec. comma

Fonte: Autora (2017).

Figura 41: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Transportador de laterais

Passo 1: Qual a peça analisada?
Transportador de laterais

Passo 2: Matriz de comparação (link) dos critérios

	C	P	RM	R	T
C	1,00	0,14	0,11	0,20	1,00
P	7,00	1,00	0,33	3,00	7,00
RM	9,00	3,00	1,00	7,00	9,00
R	5,00	0,33	0,14	1,00	5,00
T	1,00	0,14	0,11	0,20	1,00
Total	23,00	4,61	1,69	11,40	23,00

Matriz normalizada dos critérios

	C	P	RM	R	T	Prioridade relativa (w)
C	0,04	0,03	0,07	0,02	0,04	0,04
P	0,30	0,22	0,20	0,26	0,30	0,26
RM	0,39	0,65	0,59	0,61	0,39	0,53
R	0,22	0,07	0,08	0,09	0,22	0,14
T	0,04	0,03	0,07	0,02	0,04	0,04
Total	1	1	1	1	1	

Fonte: Autora (2017).

Figura 42: Etapa III: AHP Resultado – Transportador de laterais

Matriz final: prioridades relativas das tecnologias x prioridade relativa dos critérios

$$\begin{pmatrix}
 & \begin{matrix} C & P & RM & R & T \end{matrix} \\
 \begin{matrix} FDM \\ MJM \\ SLA \\ SLS \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0,69 & 0,04 & 0,65 & 0,04 & 0,25 \\ 0,09 & 0,48 & 0,14 & 0,49 & 0,25 \\ 0,14 & 0,31 & 0,06 & 0,35 & 0,25 \\ 0,07 & 0,18 & 0,15 & 0,11 & 0,25 \end{pmatrix}
 \end{pmatrix}
 \times
 \begin{pmatrix}
 \text{Prior. Critério} \\
 0,04 \\
 0,26 \\
 0,53 \\
 0,14 \\
 0,04
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 \text{Resultado} \\
 0,40 \\
 0,28 \\
 0,17 \\
 0,15
 \end{pmatrix}
 \begin{matrix}
 1^a \\
 2^a \\
 3^a \\
 4^a
 \end{matrix}$$

Fonte: Autora (2017).

ETAPA III: APOIO ESCAPAMENTO CENTRAL

O critério principal para essa peça é precisão e a resistência mecânica. Segue as análises das comparações par a par dos critérios:

- **(1) custo e (2) precisão** → (2) é bastante mais importante que (1), pois como a peça serve como suporte, ela precisa manter a precisão para que o encaixe seja preciso de acordo com as configurações do componente;
- **(1) custo e (2) resistência mecânica** → (2) é bastante mais importante que (1);
- **(1) custo e (2) rugosidade** → (2) é pouco mais importante que (1), pois como há contato com o componente a peça deve manter um padrão mínimo de rugosidade, algo que não interfira na superfície do componente;
- **(1) custo e (2) tempo** → (1) e (2) são de igual importância;
- **(1) precisão e (2) resistência mecânica** → (1) e (2) são de igual importância;
- **(1) precisão e (2) rugosidade** → (1) é muito mais importante que (2), devido a necessidade de encaixe;
- **(1) precisão e (2) tempo** → (1) é bastante mais importante que (2);
- **(1) resistência mecânica e (2) rugosidade** → (1) é muito mais importante que (2), pois apesar da rugosidade ser importante, a resistência é mais, porque é esse critério que influenciará na inutilização ou não da peça;
- **(1) resistência mecânica e (2) tempo** → (1) é bastante mais importante que (2);
- **(1) rugosidade e (2) tempo** → (1) é pouco mais importante que (2).

O resultado das comparações consta na Figura 43 e o resultado do cálculo de consistência foi de 2,1% o que traduz em julgamentos consistentes. As demais etapas do método AHP estão representados nas Figuras 44 e 45 e a melhor tecnologia para a produção desse item é a FDM.

Figura 43: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Apoio de escapamento central

A - Importance - or B?			Equal	How much more?
1	☐ Custo	or ☒ Precisão	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2	☐ Custo	or ☒ Resistência mecânica	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3	☐ Custo	or ☒ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
4	☒ Custo	or ☐ Tempo	☒ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5	☒ Precisão	or ☐ Resistência mecânica	☒ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6	☒ Precisão	or ☐ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
7	☒ Precisão	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
8	☒ Resistência mecânica	or ☐ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
9	☒ Resistência mecânica	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
10	☒ Rugosidade	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9

CR = 2.1% OK

☐ dec. comma

Fonte: Autora (2017).

Figura 44: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Apoio escapamento central

Passo 2: Matriz de comparação (link) dos critérios

	C	P	RM	R	T
C	1,00	0,14	0,14	0,33	1,00
P	7,00	1,00	1,00	5,00	7,00
RM	7,00	1,00	1,00	5,00	7,00
R	3,00	0,20	0,20	1,00	3,00
T	1,00	0,14	0,14	0,33	1,00
Total	19,00	2,48	2,48	11,66	19,00

Matriz normalizada dos critérios

	C	P	RM	R	T	Prioridade relativa (w)
C	0,05	0,06	0,06	0,03	0,05	0,05
P	0,37	0,40	0,40	0,43	0,37	0,39
RM	0,37	0,40	0,40	0,43	0,37	0,39
R	0,16	0,08	0,08	0,09	0,16	0,11
T	0,05	0,06	0,06	0,03	0,05	0,05
Total	1	1	1	1	1	

Fonte: Autora (2017).

Figura 45: Etapa III: AHP Resultado – Apoio escapamento central

Matriz final: prioridades relativas das tecnologias x prioridade relativa dos critérios

	C	P	RM	R	T
FDM	0,69	0,04	0,65	0,04	0,25
MJM	0,09	0,48	0,14	0,49	0,25
SLA	0,14	0,31	0,06	0,35	0,25
SLS	0,07	0,18	0,15	0,11	0,25

 $\times$

Prior. Critério
0,05
0,39
0,39
0,11
0,05

 $=$

Resultado
0,32
0,31
0,20
0,16

1ª
2ª
3ª
4ª

Fonte: Autora (2017).

ETAPA III: BATENTE DE CENTRAGEM

O critério prioritário para o batente de centragem é a resistência mecânica, mais precisamente, resistência ao impacto. Segue as análises das comparações dos pares de critérios:

- **(1) custo e (2) precisão** → (2) é pouco mais importante que (1) devido ao encaixe que a peça deve ter com o componente. Além disso, como o custo da peça é alto, é mais fácil que garantir quando produzida em uma impressão 3D seja menor;
- **(1) custo e (2) resistência mecânica** → (2) é muito mais importante que (1), pois a peça precisa garantir a resistência quanto ao impacto. Essa característica pode ser alcançada tanto com a escolha/combinação de materiais, quanto pelo preenchimento da peça;
- **(1) custo e (2) rugosidade** → (2) é muito mais importante que (1);
- **(1) custo e (2) tempo** → (1) e (2) são de igual importância;
- **(1) precisão e (2) resistência mecânica** → (2) é muito mais importante que (1), pois apesar da necessidade de precisão, a resistência ao impacto é a principal característica que a peça deve obter;
- **(1) precisão e (2) rugosidade** → (2) é pouco mais importante que (1);
- **(1) precisão e (2) tempo** → (1) é pouco mais importante que (2);
- **(1) resistência mecânica e (2) rugosidade** → (1) é muito mais importante que (2);
- **(1) resistência mecânica e (2) tempo** → (1) é bastante mais importante que (2);
- **(1) rugosidade e (2) tempo** → (1) é muito mais importante que (2);

A partir das análises, montou-se a relação ilustrada na Figura 46 que indica que o cálculo de consistência foi de 5,8%, logo os julgamentos foram consistentes. As demais matrizes do método AHP estão representadas nas Figuras 47 e 48, onde é possível visualizar que a tecnologia mais indicada para a produção do batente de centragem é a FDM.

Figura 46: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Batente de centragem

A - Importance - or B?			Equal	How much more?								
1	☐ Custo	or ☒ Precisão	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
2	☐ Custo	or ☒ Resistência mecânica	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☒ 7	☐ 8	☐ 9	
3	☐ Custo	or ☒ Rugosidade	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☒ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
4	☒ Custo	or ☐ Tempo	☒ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
5	☐ Precisão	or ☒ Resistência mecânica	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☒ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
6	☐ Precisão	or ☒ Rugosidade	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
7	☒ Precisão	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
8	☒ Resistência mecânica	or ☐ Rugosidade	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☒ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
9	☒ Resistência mecânica	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☒ 7	☐ 8	☐ 9	
10	☒ Rugosidade	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☒ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	

CR = 5.8% OK

☐ dec. comma

Fonte: Autora (2017).

Figura 47: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Batente de centragem

Passo 1: Qual a peça analisada?
Batente de Centragem

Passo 2: Matriz de comparação (link) dos critérios

	C	P	RM	R	T
C	1,00	0,33	0,14	0,20	1,00
P	3,00	1,00	0,20	0,33	3,00
RM	7,00	5,00	1,00	5,00	7,00
R	5,00	3,00	0,20	1,00	5,00
T	1,00	0,33	0,14	0,20	1,00
Total	17,00	9,66	1,68	6,73	17,00

Matriz normalizada dos critérios

	C	P	RM	R	T	Prioridade relativa (w)
C	0,06	0,03	0,08	0,03	0,06	0,05
P	0,18	0,10	0,12	0,05	0,18	0,12
RM	0,41	0,52	0,60	0,74	0,41	0,54
R	0,29	0,31	0,12	0,15	0,29	0,23
T	0,06	0,03	0,08	0,03	0,06	0,05
Total	1	1	1	1	1	

Fonte: Autora (2017).

Figura 48: Etapa III: AHP Resultado – Batente de centragem

Matriz final: prioridades relativas das tecnologias x prioridade relativa dos critérios

$$\begin{pmatrix}
 \text{FDM} & 0,69 & 0,04 & 0,65 & 0,04 & 0,25 \\
 \text{MJM} & 0,09 & 0,48 & 0,14 & 0,49 & 0,25 \\
 \text{SLA} & 0,14 & 0,31 & 0,06 & 0,35 & 0,25 \\
 \text{SLS} & 0,07 & 0,18 & 0,15 & 0,11 & 0,25
 \end{pmatrix}
 \times
 \begin{pmatrix}
 \text{Prior. Critério} \\
 0,05 \\
 0,12 \\
 0,54 \\
 0,23 \\
 0,05
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 \text{Resultado} \\
 0,41 \\
 0,27 \\
 0,17 \\
 0,15
 \end{pmatrix}
 \begin{matrix}
 1^{\text{a}} \\
 2^{\text{a}} \\
 3^{\text{a}} \\
 4^{\text{a}}
 \end{matrix}$$

Fonte: Autora (2017).

ETAPA III: BUCHA ANTIGIRO

Os principais critérios para a peça são precisão, porque precisa encaixar com as demais peças do sistema; e resistência ao impacto, porque com o funcionamento do sistema essa peça sofre pressão e impacto das demais partes. Segue as análises das comparações dos pares de critérios:

- **(1) custo e (2) precisão** → (2) é bastante mais importante que (1), pois a peça faz parte de um sistema e possui muitas ligações com as demais peças do sistema. Entretanto, deve-se considerar o critério custo como relevante também, pois o custo da peça, quando produzida por métodos tradicionais, não é elevado. Logo, qualquer descuido na escolha da tecnologia pode afetar em um custo com a manufatura aditiva maior do que com a tradicional;
- **(1) custo e (2) resistência mecânica** → (2) é muito mais importante que (1), pois a peça sofre grande impacto quando o sistema da qual pertence está em funcionamento;
- **(1) custo e (2) rugosidade** → (1) é pouco mais importante que (2), pois a peça quando produzida por métodos tradicionais não possui um custo elevado. Logo, se o critério não for considerado na escolha da tecnologia, isso pode influenciar em uma escolha inconsistente;
- **(1) custo e (2) tempo** → (1) e (2) são de igual importância;
- **(1) precisão e (2) resistência mecânica** → (1) é pouco mais importante que (2) devido a necessidade de encaixe/ligação com as demais peças;
- **(1) precisão e (2) rugosidade** → (1) é extremamente mais importante que (2) devido a necessidade de encaixe/ligação com as demais peças;
- **(1) precisão e (2) tempo** → (1) é bastante mais importante que (2) devido a necessidade de encaixe/ligação com as demais peças. Porém, o tempo não pode deixar de ser considerado visto a importância da peça no sistema;
- **(1) resistência mecânica e (2) rugosidade** → (1) é bastante mais importante que (2), pois a peça recebe bastante impacto quando o sistema está em funcionamento;
- **(1) resistência mecânica e (2) tempo** → (1) é muito mais importante que (2), pois a peça recebe bastante impacto quando o sistema está em

funcionamento. Porém, o tempo não pode deixar de ser considerado visto a importância da peça no sistema;

- **(1) rugosidade e (2) tempo** → (2) é pouco mais importante que (1).

A partir das análises, montou-se a relação ilustrada na Figura 49, na qual é possível identificar também que o cálculo de consistência resultou em 4,1%, ou seja, os julgamentos foram consistentes. As demais matrizes do método AHP estão representadas nas Figuras 50 e 51, onde é possível identificar que a tecnologia mais indicada para a produção é a MJM.

Figura 49: Etapa III: AHP Comparação par a par dos critérios – Bucha antigiro

A - Importance - or B?			Equal	How much more?
1	☐ Custo	or ☒ Precisão	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☒ 7 ☐ 8 ☐ 9
2	☐ Custo	or ☒ Resistência mecânica	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3	☒ Custo	or ☐ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
4	☒ Custo	or ☐ Tempo	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5	☒ Precisão	or ☐ Resistência mecânica	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6	☒ Precisão	or ☐ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☒ 9
7	☒ Precisão	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☒ 7 ☐ 8 ☐ 9
8	☒ Resistência mecânica	or ☐ Rugosidade	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☒ 7 ☐ 8 ☐ 9
9	☒ Resistência mecânica	or ☐ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
10	☐ Rugosidade	or ☒ Tempo	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9

CR = 4,1% OK

☐ dec. comma

Fonte: Autora (2017).

Figura 50: Etapa III: AHP Prioridade relativa dos critérios – Bucha antigo

Passo 1: Qual a peça analisada?

Bucha antigo

Passo 2: Matriz de comparação (link) dos critérios

	C	P	RM	R	T
C	1,00	0,14	0,20	3,00	1,00
P	7,00	1,00	3,00	9,00	7,00
RM	5,00	0,33	1,00	7,00	5,00
R	0,33	0,11	0,14	1,00	0,33
T	1,00	0,14	0,20	3,00	1,00
Total	14,33	1,72	4,54	23,00	14,33

Matriz normalizada dos critérios

	C	P	RM	R	T	Prioridade relativa (w)
C	0,07	0,08	0,04	0,13	0,07	0,08
P	0,49	0,58	0,66	0,39	0,49	0,52
RM	0,35	0,19	0,22	0,30	0,35	0,28
R	0,02	0,06	0,03	0,04	0,02	0,04
T	0,07	0,08	0,04	0,13	0,07	0,08
Total	1	1	1	1	1	

Fonte: Autora (2017).

Figura 51: Etapa III: AHP Resultado – Bucha antigo

Matriz final: prioridades relativas das tecnologias x prioridade relativa dos critérios

	C	P	RM	R	T
FDM	0,69	0,04	0,65	0,04	0,25
MJM	0,09	0,48	0,14	0,49	0,25
SLA	0,14	0,31	0,06	0,35	0,25
SLS	0,07	0,18	0,15	0,11	0,25

 $\times$

Prior. Critério
0,08
0,52
0,28
0,04
0,08

 $=$

Resultado
0,28
0,33
0,22
0,16

2ª
1ª
3ª
4ª

Fonte: Autora (2017).

ETAPA IV: ANÁLISE DE TODAS AS PEÇAS

O objetivo da etapa IV é descobrir qual a relação de importância de cada peça para a organização, e a partir desse resultado poder realizar o método Promethee para, então, descobrir em qual tecnologia de manufatura aditiva se deve investir para atingir o maior número de peças possíveis dentro do conjunto de peças em estudo. Ressalta-se que nessa etapa (IV) a análise é particular para cada organização, ou seja, cada tomador de decisão deverá refletir sobre os indicadores e sobre qual a importância de cada um dentro da organização, bem como para as próximas análises deverá decidir qual a relação de cada peça, comparação par a par, para cada um desses critérios.

Para a etapa serão considerados os critérios gerais: demanda, nível de investimento tecnológico e valor da peça quando produzida via manufatura convencional. Sendo que os critérios: demanda e valor da peça, devem ser conduzidos levando em consideração que quanto maior é melhor, pois, em teoria, trarão mais resultados positivos em termos de redução de custos. Já o critério tecnologia, quanto menor o nível de investimento da tecnologia, melhor, pois o investimento acaba sendo mais baixo. Para o conjunto das peças, tem-se as informações da Tabela 17. Ressalta-se que as informações de demanda e valor

unitário da peça constam no tópico 04; as informações de qual tecnologia melhor atende cada peça constam no passo anterior a esse; e para o nível de investimento deve-se consultar as instruções da explicação do passo IV no tópico nos quais cada passo do método é detalhado.

Tabela 17: Etapa IV: Informações dos critérios x conjunto de peças

Peça	Demanda (anual)	Tecnologia e Nível investimento	Valor unitário da peça
Bico de mastic	1248	MJM – médio/alto	R\$120,00
Apoio de solda	04	MJM – médio/alto	R\$614,00
Transportador de laterais	100	FDM – baixo	R\$178,00
Apoio escapamento	42	FDM – baixo	R\$377,00
Batente de centragem	12	FDM – baixo	R\$922,50
Bucha antigiro	64	MJM – médio/alto	R\$79,00

Fonte: Autora (2017).

A primeira etapa do AHP consiste em relacionar os critérios em si, par a par, considerando os critérios já mencionados, a comparação entre eles resultou nas Figuras 52 e 53. Considerou-se que o critério demanda é muito mais importante que o investimento, porque quanto maior a demanda, em teoria, o tempo de retorno do investimento será menor. Já para a comparação demanda e valor, a demanda é bastante mais importante que valor, visto que caso não haja demanda o suficiente, o investimento não se justifica. Logo, não é o valor unitário sozinho que vai viabilizar a aquisição de um equipamento, mas sim, prioritariamente, a demanda. E a última comparação realizada, entre investimento e valor, tem-se que investimento é muito mais importante que o valor, porque esse é um dos critérios principais que se analisa quando algo vai ser adquirido, ou seja, o quanto será necessário desembolsar para adquirir um equipamento. Em contrapartida, caso o valor da peça seja extremamente alto, não necessariamente isso irá viabilizar a aquisição do equipamento, pode auxiliar na tomada de decisão, mas não sozinho.

Figura 52: Etapa IV: AHP Comparação par a par dos critérios gerais

A - Importance - or B?		Equal	How much more?								
1	☒ Demanda or ☐ Investimento	☐ 1	☐ 2	☒ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	
2	☒ Demanda or ☐ Valor	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☐ 5	☐ 6	☒ 7	☐ 8	☐ 9	
3	☒ Investimento or ☐ Valor	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☒ 5	☐ 6	☐ 7	☐ 8	☐ 9	

CR = 6.8% OK

☐ dec. comma

Fonte: Autora (2017).

Figura 53: Etapa IV: AHP Prioridade relativa dos critérios

Matriz de comparação (link) dos critérios			
	Demanda	Investimen	Valor
Demanda	1,00	3,00	7,00
Investimento	0,33	1,00	5,00
Valor	0,14	0,22	1,00
Total	1,47	4,22	13,00

Matriz normalizada dos critérios				
	Demanda	Investimento	Valor	Prioridade relativa (w)
Demanda	0,68	0,71	0,54	0,64
Investimento	0,22	0,24	0,38	0,28
Valor	0,10	0,05	0,08	0,07
Total	1,00	1,00	1,00	

Fonte: Autora (2017).

Para construção das matrizes de comparação par a par das peças para cada critério utilizou-se, também, as informações da Tabela 17 e para a definição de qual grau se encaixa em cada comparação foi realizada a proporção entre o maior valor presente e o menor. Por exemplo, comparando o bico de mastic com o apoio de solda para o critério demanda, tem-se: bico de mastic = 1248 unidades/ano e o apoio de solda = 4, nesse caso divide-se 1248 por 4, isso resulta em 321. Portanto, a demanda do bico de mastic é 321 vezes a demanda do apoio de solda, ou seja, o bico de mastic é mais importante que o apoio de solda, pois por definição quanto maior a demanda, maior a importância. Para definir o grau de importância a ser utilizado, foi elaborada uma referência, conforme os dados da Tabela 18, e esses dados foram utilizados para montar as matrizes de comparação par a par das peças para cada critério, conforme a Figura 54, juntamente com a matriz final (Figura 55) do método a qual indica o peso de cada peça para organização.

Fonte: Autora (2017).

ETAPA V: APLICAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE

O primeiro passo para a aplicação do Promethee é a montagem da tabela que, conforme as instruções da Figura 33, identifica a prioridade relativa de cada tecnologia para cada peça e o peso para a organização de cada peça, cuja informações são extraídas, respectivamente, das etapas III e IV do modelo, o compilado dessas informações está na Figura 56.

Figura 56: Etapa V: Tabela inicial método Promethee

	Bico de mastic	Apoio solda	Transportador	Apoio escapamento	Batente	Bucha antigiro
FDM	0,12	0,14	0,40	0,32	0,41	0,28
MJM	0,43	0,42	0,28	0,31	0,27	0,33
SLA	0,31	0,30	0,17	0,20	0,17	0,22
SLS	0,14	0,14	0,15	0,16	0,15	0,16
PESO	0,33	0,05	0,23	0,16	0,14	0,09

Fonte: Autora (2017).

Esses dados foram lançados no programa Visual Promethee, um programa aberto ao público acadêmico, para que o mesmo possa realizar os devidos cálculos. A Figura 57 ilustra como os dados foram inseridos no software e as Figuras 58, 59, 60 e 61 faz referências aos resultados obtidos. Com a análise dessas figuras é possível identificar que a tecnologia que melhor atende o maior número de peças do conjunto é a MJM, visto que ela é a única tecnologia que quando selecionada não fica abaixo de nenhuma outra e está da região de preferência, isso pode ser observado na Figura 59. Observando as demais tecnologias, percebe-se que quando a FDM é selecionada, ela fica entre a MJM (superior) e a SLA (inferior), ou seja, depois da MJM a FDM é a segunda tecnologia mais indicada para investimento. Além disso, quando as Figuras 60 e 61 são observadas é possível identificar que as tecnologias SLA e SLS pertencem a área de não preferência ou baixa preferência.

Figura 57: Etapa V: Software Visual Promethee

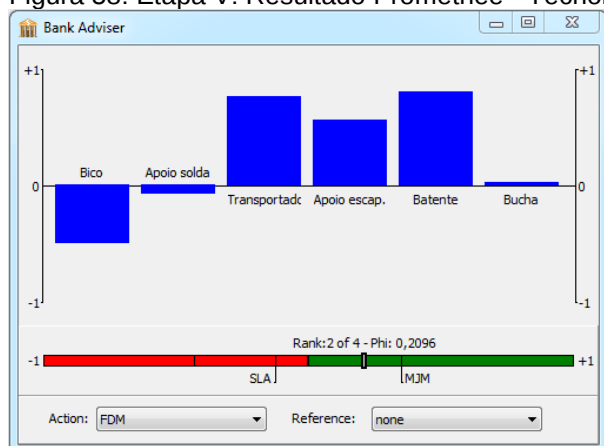
Visual PROMETHEE Academic - EtapaV.vpg (saved)

File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help

	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Scenario1	Bico	Apoio solda	Transportador	Apoio escap.	Batente	Bucha
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences						
Min/Max	max	max	max	max	max	max
Weight	0,33	0,05	0,23	0,16	0,14	0,09
Preference Fn.	Linear	V-shape	Linear	Linear	Linear	V-shape
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	0,10	n/a	0,08	0,06	0,08	n/a
- P: Preference	0,28	2,00	0,22	0,15	0,23	2,00
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics						
Minimum	0,12	0,14	0,15	0,16	0,15	0,16
Maximum	0,43	0,42	0,40	0,32	0,41	0,33
Average	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Standard Dev.	0,13	0,12	0,10	0,07	0,10	0,06
Evaluations						
☒ FDM	0,12	0,14	0,40	0,32	0,41	0,28
☒ MJM	0,43	0,42	0,28	0,31	0,27	0,33
☒ SLA	0,31	0,30	0,17	0,20	0,17	0,22
☒ SLS	0,14	0,14	0,15	0,16	0,15	0,16

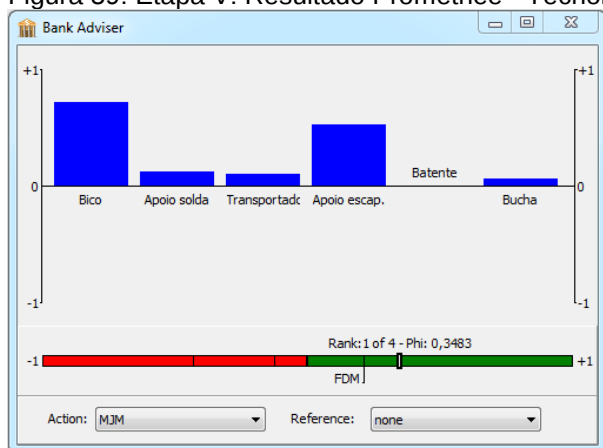
Fonte: Autora (2017).

Figura 58: Etapa V: Resultado Promethee - Tecnologia FDM



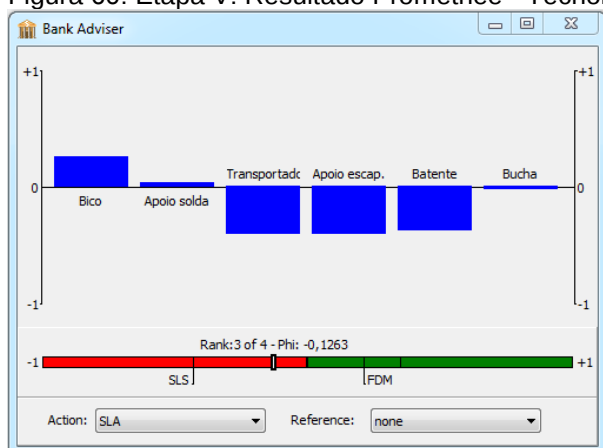
Fonte: Autora (2017).

Figura 59: Etapa V: Resultado Promethee - Tecnologia MJM



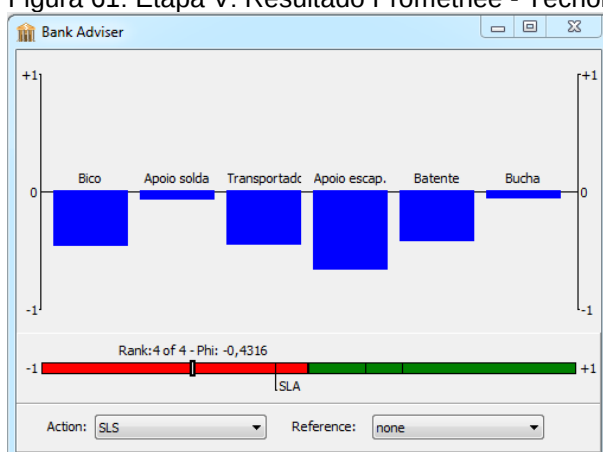
Fonte: Autora (2017).

Figura 60: Etapa V: Resultado Promethee - Tecnologia SLA



Fonte: Autora (2017).

Figura 61: Etapa V: Resultado Promethee - Tecnologia SLS

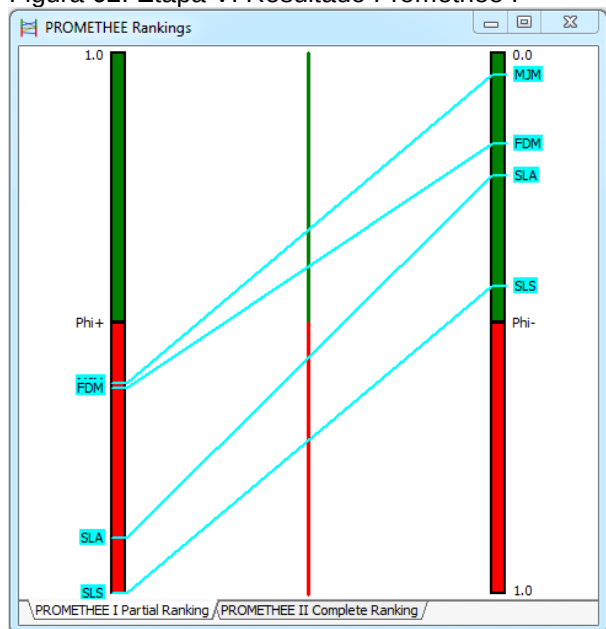


Fonte: Autora (2017).

Um outro meio de verificar qual o ranking das alternativas é pelo gráfico Promethee Rankings, nele é possível verificar o status do Promethee I e do II, as Figuras 62 e 63 representam respectivamente aos gráficos. A principal diferença entre

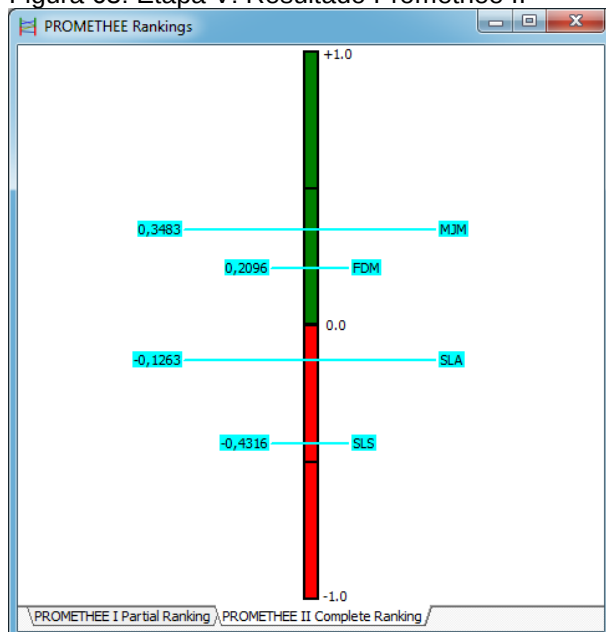
o I e o II é que no I as comparações são feitas par a par e caso tenha casos em que não é possível comparar algum critério isso é identificado no resultado. Enquanto que no II os casos de incomparabilidade não são considerados separadamente.

Figura 62: Etapa V: Resultado Promethee I



Fonte: Autora (2017).

Figura 63: Etapa V: Resultado Promethee II



Fonte: Autora (2017).

Em todo caso, nos dois gráficos é possível perceber que, definitivamente, a tecnologia mais indicada para a produção do conjunto de peças é a MJM, assim o

maior número de peças será atendido conforme a prioridade de cada uma e considerando, também, os critérios mais importantes para cada peça, facilitando a viabilidade da aquisição e otimizando os benefícios que as impressoras 3D proporcionam.

CONCLUSÕES

A importância e as vantagens do uso de impressoras 3D nas organizações é uma realidade a qual as empresas estão se adaptando, para que esse processo se torne mais simplificado e assertivo é essencial ter o conhecimento da grande parte das tecnologias de AM bem como suas aplicações e conseguir identificar as oportunidades de inclusão dessa nos processos organizacionais. Além disso, o fato de saber aplicar as tecnologias de modo adequado é essencial para obter os benefícios esperados.

Seguindo esse intuito, criou-se o modelo que auxilia na tomada de decisão de qual tecnologia de manufatura aditiva investir para que o maior número de peças MRO de apoio a produção seja atendido. De forma resumida, o modelo deve relacionar: qual o critério mais importante para cada peça; qual a relação de importância de cada critério com as tecnologias envolvidas no modelo; qual o grau de importância de cada peça para a organização e, com todas as informações, identificar qual a melhor tecnologia a ser investida para suprir a produção do conjunto de peças. Para auxiliar na elaboração do modelo, uma pesquisa sobre: principais tipos de impressão 3D, importância dos critérios quando comparados par a par e definição de como cada tecnologia atende os critérios, foi aplicada ao público que tem o tema impressão 3D como centro de suas atividades, seja profissional ou acadêmica.

As etapas do modelo consistem em:

- Primeira: selecionar o conjunto de peças que se deseja imprimir;
- Segunda: responder as seguintes perguntas:
 1. As peças são MRO de apoio a produção? Ou seja, são dispositivos, gabaritos, suportes ou outros do mesmo estilo?
 2. São peças plásticas ou precisam conter metal em sua composição?
 3. O dimensional da peça está entre 30x25x20cm? Se não, a peça pode ser particionada?

4. Qual a demanda anual? Tem necessidade de produção diária? O nível de produção chega a ser seriada (em massa)?

5. Qual o custo unitário da peça?

- Terceira: aplicação do método AHP para relacionar como cada tecnologia atende cada peça considerando os critérios. Nessa etapa, a relação de como cada tecnologia atende cada critério foi definida conforme análise realizada com o resultado da pesquisa aplicada;
- Quarta: aplicação do método AHP para identificar qual a importância de cada peça para a organização com base nos critérios gerais;
- Quinta: aplicação do método Promethee relacionando os resultados obtidos nas etapas III e IV e obter como resultado qual a melhor tecnologia a ser investida que melhor atende o maior número de peças do conjunto.

Os métodos AHP e o Promethee foram selecionados por fazerem parte dos métodos que envolvem problemáticas relacionadas a seleção da melhor solução e, apesar do método SAW (listado no tópico dos métodos) ser mais simples, o AHP foi escolhido porque no seu passo a passo não é preciso definir um peso para cada critério, mas sim define-se o grau de importância de cada critério quando comparado com cada tecnologia, além disso esse grau é definido com a consulta da tabela de Saaty e um cálculo de índice de consistência dos julgamentos é realizado. Enquanto que no método SAW esse grau varia de decisor para decisor e pode ser que haja incoerência nos julgamentos.

Os critérios considerados no modelo são: custo, precisão, propriedade dos materiais (resistência mecânica), rugosidade e tempo, os quais foram selecionadas a partir de pesquisas na literatura sobre os principais parâmetros que devem ser atendidos quando se fala em impressão 3D e diante de uma lista de critérios prioritários utilizou-se a regra 80/20, ou seja, foram identificados os critérios que correspondem a 82% do total (Figura 27). Para compor o cenário do modelo foram identificadas as tecnologias mais populares atualmente, segundo resultado da pesquisa, que são: FDM, MJM, SLA e SLS. Os critérios gerais mencionados na etapa IV são: demanda, nível de investimento da tecnologia e custo unitário, e foram definidos seguindo o raciocínio que para viabilizar um investimento é necessário que o mesmo traga retorno financeiro à organização e esse retorno se dá, basicamente, com redução de custos e/ou aumento de produtividade. Logo, a análise da demanda

está relacionada ao fato de que se deve verificar se há demanda suficiente para pagar o investimento; se o nível de investimento não é alto o bastante que inviabilize a aquisição; e se o valor unitário não é baixo o bastante que se torne mais vantajoso continuar produzindo por meios tradicionais.

O modelo foi aplicado aos casos exploratórios realizados durante o projeto, esses casos consistem em seis peças MRO de apoio à produção pertencentes ao processo produtivo de uma montadora de veículos e que foram, inicialmente, produzidos via impressão 3D apenas para analisar qual a redução de custos que iria atingir e qual seria a qualidade final da peça, tanto em termos estéticos quanto funcionais. Portanto, com esses casos, foi possível identificar qual o resultado que se obteve-se com as peças impressas, porém só foi utilizada uma única tecnologia, a FDM.

A aplicação das peças dos casos exploratórios no modelo desenvolvido resultou na seleção da tecnologia MJM para a produção de todas as peças, indicando que essa poderá suprir da melhor forma possível os critérios prioritários. Por ter o conhecimento das peças reais e da função que cada uma desempenha, considera-se que o resultado obtido é positivo e que realmente essa tecnologia atenderá muito bem aos critérios exigidos.

Do ponto de vista da aplicação do modelo pelas organizações, o resultado gerado é algo relevante por se tratar de auxiliar na tomada de decisão de como o investimento em uma tecnologia de AM deverá ser aplicado e, como o tema (investimento) é algo constante nas organizações, por se tratar de melhoria de processos, redução de custos, entrada em novos mercados e outros, sabe-se que é de extrema importância que todo investimento precisa passar pelo processo de provar a viabilidade e o resultado do modelo auxilia na escolha correta de qual tecnologia investir para que o retorno financeiro seja maior. Ou seja, enquanto que sem o auxílio do modelo é possível escolher uma tecnologia considerando apenas fatores aleatórios e proporcionando uma viabilidade qualquer, com o modelo é possível otimizar os benefícios que a produção via impressão 3D oferece por considerar como cada tecnologia atende cada critério, a relação dos critérios prioritários para cada peça e a importância de cada peça para a organização. Com isso, o ciclo de correlações tanto de critérios quanto de peças e tecnologias se completa e o retorno financeiro acaba sendo maior, pois o número de peças a ser atingido é maior e, não só isso, mas a

qualidade das peças oferecidas fará com que se tenha maior abrangência dos benefícios e, conseqüentemente, o investimento se pague.

Como a aplicação do modelo é relevante na tomada de decisão, entende-se que um programa deverá ser desenvolvido para a aplicação do modelo, pois apesar de envolver etapas simples é necessário ter o conhecimento dos métodos (AHP e Promethee) para a efetiva aplicação. Logo, surge a primeira sugestão para trabalhos futuros que seria a criação de um software que represente as etapas do modelo e que viabilize melhor a aplicação, para que seja algo rápido e que qualquer um dentro da organização possa aplicar.

Além disso, sugere-se que além da aplicação do modelo, seja realizado a impressão e os testes funcionais dessas peças, pois assim será possível identificar se não há nenhum desvio ou incoerência nos dados. Por fim, deve-se considerar a atualização do modelo, pois como comentado durante o trabalho as tecnologias de manufatura aditiva estão em constante evolução então a adição de novas tecnologias ou critérios pode ser necessária.

REFERENCIAS

3D SYSTEMS. **3D Printer Buyer's Guide** for Professional and Production Applications.

ALMEIDA, Wagner J. **Otimização estrutural de protótipos fabricados pela tecnologia FDM utilizando o método de elementos finitos**. 2007. 110 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ARCAM AB. **EBM Electron Beam Melting – in the forefront of additive manufacturing**. Disponível em: <<http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/>>. Acesso em: 08 jun. 2016.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies**. 2013.

BARROS, Cynthia. **A Decision Support System to Measure Product Suitability for Additive Manufacturing Processes**. 2014. 127 p. Dissertação (Mestrado) - The University of Texas-Pan American, Texas, 2014.

BARRY Berman. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business Horizons**, v. 55, n. 2, p. 155-162, mar./abr. 2012. doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.

BATISTA, L. **Teoria da Decisão: métodos baseados em relações de sobreclassificação**. Disponível em: <<https://ptdocz.com/doc/26575/manual-marca-governo-2015>>. Acesso em: 22 jul. 2016.

BLAND, S.; CONNER, B. Mapping out the additive manufacturing landscape. **Metal Powder Report**, v. 70, n. 3, p. 115-119, mai./jun. 2015. doi: 10.1016/j.mprp.2014.12.052

BORILLE, Anderson. et al. Applying decision methods to select rapid prototyping technologies. **Rapid Prototyping Journal**, v. 16, n. 1, p. 50-62, 2010.

BYUN, H. S.; LEE, K. H. A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.26, p. 1338–1347, 2005.

CABRAL, Mylene, L. **Avaliação de melhorias em processos de software durante a Execução de um projeto**. 2012. 209 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

CAMPOS, Vanessa R. **Modelos e métodos de tomada de decisão para apoio**. 2011. 175 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CHAKHAR, S.; MARTEL, J. Enhancing Geographical Information Systems Capabilities with Multi-Criteria Evaluation Functions. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 7, n. 2, p. 47-71, 2003.

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. **Rapid Prototyping: Principles and Applications**. 1 ed. Singapura: World Scientific Pub, 2008. 540 p.

COLUMBUS, Louis. Big Data Analytics, Mobile Technologies And Robotics Defining The Future Of Digital Factories. **Forbes**, 2015. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2015/02/15/big-data-analytics-mobile-technologies-and-robotics-defining-the-future-of-digital-factories/#ca4a03b7e9d8>>.

Acesso em: 17 abr. 2017.

CORMIER, D.; HARRYSSON, O.; HARVEY, W. Characterization of H13 steel produced via electron beam melting. **Rapid Prototyping Journal**, v. 10, n. 1, p. 35-41, 2004.

COTTELEER, M.; HOLDOWSKY, J.; MAHTO, M. The 3D opportunity primer: the basics of additive manufacturing. **Deloitte University Press**, 20 p. 2014.

COTTELEER, M.; JOYCE, J. 3D Opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth. **Deloitte University Press**. 17 p. 2014.

FIGUEIRA, J.; ROY, B.; MOUSSEAU, V. Electre methods. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHROGOTT, M. **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. New York: Springer, 2005. cap. 4. p. 133-153.

FINK, Christopher W.. An Overview of Additive Manufacturing Part II. **The AMMTIAC Quartely**, Roma (NY), v. 4, n. 3, p. 7-10, 2014.

FISCHER, Fred. **FDM and POLYJET 3D printing: determining which technology is right for your application**. Stratasys. Disponível em <<http://www.productivity.com/wp-content/uploads/2016/05/FDM-vs-PolyJet.pdf>>. Acesso em: 26.mai.2016.

FRANKLIN, R. B.; FERNANDES, P. P. Métodos de tomada de decisão para empresas de pequeno e médio porte: uma abordagem multicritério. **Revista ADMpg Gestão Estratégica**, Ponta Grossa, v. 5, n. 1, p. 129-136, 2012.

GIFFI, C. A.; GANGULA, B.; ILLINDA, P. 3D opportunity in the automotive industry: Additive manufacturing hits the road. **Deloitte University Press**. 28 p. 2014.

GIL, Antônio C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4 ed.. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos de apoio multicritério**. São Paulo: Thomson, 2004.

GOOGLE. **Patente - laminated object manufacturing system US 5730817 A**. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/us5730817>>. Acesso em: 08 jun. 2016.

GORNI, Antonio A. Introdução à prototipagem rápida e seus processos. **Revista Plástico Industrial**, p. 230-239, mar. 2001.

GRELLMANN, D. O processo de microfusão utilizando padrões fabricados por estereolitografia. **Revista Ferramental**, p. 15-24, mar./abr. 2006.

HAGEL, J.; BROWN, J.; KULASOORIYA, D.; GIFFI, Craig A.; CHEN, M. The future of manufacturing: Making things in a changing world. **Deloitte University Press**, 52 p. 2015.

HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES. **7 Families of Additive Manufacturing Quick Reference Guide**. Disponível em: <<http://www.hybridmanutech.com/resources.html>>. Acesso em: 07 mai. 2016.

INFANTE, C. E. D. de C.; MENDONÇA, F. M. de; VALLE, R. B. do. Análise de robustez com o método Electre III: o caso da região de Campo das Vertentes em Minas Gerais. **Revista Gestão & Produção**, v. 21, n. 2, p.245-255, abr./jun. 2014.

JAIN, V.; RAJ, T. Evaluation of flexibility in FMS using SAW and WPM. **Decision Science Letters**, v. 2, n. 4, p.223-230, jun 2013.

JUNIOR, L. F. N.; CHAMON, M. A. **Método AHP: pesquisa-ação na pequena empresa**. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (SIMPEP), XIII, 2006, Bauru.

JUNIOR, L. F. N. **Tomada de decisão com múltiplos critérios: pesquisa-ação sobre o método AHP em pequenas empresas**. 2006. 128 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2006.

JUNIOR, O. C.; SANT'ANNA, A. M. O.; MACHADO, L. C. Multi-attribute method for prioritization of sustainable prototyping technologies. **Clean Technologies and Environmental Policy**, p. 1355–1363. 2015.

KROHLING, R A.; SOUZA, R T. M. de. Dois Exemplos da Aplicação da Técnica TOPSIS para Tomada de Decisão. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, n. 8, p.31-35, 2011.

LORENZONI, V. DOUBROVSKI, Z. VERLINDEN, J. **Embracing the Digital in Instrument Making: Towards a Musician-tailoredMouthpiece by 3D Printing**. In: STOCKHOLM MUSIC ACOUSTICS CONFERENCE (SMAC), 2013, Stockholm, Sweden.

LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. Additive Manufacturing Research Group. Disponível em: <<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

MALAKOOTI, B. Systematic decision process for intelligent decision making. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 22, n. 4, p.627-642, ago. 2011.

MARTINS, Patrícia M. S. **Modelo de decisão para avaliar a utilização sustentável das tecnologias de informação**. 2012. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2012.

MEMARIANI, A; AMINI, A; ALINEZHAD, A. Sensitivity Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW): The Results of Change in the Weight of One Attribute on the Final Ranking of Alternatives. **Journal of Industrial Engineering**, v. 2, n. 4, p.13-18, set. 2009.

MILANI, A. S.; SHANIAN, A.; EL-LAHHAM, C. Using different ELECTRE methods in strategic planning in the presence of human behavioral resistance. **Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences**, p.1-19, jul. 2006.

MORAIS, D. C. ALMEIDA, A. T. de. Modelo de Decisão em grupo para gerenciar perdas de água. **Pesquisa Operacional**, v.26, n.3, p.567-584, set./dez. 2006.

MUDGE, R. P.; WALD, N. R. Laser Engineered Net Shaping Advances Additive Manufacturing and Repair. **Welding Journal**, p. 44-48, jan. 2007.

MUELLER, B.; KOCHAN, D.. Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry. **Journal Computers in Industry - Special issue on rapid prototyping and manufacturing technologies**, v. 39, n. 1, p. 47-53, jun. 1999.

MURPHY, T.; GRAY, H.; COTTELEER, M. J. 3D opportunity for the future: Industry participants speak out. **Deloitte University Press**, 19 p. 2015.

MURRAY, M. **Maintenance, Repair, and Operating Supplies (MRO)**. MRO Items Are Consumed in Production and Plant Maintenance. Disponível em: <<https://www.thebalance.com/maintenance-repair-and-operating-supplies-mro-2221265>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Optics and Photonics: Essential Technologies for Our Nation**. Washington, DC: The National Academies Press. 2013.

NING, F. et al. **Additive manufacturing of CFRP composites using fused deposition modeling: Effects of carbon fiber content and length**. In: International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC), 2015, jun. 8-12, 2015, Charlotte, North Carolina, USA.

OHJI, Tatsuki; et. al. **Advanced Processing and Manufacturing Technologies for Structural and Multifunctional Materials VII: Ceramic Engineering and Science Proceedings**. Editora: Wiley, 2013.

OLIVEIRA, V. M. **Gestão de Estoque MRO em uma Fábrica de Rolamentos**. 2013. 101 p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

POVOA, B. B. Gestão de estoque: os desafios dos itens de mro e a importância dos indicadores de performance. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXXIII, Salvador, 2013.

QUEIROZ, Júlio C. B. **Modelos e métodos de tomada de decisão para apoio à gestão estratégica em empresas**. 2009. 245 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

REZENDE, Helio F. F de. **Seleção de sistema de informações gerenciais de projetos utilizando SAW e VIP Analysis**. 2012. 81 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Economia e Finanças IBMEC, Rio de Janeiro, 2012.

RICO, O.; ENGEL, C. **État actuel des fabrications additives pour les applications métalliques**. Atelier CNES – novembro, 2013, Toulouse, France. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/carstenengel/selective-laser-melting-versus-electron-beam-melting/>>. Acesso em: 08 jun. 2016.

ROBERSON, D. A.; ESPALIN, D.; WICKER, R. B. 3D printer selection: A decision-making evaluation and ranking model. **Virtual and Physical Prototyping**, p. 201-212. 2013

ROYAL ACADEMY OF ENGINEERING. **Additive manufacturing: opportunities and constraints**. Editora: Royal Academy of Engineering, 2013.

RÜßMANN, Michael et al. **Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**. BCG. The Boston Consulting Group, 2015. 20 p.

SAATY, R.W. The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3-5, p.161-176, 1987.

SANTOS, F. C. dos. **Desenvolvimento de Software para equipamento de Prototipagem Rápida por Sinterização Seletiva a Laser (SLS)**. 2009. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SARRAF, A. Z.; MOHAGHAR, A.; BAZARGANI, H.. Developing TOPSIS method using statistical normalization for selecting Knowledge management strategies. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v.6, n.4, p.860-875, jul. 2013.

TCHEMRA, Angela H. **Tabela de decisão adaptativa na tomada de decisão multicritério**. 2009. 172 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SRIVATSAN, T.S.; SUDARSHAN, T.S. **Additive manufacturing: innovations, advances, and applications**. 1 ed. Flórida: CRC Press, 2016. 460 p.

STRATASYS. **Aerospace & defense**. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/industries/aerospace-defense>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

STRATASYS. **Tecnologia FDM**. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/br/impressoras-3d/technologies/fdm-technology>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

STRATASYS DIRECT MANUFACTURING. **Stereolithography**. Disponível em: <<https://www.stratasysdirect.com/solutions/stereolithography/>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN - MECHANICAL ENGINEERING. **Selective laser sintering, birth of an industry**. Disponível em: <<http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>>. Acesso em: 26 mai. 2016.

VAUPOTIČ, B.; BREZOČNIK, M.; BALIČ, J. Use of PolyJet technology in manufacture of new product. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Slovenia, v. 18, n. 1, p. 319-322, set./out. 2006.

VOLPATO, Neri et al. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

WALTER, M. Kruf; et. al. Design for Rapid Manufacturing functional SLS parts. **Intelligent Production Machines and Systems**, p. 389-394. 2006.

WANG, W.; CONLEY, J. G.; STOLL, H., W. Rapid tooling for sand casting using laminated object manufacturing process. **Rapid Prototyping Journal**, v. 5, n. 3, p. 134-141, 1999.

WOHLERS REPORT 2013. Additive manufacturing and 3D Printing State of the Industry.

APENDICE

APÊNDICE 1: PESQUISA – PARTE A

Questionário - Comparação de Tecnologias de Manufatura Aditiva

Estou desenvolvendo, no âmbito da pesquisa de minha dissertação de mestrado, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEPS) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), um modelo para tomada de decisão a respeito da fabricação de peças de Manutenção, Reparo e Operação (MRO) por meio de tecnologias de manufatura aditiva. A ideia deste modelo é que seja possível determinar qual a melhor tecnologia a se investir, dado o contexto de operação da empresa que está considerando essa iniciativa.

Você foi selecionado como alguém que possui experiência com manufatura aditiva e gostaria de contar com 5 minutos do seu tempo para responder a este questionário que trata da comparação de tecnologias de manufatura aditiva com base em alguns critérios que foram identificados como relevantes para peças de MRO. Suas respostas são anônimas e não é possível relacionar as respostas a respondentes individuais.

Agradeço antecipadamente pelas suas respostas e coloco-me à disposição para qualquer esclarecimento que seja necessário. Caso deseje ter mais informações sobre a pesquisa, incluindo ser informado dos resultados da mesma, não hesite em me contatar.

Mestranda: Nairana Aparecida Alberton Disner (nairana.alberton@pucpr.edu.br)
Orientador: Prof. Fernando Deschamps, Dr. (fernando.deschamps@pucpr.br)

>>

APÊNDICE 2: PESQUISA – PARTE B

Qual sua formação?

Em que setor/indústria você trabalha ou em que setor/indústria predominantemente desenvolve suas atividades? (Por exemplo: automotivo, próteses)

Há aproximadamente quantos anos você trabalha com manufatura aditiva?

Com quais das tecnologias de manufatura aditiva você trabalha? Assinale todas as alternativas correspondentes ao nome dessas tecnologias.

- | | | |
|--|--|---|
| ☐ Stereolithography (SLA) | ☐ Electron beam melting | ☐ Powder bed and inkjet head printing |
| ☐ Digital light processing | ☐ Selective laser sintering (SLS) | ☐ Plaster-based 3D printing |
| ☐ Multi-jet modeling (MJT) | ☐ Selective heat sintering | ☐ Laminated object manufacturing (LOM) |
| ☐ Fused deposition modeling (FDM) | ☐ Direct metal laser sintering | ☐ Ultrasonic consolidation |

>>

APÊNDICE 3: PESQUISA – PARTE B

Após um conjunto de casos exploratórios de peças de MRO fabricadas por manufatura aditiva, os seguintes cinco critérios foram identificados como os mais relevantes a serem considerados nesse tipo de aplicação (em ordem alfabética):

custo, precisão, resistência mecânica, rugosidade, tempo

Considerando esses critérios par a par, como você os compara, levando em consideração a sua experiência com manufatura aditiva?

(1) custo e (2) precisão	
(1) custo e (2) resistência mecânica	
(1) custo e (2) rugosidade	
(1) custo e (2) tempo	
(1) precisão e (2) resistência mecânica	
(1) precisão e (2) rugosidade	
(1) precisão e (2) tempo	
(1) resistência mecânica e (2) rugosidade	
(1) resistência mecânica e (2) tempo	
(1) rugosidade e (2) tempo	

>>

APÊNDICE 4: PESQUISA – PARTE D

Nas próximas questões, você deve comparar quatro tecnologias de manufatura aditiva, par a par, no atendimento a cada um dos cinco critérios já apresentados (custo, precisão, resistência mecânica, rugosidade e tempo). As quatro tecnologias a serem comparadas são:

Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), Multi-jet modeling (MJT)

Faça a comparação com base em seu conhecimento e experiência com manufatura aditiva.

Critério: **CUSTO**

- | | |
|-------------------|----------------------|
| (1) FDM e (2) SLA | <input type="text"/> |
| (1) FDM e (2) SLS | <input type="text"/> |
| (1) FDM e (2) MJT | <input type="text"/> |
| (1) SLA e (2) SLS | <input type="text"/> |
| (1) SLA e (2) MJT | <input type="text"/> |
| (1) SLS e (2) MJT | <input type="text"/> |

Critério: **PRECISÃO**

- | | |
|-------------------|----------------------|
| (1) FDM e (2) SLA | <input type="text"/> |
| (1) FDM e (2) SLS | <input type="text"/> |
| (1) FDM e (2) MJT | <input type="text"/> |
| (1) SLA e (2) SLS | <input type="text"/> |
| (1) SLA e (2) MJT | <input type="text"/> |
| (1) SLS e (2) MJT | <input type="text"/> |
-

APÊNDICE 5: PESQUISA – PARTE E**Critério: RESISTÊNCIA MECÂNICA**

(1) FDM e (2) SLA	
(1) FDM e (2) SLS	
(1) FDM e (2) MJT	
(1) SLA e (2) SLS	
(1) SLA e (2) MJT	
(1) SLS e (2) MJT	

Critério: RUGOSIDADE

(1) FDM e (2) SLA	
(1) FDM e (2) SLS	
(1) FDM e (2) MJT	
(1) SLA e (2) SLS	
(1) SLA e (2) MJT	
(1) SLS e (2) MJT	

Critério: TEMPO

(1) FDM e (2) SLA	
(1) FDM e (2) SLS	
(1) FDM e (2) MJT	
(1) SLA e (2) SLS	
(1) SLA e (2) MJT	
(1) SLS e (2) MJT	

APÊNDICE 6: ARTIGO ICIEOM, 2016

International Joint Conference - CIO-ICIEOM-IIE-AIM (IJC 2016)
San Sebastián, Spain, July 13-15, 2016

Exploring the Application of Additive manufacturing to Consumable Process Parts

Disner N¹, Deschamps F², Pinheiro E³

Abstract Many industrial systems make use, in their machines and equipment, of parts that are gradually consumed in the process but are not incorporated in the final product – usually called consumable process parts. Some of these parts need frequent replacement and must be acquired in large quantities, demanding a significant amount of financial resources and storage capacity. In recent years, additive manufacturing, or 3D printing, has gained increased relevance as a way to implement make-to-order production, making its application in this situation particularly interesting. This work aims at exploring how different additive manufacturing technologies may be applied to the production of different types of consumable process parts as an alternative to acquiring them from third-party suppliers. Some of the factors considered in the analysis are the replacement frequency of the part, acquisition costs, storage costs, technical viability of producing it through additive manufacturing and this production cost. Through the case analysis of a car manufacturer, a proof of concept for the application of additive manufacturing technologies to consumable process parts is developed, which can also be generalized to other industries. The use of additive manufacturing to produce a part – the nozzle of a glue dispensing robot – is detailed.

Keywords: Additive manufacturing; 3D printing; proof of concept, consumable process parts.

1 Introduction

The growing need to become and remain competitive in the markets that organizations operate leads them to seek new technologies and production tools that help achieve that goal. In recent years, additive manufacturing technologies (AM), popularly known as 3D printing, have helped large companies to become more competitive by assisting them mainly in the reduction of process times and cost. Such reductions are visible in the production of prototypes, products, and also parts that are used and consumed during the production process, such as gauges, fixtures, dispensers and others.

According Giffi et al. (2014), among automakers in particular, there are two areas that AM has greater competitive influence:

Source of production innovation: AM can produce components whose design can be a limitation in traditional manufacturing processes – some AM technologies are able to incorporate different materials in one part allowing the part to have custom unique properties.

Driver of supply chain transformation: the idea is to use AM to eliminate the need for new tools and directly produce final parts, reducing the lead time and improving the ability to reset the market. Moreover, the production of the necessary components on demand reduces inventory costs.

¹Nairana Disner (e-mail: nairana.alberton@pucpr.edu.br)
Dept. of Industrial Engineering and Systems. Pontifical Catholic University of Parana. Curitiba, BR.

²Fernando Deschamps (e-mail: fernando.deschamps@pucpr.br)
Dept. of Industrial Engineering and Systems. Pontifical Catholic University of Parana. Curitiba, BR.

³Edson Pinheiro de Lima (e-mail : e.pinheiro@pucpr.br)
Dept. of Industrial Engineering and Systems. Pontifical Catholic University of Parana. Curitiba, BR.

Parts that are consumed and used during the process generally have frequent replacement, demanding a significant amount of financial resources and a large storage capacity. Based on the idea that AM may drive supply chain transformation, this article aims to present an exploratory case for the production of a consumable process part using AM in an automobile industry. Results are presented, demonstrating how the use of AM can be applied to this type of situation.

2 Literature Review

2.1 Additive manufacturing (AM) technologies

According to Barros (2014), the principle of AM is the creation of a solid object, generated from a CAD model (Computer Aided Design) through the deposition of raw material layer by layer. The term additive manufacturing originated within the area of rapid prototyping (RP). With the development of new materials, technologies and the improvements in quality, prototypes started to become the final product they used to represent. The author Cotteleer et al. (2014) says that there currently exist thirteen different additive manufacturing technologies, which were compiled with their characteristics, advantages and disadvantages in Table 1.

In general, the application of AM technologies goes through five stages:

Step 1: creation of a 3D model using a CAD software;

Step 2: the 3D model is saved in .STL format that is a representation in the form of model triangles;

Step 3: the model is cut into layers and the data is sent to the additive manufacturing device;

Step 4: the device creates the object by depositing material layer by layer (by either using liquid, powder or filaments);

Step 5: the object is finished, if necessary.

Table 1 Types of additive manufacturing

Technology		AM Process		Typical materials		
Stereolithography		Vat polymerization		Liquid photopolymer, composites		
Digital processing	light	Vat polymerization		Liquid photopolymer		
Multi-jet modeling (MJM)		Material jetting		Photopolymers, wax		
Fused deposition modeling		Material extrusion		Thermoplastics		
Electron melting	beam	Powder fusion	bed	Titanium chrome	powder,	cobalt
Selective sintering	laser	Powder fusion	bed	Paper, plastic, metal, glass, ceramic, composites		
Selective sintering	heat	Powder be fusion		Thermoplastic powder		
Direct metal sintering	laser	Powder fusion	bed	Stainless steel, cobalt, chrome, nickel alloy		
Powder bed and inkjet head printing		Binder jetting		Ceramic laminates, composites	powders, acrylic,	metal sand,
Plaster-based printing	3D	Binder jetting		Bonded composites	plaster,	plaster
Laminated object manufacturing		Sheet lamination		Paper, plastic, metal laminates, ceramics, composites		
Ultrasonic consolidation		Sheet lamination		Metal and metal alloys		

Technology	AM Process	Typical materials
Laser metal deposition	Directed energy deposition	Metals and metal alloys

As there are different types of AM, with very different characteristics (represented by the materials in Table 1), such as the physicochemical properties of the raw material, surface finish, environmental impact, visual appearance of the finished part, accuracy, precision, lifespan of the part, and thermal properties, among others, it is important to first define some selection criteria for determining what is the best type of technology to be applied to a certain situation. Based on this, the industry 3D Systems identified types of application and performance criteria for additive manufacturing were identified and are shown in Tables 2 and 3, respectively.

Table 2 Types of application for additive manufacturing

Type of application	Description
<i>Concept Models</i>	improve the initial design decisions that affect all future project activities and engineering. Through the testing of a conceptual model early in the project it is possible to reduce the changes to be made throughout the project and reduce delivery and market launch times.
<i>Functional Prototypes</i>	Verify that the product guarantees the function which it is intended to accomplish. This check can include applications such as form and fit, functional performance, and assembly verification.
<i>Pre-Production Applications</i>	Pre-production applications include short-term tools, parts and accessories that allow early production and assembly of final products as well as end-use parts.

Table 3 Performance criteria related do additive manufacturing

Performance criteria
File-to-finished-part speed
Part cost
Feature detail resolution
Accuracy
Material properties
Print capacity

According to Roberson et al. (2013), some of the main characteristics to be assessed in an AM application are the following: unit cost (calculated by number of parts or other measure used); the time and quantity of material used for the construction of the part; necessary support (explained in Section 4); accuracy and surface finish or roughness.

It is noteworthy that such attributes are mainly related to the AM technology –geometry of the part has an impact on the parameters, but it is the technology that defines most of them. Nonetheless, as the company in which the exploratory case of this paper already has additive manufacturing equipment, the criteria will be selected and identified based on the characteristics of some parts and the feasibility of producing them through the available equipment.

3 Methodology

This work uses an exploratory research approach. The main objective is to become familiar with the problem, making it explicit or building hypotheses. The author Gil (2002), says that such research usually involves three main sources of information: a) literature review; b) interviews; and c) analysis examples. The exploratory research in this study takes the form of a case study in an automotive manufacturer located in Brazil. The organization under study has assembled vehicles as its final products. Among materials consumed in the different production processes are several consumable parts such as robot tools, application nozzles and guns, gauges and fixtures, among others. Each of these consumable parts is used at a scheduled time for the processing of the vehicle and some of them are daily used in a very high volume. Such products are purchased from suppliers and stored at a central warehouse, which is responsible for inventory management and control of local distribution.

As the consumption of some of these materials has a high volume, acquisition costs for some of these materials, in order to provide a timely and safe level of supply, are usually higher than the cost of the product itself. This process becomes even more critical when it comes to specific material vendors that have a long delivery time. If the purchase programming of such materials is not aligned with production scheduling and control, the production line can stop for the lack of some consumable part. And if the material does not come from an accredited supplier for that part it can not enter the production process because it was not validated by quality standards established by the group.

Given this scenario, the opportunity was identified to include AM technologies for the production of consumable parts in the production process in order to reduce costs and delays with these materials. To select a test part to be included in the exploratory case, a survey was conducted to identify which parts are able to be manufactured internally with AM. Through the list of materials in the warehouse, parts were filtered according to some technical restriction criteria for additive manufacturing, as the necessary equipment and the raw materials locally available. The additive manufacturing equipment that the organization has is of the type Fused Deposition Modeling (FDM).

4 Application

The exploratory case was based on a cost reduction opportunity of the automotive manufacturer under study. There are several types of additive manufacturing technologies, each with its peculiarities and. In deciding which technology to use it is necessary to look at some parameters related to parts and processes. Therefore, based on the main criteria mentioned by the authors in the literature review, the expertise of the authors of this article and the expertise of the professionals involved with AM technologies in the organization under study, a final set of criteria was defined in order to decide whether the production of certain parts through AM is viable or not.

The final set of criteria, based on the literature review and the experience of the professionals involved in this work, follows:

- i. Unit cost: unit cost: cost paid by the piece unit. This criterion is important to analyze the difference between the cost of the part produced in the 3D printer and the cost of the part purchased from the supplier.
- ii. Demand: consumption part per period. Analyzing the part demand to check the capacity of the printer meets the demand. if the printer does not meet the demand, should consider purchasing other equipment or back to the traditional production
- iii. Geometric complexity: analyzing the geometry of the part, because depending on the technology used can be limited or difficulty printing.
- iv. Accuracy: checking the required dimensional accuracy required for the application of the part in the process.
- v. Surface finish: checking the required finish of the piece.

4.1 Application

The selected part is a glue application nozzle (Figure 1) to the vehicle's windshield bonding. This part is purchased from external suppliers, and is produced on CNC machines, and the cost of BRL120.00/unit. The consumption of this piece is 2 units/day, so the demand is 480 pieces/year, with a total cost of BRL57,600.00/year.

The following analysis of the five criteria applied to the nozzle:

Unit cost: the external cost (supplier) is BRL120.00/unit and the internal cost (3D printer) is BRL 20.00/unit, this difference generates a saving of 83% of the amount paid on each unit.

Demand: the external demand is 2 pieces/day and the internal demand is 4 pieces/day, because the surface of the piece produced in the 3D printer is roughened, so the adhesive sticks to the surfaces of the nozzle and this is unusable.

Geometric complexity: the piece does not have complex geometry, so the FDM technology produces the piece with quality.

Accuracy: accuracy satisfies the printer provides the accuracy required for the piece.

Surface finish: to improve the efficiency piece is necessary to perform a procedure that leave the smooth surface. But with the quality offered is satisfying functionality.

In addition to the reduced cost of the piece, there are the savings and benefits, as follows:

Reduce the purchasing process costs: with the 3D printer, the shopping process is performed internally, with an exchange of information between areas;

Elimination of nozzles in inventory: domestic production of nozzles is controlled by a kanban system, this reduces storage and logistics costs.

Improve nozzle: when there are new robots need to be placed in the production process, there is a need of a new nozzle. With domestic production of nozzles, it is not necessary to ask for an external supplier a prototype of the new nozzle for the test (a process that lasts 60 days), but ask the area responsible for additive manufacturing within the organization that can provide the piece in 24 hours (max), depending on demand, and to produce a nozzle 3D printer takes about an hour.



Fig. 1 Glue application nozzle

5 Conclusions

After analyzing the detailed exploratory case in the previous section, it follows that the AM technologies can and are helping organizations find ways to reduce costs in such a way that there is impact on the final cost of the product. In addition to this reduction, AM equipment provide advantages in processing time, range of available materials, ease of producing complex parts, ease of design change, cost of equipment, and ease of use/manipulation. Therefore, they have great market potential, not only in the automotive industry but also in many other market segments.

It must be observed that the economy of 83% is in relation the unit cost of the part. The economy calculating the demand and the cost of the equipment was not estimated. However, by means of industry information, the printer was paid at 4 months with the production of the nozzles.

The intention of the article was to demonstrate a practical way that the use of such technology can impact on cost reduction, a topic in constant discussion in organizations. However a limitation of the work was to have only one test case to assess the criteria. One of the suggestions is to apply these criteria to other cases for evaluation and also formulate a framework that involves choosing the best suited equipment based on the desired part and the process. Besides these two points, another interesting point would be to apply the evaluation criteria to other industries to evaluate the efficiency of such technology.

6 References

- Barros, C (2014) A Decision Support System to Measure Product Suitability for Additive Manufacturing Processes. Sc.M. thesis, The University of Texas-Pan American.
- Cotteleer, M., Holdowsky, J., Mahto, M (2014) The 3D opportunity primer: the basics of additive manufacturing. Deloitte University Press.
- Giffi, C. A., Gangula, B., and Illinda, P (2014) 3D opportunity in the automotive industry: Additive manufacturing hits the road. Deloitte University Press.
- Gil, A. C (2002) Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 4rd Edition, Atlas, São Paulo.
- Roberson, D. A., Espalin, D., and Wicker, R. B (2013) 3D printer selection: A decision-making evaluation and ranking model. Virtual and Physical Prototyping, 2012.
- 3D Systems 3D Printer Buyer's Guide: for Professional and Production Applications.

APÊNDICE 7: ARTIGO ISPE, 2016

A framework for applying additive manufacturing to consumable process parts

Nairana Aparecida Alberton DISNER^{a,4}, Fernando DESCHAMPS^{a,b,2} and Edson PINHEIRO DE LIMA^{a,c,3}

^a *Industrial and Systems Engineering Graduate Program (PPGEPS), Polytechnic School, Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), Curitiba, Brazil*

^b *Department of Mechanical Engineering, Federal University of Paraná (UFPR), Curitiba, Brazil*

^c *Department of Electrotechnics, Federal University of Technology – Paraná (UTFPR), Curitiba, Brazil*

Abstract. The growing competitiveness among automakers and other organizations of the automotive supply chain has been the trigger for innovation in production technologies so that objectives and goals can be met. In highlight, one of the main innovations being adopted as a source of cost reduction, reduced processing times and process flexibility are the so called 3D printers or additive manufacturing technologies. There are currently 13 different types of additive manufacturing technologies and the choice of which technology to use is based on different factors such as unitary cost of the processed part, processing time, accuracy, surface finish, and mechanical properties such as thermal resistance, among others. In order to assist in this selection process, this work presents a preliminary framework for applying additive manufacturing technologies to consumable process parts, such as nozzles, fixtures and support devices, which are not incorporated in the final product, but because of wear or destruction, need frequent replacement in the production process. This framework is based on a set of exploratory case studies conducted in an organization of the automotive industry and the literature on additive manufacturing and decision-making methods. The framework is composed of a set of criteria to be evaluated when assessing which consumable process part may be matched by a specific additive manufacturing technology, and a process that guides the application of these criteria. The framework's utility, usability and feasibility is finally discussed.

Keywords. Additive manufacturing, consumable process parts, selection framework, decision-making methods

1. Introduction

The manufacturing companies are looking for approaches that optimize production processes in terms of speed, cost reduction and product quality in order to increase profit margins [1], assuming therefore a position of major player in the segment it operates or, at least, achieving the outlined strategic objectives.

The search for improvements of results and production processes leads organizations to seek resources and tools that are in the context of technological and innovative trends. On this basis, there is a prominent issue in today's business environment, the industry 4.0, which has the intention to interconnect the entire production chain of an organization, end to end, adding value to it. The concept seems simple, but there are several factors that should be considered and analyzed, including: autonomous robots, simulation, horizontal and vertical integration, Internet of Things (IoT), cybersecurity, the cloud, additive manufacturing (AM), augmented reality, big data and analytics [2]. These factors, each with its peculiarity, are able to assist in the strengthening, development and improvement in processes of companies, offering innovative technologies.

One believes that the additive manufacturing is able not only to produce individual prototypes and components, but use the technology for the production of small batches of customized products that offer advantages, such as: reduce transportation and inventory; flexibility to changes in projects and sophisticated visualization capabilities [1].

Therefore, the AM (3D printing) is one of the most technologies prominent today, reaching segments like: food, automotive, construction, retail, among others. As the range of areas is large, the diversity of 3D printing equipment is also large, because each one meets a specific need. The AM technologies differentiate themselves by: physical form of raw material, production process, types of raw materials, printing speed, among others [3].

Thus, the main question to be answered is: "How to identify the best additive manufacturing technology to be chosen for a given process or product, based on certain factors to be analyzed?". To answer this question a preliminary framework of decision-making will be produced. It will be preliminary because the parts will be evaluated according to the framework, but will not be printed in technology indicated and will not be compared to the other to check the veracity of the statement obtained by the model application.

⁴ Corresponding author, e-mail: nairana.alberton@pucpr.edu.br

² E-mail: fernando.deschamps@pucpr.br

³ E-mail: e.pinheiro@pucpr.br

The parts selected to test the framework are consumable process parts of the automotive industry located in the state of Paraná. These parts do not belong to the final product, but assist in the production thereof, such as: jigs, supports, robot accessories, among others. The choice for this type of parts was due to the fact it was not found cases in the literature of models of decision-making for the production these parts by additive manufacturing technologies, and the cases found are meant to end parts.

2. Literature Review

2.1. Additive Manufacturing (AM)

AM is defined as a process of joining materials to make objects from the 3D model data, usually layer upon layer, unlike subtraction manufacturing methodologies [4, 5]. In other words, additive manufacturing technologies build objects from a CAD model, which will undergo a conversion process from a three-dimensional model to a layered model (.stl file), which will be read by the machine and printed.

Due to the high number of 3D printing technologies, Table 1 [3] consolidates thirteen types of technologies, highlighting: the type of process, raw materials, the main advantages and disadvantages. In addition, it's important to analyze some factors that should be considered when choosing the production process and the part that will be produced. Thus, the factors listed below may be considered in the framework.

Table 1. Types of additive manufacturing (Adapted from Cotteleer *et al.* [3])

Technology	AM Process	Typical materials	Advantages	Disadvantages
Stereolithography (SLA)	Vat polymerization	Liquid photopolymer, composites	Complex geometries; detailed parts; smooth finish	Post-curing required; requires support structures
Digital light processing	Vat polymerization	Liquid photopolymer	Allows concurrent production; complex shapes and sizes; high precision	Limited product thickness; limited range of materials
Multi-jet modeling	Material jetting	Photopolymers, wax	Good accuracy and surface finish; may use multiple materials (also with color); hands-free removal of support material	Range of wax-like materials is limited; relatively slow build process
Fused deposition modeling (FDM)	Material extrusion	Thermoplastics	Strong parts; complex geometries	Poorer surface finish and slower build times than SLA
Electron beam melting	Powder bed fusion	Titanium powder, cobalt chrome	Speed; less distortion of parts; less material wastage	Needs finishing; difficult to clean the machine; caution required when dealing with X-rays
Selective laser sintering (SLS)	Powder bed fusion	Paper, plastic, metal, glass, ceramic, composites	Requires no support structures; high heat and chemical resistant; high speed	Accuracy limited to powder particle size; rough surface finish
Selective heat sintering	Powder be fusion	Thermoplastic powder	Lower cost than SLS; complex geometries; no support structures required; quick turnaround	New technology with limited track record
Direct metal laser sintering	Powder bed fusion	Stainless steel, cobald, chrome, nickel alloy	Dense components; intricate geometries	Needs finishing; not suitable for large parts
Powder bed and inkjet head printing	Binder jetting	Ceramic powders, metal laminates, acrylic, sand, composites	Full-color models; inexpensive; fast to build	Limited accuracy; poor surface finish
Plaster-based 3D printing	Binder jetting	Bonded plaster, plaster composites	Lower price; enables color printing; high speed; excess powder can be reused	Limite choice of materials; fragile parts

Technology	AM Process	Typical materials	Advantages	Disadvantages
Laminated object manufacturing	Sheet lamination	Paper, plastic, metal laminates, ceramics, composites	Relatively less expensive; no toxic materials; quick to make big parts	Less accurate; non-homogeneous parts
Ultrasonic consolidation	Sheet lamination	Metal and metal alloys	Quick to make big parts; faster build speed of newer ultrasonic consolidation systems; generally non-toxic materials	Parts with relatively less accuracy and inconsistent quality compared to other AM processes; need for post-processing
Laser metal deposition	Directed energy deposition	Metals and metal alloys	Multi-material printing capability; ability to build large parts; production flexibility	Relatively higher cost of systems; support structures are required; need for post-processing activities to obtain smooth finish

2.2. Choice of Parameters

Based on the work of some authors, the list below gives the main parameters to be weighed in the choice of technology and evaluation of parts to be produced, such as:

- complexity of the part, customization and production volume [6];
- dimensional accuracy, surface roughness, cost, processing time, material properties (tensile strength and elongation) [7];
- purpose of the product, material needed in its composition, dimensional accuracy, cost, processing time, necessary detail, surface finish [8];
- print speed, cost, resolution, accuracy, material properties and color [9];
- cost, amount of material used, processing time, amount of necessary support, accuracy and surface finish (roughness) [10];

In the face of the factors listed above, there is a need to select which the main points to be observed in the selection of an AM technology to be the best in order to meet the needs and generate the expected results. Therefore, the next topic is related to the decision-making model which will serve as basis for the development of the framework that will assist in decision-making for choosing an AM technology.

2.3. Multiple Criteria Decision-Making

Multiple Criteria Decision-Making (MCDM) techniques can be classified into two main categories: Multiple Objective Decision-Making (MODM) or Multiple Attribute Decision-Making (MADM). Therefore, to know in which category the decision-making technology belongs it is necessary to understand the meaning of objective and attribute. Thus, follow the definitions: the objectives are like the reflection of the desire of decision-makers and presume the direction in which they want to work; and attributes are characteristics that represent properties or capabilities of alternatives to meet the need and/or wishes of decision-makers [11]. As soon, as the main aim of the paper is to create a model that helps to identify the best AM technology based on some criteria, it should be taken into account to create the framework only existing methods related to MADM.

The main MADM methods which may assist in the framework development are: simple weighting (SAW), TOPSIS, ELECTRE and AHP. The AHP is used as the basis for creating the preliminary framework as it takes into account the qualitative part of the analysis as well as the quantitative; and through it, it is possible to choose the alternative that contributes to achieving the criteria that are most important for each analyzed parts. AHP, thus, will be briefly explained next.

2.3.1. Analytic Hierarchy Process – AHP

The AHP is a tool used to facilitate the analysis, understanding and assessment of the problem by dividing it into hierarchical levels. [12]. It was developed by Thomas L. Saaty in the early 70s and is divided according to the following steps [13]:

- structuring the problem hierarchically showing the key elements and the relationships between criteria and alternatives;
- organizing criteria and alternatives in an matrix for pairwise comparison;
- comparing alternatives consistently, using the knowledge of the business, impressions and sensations that have on the subject. Preferably using the numerical scale developed by Saaty;
- calculating the weights of alternatives and criteria within the established hierarchy;
- calculating the consistency of relation to evaluate whether the judgment made by the decision maker is coherent and will not lead to a wrong decision;
- summarizing the results and assemble the final scale of values to the alternatives ordered by preference.

The results obtained from the analysis performed through the AHP application is the consensus of the best alternative proposal with the main criteria targeted to achieve the solution to the problem or meet the established objective. Therefore, in this case, the main objective is to choose the best additive manufacturing technologies that meets the main criteria for each parts. This will be done as the preliminary framework described below.

3. Development of preliminary framework

For the development of the preliminary framework, it will be considered only the three main technologies currently used: SLA, FDM e SLS. The main characteristics of these technologies were mentioned in Table 1.

The attributes mentioned in the article were compiled and classified and the list that follows contains the attributes that will be assessed to assist in the identification of AM technologies most suitable for use in each case: processing time, accuracy, surface finish, unitary cost, mechanical properties and thermals (resistance) and complexity of the product. The purpose is to use principles of AHP to rank the relative priority of each criterion used in the analysis of each part and from this, opt for the technology in which the parts will be printed.

To better understand this approach, a step by step of the preliminary framework follows:

Step 1: identifying the part to be printed, its features and required characteristics, according to the list of attributes chosen by the authors of the article mentioned at the beginning of this section. For the example to be developed:

- Part: protective cover.
- Function: protection of welding robots end effector.
- Required characteristics: impact resistance, processing time and unitary cost.

Step 2: apply the principles of AHP to determine the ranking of criteria through an n by n matrix, such as Table 2. The matrix must be formulated for each part to be printed. Each row and column on the of this table belongs to a chosen criterion in Step 1. To assist in filling out this matrix, Table 3 (see appendix) must be consulted, that has been adapted from the original built by Saaty in 1977.

Table 2. Example of ranking of criteria for the welding robot protective cover.

		CRITERIA			CALCULATION		
		Impact resistance	Processing time	Unitary cost	Product	Geometric mean	Relative priority
CRITERIA	Impact resistance	1.00	7.00	9.00	63.00	3.979	0.762
	Processing time	0.14	1.00	7.00	0.98	0.993	0.190
	Unitary cost	0.11	0.14	1.00	0.02	0.249	0.048
	Sum					5.230	1

Table 3. Importance table (Adapted from Saaty [13])

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
3	Moderate importance of one over another	Experience and judgment slightly favour one activity over another
5	Essential or strong importance	Experience and judgment strongly favour one activity over another
7	Very strong importance	An activity is strongly favoured and its dominance demonstrated in practice
9	Extreme importance	The evidence favouring one activity over another is of the highest possible order of affirmation

To complete Table 2, one shall consider the criterion chosen as priorities for the part (Step 1). The filling of the table should occur in two ways: a) to fill the left side of the table, related to criteria, according to the information entered in step 1 and the analysis set out in Table 3; and b) to fill the right side of the table, related to calculation; the details of how to be filled are as in the example below. This should be done by the people involved in the application of the method, typically experts in the domain.

Diagonally across the table (left side – related to criteria) values are equal to 1, because as comparisons occur pairwise and should be analyzed according to Table 3 when comparing the impact resistance with itself, it is known that it is of equal importance; soon the number of importance is equal to 1. The other comparisons are:

- Impact resistance and processing time: as the parts suffers severe impacts that can damage it, the impact resistance is much more important than processing time. Therefore, the intersection of these criteria receives the number 7 (according Table 3). As pairwise comparisons occur when the comparison is processing time vs. impact resistance, the degree of importance will be the inverse of other comparison. Therefore, the intersection of processing time vs. impact resistance receives the number $1/7 = 0.14$.
- Impact resistance and unitary cost: as the function of the part is to protect the equipment and the operator, keeping the part intact, the impact resistance is extremely more important than the unitary cost. So, the intersection of the criteria receives the number 9.
- Processing time and unitary cost: as the item is for protection, the time to process the part is much more important than the final cost of it, because it is a security issue. Thus, the intersection of the criteria receives the number 7.

The part of the calculation in Table 2 is performed as follows:

- Product: multiplication of the importance values in each line. That is, in the first line, the product column, the value is 63, which corresponds to multiplication 1, 7 and 9.
- Geometric mean: it's the nth-root of the product with exponent equal to the number of criteria used. For example, first line: $\sqrt[3]{63}=3,979$.
- Relative priority: it's the geometric mean value divided by the sum of all of the geometric means. The relative priority shows which are the most important criteria, the larger the value of the priority, the more important the criterion is.

Step 3: according to the ranking obtained in Step 2, one has to analyze Table 4, that classifies the alignment to the criteria for each type of technology. The table was developed based on the identification of the characteristics of the technologies found in the literature review (Table 1) according to the interpretation of scientific literature.

Table 4. Criteria vs. technologies

Criteria	Technologies		
	SLA	SLS	FDM
Surface finish	excellent	good	regular
Accuracy	excellent	good	regular
Impact resistance	regular	good	good
Flexural strength	low	excellent	excellent
Unitary cost	high	high	medium
Processing time	good	excellent	good
Product complexity	excellent	excellent	good

Example: according to Table 4, the most important item for the part is the impact resistance, followed by processing time and unitary cost. In Table 5, impact resistance is best in SLS and FDM. To decide, which of these is best suited for this part, one has to analyze the second most important criterion, processing time. Between the two aforementioned technologies, the processing time is better on the SLS. Therefore, the most appropriate technology for the production this part is the SLS.

Next section will demonstrate three applications of the preliminary framework also belonging to the exploratory cases performed in the same organization in which the previous example was developed.

4. Cases of the preliminary framework

4.1. Case 1 – Mastic nozzle applicator

Step 1:

- Part: Nozzle applicator Mastic.

- Function: to apply glue on the windshield of vehicles.
- Required characteristics: surface finish (roughness), processing time, accuracy and unitary cost.

Step 2:

- Roughness and processing time: roughness is essential to the part, because the applied glue can adhere to imperfections of the inner wall of the nozzle, dry and, consequently, obstruct passage. Therefore, this criterion is essentially more important than processing time. The degree of importance is not extreme, because as the use of the part is 4 units per day, the processing time may not be high.
- Roughness and accuracy: roughness is also more important than accuracy due to the fact mentioned in the previous item. However, the accuracy is also important, due to the fact that this is coupled to a robot.
- Roughness and unitary cost: the roughness is much more important than the unitary cost, because it undermines the proper functioning of the part and advancement in the production process.
- Processing time and accuracy: accuracy is moderately more important than processing time, but both are essential for the proper functioning of the part and to the advancement of the production process.
- Processing time and unitary cost: processing time is substantially more important than the cost due to the demand.
- Accuracy and unitary cost: accuracy is essentially more important than unitary cost, due to the accuracy required for the proper functioning and coupling of the part.

After identifying the degree of importance of the attributes and performing the calculations, Table 5 was constructed.

Table 5. Step 2 - Mastic nozzle applicator

		CRITERIA				CALCULATION		
		Surface finish	Processing time	Accuracy	Unitary cost	Product	Geometric mean	Relative priority
CRITERIA	Surface finish	1.00	5.00	5.00	7.00	175.00	3.637	0.608
	Processing time	0.20	1.00	0.33	5.00	0.330	0.758	0.127
	Accuracy	0.20	3.00	1.00	5.00	3.000	1.316	0.220
	Unitary cost	0.14	0.20	0.20	1.00	0.006	0.274	0.046
		Sum					5.985	1

Step 3: Based on the ranking of criteria, Table 6 shows that the best technology for the production of the nozzle is the SLA. Because, considering all the identified criteria, each according to their priority, the SLA meets the two main criteria.

Table 6. Step 3 - Mastic nozzle applicator

Criteria	Technologies		
	SLA	SLS	FDM
Surface finish	excellent	good	regular
Accuracy	excellent	good	regular
Processing time	good	excellent	good
Unitary cost	high	high	medium

4.2. Case 2 – Welding support

Step 1:

- Part: support for welding.
- Function: support used in the welding of car bodies.
- Required characteristics: surface finish (roughness) and accuracy.

Step 2:

- Roughness and accuracy: as the main function of this part is to support the car bodies, it is necessary that it does not damage it. Therefore, roughness is extremely more important than accuracy.

Table 7 contains the corresponding values of the part analyzed.

Table 7. Step 2 – Welding Support

		CRITERIA		CALCULATION		
		<i>Surface finish</i>	<i>Accuracy</i>	<i>Product</i>	<i>Geometric mean</i>	<i>Relative priority</i>
CRITERIA	<i>Surface finish</i>	1.00	9.00	9.00	3.000	0.900
	<i>Accuracy</i>	0.11	1.00	0.11	0.332	0.100
	Sum			3.332	1	

Step 3: The technology chosen as the best option for printing this part, according to Table 8 is SLA..

Table 8. Step 3 – Welding support.

Criteria	Technologies		
	<i>SLA</i>	<i>SLS</i>	<i>FDM</i>
<i>Surface finish</i>	excellent	good	regular
<i>Accuracy</i>	excellent	good	regular

4.3. Case 3 – Non-rotating sleeve

Step 1:

- Part: non-rotating sleeve.
- Function: the analyzed piece works as a clutch for a system.
- Required characteristics: accuracy, impact resistance and unitary cost.

Step 2:

- Accuracy and impact resistance: the impact resistance is much more important than accuracy, because if the part has great accuracy and little resistance, the service life will be reduced and problems with frequent changes and maintenance will occur more often.
- Accuracy and unitary cost: the accuracy is essentially more important than the cost, because it's the accuracy that will ensure the proper functioning of the part and the necessary fit with the other parts set.
- Impact resistance and unitary cost: as mentioned above the impact resistance is a decisive criterion for the proper functioning of the production process. Therefore it is extremely more important than unitary cost.

Table 9 contains the corresponding values of the analyzed part.

Table 9. Step 2 - Non-rotating sleeve

		CRITERIA			CALCULATION		
		<i>Accuracy</i>	<i>Impact resistance</i>	<i>Unitary cost</i>	<i>Product</i>	<i>Geometric mean</i>	<i>Relative priority</i>
CRITERIA	<i>Accuracy</i>	1.00	0.14	5.00	0.70	0.888	0.172
	<i>Impact resistance</i>	7.00	1.00	9.00	63.00	3.979	0.773
	<i>Unitary cost</i>	0.20	0.11	1.00	0.02	0.281	0.055
Sum					5.148	1	

Step 3: The best technology to be chosen, according to Table 10, is the SLS, because it will meet the first two criteria of the ranking with a good quality. While SLA serves better in terms of accuracy, but the impact resistance is regular.

Table 10. Step 3 - Non-rotating sleeve

Criteria	Technologies		
	<i>SLA</i>	<i>SLS</i>	<i>FDM</i>

<i>Impact resistance</i>	regular	good	good
<i>Accuracy</i>	excellent	good	regular
<i>Unitary cost</i>	high	high	medium

5. Conclusions and Limitations

The model contains principles of AHP, but its main base are the criteria that must be analyzed in each piece and how each technology meets these criteria. The definitions were established according to the literature and to check the framework efficiency it is necessary to produce the part in the technology indicated and in the others; in order to compare the results and validate the preliminary framework. Therefore it is not a final framework but a preliminary framework. Anyway, the preliminary framework is important for the area of 3D Printing, because to have theoretical background and easy to apply.

To realize the full study, ie not only the application of the model, but also the production of parts, is indicated consider the limitations of each technology and then choose the parts. The most suitable is to consider mainly the parts that can be produced in the simplest technology that is the FDM, because then it is considered that the others can also be produced; and what it will be really tested is the preliminary framework.

This framework still needs further work to be fully validated. Experts need to be consulted in relation to the factibility of the technology selected for each part according to the criteria, as well as the definition of the criteria needs to be improved and better systematized – it still uses much of the opinion of domain experts that are working or interested in the parts being produced.

References

- [1] Barros, C. A Decision Support System to Measure Product Suitability for Additive Manufacturing Processes. Sc.M. thesis, The University of Texas-Pan American, 2014.
- [2] Consafe Logistics, 2015, *Consafe Logistics. Our business, your advantage*, Accessed: 14.04.2015. [Online]. Available: <http://www.consafelogistics.com/in-practice/articles/industrial-4-0>
- [3] Cotteleer, M., Holdowsky, J., Mahto, M. The 3D opportunity primer: the basics of additive manufacturing, Deloitte University Press, 2014.
- [4] Gibson, I., Rosen, W. D., Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Editora: Springer, 2010.
- [5] ASTM INTERNATIONAL. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2013.
- [6] Bland, S., Conner, B. Mapping out the additive manufacturing landscape, *Metal Powder Report*, vol. 70, 2015, pp. 115–119.
- [7] Byun, H. S., Lee, K.H. A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26, 2005, pp. 1338–1347.
- [8] Junior, O. C., Junior, A.S., Sant’Anna, A.M.O. Método de decisão dos processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos, *Gestão da Produção*, vol. 22, 2015, pp. 345–355.
- [9] 3D SYSTEMS. 3D Printer Buyer’s Guide: for Professional and Production Applications.
- [10] Roberson, D. A.; Espalin, D.; Wicker, R. B. 3D printer selection: A decision-making evaluation and ranking model. *Virtual and Physical Prototyping*, 2013, pp. 201–202.
- [11] Queiroz, J.C. B. de. Modelos e métodos de tomada de decisão para apoio. Federal University of Minas Gerais, 2009.
- [12] Marins, C.S, Souza, D. de O., Barros, M. da S. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais – um estudo de caso, In: *XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, Porto Seguro, BA, Brazil, 2009, pp. 1778–1788.
- [13] Moraes, E. A. de., Santaliesra, R. Modelo de decisão com múltiplos critérios para escolha de software de código aberto e software de código fechado. In: *XXXI Encontro da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração (EnANPAD)*, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2007.