

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**DOUGLAS RICARDO HEINEN**

**USO DA MANUFATURA ADITIVA NA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE  
FABRICAÇÃO DE MOLDES DE ALUMÍNIO FUNDIDO EM UMA EMPRESA DO  
RAMO CALÇADISTA**

**São Leopoldo  
2021**

DOUGLAS RICARDO HEINEN

**USO DA MANUFATURA ADITIVA NA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE  
FABRICAÇÃO DE MOLDES DE ALUMÍNIO FUNDIDO EM UMA EMPRESA DO  
RAMO CALÇADISTA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia de Produção, pelo Curso de  
Engenharia de Produção da Universidade  
do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Rafael Veit

São Leopoldo  
2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Oscar e Terezinha, e minha irmã Fabiana, grandes incentivadores para que este sonho pudesse ser realizado. Agradeço por todo esforço, dedicação e exemplo dados a mim, sem dúvida foram combustível que me deu forças para concluir esta etapa tão importante de minha formação.

Agradeço à minha companheira de jornada e vida Karine Schmitt, pela paciência e compreensão nesta longa caminhada. Obrigado por estar sempre ao meu lado, apoiando e incentivando.

A empresa Gravasul e ao Grupo Dass, meus colegas e gestores, pela disponibilidade de tempo e recursos. Agradeço a cada um que de certa forma auxiliou na execução desta pesquisa.

Aos professores do curso de Engenharia de Produção da Unisinos, por compartilharem seu conhecimento técnico e humano, pensando sempre em formar mais do que engenheiros, mas sim formar pessoas.

Por fim, ao meu orientador Professor Douglas Rafael Veit, primeiramente por ter aceitado o desafio, e posteriormente me acompanhar, apoiar, incentivar e principalmente compreender os momentos de dificuldades enfrentados. Obrigado pelas cobranças e pela paciência dedicada.

“A primeira regra de qualquer tecnologia utilizada nos negócios é que a automação aplicada a uma operação eficiente aumentará a eficiência. A segunda é que a automação aplicada a uma operação ineficiente aumentará a ineficiência.”

Bill Gates

## RESUMO

Novas tecnologias estão fazendo o mundo e os negócios serem revolucionados. A Indústria 4.0 conhecida como a quarta revolução industrial está baseada na transformação que ocorre da revolução digital, caracterizada pela convergência de tecnologias inovadoras, como por exemplo a Manufatura aditiva. Neste contexto, esta pesquisa explora os impactos da utilização da Manufatura Aditiva na fabricação de maquetes utilizadas para fundição de moldes em alumínio no setor calçadista. Para atender a este objetivo, inicialmente foi realizada uma revisão sistemática da literatura sobre o tema. A partir desta revisão proposições nortearão a elaboração de um questionário para entrevistas realizadas com gestores da empresa onde foi realizado o estudo de caso. Para realização do estudo de caso, foi mapeado o processo de fabricação dos moldes utilizando a manufatura convencional, e utilizando a manufatura aditiva. Após foi realizada a análise de conteúdo, onde buscou-se identificar convergências e divergências entre a literatura e a prática. Como resultados, destaque para a redução do lead time, a redução no tempo de desenvolvimento de produto, além do aumento na disponibilidade de recursos na empresa em estudo. No entanto tempo de ciclo e baixa resolução e qualidade ainda são pontos de melhoria para a tecnologia. Diante do exposto a manufatura aditiva se consolida como grande avanço tecnológico na manufatura, melhorando processos e auxiliando no posicionamento estratégico da indústria.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva. Indústria 4.0. Manufatura convencional.

## **ABSTRACT**

New technologies are making the world and business to be revolutionized. Industry 4.0 known as the fourth industrial revolution is based on the transformation that takes place in the digital revolution, characterized by the convergence of innovative technologies, such as additive manufacturing. In this context, this research explores the impacts of the use of Additive Manufacturing in the manufacture of molds used for casting aluminum molds in the footwear industry. To meet this objective, a systematic review of the literature on the subject was initially carried out. From this review, propositions guide the elaboration of a questionnaire for interviews carried out with managers of the company where the case study was carried out. To carry out the case study, the mold manufacturing process was mapped using conventional manufacturing, and using additive manufacturing. Afterwards, the content analysis was performed, which sought to identify convergences and divergences between literature and practice. As a result, we highlight the reduction in lead time, the reduction in product development time, in addition to the increase in the availability of resources in the company under study. However cycle time and low resolution and quality are still points of improvement for the technology. Given the above, additive manufacturing is consolidated as a great technological advance in manufacturing, improving processes and helping in the strategic positioning of the industry..

**Palavras-chave:** Additive Manufacturing. Industry 4.0. Conventional Manufacturing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método para Revisão Sistemática da Literatura (RSL).....	17
Figura 2 - Processo de busca, elegibilidade e codificação .....	19
Figura 3 - Revolução Industrial .....	28
Figura 4 - Pilares da Indústria 4.0 .....	30
Figura 5 - Ciclo de desenvolvimento de produto .....	36
Figura 6 - Processos de manufatura aditiva .....	37
Figura 7 - Representação processo FDM.....	38
Figura 8 - Conversão do modelo geométrico para impressão 3D.....	39
Figura 9 - Processo SLA.....	40
Figura 10 - Representação processo LOM.....	41
Figura 11 - Representação processo LENS .....	43
Figura 12 - Representação processo 3DP .....	44
Figura 13 - Classificação dos processos de usinagem.....	47
Figura 14 - Pêndulo para condução da pesquisa .....	49
Figura 15 – Etapas da condução de estudos de caso.....	52
Figura 16 – Fluxo de coleta de dados. ....	59
Figura 17 - Impactos Gerais da Manufatura Aditiva na Literatura.....	61
Figura 18 - Impactos Positivos da Manufatura Aditiva na Literatura .....	62
Figura 19 - Impactos Negativos da Manufatura Aditiva na Literatura .....	62
Figura 20 - Impactos Gerais da Manufatura Aditiva nas Entrevistas .....	70
Figura 21 - Impactos Positivos da Manufatura Aditiva nas Entrevistas.....	71
Figura 22 - Impactos Negativos da Manufatura Aditiva nas Entrevistas .....	71
Figura 23 - Projeto 3D da maquete para fundição .....	90
Figura 24 - Maquete em <i>cibatool</i> - Usinada.....	91
Figura 25 - Maquete impressa .....	91
Figura 26 - Detalhamento da textura aplicada na maquete .....	92
Figura 27 - MFV do processo convencional .....	94
Figura 28 - MFV do processo com a utilização da Manufatura aditiva.....	95

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados de busca em base de dados.....	18
Quadro 2 - Publicações selecionadas .....	19
Quadro 3 – Lista de entrevistados.....	54
Quadro 4 – Roteiro para Entrevistas .....	56
Quadro 5 – Categorias de análise.....	60
Quadro 6 - Triangulação dos Impactos na Categoria Tempo .....	96
Quadro 7 - Triangulação dos Impactos na Categoria Custo .....	97
Quadro 8 - Triangulação dos Impactos na Categoria Geometria.....	98
Quadro 9 - Triangulação dos Impactos na Categoria Otimização de Recursos.....	99
Quadro 10 - Triangulação dos Impactos na Categoria Qualidade .....	101
Quadro 11 - Triangulação dos Impactos na Categoria Interferência Humana .....	102
Quadro 12 - Triangulação dos Impactos na Categoria Investimento .....	103
Quadro 13 - Triangulação dos Impactos na Categoria Inovação .....	104
Quadro 14 - Triangulação dos Impactos na Categoria Sustentabilidade .....	104

## LISTA DE SIGLAS

3D	Três dimensões
3DP	Impressão 3D aglutinante
ABS	Acrilonitrila-butadieno-estireno
CAD	<i>Computer aided design</i>
CAE	<i>Computer aided engineering</i>
CNC	Comando numérico computadorizado
EBM	Fusão por feixe de elétrons
EVA	Etileno Acetato de Vinila
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
IOS	<i>Internet of services</i>
IOT	<i>Internet of Think</i>
LENS	<i>Laser Engineering Net-Shaping</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
MA	Manufatura Aditiva
MFV	Mapa do Fluxo de Valor
RSL	Revisão sistemática da literatura
SLA	Stereolitografia
SLS	Sinterização seletiva a laser
STL	Stereolitografia
TPU	Poliuretano termoplástico
WEF	World Economic Fórum

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2	OBJETIVOS	16
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>16</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>16</b>
1.3	JUSTIFICATIVA	16
<b>1.3.1</b>	<b>Justificativa Acadêmica</b>	<b>16</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Justificativa empresarial</b>	<b>23</b>
1.4	DELIMITAÇÕES	25
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>27</b>
2.1	INDÚSTRIA 4.0	27
<b>2.1.1</b>	<b>Pilares da Indústria 4.0</b>	<b>29</b>
2.1.1.1	<i>Big Data Analytics</i>	30
2.1.1.2	Robôs Autônomos	31
2.1.1.3	Simulação	31
2.1.1.4	Sistemas Integrados	31
2.1.1.5	<i>Internet of Think (IOT)</i>	32
2.1.1.6	Segurança da informação	33
2.1.1.7	Computação na Nuvem	33
2.1.1.8	Realidade aumentada	34
2.1.1.9	Manufatura aditiva	35
2.2	MANUFATURA ADITIVA	35
<b>2.2.1</b>	<b>Tecnologias de Manufatura Aditiva a base líquida</b>	<b>37</b>
2.2.1.1	<i>Fused Deposition Modeling - FDM</i>	37
2.2.1.2	Stereolitografia (SLA)	38
2.2.1.3	<i>Poly Jet</i>	40
<b>2.2.2</b>	<b>Tecnologia de Manufatura Aditiva a base sólida</b>	<b>41</b>
2.2.2.1	<i>Laminated Object Manufacturing (LOM)</i>	41
<b>2.2.3</b>	<b>Tecnologias de Manufatura Aditiva a base de pó</b>	<b>42</b>
2.2.3.1	Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	42
2.2.3.2	Fusão por Feixe de Elétrons (EBM)	42

2.2.3.3	<i>Laser Engineering Net-Shaping (LENS)</i> .....	43
2.2.3.4	Impressão 3D Aglutinante (3DP) .....	44
2.2.3.5	Prometal.....	45
2.3	USINAGEM.....	45
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>49</b>
3.1	DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	49
3.2	MÉTODO CIENTÍFICO .....	50
3.3	MÉTODO DE PESQUISA .....	50
3.4	MÉTODO DE TRABALHO .....	52
<b>3.4.1</b>	<b>Definir uma estrutura conceitual-teórica</b> .....	<b>52</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Planejar o caso</b> .....	<b>53</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Conduzir teste piloto</b> .....	<b>58</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Coletar os dados</b> .....	<b>58</b>
<b>3.4.5</b>	<b>Analisar os dados</b> .....	<b>59</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>61</b>
4.1	ANÁLISE DOCUMENTAL SOBRE OS IMPACTOS DA MANUFATURA ADITIVA .....	61
4.1.1	<b>Tempo</b> .....	62
4.1.2	<b>Custo</b> .....	63
4.1.3	<b>Geometria</b> .....	64
4.1.4	<b>Otimização de recursos</b> .....	65
4.1.5	<b>Qualidade</b> .....	66
4.1.6	<b>Interferência Humana</b> .....	67
4.1.7	<b>Investimento</b> .....	67
4.1.8	<b>Inovação</b> .....	68
4.1.9	<b>Sustentabilidade</b> .....	69
4.2	ANÁLISE DAS ENTREVISTAS SOBRE OS IMPACTOS DA MANUFATURA ADITIVA .....	70
4.2.1	<b>Tempo</b> .....	71
4.2.2	<b>Custo</b> .....	74
4.2.3	<b>Geometria</b> .....	76
4.2.4	<b>Otimização de recursos</b> .....	78
4.2.5	<b>Qualidade</b> .....	80
4.2.6	<b>Interferência Humana</b> .....	82

4.2.7	Investimento.....	85
4.2.8	Inovação .....	86
4.2.9	Sustentabilidade .....	87
4.3	ANÁLISE ESTUDO DE CASO .....	89
4.3.1	Contextualização da empresa.....	89
4.3.2	Estudo de Caso.....	90
4.3.3	Mapeamento do Processo.....	92
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS .....	96
4.4.1	Tempo.....	96
4.4.2	Custo .....	97
4.4.3	Geometria .....	98
4.4.4	Otimização de Recursos .....	99
4.4.5	Qualidade .....	101
4.4.6	Interferência Humana .....	102
4.4.7	Investimento.....	103
4.4.8	Inovação .....	103
4.4.9	Sustentabilidade .....	104
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	106
6	CONCLUSÃO.....	111
	REFERÊNCIAS .....	113
	APENDICE A: PROTOCOLO DE REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA...	119

## 1 INTRODUÇÃO

O mundo vem mudando rapidamente, o mercado se reinventando e novas tecnologias estão surgindo para suprir demandas enfrentadas pela indústria. É chegada uma revolução tecnológica que mudará a maneira como se vive, trabalha e se relaciona. esta é uma transformação diferente de tudo que a sociedade já experimentou, e ainda não se sabe mensurar todos seus impactos. (WEF, 2016).

A primeira revolução industrial se deu com o surgimento da máquina a vapor, onde a produção mecanizada abriu caminho para a urbanização e o desenvolvimento econômico para as cidades e indústrias. Mais tarde, a segunda revolução ficou conhecida por ser a era da ciência, fomentada pela eletricidade, grandes descobertas físicas transformaram a forma de viver da sociedade. Posteriormente a terceira revolução surgiu com a automação e o advento digital, fazendo uso de computadores e internet, e mudando a forma de consumir e transmitir informação do analógico para o digital. (Salesforce, 2018; WEF, 2016).

A quarta revolução industrial, chamada de Indústria 4.0, está baseada na transformação que está acontecendo através da revolução digital, caracterizada pela convergência de tecnologias inovadoras como robótica avançada, inteligência artificial, internet das coisas, manufatura aditiva, entre outras. (WEF, 2017 ; Salesforce, 2018; RUBMANN, 2015).

Para o Boston Consulting Group, empresa de consultoria de gestão global, (RUBMANN, 2015) a Indústria 4.0 irá transformar projeto, fabricação e operação. A conectividade e a interação entre máquina, peças e os seres humanos, tornarão os sistemas produtivos 30% mais rápidos e 25% mais eficientes.

Dentro deste cenário disruptivo, algumas práticas inovadoras, como a manufatura aditiva, impulsionam o desenvolvimento de novos produtos, e agregam inúmeros benefícios que impactam de forma positiva na sociedade. A manufatura aditiva, consiste na produção de peças por meio da impressão 3D, onde a concepção de uma peça se dá pela adição de camadas, evitando o desperdício, se opondo ao processo convencional da fabricação chamado de subtrativo, onde há a remoção de material para fabricação de peças. (VDI-Brasil, ).

O processo de manufatura aditiva já possui papel de destaque em alguns setores das indústrias automotiva, aeroespacial, energia e saúde. Sua utilização impacta diretamente na redução de tempo de desenvolvimento de produção, além do

custo operacional, sendo aplicada diretamente na área de protótipos, ferramentas ou partes funcionais de processos. Entre suas vantagens, pode-se destacar a viabilidade de seu uso para produção de produtos em baixa escala, além do uso para fabricação de protótipos. (VDI-Brasil, 2019).

Dada a relevância do tema, esta pesquisa explora a utilização da manufatura aditiva no âmbito calçadista, mais especificamente no processo de fabricação de moldes para calçado.

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O futuro da indústria está sendo moldado por megatendências como a globalização, escassez de recursos, mudanças climáticas e tecnológicas, surgindo uma necessidade de implementar novos processos de manufatura (SUAREZ, et al., 2019).

Tecnologias disruptivas estão transformando de ponta a ponta as cadeias de produção e modelos de negócios nos mais diversos setores da economia. A manufatura aditiva é uma destas tecnologias disruptivas que estão proporcionando uma maior flexibilidade de produtos e estratégias de manufatura, oportunizando novos modelos de negócios (WEF, 2017).

O mercado global de manufatura aditiva confirmou seu robusto crescimento e foi estimado em US\$ 12,8 bilhões no ano de 2020, levando em consideração os impactos da Covid-19 (WHOLERS ASSOCIATES, 2021). Estimativa semelhante foi apresentada pela *Hubs* (2021), onde aponta em seu relatório anual um crescimento da tecnologia em 21% no ano de 2020, sendo estimado em US\$ 12,6 bilhões, e apontando uma tendência de crescimento de 17% a cada ano para os próximos três anos, e podendo atingir valor de US\$ 37,2 bilhões no ano de 2026.

A manufatura aditiva apresenta grande potencial para desencadear uma nova revolução industrial, e suas características econômicas são tão distintas que as decisões de investimento são altamente estratégicas (WELLER; KLEER; PILLER, 2015). A manufatura aditiva não pretende substituir os métodos convencionais de produção, no entanto tende a revolucionar áreas de nicho (ATTARAN, 2017).

Para Frazier (2014) a manufatura aditiva tem potencial de revolucionar o cenário global de fabricação e logística de peças, tendo em vista a possibilidade da fabricação descentralizada e produção de peças sob demanda. Com isso, a tecnologia

oferece potencial de redução de custo e sustentabilidade reduzindo a pegada de carbono, por meio da otimização do projeto e redução do fluxo de resíduos de materiais.

Os potenciais benefícios da manufatura aditiva são percebidos por empresas dos mais distintos mercados, e a indústria do calçado é um exemplo onde a tecnologia já vem sendo utilizada a anos para teste de novos protótipos e acelerar os processos de inovação (WELLER; KLEER; PILLER, 2015).

Para aumentar a competitividade das empresas, é imperativo desenvolver processos e produtos inovadores baseados em novas tecnologias (SUAREZ, et al., 2019).

A crescente complexidade de produtos e o aumento da competitividade de mercado, tem impactado em mudanças nos processos de desenvolvimento de produtos das empresas, seja para incremento de qualidade em seus produtos ou para redução no seu tempo de desenvolvimento. (VOLPATO, 2017).

Dentro do atual contexto econômico e industrial, o setor calçadista tem buscado melhorar a manufatura de seus produtos a fim de atingir metas de custo, qualidade e tempo. Solas de sapato são extremamente complexas de projetar e manufaturar devido a sua forma orgânica e restrições de fabricação (DAVIA-ARACIL; JIMENO-MORENILLA; SALAS, 2016).

A manufatura aditiva é uma tecnologia transformadora. Seu impacto pode ser percebido em design, custo e entrega dos produtos, tendo reflexo nos modelos de negócios e logísticas globais (FRAZIER, 2014). Para Volpato (2017), o sucesso comercial de uma empresa está diretamente ligado à sua habilidade em identificar as necessidades do cliente e rapidamente desenvolver produtos para satisfazê-las.

De acordo com Santos (2021), uma das formas de as organizações reformularem com ganhos e benefícios o processo de desenvolvimento de produto é a utilização da manufatura aditiva. Sua adoção causa impacto positivo nos sistemas de produção, através da redução de estoque de produtos acabados e no seu tempo de entrega.

Quando comparada aos processos tradicionais de manufatura, como a usinagem, a manufatura aditiva apresenta algumas vantagens relevantes ao sucesso do desenvolvimento de produto, como a liberdade geométrica, menor desperdício de materiais e melhor eficiência energética, além de não necessitar dispositivos de fixação nem setups de máquina. Contudo a tecnologia também tem seus limitantes

em relação a usinagem, as propriedades dos materiais não são as mesmas dos materiais obtidos pelos processos convencionais. Outro limitante é referente a qualidade do produto, a precisão e o acabamento superficial são inferiores aos obtidos no processo de usinagem, além de o processo ainda ser mais lento e por vezes mais caro. (VOLPATO, 2017; SANTOS 2021).

Em geral, o processo convencional de manufatura, envolvendo metalurgia e usinagem, tem custos fixos, como ferramental e espaço de fabril, mais elevados, no entanto seus custos variáveis como matéria-prima são inferiores aos da manufatura aditiva, o que faz com que a manufatura aditiva tenha seu uso avaliado para cada modelo de negócio, e tendo como uso preferencial em produção de pequenos lotes. Outro valor a ser considerado se refere a velocidade, versatilidade e adaptabilidade, onde a manufatura aditiva permite a fabricação *just-in-time*, sendo este um valor não quantitativo (FRAZIER, 2014).

Para Santos (2021), uma das aplicações da manufatura aditiva que desperta profundo interesse, é a sua utilização para fabricação de ferramental, ou seja, a manufatura de dispositivos, modelos e maquetes para vários processos de fabricação, como por exemplo a fabricação de eletrodos de eletroerosão ou modelos e maquetes para confecção de moldes para fundição.

A manufatura aditiva já é utilizada na indústria calçadista em diversas finalidades, desde a fabricação dos moldes, até para a customização do produto. Na fabricação dos moldes onde as solas são injetadas, a manufatura aditiva tem sido utilizada como protótipos de base em um molde de alumínio, que é fabricado por técnica de fundição. A manufatura aditiva é particularmente interessante nesse processo quando a sola é altamente texturizada, sendo esta textura aplicada diretamente ao protótipo (ARACIL; MORENILLA; SALAS, 2016).

Volpato (2017), percebe um interesse crescente da indústria metalmeccânica quanto ao uso da manufatura aditiva, porém ainda com certa dificuldade em encontrar um equilíbrio na sua viabilidade de implementação.

Tendo em vista este o contexto apresentado, surge a questão que norteia esta pesquisa: Quais os impactos percebidos pelo uso de manufatura aditiva na confecção de maquetes utilizadas no processo de fabricação de moldes de alumínio fundido?

## 1.2 OBJETIVOS

No intuito de responder à questão norteadora desta pesquisa, o trabalho apresenta os seguintes objetivos, divididos em geral e específicos, descritos a seguir.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo geral analisar os impactos da utilização da manufatura aditiva, na fabricação de maquetes utilizadas no processo de fabricação de moldes fundidos em alumínio para fabricação de solas para calçados esportivos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, esta pesquisa possui os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar na literatura as principais características, limitações e possibilidades de uso da manufatura aditiva nos processos de fabricação;
- b) Mapear o processo convencional de fabricação dos moldes fundidos em alumínio;
- c) Comparar os processos de fabricação convencional e com o uso da manufatura aditiva.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

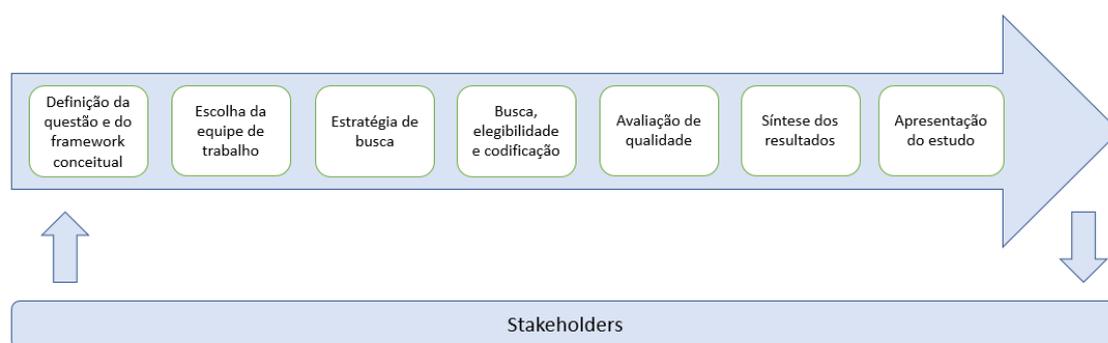
Nesta seção, são apresentados os motivos que justificam esta pesquisa em perspectivas de diferentes interessados no tema, sendo eles, a academia, e a indústria.

### 1.3.1 Justificativa Acadêmica

No que tange à academia, esta pesquisa contribuirá para a literatura e aumento da base de referências para estudos futuros, visto que a utilização da manufatura aditiva como auxiliar no processo de fabricação tradicional de moldes fundidos em alumínio, ainda é assunto que carece de estudos mais aprofundados.

Para justificar a relevância da presente pesquisa, foi realizada uma revisão sistemática da literatura ( ), método proposto por Morandi e Camargo (2015), a fim de proporcionar uma visão mais abrangente e robusta sobre o tema. Esta revisão consiste em uma definição da estratégia de pesquisa, afim de avaliar temas que são relevantes ou que possam contribuir de alguma forma para o estudo, seja para inspirar novas ideias que solucionem o problema de pesquisa proposto. Morandi e Camargo (2015). A figura 1 apresenta os passos do método proposto para a revisão sistemática da literatura.

Figura 1 - Método para Revisão Sistemática da Literatura (RSL)



Fonte: Morandi e Camargo (2015, p.146)

De acordo com o método, a primeira etapa consiste em definir o tema central de pesquisa, no intuito de elaborar um framework conceitual, que será o ponto de partida para compreensão da revisão e seu contexto. (Morandi e Camargo, 2015), neste caso os impactos da manufatura aditiva. Ainda segundo o método, esta pesquisa trata de uma revisão configurativa, que visa explorar um tema de forma mais abrangente, fazendo uso de questões abertas respondidas de forma qualitativa.

A segunda etapa do método, é a escolha da equipe de trabalho. Morandi e Camargo (2015) indicam que a pesquisa deva ser realizada por uma equipe a fim de mesclar conhecimento técnico e metodológico, além de habilidades necessárias à revisão. No caso desta monografia, a revisão foi feita de forma individual pelo acadêmico, com a supervisão de seu orientador.

Dando sequência ao método, a terceira etapa é caracterizada pela definição da estratégia de busca. Nela são definidos os termos de busca, as fontes consultadas, além dos critérios de inclusão e exclusão. (MORANDI; CAMARGO, 2015). Os termos escolhidos para esta revisão foram voltados a manufatura aditiva de uma forma geral, e também dentro do cenário calçadista, sendo estes pesquisados em inglês, e em

síntese apresentados no Quadro 1 com os respectivos resultados encontrados. Não foi imposto limite temporal nas buscas, visto que o tema de pesquisa é considerado um tema recente. Artigos encontrados em duplicidade foram considerados apenas na base onde foi encontrado primeiro.

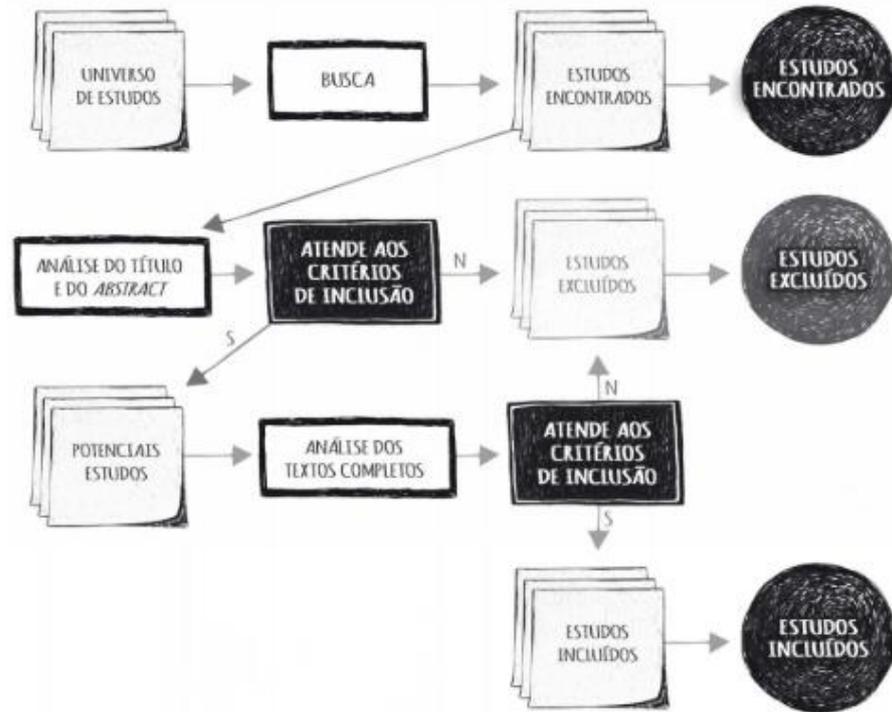
Quadro 1 - Resultados de busca em base de dados

Base de dados	Termo de busca	Índice	Títulos encontrados	Títulos selecionados	Resumos selecionados	Artigos selecionados
CAPES	"Additive Manufacturing"	Título	3638	432	25	5
	"Additive Manufacturing" AND "footwear industry"	Texto completo	4	1	1	1
	"Additive Manufacturing" AND "Shoes"	Texto completo	27	7	4	3
EBSCO	"Additive Manufacturing"	Título	2214	326	18	4
	"Additive Manufacturing" AND "footwear industry"	Texto completo	8	1	0	0
	"Additive Manufacturing" AND "Shoes"	Texto completo	138	7	2	0
SCIELO	"Additive Manufacturing"	Título	56	4	2	1
	"Additive Manufacturing" AND "footwear industry"	Texto completo	0	0	0	0
	"Additive Manufacturing" AND "Shoes"	Texto completo	0	0	0	0
Total dos resultados			6085	778	52	14

Fonte: Elaborado pelo autor

Para construção do Quadro 1, foi utilizado o processo de busca, elegibilidade e codificação proposto por Morandi e Camargo (2015), conforme é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Processo de busca, elegibilidade e codificação



Fonte: Morandi e Camargo (2015, p.154)

Com base no processo de elegibilidade proposto por Morandi e Camargo (2015), foi realizada a análise dos títulos encontrados, e selecionados aqueles que estavam alinhados ao tema desta pesquisa. Após esta primeira seleção, foi feita a leitura dos resumos dos artigos pré-selecionados e novamente foram selecionados os resumos os quais o tema estavam alinhados com o propósito desta pesquisa. Por fim, foi realizada a leitura na íntegra dos artigos para definição dos estudos que venham a contribuir nesta monografia. Os artigos selecionados para estudo estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2 - Publicações selecionadas

Título	Autor	Ano	Abordagem
Manufatura aditiva aplicada na fabricação de insertos para moldes de injeção termoplásticos	Gastão Boccardi Marques Junior Carlos Alberto Costa	2019	Implementação
Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects	Insaf Bahnini Mickael Rivette Ahmed Rechia Ali Siadat Abdelilah Elmesbahi	2018	Conceitual

Processo, complexidade e qualidade: comparação entre artefatos semelhantes produzidos por diferentes tecnologias de Prototipagem Rápida	Paula Lumi Goulart Nishimura Galdenoro Botura Junior Osmar Vicente Rodrigues Amanda Coelho Figliolia Livia Garcia Ferrari	2018	Comparativo
Unlocking innovation in the sport industry through additive manufacturing	Marlon Meier Kim Hua Tan	2018	Implementação
A review of digital manufacturing-based hybrid additive manufacturing processes	Li Chong Seeram Ramakrishna Sunpreet Singh	2017	Conceitual
The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing	Mohsen Attaran	2017	Comparativo
Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints	Mary Kathryn Thompson Giovanni Moroni Tom Vaneker Georges Fadel R. Ian Campbell Ian Gibson Alain Bernard Joachim Schulz Patricia Graf Bhrihu Ahuja Iomemo Martina	2016	Conceitual
A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing	Yunlong Tang Kieran Mak Yaoyao Fiona Zhao	2016	Implementação
Additive manufacturing–integrated hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis	Guha Manogharan Richard A Wysk Ola L.A. Harrysson	2015	Implementação
Additive manufacturing technologies: state of the art and trends	Julien Gardan	2015	Conceitual
Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited	Christian Weller Robin Kleer Frank T. Piller	2015	Conceitual
Additive manufacturing: A framework for implementation	Stephen Mellor Liang Hao David Zhang	2014	Comparativo

Application of additive manufacturing techniques in sports footwear	Vivek Manoharan Siaw Meng Chou Steph Forrester Gin Boay Chai Pui Wah Kong	2013	Conceitual
A Review of Additive Manufacturing	Kaufui V. Wong Aldo Hernandez	2012	Conceitual

Fonte: Elaborado pelo autor

Fazendo a análise dos estudos encontrados, alguns artigos apresentam a manufatura aditiva de forma conceitual (BAHNINI et al., 2018; MEIER; TAN, 2018; THOMPSON et al., 2016; GARDAN, 2015; WELLER; KLEER; PILLER, 2015; MANOHARAN et al., 2013; WONG; HERNANDEZ, 2012); outros abordam a implementação do uso da manufatura aditiva (JUNIOR; COSTA, 2019; CHONG; RAMAKRISHNA; SINGH, 2017; TANG; MAK; ZHAO, 2016; MANOGHARAN; WYSK; HARRYSSON, 2015; MELLOR; HAO; ZHANG, 2014); por fim alguns dos artigos selecionados apresentam um comparativo entre o uso da manufatura aditiva e os processos tradicionais de manufatura (NISHIMURA et al., 2018; ATTARAN, 2017). Não foi encontrado nenhum estudo que aborde o uso da manufatura aditiva como auxiliar ao processo de fabricação de moldes para calçados, justificando a relevância do presente estudo a contribuir com o desenvolvimento acadêmico.

Após classificados, se faz relevante uma análise crítica dos artigos selecionados para formar a base do material de pesquisa a ser consultado, no intuito de auxiliar o objeto de estudo desta pesquisa.

Chong, Ramakrishna e Singh (2017), Gardan (2015) e Wong e Hernandez (2012), abordam de forma global os conceitos da manufatura aditiva. Apresentam as variações das tecnologias e processos, características inerentes, vantagens, desvantagens, entre outros conceitos a fim de gerar conhecimento sobre o tema.

Manogharan, Wysk e Harrysson (2015), também abordam a manufatura aditiva de forma conceitual, contudo, analisa o contexto econômico da implementação da manufatura híbrida, onde a manufatura aditiva e a manufatura subtrativa atuam de forma simultânea.

Ainda abordando a manufatura aditiva de forma conceitual, além dos conceitos globais, Thompson et al. (2016), explora questões relacionadas ao design e redesenho. Manoharam et al. (2013), por sua vez, faz uma relação dos tipos de tecnologias de manufatura aditiva, com a sua aplicação, tendo em vista a área de

calçado. Weller, Kleer e Piller (2015) analisam os impactos da manufatura aditiva nas estruturas de mercado, como estes serão impactados pelo seu uso.

Também de forma conceitual, Mellor, Hao e Zhang (2014), propõem um modelo estrutural normativo de fatores de implementação relacionados a manufatura aditiva, isto com base em análise qualitativa de estudos de caso já existentes. Bahnini et al. (2018), além de apresentar conceitos globais, faz um comparativo superficial entre os processos aditivo e subtrativo, porém não analisa um caso específico.

Os artigos conceituais selecionados, foram considerados relevantes para formar conhecimento sobre a tecnologia de forma mais aprofundada. Alguns destes, norteiam o referencial teórico desta monografia.

Attaran (2017), apresenta os desafios da implementação da manufatura aditiva, além disso discute vantagens e desvantagens do processo em comparação a meios tradicionais de manufatura. Nischimura et al., (2018) estabelece um comparativo entre a manufatura aditiva e o processo de fabricação subtrativo de usinagem, no caso CNC. Estes artigos comparam as manufaturas aditiva e subtrativa, conceito este, que é objeto desta pesquisa.

Meier e Tan (2018) fazem uma análise de estudos de caso práticos da aplicação da manufatura aditiva em casos específicos na área esportiva. Apresentam alguns casos da implementação da impressão 3D em grandes players da área de calçado esportivo, como Nike, Adidas e New Balance. Esta monografia, aborda um estudo de caso, de implementação da manufatura aditiva na fabricação de moldes para calçado esportivo, gerando impacto na cadeia de suprimentos como um todo.

Afim de explorar a aplicação da manufatura aditiva no processo de fabricação de moldes e matrizes, Junior e Costa (2019), apresentam um estudo sobre as viabilidades técnicas e econômicas na fabricação de insertos metálicos. Por se tratar de um estudo na área de fabricação de moldes, este estudo se torna relevante ao tema de pesquisa desta monografia.

Por fim, Tang, Mak e Zhao (2016), apresentam uma análise do impacto ambiental da manufatura aditiva, em comparação a manufatura subtrativa realizada em centros de usinagem, esta pesquisa apresenta um caso prático de implementação da manufatura aditiva na fabricação de um suporte para motor. Este artigo foi selecionado tendo em vista a relevância que deve ser dada ao tema sustentabilidade na otimização dos processos industriais.

Os artigos selecionados abordam de temas similares ao proposto por esta pesquisa, porém nenhum deles evidencia uma análise dos impactos do uso da manufatura aditiva especificamente na confecção de maquetes, no processo de fabricação de moldes fundidos, sendo este o objetivo deste trabalho. Sendo assim, esta monografia busca discutir estes impactos e agregar a academia.

### **1.3.2 Justificativa empresarial**

O uso da manufatura aditiva já é realidade nas organizações no mercado mundial. Mais de 70% de indústrias americanas utilizam a impressão 3D em seus processos, seja para protótipos ou produtos finais. (PWC, 2016).

Para a Folha de São Paulo (2018), além da possibilidade de customização, a manufatura aditiva auxilia na aceleração do tempo de desenvolvimento de produto, o que acarreta uma redução de custo para as empresas, possibilitando maior crescimento e competitividade.

Segundo o *Markets and Markets* (2019), instituto de pesquisa na área de negócios, o mercado da manufatura aditiva terá uma representatividade em valor aproximado US\$ 42.9 bilhões até o ano de 2025.

Atualmente o setor é avaliado em aproximadamente US\$ 10 bilhões, tendo crescido quase 62% nos últimos dois anos, conforme divulgado por All3dp, revista alemã sobre impressão 3D.

Para a *Forbes* (2019), as previsões de mercado são um pouco mais conservadoras. Segundo a revista, as previsões para o mercado da manufatura aditiva para 2020 são de movimentar US\$15.8 bilhões em todo o mundo e projeta um crescimento da receita gerada para US\$ 23,9 bilhões em 2022 e US\$ 35,6 bilhões em 2024. Conforme o relatório Wohlers (2018), divulgado anualmente pela Wohlers Associates o crescimento do mercado foi de 21%, e movimentou mais de US\$7 bilhões no ano de 2018.

A Formlabs, grande player do setor, considera que a manufatura aditiva atua na otimização em três níveis; peça, processo e produto. Podendo ser utilizado de forma conjunta ou isolada. Em cada um destes níveis as considerações são diferentes, porém para ambos, fatores como tempo, material, mão de obra e qualidade, devem ser considerados para cálculo de otimização. (Formlabs, 2019; 3D Printing Industry, 2019).

Na otimização a nível de peça, a geometria da peça atende os requisitos de design e desempenho, minimizando tempo e custos de fabricação. A nível de processo, o impacto se dá pela redução no tempo de fabricação de determinado produto, uma vez que são reduzidas etapas do processo fabricação ante ao processo tradicional, o que impacta no lead time do processo, e também no custo de operação. Já a nível de produto, a impressão 3d auxilia na personalização em massa, podendo experimentar novas geometrias em produtos de uso final. (Formlabs, 2019).

Casos de sucesso da implementação da manufatura aditiva são dos mais variados. A Boeing, referência no setor de aviação, já utiliza componentes oriundos da manufatura aditiva em aviões comerciais e aeronaves de uso militar. (Época Negócios, 2018). Na área automobilística podemos citar a BMW, que imprime mais de 140 mil peças por ano e a Volkswagen, que por sua vez, formou parceria com a HP, com objetivo de fabricação de grandes lotes de peças impressas em metal. Segundo o portal *3D Printing Media* (2019), o grande impacto neste caso foi econômico em comparação aos processos tradicionais de manufatura.

Analisando este cenário, é possível ver uma tendência de mercado voltada a utilização da manufatura aditiva nos mais diversos segmentos da indústria a nível mundial, e o setor calçadista também é um setor onde está ocorrendo a sua implementação gradativa.

A área calçadista também tem papel de destaque no uso da manufatura aditiva. A Nike, desenvolveu um tênis com cabedal de alta performance fabricado em camadas de poliuretano termoplástico (TPU). (Tecnundo, 2018; Exame, 2019). A New Balance, implementou a impressão 3d na fabricação da entressola, o que além de auxiliar no amortecimento, trouxe outro benefício de grande relevância, que foi a eliminação da dependência de moldes para injeção da peça, o que reduziu o tempo de desenvolvimento do produto em meses. (*3D Printing Industry*, 2019).

A Adidas por sua vez, implementou o uso da manufatura aditiva na fabricação de soldados, o que trouxe uma redução de 10% no peso em relação aos modelos tradicionais. A tecnologia fez com que o tempo de produção fosse reduzido em produtos personalizáveis. Além disso, facilita na criação de protótipos, antecipando lançamentos de novos produtos. (EXAME, 2019).

A implementação da manufatura aditiva não impacta apenas na forma de produto, mas também no seu potencial de remodelar processos de produção. Um exemplo disso vem da parceria entre a Carbon e a Adidas onde em 11 meses foi

desenvolvido e lançado um modelo de tênis, sendo que no método tradicional, este tempo pode levar de 15 a 18 meses. (Forbes, 2018).

Outro impacto relevante trazido pela manufatura aditiva é a diversidade do ecossistema industrial, uma vez que com a simplificação e redução dos custos de desenvolvimento de protótipos permite a entrada de novos players em área que antes eram mais fechadas. (Época negócios, 2018).

Segundo a Abicalçados (2019), dentre os dez maiores produtores mundiais de calçados, seis estão no mercado asiático, sendo que China, Índia e Vietnã, juntos, representam 72,3% da produção mundial, o Brasil, representa 4,4%, justificando a necessidade de investir em novas tecnologias para manter o mercado nacional competitivo.

Desta forma, a análise da implementação do uso da manufatura aditiva no processo de fabricação de moldes para calçado é de extrema relevância para o contexto empresarial, tendo em vista os impactos gerados tanto em custo quanto em redução no tempo de desenvolvimento de produto, fatores estes essenciais ao sucesso das organizações.

#### 1.4 DELIMITAÇÕES

Esta pesquisa tem por objetivo analisar os impactos da utilização da manufatura aditiva, como elemento auxiliar em um processo de fabricação, portanto, se faz necessário estabelecer limites para aprofundar somente ao tema de interesse.

Tendo em vista delimitação exposta acima, especificações técnicas de máquina e materiais não serão objeto desta pesquisa. Assim como demais informações relacionadas a clientes serão preservadas por questões de sigilo.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. Inicia pela introdução, onde é exposta uma apresentação contextual sobre a relevância do tema. Neste capítulo são apresentados também, o problema de pesquisa, seus objetivos, justificativas e delimitações.

O segundo capítulo, é composto pela fundamentação teórica, etapa que dará embasamento teórico para a pesquisa. Este referencial foi obtido através de

publicações de outros pesquisadores sobre o tema em questão, e está apresentado em duas grandes áreas, sendo elas a manufatura aditiva, e os processos de fabricação empregados no estudo de caso.

O terceiro capítulo apresenta os procedimentos metodológicos empregados no estudo de caso. Seguido pelos capítulos quatro e cinco, onde são apresentadas as análises e discussões dos resultados obtidos no estudo.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões e considerações finais desta pesquisa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos que norteiam o tema da pesquisa, com intuito de embasar o estudo e facilitar sua compreensão e apoio as conclusões. Inicialmente são apresentados conceitos sobre a indústria 4.0 e suas tecnologias, e após uma contextualização mais específica em relação a manufatura aditiva, tema que norteia esta monografia.

### 2.1 INDÚSTRIA 4.0

Historicamente a indústria já passou por mudanças na forma de produzir e pensar a produção, estas mudanças foram chamadas de “revoluções”, a fim de descrever uma mudança abrupta e radical. O termo “Indústria 4.0” representa a quarta revolução industrial. (SCHWAB, 2016).

A primeira revolução se deu no século XVIII, com o surgimento da máquina a vapor, dando início produção mecânica. Neste momento foi possível dar início a produção em série de produtos, o que gerou um novo modelo econômico. (SCHWAB, 2016; STEVAN JR.; LEME; SANTOS, 2018).

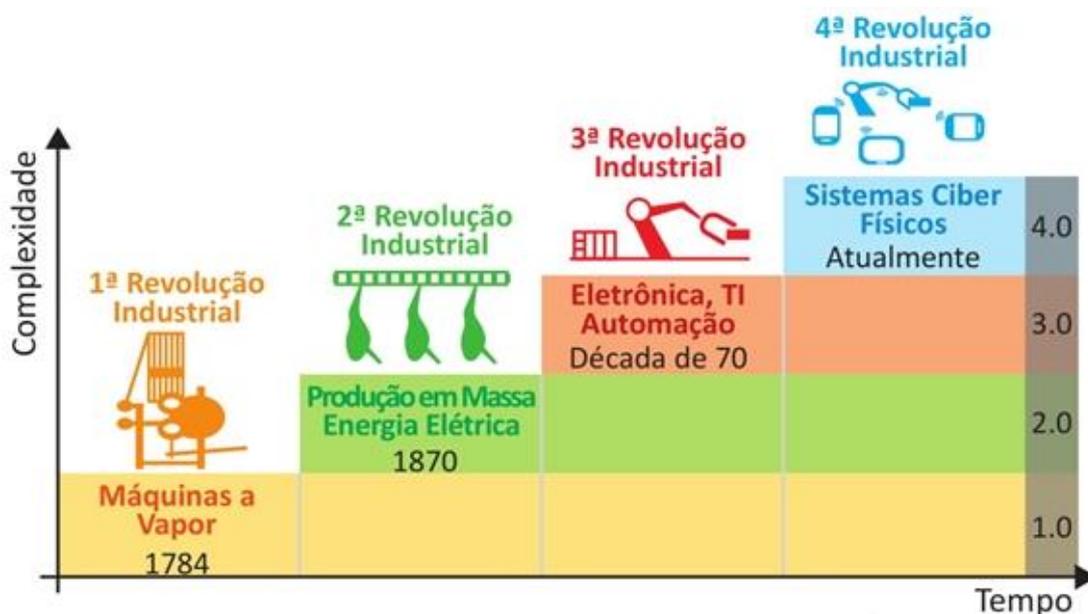
A segunda revolução aconteceu entre os séculos XIX e XX, tendo como seu mote o advento da eletricidade e da linha de montagem. Neste período também houveram avanços significativos na indústria química e petroleira. Um dos grandes nomes do período foi Henry Ford que criou o conceito de produto único, visando aumentar a eficiência da produção e reduzir os custos de montagem. (SCHWAB, 2016; STEVAN JR.; LEME; SANTOS, 2018).

Na década de 60, ocorre a terceira revolução industrial, esta conhecida como revolução digital. O Surgimento dos semicondutores e dos controladores lógicos programáveis (CLP), revolucionando a comunicação, e a automação em processos industriais. Neste período surgiu o sistema Toyota de produção, baseado na produção enxuta. (SCHWAB, 2016; STEVAN JR.; LEME; SANTOS, 2018; SACOMANO et al., 2018).

A quarta revolução baseia-se na revolução digital. Teve seu início do fim dos anos 90 com a evolução a internet e surgimento de inteligência artificial. As tecnologias de software estão se tornando mais sofisticadas e transformando a sociedade e economia. Surge o conceito de fábricas inteligentes, onde os sistemas

físicos e virtuais cooperam entre si. (SCHWAB, 2016; SACOMANO et al., 2018). A figura 3 ilustra a evolução histórica da produção industrial.

Figura 3 - Revolução Industrial



Fonte: COSTA, 2017

Para Coelho (2016), a combinação de múltiplas tecnologias farão com que as organizações repensem a gerência sobre seus negócios e processos.

A indústria 4.0 auxilia a encontrar soluções para a escassez de recursos, além de reduzir os impactos da ineficiência energética e aumento da produção. Isso é possível através da integração dos processos de fabricação e os sistemas interagindo entre si. (STEVAN JR.; LEME; SANTOS, 2018).

Lee et al. (2015) define a Indústria 4.0 como um conceito que engloba as principais inovações tecnológicas dos campos de automação, controle e tecnologia da informação, aplicadas aos processos de manufatura.

De acordo com Brettel et. al. (2014), para desenvolvimento e implementação da indústria 4.0, existem alguns princípios que definem os sistemas inteligente, são eles:

- I. Capacidade de operação em tempo real: trata da aquisição e tratamento de dados instantâneos, auxiliando o processo de tomada de decisão;
- II. Virtualização: este conceito propõe uma fábrica virtual, permitindo rastreabilidade e monitoramento remoto dos processos, através de sensores alocados ao longo da planta;

- III. Descentralização: sistemas *cyberfísicos* tomam decisões independentes, de acordo com as necessidades da produção em tempo real. As máquinas além de receber comandos, passam a fornecer informações sobre os ciclos de trabalho;
- IV. Orientação a serviços: utilização dos conceitos de *internet of services*;
- V. Modularidade: acoplamento e desacoplamento de módulos de produção, adaptando de acordo com a demanda, oferecendo maior flexibilidade para alterar tarefas das máquinas.

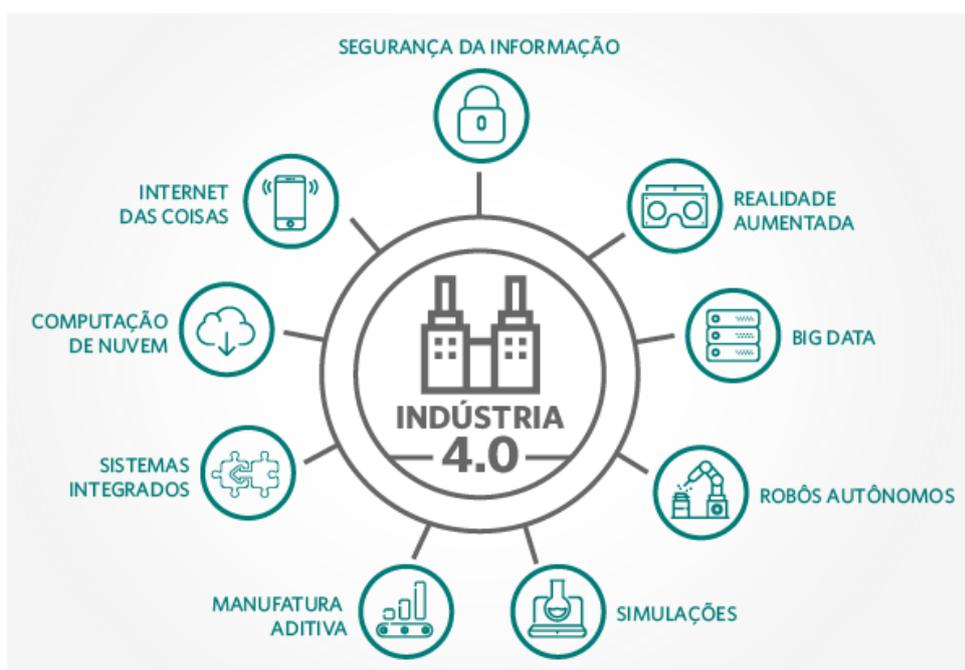
Para Spricigo (2018), o mercado competitivo faz com que as empresas busquem alternativas para diferenciar-se e crescer. Dentre os benefícios que a implementação da indústria 4.0 podem proporcionar, é possível listar alguns deles:

- a) Redução de custos;
- b) Aumento da segurança;
- c) Redução de erros;
- d) Otimização de processos;
- e) Transparência em dados;
- f) Customização de produtos.

### **2.1.1 Pilares da Indústria 4.0**

Tendo em vista esta intereção de processos, são apresentados os pilares que sustentam os conceitos da indústria 4.0: *big data analytics*, robôs autônomos, simulação, sistemas integrados, *internet of thing*, segurança da informação, computação de nuvem, realidade aumentada e manufatura aditiva, conforme apresenta a figura 4. Estes conceitos serão abordados individualmente a seguir.

Figura 4 - Pilares da Indústria 4.0



Fonte: Endeavor, 2017

#### 2.1.1.1 *Big Data Analytics*

Big Data refere-se a grande quantidade de dados armazenados instantaneamente, originários de milhões de sistemas conectados a rede. Estes sistemas produzem dados em tempo real. Equipamentos de produção, sistemas de gestão, são algumas das fontes destes dados. (COELHO, 2016).

Existem quatro fatores que sustentam a abordagem big data, conhecidos como os 4V's, são eles: volume, variedade, velocidade e veracidade. Volume e variedade se correlacionam, a multiplicidade de dispositivos com acesso a rede acarretam em inundações de dados com potencial de análise. (RIBEIRO, 2014).

A análise de dados na manufatura foi implementada visando otimizar a qualidade da produção. Dentro do conceito de indústria 4.0, estes dados oriundos de diferentes fontes, seja de equipamentos ou de sistemas, formam um padrão, para apoiar na tomada de decisão. (RUBMANN, 2015; COELHO, 2016). Fazer a análise correta destes dados é o grande desafio para as organizações a fim de tornarem-se mais assertivas. (STEVAN JR.; LEME; SANTOS, 2018).

### 2.1.1.2 Robôs Autônomos

Uma das chaves para controlar as máquinas a fim de tornar o processo inteligente, são os robôs autônomos. (MUELLER et al., 2017). Com os avanços tecnológicos, robôs industriais estão se tornando cada vez mais versáteis e capazes de realizar tarefas complexas. (STRANGE; ZUCHELLA, 2017).

Dentro do conceito de indústria 4.0, os robôs tendem a interagir com outras máquinas e seres humanos, tornando-os mais flexíveis e colaborativos (cobots). (RUBMANN, 2015).

O esforço conjunto de robôs e operadores humanos, visa obter maior agilidade, facilidade, redução de custos, e segurança no caso de processos complexos, repetitivos e perigosos, mantendo a capacidade de decisão humana no processo. (Fersiltec, 2019).

### 2.1.1.3 Simulação

A manufatura moderna, vem fazendo amplo uso da simulação computacional, seja como simulação de processos, em busca de otimizações, seja na forma de engenharia reversa, uso de realidade virtual, e simulações CAE (*computer aided engineering*) onde se realiza análises estáticas, dinâmicas, térmicas, de impacto, entre outras. (CHONG; RAMAKRISHNA; SINGH, 2017).

Este conceito de simulação vai muito além desta simulação já conhecida pela engenharia, esta tecnologia utiliza simulações muito próximas a realidade, a fim de refletir o mundo físico, de forma virtual. (RUBMANN, 2015).

A simulação pode ser utilizada para reduzir a incerteza e criar exibições dinâmicas da situação futura, além de visualizar possíveis alternativas, de acordo com os cenários projetados. (SOLDING; GULLANDER, 2009).

### 2.1.1.4 Sistemas Integrados

A integração dos sistemas cibernéticos de manufatura é a essência da indústria 4.0. (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Esta integração de sistemas, que é também chamada de “Fábrica Inteligente”, conecta objetos físicos, como máquinas e produtos, com sistemas de informação, como os sistemas de gerenciamento de produção. (LEE et al., 2015).

As indústrias buscam a integração horizontal do fluxo de dados entre parceiros, fornecedores e clientes, além da integração vertical nos quadros organizacionais, do desenvolvimento ao produto final. Esta integração auxilia na comunicação, fabricação, controle e gerenciamento do ciclo de vida da produção. (YUE et al., 2015).

Para Shrouf, Ordieres e Miragliotta (2014), algumas características relevantes das fábricas inteligentes são:

- a) Produção em massa;
- b) Flexibilidade;
- c) Criação de novos serviços;
- d) Monitoramento remoto;
- e) Manutenção proativa.

#### 2.1.1.5 *Internet of Think (IOT)*

A Cisco Internet Business Solutions Group (2011) define IOT como “o momento exato em que foram conectados à internet mais coisas ou objetos do que pessoas”.

Internet of Things, ou internet das coisas (IOT), refere-se a conexão entre o mundo real e o virtual. Esta conexão se dá através da transmissão de informação de objetos conectados a rede, via internet, sem a interferência humana. A IOT também possibilita o controle remoto de objetos físicos conectados a uma rede. (MATTERN; FLOERKEMEIER, 2010; WEF, 2017).

Segundo Hermann, Pentek e Otto (2015), corrobora com o conceito, segundo os autores, a *internet of things* permite que as coisas interajam umas com as outras, e tomem decisões de forma independente. Considera ainda, a IOT como uma das bases fortes do conceito de indústria 4.0.

Esta conexão de dispositivos em tempo real, possibilita a melhora na eficiência das operações reduz o tempo de processamento, operação e gerenciamento. (COELHO, 2016). Contudo, a disponibilidade de dados via rede, expõe as organizações aos riscos cibernéticos, a segurança de dados tem relação direta ao uso da IOT, e será abordada no próximo item.

Dentro do conceito de IOT, existe também o conceito de IOS (*internet of services*). Quando a IOT funciona, dados processados e analisados agregarão valor aos próprios dados. (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015)

#### 2.1.1.6 Segurança da informação

Aliado a maior conectividade, aumenta a demanda por proteções a ataques cibernéticos, e conseqüentemente o desenvolvimento de novas tecnologias de segurança, tornando as comunicações mais seguras e confiáveis. (RUBMANN, 2015). Estas ameaças aos sistemas de segurança corporativos, fez com que muitas organizações utilizassem sistemas fechados, ou desconectados. (RUBMANN, 2015).

A segurança na indústria 4.0, busca proteger as organizações de roubo ou danos a hardware além de dados ou softwares armazenados no sistema. (HUXTABLE; SCHAEFFER, 2016).

Nestes sistemas de segurança as operações são controladas e integradas por um núcleo de computação e comunicação, integrando capacidade de atuação física e inteligência artificial. (LEE et al., 2015).

#### 2.1.1.7 Computação na Nuvem

Chong, Ramakrishna e Singh (2017), definem a computação em nuvem como:

“Modelo para permitir o acesso onipresente e conveniente da rede sob demanda a um conjunto compartilhado de recursos de computação configuráveis, por exemplo, redes, servidores, armazenamento aplicativos e serviços, que podem ser rapidamente provisionados e liberados com o mínimo esforço do gerenciamento ou provedor de serviços”.

A computação em nuvem proporcionou profundas transformações no mundo tecnológico. (TAURION, 2009).

Trata-se de um sistema paralelo e distribuído, que consiste em uma coleção de computadores virtualizados e interconectados, provisionados de forma dinâmica e apresentados como um ou mais recursos computacionais unificados. (BUYAYA, 2008).

A utilização da nuvem pode ser categorizada em dois tipos. Na implementação de software de fabricação em rede, ou um serviço mais amplo, como design e gerenciamento de produtos. (CHONG; RAMAKRISHNA; SINGH, 2017).

Para Chong, Ramakrishna e Singh (2017) a nuvem impactará a manufatura nos seguintes aspectos:

- a) Melhor compartilhamento de aplicação do conhecimento e inteligência;
- b) Acelerar o fluxo de trabalho, reduzindo o prazo das entregas e custo de operação;
- c) Integrar as ações independentes na cadeia de produção, como desing de produto e vendas;
- d) Sousa (2009), simplifica a nuvem como a representação para internet ou infraestrutura de comunicação entre componentes arquiteturais, cada parte desta infraestrutura é provida como um serviço, estes serviços são alocados em datacenters, utilizando hardware compartilhado para computação e armazenamento.

Com a utilização da nuvem, os níveis de performance e resposta tecnológica são cada vez mais mediatos, sendo suas funcionalidades e agilidade essenciais para as organizações. (RUBMANN, 2015).

#### 2.1.1.8 Realidade aumentada

Sistemas baseados em realidade aumentada, suportam uma variedade de serviços, desde seleção autônoma de produtos, até enviar solicitações de serviço por meios móveis.

A realidade aumentada enriquece o ambiente fabril. É uma tecnologia facilitadora, essencial para a troca de informações do mundo digital para o mundo físico. Dentre as vantagens significativas há ciclos mais rápidos, maior confiabilidade e rastreabilidade. Esta tecnologia serve como apoio em tempo real as operações, sendo uma assistência digital a fim de reduzir erros humanos. (ROMERO et al., 2016).

A realidade aumentada terá grande impacto no futuro das indústrias. A colaboração entre a realidade virtual e a engenharia permite controlar todo o sistema fabril remotamente, através de ambientes virtuais. Por sua vez, empresas fazem uso desta realidade aumentada para fins específicos do processo de manufatura. (CHONG; RAMAKRISHNA; SINGH, 2017).

### 2.1.1.9 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva, também é chamada de impressão 3D. Tem por característica a construção por camadas sobrepostas a partir de uma geometria 3D desenhada em software de CAD. (VOLPATO, 2017).

Por ser objeto desta pesquisa, este tema será tratado de forma mais abrangente no próximo capítulo.

## 2.2 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva, consiste no processo de fabricação por meio de adição sucessiva de materiais, a partir de um modelo geométrico obtido de forma computacional. Este processo permite a utilização de vários tipos de materiais, formas e aplicações. (VOLPATO, 2017).

Segundo Wong e Hernandez (2012), a primeira impressão 3D camada a camada, a partir de um modelo geométrico criado em CAD foi no ano de 1980, no intuito de fabricar peças para protótipos.

Esta tecnologia se opõe ao modelo tradicional de fabricação, a manufatura subtrativa, esta que consiste em remoção de material a partir de material bruto, até alcançar a geometria desejada. (Volpato, 2017).

O processo de manufatura aditiva, também é conhecido como prototipagem rápida, visto que é um processo mais otimizado que os processos tradicionais de fabricação, tanto em nível de tempo, quanto de desperdício de matéria-prima. (HUANG et al., 2013).

Dentre os principais avanços que a manufatura aditiva traz aos processos de fabricação, Wong e Hernandez (2012), citam a redução no tempo de desenvolvimento de produto, redução no custo, menor interação humana no processo, e a possibilidade de criar peças com geometrias complexas, que seriam muito difíceis de fabricar via processo de usinagem.

Para Attaram (2017), a manufatura aditiva é uma tecnologia inovadora e considera que seu uso ainda está em fase inicial, tendo ainda muitos obstáculos para sua implementação.

Dentre os obstáculos para a manufatura aditiva, deve-se considerar as restrições de tamanho, o tempo de produção que por vezes pode ser maior do que na

fabricação convencional. O custo dos equipamentos de impressão e matéria-prima, são outra barreira para o desenvolvimento da tecnologia. (ATTARAM, 2017)

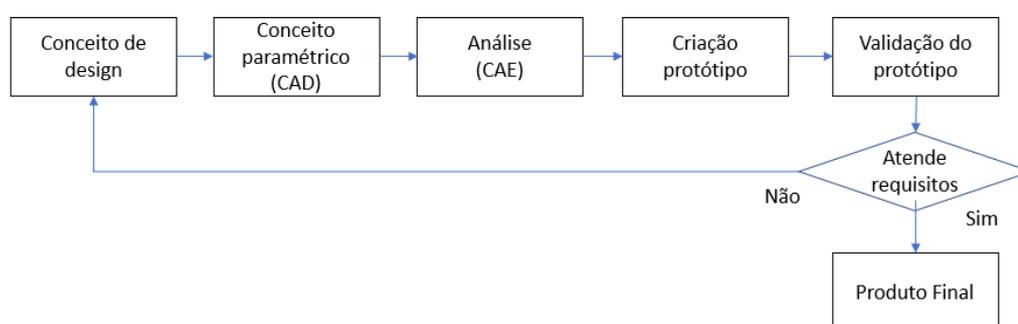
Attaram (2017), considera que a manufatura aditiva não irá substituir os processos convencionais existentes. No entanto acredita em um crescimento exponencial da tecnologia.

Dentre as vantagens Attaram (2017) cita a eficiência industrial, personalização em massa, fabricação sob demanda, fabricação descentralizada além da sustentabilidade.

Para Stratfor Worldview (2013), o maior impacto do uso da manufatura aditiva na cadeia de suprimentos não será em produtos acabados, mas em estoque, uma vez que o uso da manufatura aditiva elimina a necessidade de manter estoques.

Huang et al. (2013) sintetiza a tecnologia de manufatura aditiva em três etapas: um modelo 3D desenvolvido de forma gráfica e após convertido a uma forma padrão; após o modelo é enviado a uma máquina onde é feito ajuste de posição e orientação; por fim, o modelo é produzido camada por camada. A figura 5 apresenta as etapas do desenvolvimento de produto via manufatura aditiva, conforme Wong e Hernandez (2012).

Figura 5 - Ciclo de desenvolvimento de produto

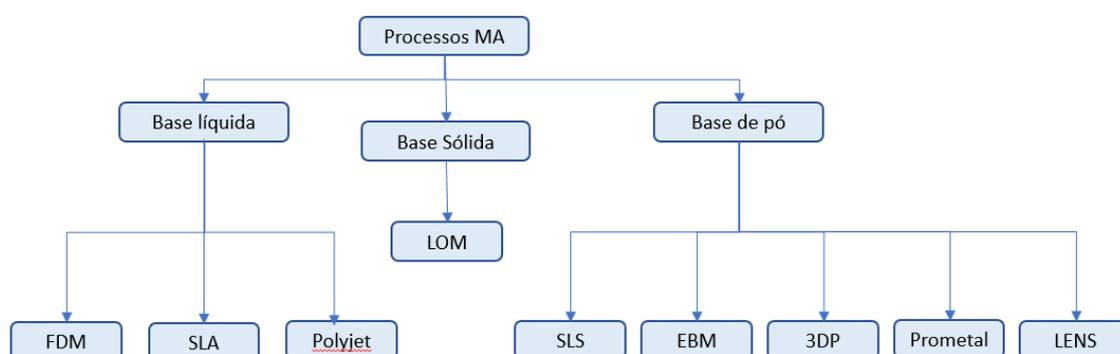


Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Wong e Hernandez (2012).

Há diferentes formas e materiais de fabricação por manufatura aditiva, podendo estes serem resinas, pós, cerâmica e até mesmo metal. (VOLPATO, 2017). Os processos de manufatura aditiva podem ser classificados em três tipos: processos a base líquida, processos a base sólida, e processos a base de pó. Dentro destas classificações os processos mais relevantes são: *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Stereolitografia* (SLA), *Polyjet*, *Laminated Object Manufacturing* (LOM), sinterização

seletiva a laser (SLS), fusão por feixe de elétrons (EBM), *Laser Engineering Net-Shaping* (LENS), impressão 3D aglutinante (3DP), Prometal. (WONG; HERNANDEZ, 2012). Estes processos serão discutidos mais detalhadamente a seguir. A figura 6 apresenta as tecnologias de manufatura aditiva de acordo com sua classificação.

Figura 6 - Processos de manufatura aditiva



Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Wong e Hernandez (2012)

## 2.2.1 Tecnologias de Manufatura Aditiva a base líquida

### 2.2.1.1 Fused Deposition Modeling - FDM

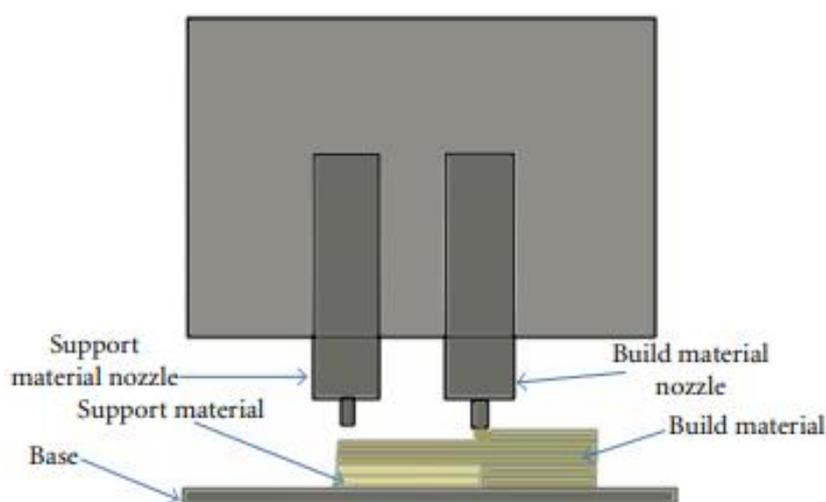
O processo de fusão por deposição de material (FDM), consiste na fusão de filamento e posterior extrusão. O material normalmente tem origem termoplástica, é aquecido até 1°C acima de seu ponto de fusão, para que sua solidificação seja imediata após a extrusão. Este tipo de máquina atua com um cabeçote, que se movimenta no plano horizontal (eixo XY), e uma plataforma no sentido vertical (eixo Z). Este cabeçote é composto por dois bicos extrusores, um deles recebe o material para fabricação do modelo, o outro cabeçote recebe material a ser utilizado como suporte, em caso de geometrias complexas. A extrusão se dá por camadas de igual espessura uma sobre a outra, até formar o modelo conforme geometria 3D projetada. A precisão neste processo pode alcançar 0,05mm. (PALLAROLAS, 2013; HUANG et al., 2013).

A principal vantagem do processo FDM está na variedade de materiais que podem ser utilizados para a fabricação dos modelos, sendo eles ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno), policarbonato, elastômero e cera. Além disso as propriedades mecânicas obtidas no processo são superiores ante outros processos de manufatura

aditiva. (PALLAROLAS, 2013). Huang et al. (2013), ainda cita como vantagens o tamanho compacto das máquinas, e o baixo custo de manutenção. Wong e Hernandez (2012), ainda cita como vantagem, não haver a necessidade de pós processamento químico, nem uso de resinas para a cura.

Quanto a desvantagem do processo, Pallarolas (2013), indica a velocidade de fabricação, isto se dá pela alta inércia dos cabeçotes, fazendo com que as velocidades e acelerações sejam menores do que em outros processos de manufatura aditiva.

Figura 7 - Representação processo FDM



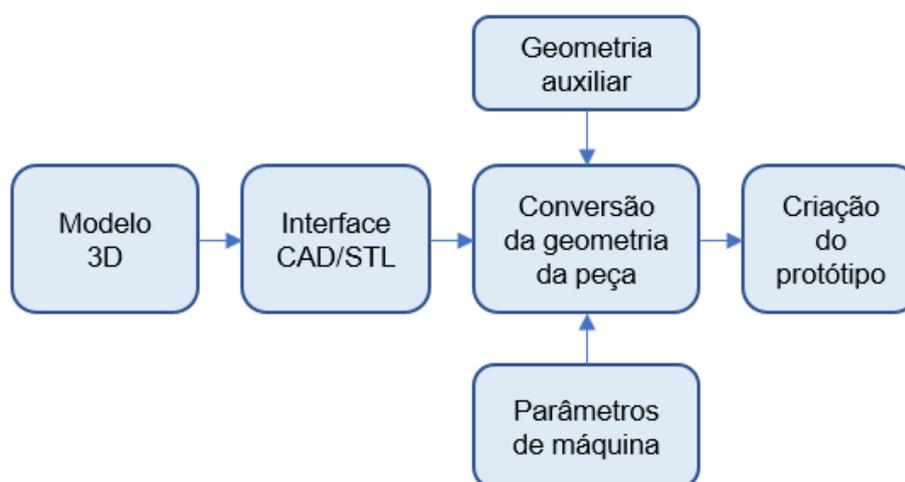
Fonte: HOTZA, 2009

### 2.2.1.2 Stereolitografia (SLA)

Este foi o primeiro dos processos de fabricação por manufatura aditiva, tendo sua patente concedida em 1986. (HUANG et al., 2013). Também chamado de foto polimerização, consiste na polimerização de resina líquida fotocurável, que se solidifica por irradiação magnética. (PALLAROLAS, 2013).

Para este processo, desenvolve-se um modelo 3D via software CAD (*computer aided design*) após o modelo é convertido para extensão STL (Stereolitografia). Este tipo de arquivo assim como a tecnologia SLA foram desenvolvidos pela 3D Systems Inc. e é o tipo de arquivo mais utilizado para o processo de impressão 3D. (WONG; HERNANDEZ, 2012). A figura 8 demonstra a etapa de conversão do modelo geométrico para STL dentro do processo de manufatura aditiva.

Figura 8 - Conversão do modelo geométrico para impressão 3D



Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Wong e Hernandez (2012)

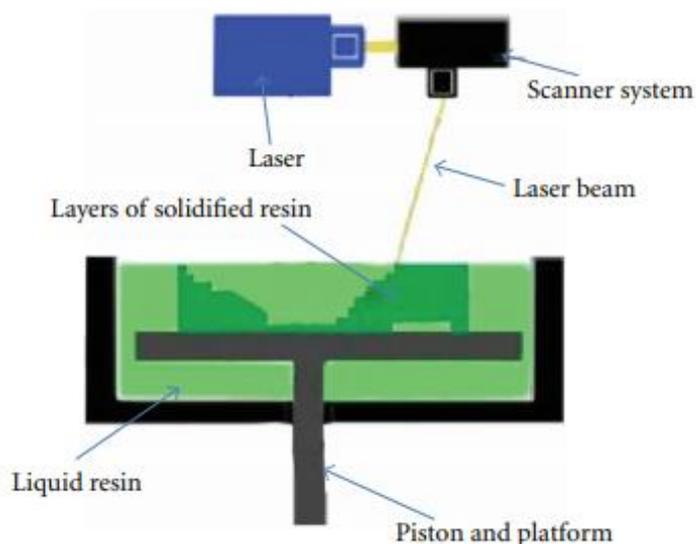
Esta extensão converte o arquivo para pequenos triângulos. O modelo é então cortado em fatias separando as informações por camadas. Espessura de camada e resolução, dependem das especificações de máquina. Este processo requer estrutura de apoio para sua construção, após a conclusão, esta plataforma pode ser removida, de forma manual. (WONG; HERNANDEZ, 2012; HUANG et al., 2013).

Ao aplicar o laser sob a resina, esta solidifica-se nos locais específicos de cada camada, de acordo com a geometria do modelo 3D. Ao final de cada camada, a plataforma move-se a fim de realizar a camada posterior. Ao final do processo, o excesso da resina é drenado, e pode ser reutilizado. (WONG; HERNANDEZ, 2012)

A cura das peças pode ocorrer por ponto ou por camada. Na cura por ponto o processo ocorre ponto a ponto, linha por linha, camada por camada, dentro de uma cuba com resina líquida fotocurável. Forma-se uma camada fina no topo através de recobrimento. A seção transversal da camada, é desenhada por um raio laser com foco preciso na superfície da resina, que então é curada em toda trajetória através do laser. A plataforma é deslocada a um nível inferior e uma nova camada é feita sobre a camada anterior. (PALLAROLAS, 2013).

O processo de cura por camada foi desenvolvido para aumentar a velocidade de cura do polímero. O processo é semelhante ao por pontos, porém a cura ocorre na camada por completo o que reduz o tempo de fabricação do modelo. (PALLAROLAS, 2013). A figura 9 mostra uma representação desta tecnologia.

Figura 9 - Processo SLA.



Fonte: Wong e Hernandez (2012)

Para Huang et al. (2013), este processo é indicado a indústria de transformação, pois além de obter bom acabamento superficial, auxilia na redução do tempo de produção de protótipos.

Porém, possui como limitação o tamanho reduzido de área de produção, conseguindo fabricar apenas peças menores que 2 pés (aproximadamente 60cm). Outro fator a considerar neste processo é o custo elevado e a limitação de materiais, ante a outros processos de manufatura aditiva. (HUANG et al., 2013).

### 2.2.1.3 Poly Jet

Este processo utiliza jato de tinta para impressão em camadas muito finas, 16 microns. Através dele é depositado um fotopolímero nos eixos x e y. A cura deste fotopolímero se dá por raios ultravioletas, após conclusão de cada camada. Este processo obtém excelente qualidade de resolução, porém as peças obtidas neste processo são mais frágeis em comparação aos processos SLA e SLS. O suporte nesse processo é um tipo de gel, que após pronto é jateado com água. (WONG; HERNANDEZ, 2012).

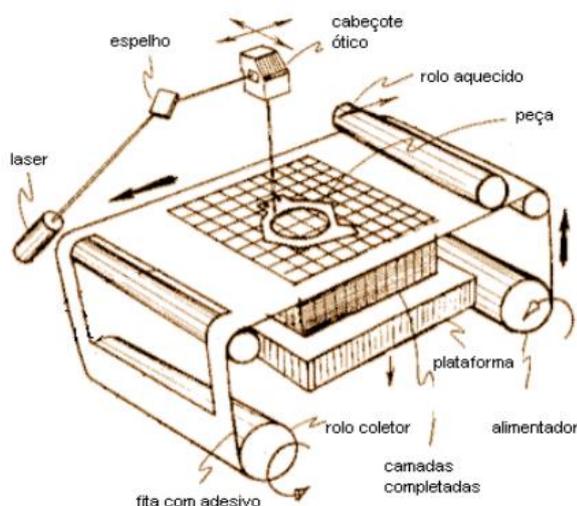
## 2.2.2 Tecnologia de Manufatura Aditiva a base sólida

### 2.2.2.1 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Este processo combina técnicas aditivas e subtrativas na construção de peças camada por camada. A LOM utiliza lâminas revestidas com adesivo, podendo ainda este ser revestido sobre o material ou também antes da colagem, permitindo as lâminas ligarem entre si. A fabricação da peça se dá através da laminação e corte sequenciais de seções transversais 2D. Este corte é feito através de raio laser, onde velocidade e foco são ajustados de acordo com a profundidade de corte, este por sua vez, deve corresponder exatamente a espessura da camada. (HUANG et al., 2013).

Neste processo pode ser utilizada uma variedade de materiais, incluindo papel, metais, plásticos, tecidos, materiais sintéticos e compósitos. Este é considerado um processo barato e de baixo impacto ecológico, pois não gera nenhum vapor tóxico. Todavia, há problemas em relação a precisão, sendo difícil atingir tolerâncias geométricas, com isso, a qualidade do produto acaba sendo afetada. (HUANG et al., 2013; WONG; HERNANDEZ, 2012).

Figura 10 - Representação processo LOM



Fonte: HOTZA, 2009

## 2.2.3 Tecnologias de Manufatura Aditiva a base de pó

### 2.2.3.1 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

O processo de sinterização seletiva a laser (SLS), é um processo de impressão 3D onde o pó é sinterizado, ou seja, é fundido, através do uso de um feixe de laser de alta potência de dióxido de carbono. (HUANG et al., 2013; WONG; HERNANDEZ, 2012). O laser funde o pó em local específico para cada camada, conforme geometria do objeto. As partículas ficam sob uma plataforma, controlada por um pistão, que se movimenta de acordo com a espessura das camadas. (WONG; HERNANDEZ, 2012).

O material sinterizado forma a peça, enquanto o material não sinterizado permanece em forma de pó para apoiar a estrutura e pode ser reaproveitado após a finalização do uso. (HUANG et al., 2013).

Para Volpato (2017), este processo de sinterização pode ser abordado de duas formas: direta e indireta. Na abordagem direta, o material é sinterizado pela ação direta do laser. Já a abordagem indireta ocorre quando um material ligante é utilizado para dar forma ao objeto fabricado, que posteriormente será sinterizado em um forno.

Este processo permite grande variedade de materiais a ser utilizados, como plásticos, metais, combinações de metais e cerâmicos, o que é uma vantagem. (WONG; HERNANDEZ, 2012). Como outras vantagens, o processo SLS oferece liberdade de rápida construção de peças complexas com maior durabilidade. Já a precisão limitada pelo tamanho das partículas é considerada uma desvantagem do processo, além da complexidade operacional, visto que são muitas as variáveis a serem consideradas na construção. (HUANG et al., 2013; WONG; HERNANDEZ, 2012).

### 2.2.3.2 Fusão por Feixe de Elétrons (EBM)

Este é um processo semelhante ao SLS. É um processo relativamente novo, e que está crescendo rapidamente. Nele, o pó é fundido através de um feixe de laser de elétrons, alimentado por uma corrente elétrica de alta tensão, geralmente entre 30 e 60 KV. (WONG; HERNANDEZ, 2012).

Segundo Volpato (2017), um feixe de elétrons livres, resultantes de um cátodo quente é acelerado e apontado em um leito de pó. Quando os elétrons atingem a

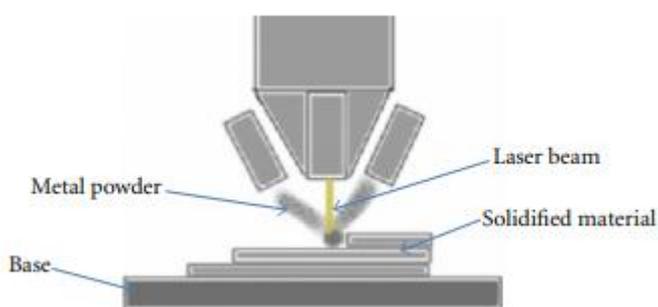
superfície do leito de pó, ocorre uma desaceleração, transformando a energia cinética dos elétrons em energia térmica, aumentando a temperatura do leito de pó.

A tecnologia EBM é indicada na fabricação de peças metálicas, e por este motivo, o processo ocorre dentro de uma câmara de vácuo, a fim de evitar oxidação do produto. Isto pode ser considerado uma desvantagem, visto que eleva seu custo de fabricação. Como vantagem este processo tem a capacidade de processar alta variedade de metais pré-ligados. (WONG; HERNANDEZ, 2012).

### 2.2.3.3 *Laser Engineering Net-Shaping* (LENS)

A tecnologia *Laser Engineering Net-Shaping* (LENS), ocorre pela inserção de substrato através um feixe de laser acumulando finas camadas de material para obter a peça idealizada. Camadas sequenciais são criadas posteriormente, até que se obtenha o produto final. (HUANG et al., 2013).

Figura 11 - Representação processo LENS



Fonte: Wong e Hernandez (2012)

Através de controle apropriado de parâmetros, propriedades mecânicas como força e ductilidade, são facilmente controladas. Este processo também pode ser utilizado para reparos em produtos já existentes. Além disso, não necessita operações de queima secundárias. (HUANG et al., 2013; WONG; HERNANDEZ, 2012).

Contudo, a tecnologia LENS necessita de processos posteriores de acabamento, como fresamento e torneamento. Também há limitações geométricas em casos de superfícies complexas, além da necessidade do uso de uma base para iniciar a fabricação dos objetos. É um processo voltado a obtenção de componentes de ligas especiais e restauração de matrizes. (PALLAROLAS, 2013).

### 2.2.3.4 Impressão 3D Aglutinante (3DP)

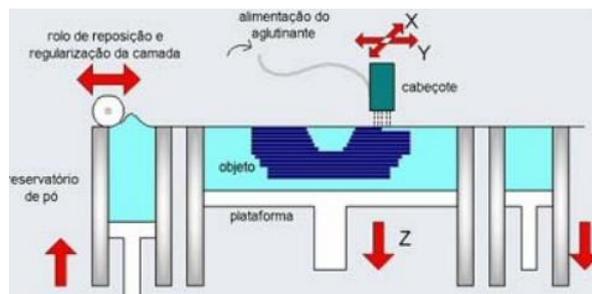
A tecnologia de impressão 3D aglutinante, consiste em um aglutinante líquido a base de água aplicado por meio de jato, sob pó a base de amido, para imprimir a partir de um modelo 3D. No momento que ocorre a injeção do ligante nas partículas localizadas em um leito de pó, as partes se unem. (WONG; HERNANDEZ, 2012).

Este é um processo licenciado pelo *Massachusetts Institute Technology* (MIT). Por ser um processo semelhante à impressão a jato de tinta, utilizado para impressão bidimensional em papel, este processo também é chamado de 3DP. (WONG; HERNANDEZ, 2012).

Neste processo, o material é primeiramente estabilizado através de nebulização com gotejamento de água afim de evitar perturbações excessivas quando atingido pelo ligante. Após a aplicação sequencial de camadas, o pó não ligado, é removido. A peça pode ser posteriormente processada sendo sujeitada a altas temperaturas, a fim de fortalecer ainda mais a ligação. Este processo pode ser aplicado na produção de peças compostas de metal, cerâmica e compósitos de cerâmica. (HUANG et al., 2013).

Como vantagens, este processo oferece rápida fabricação além do baixo custo de materiais. Dentre os processos de manufatura aditiva, este é considerado o mais rápido em tempo de fabricação. Porém, existem limitações, como o acabamento superficial áspero, além de limitações de tamanho, e alto custo de equipamento. (HUANG et al., 2013).

Figura 12 - Representação processo 3DP



Fonte: HOTZA, 2009

### 2.2.3.5 Prometal

Prometal é um processo de impressão 3D, utilizado para fabricação de ferramentas de injeção e matrizes. Este é um processo a base de pó, onde se faz o uso do aço inoxidável. Ocorre através de jatos de um aglutinante líquido direcionado sob o pó de aço. O pó, por sua vez fica em um leito controlado por êmbolos de construção que reduzem o leito, assim que cada camada é finalizada. (WONG; HERNANDEZ, 2012).

Ao final do processo o pó residual é removido. Caso alguma parte funcional esteja sendo produzida, são necessários processos posteriores de sinterização, infiltração e acabamento. No processo de sinterização, a peça é aquecida até 24 horas a fim de endurecer o agente ligante com o aço. (WONG; HERNANDEZ, 2012).

Já no processo de infiltração, a peça é infundida com pó de bronze, quando são aquecidos acima de 1093°C, em liga de 60% em aço inoxidável e 40% de bronze. O mesmo procedimento, mas com diferentes temperaturas, e tempos da sinterização, é usado com outros materiais como pó de carboneto de tungstênio, com liga de zircônio de cobre, para fabricação de peças de foguetes, visto que as peças têm melhores propriedades do que as fabricadas pelos processos convencionais, fazendo uso do mesmo material. (WONG; HERNANDEZ, 2012).

## 2.3 USINAGEM

A usinagem foi introduzida nos processos de fabricação em meados do século XVIII. Nesta época utilizava-se ferramentas de aço carbono para trabalhar sob madeira, amplamente utilizada como peças de engenharia até então. (MACHADO et al., 2015).

As primeiras máquinas ferramenta, surgiram no início do século XIX, passando assim a manufaturar ferro fundido, latão e bronze. Com o avanço das tecnologias, outras ligas e materiais foram desenvolvidas fazendo evoluir também o processo de usinagem. Novas ferramentas foram introduzidas ao processo, permitindo realizar a usinagem de aços e outros materiais metálicos. Além disso, houve grandes avanços tecnológicos no campo de máquinas ferramentas, surgindo as máquinas automáticas e posteriormente as máquinas comandadas numericamente via computador (CNC). (MACHADO et al., 2015).

No final da década de 1970 surgiram os sistemas CAM (manufatura assistida por computador). Este sistema foi amplamente implementado a partir dos anos 1980 na área de manufatura industrial, permitindo a programação de máquinas CNC via software usando a integração CAD-CAM, porém com grandes limitações. (SOUZA; ULBRICH, 2009)

A usinagem é um processo de manufatura que faz uso de ferramentas de corte para remover material de um sólido, a fim de dar a forma desejada a peça, além de dimensões e acabamento projetados. A usinagem se dá a partir da remoção de cavaco. (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013; MACHADO et al., 2015).

Por cavaco, compreende-se: porção de material retirada pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular. (MACHADO et al., 2015).

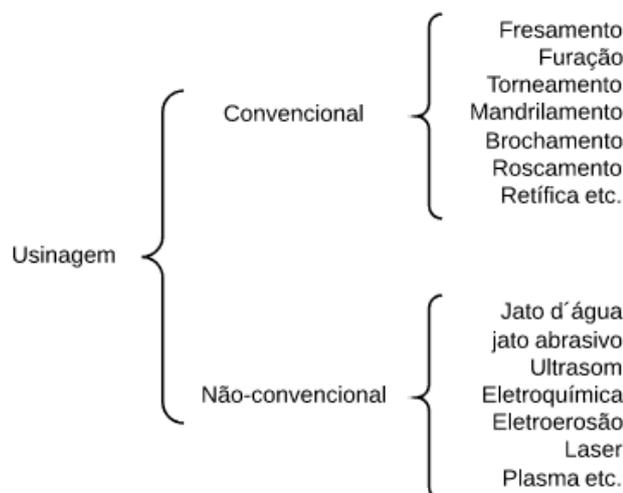
Segundo Machado et al. (2015) é o processo de fabricação mais popular do mundo. É um processo imprevisível, pode ser definido como um processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavacos.

A complexidade se dá pelas dificuldades em determinar as condições ideais de corte. Simples, pois, uma vez determinadas as condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando intervenção de um operador. As condições ideais de corte são aquelas capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento, com o menor custo possível. (MACHADO et al., 2015).

O processo de usinagem é um processo de deformação plástica onde a única restrição é oferecida pela ferramenta de corte. A usinagem envolve altas deformações combinadas com altas taxas de deformação. As variadas opções de parâmetros de entrada, resultam em infinitas combinações de parâmetros. (MACHADO et al., 2015).

Os processos de fabricação, onde há a remoção de cavaco (usinagem), podem ser definidos em dois grupos de processos, são eles convencional e não convencional, conforme figura 13.

Figura 13 - Classificação dos processos de usinagem.



Fonte: Adaptado pelo autor a partir de MACHADO et al. (2015)

Principais operações de usinagem convencional executadas com ferramentas de geometria definida são torneamento, furação, fresamento, mandrilamento, brochamento e roscamento. São utilizados em grande variedade de materiais, gerando qualquer geometria regular, como superfícies planas e cilindros. É utilizado também como um processo secundário, ou de acabamento, quando a peça é produzida por fundição, conformação ou metalurgia do pó. No desbaste é relevante garantir alta taxa de remoção de material, já no acabamento a busca se dá pela qualidade final do produto. (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013; MACHADO et al., 2015).

No processo de torneamento, a peça gira em torno de seu próprio eixo, enquanto a ferramenta de corte realiza movimentos de avanços longitudinais e transversais. Já na furação, a ferramenta gira e realiza os movimentos de avanço. (MACHADO et al., 2015).

O fresamento é o processo mais versátil e eficiente. Possui altas taxas de remoção de material, devido as múltiplas arestas de corte das ferramentas utilizadas. Neste processo, a ferramenta gira e a peça se movimenta em avanços longitudinais e transversais. (MACHADO et al., 2015).

Mandrilamento é utilizado principalmente para acabamento interno em furos cilíndricos. Movimentos de corte e avanço são realizados pela ferramenta, enquanto a peça fica presa. No brochamento é utilizado para produzir furos em que a geometria

não seja cilíndrica. A ferramenta é tracionada e através de dentes provoca a mudança da forma do furo para perfil desejado. É possível alcançar elevada qualidade dimensional e geométrica quando produzido em massa. Já o roscamento pode ser realizado por máquinas (tornos, fresa, rosqueadeiras) ou através de dispositivos manuais (machos e cossinetes). (MACHADO et al., 2015).

O próximo capítulo apresenta o método de trabalho utilizado para realização deste estudo.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são abordados os procedimentos metodológicos empregados para o desenvolvimento desta pesquisa. Esta etapa é composta pelo delineamento da pesquisa, seguido do método de trabalho, da escolha da unidade de análise, além das técnicas para coleta e análise de dados.

#### 3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

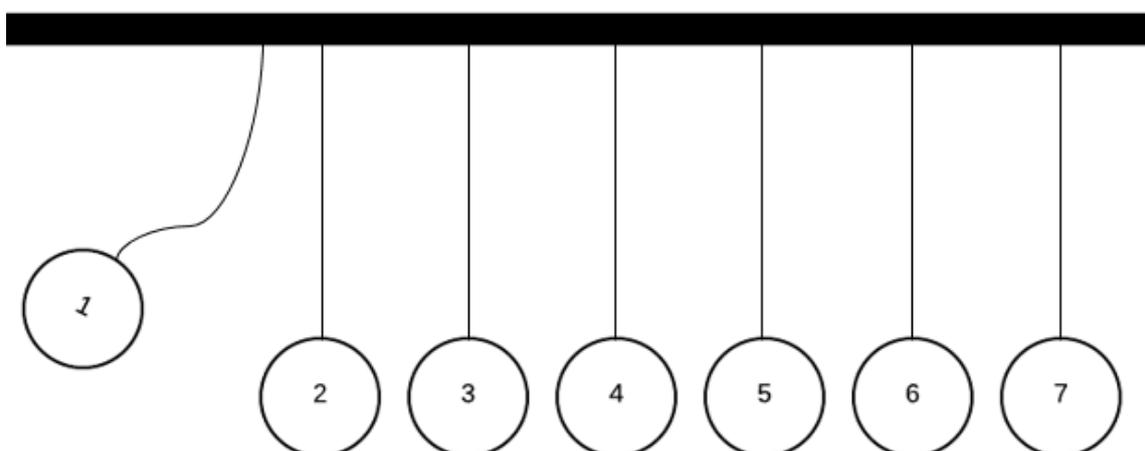
Para Gil (2002), a pesquisa é definida como:

[...] procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos. A pesquisa desenvolve-se por um processo constituído de várias fases, desde a formulação do problema até a apresentação e discussão dos resultados.

O delineamento de pesquisa envolve os processos de coleta e análise de dados para classificar uma pesquisa. É o planejamento da pesquisa de uma forma mais ampla. (GIL, 2002).

Seguir procedimentos de pesquisa são de extrema importância para garantir confiabilidade nos resultados de uma pesquisa científica. (DRESCH, LACERDA e ANTUNES, 2015). Os autores sugerem então um método de pesquisa baseado em um modelo de pêndulo conforme figura 14.

Figura 14 - Pêndulo para condução da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015, p.116)

Segundo o método proposto, a etapa 1 explicita as razões para realizar a pesquisa, e é seguida pela etapa 2 que indica qual o objetivo da pesquisa, etapas estas já expostas neste trabalho. Os itens 3,4,5 e 6 compõem este capítulo referente aos métodos utilizados, sendo eles métodos científicos, métodos de pesquisa, método de trabalho e a escolha das técnicas de coleta e análise de dados. A última etapa, etapa 7 expõe os resultados obtidos pelo método.

### 3.2 MÉTODO CIENTÍFICO

O método científico é uma visão de como o conhecimento é construído, e para definir a abordagem a utilizar em uma pesquisa, deve ser levando em consideração o ponto de partida e o objetivo. Os métodos científicos mais empregados na área de gestão são os métodos: indutivo, dedutivo e hipotético-dedutivo. (DRESCH, LACERDA e ANTUNES, 2015).

Segundo Dresch, Lacerda e Antunes (2015), o método indutivo fundamenta-se a partir da observação, sendo esta a chave para a construção do conhecimento científico. Para os autores, este método consiste em três etapas básicas: observação dos fenômenos de interesse, descoberta de relações entre os fenômenos e generalização das descobertas.

Esta pesquisa utiliza o método indutivo, visto que busca observar os impactos causados pela implementação de manufatura aditiva em um determinado processo produtivo.

### 3.3 MÉTODO DE PESQUISA

A definição do método de pesquisa, auxilia a garantir que o estudo irá resolver o problema proposto. Além disso, a escolha do método torna a pesquisa confiável e válida. (DRESCH, LACERDA e ANTUNES, 2015).

Os tipos de pesquisa podem ser classificados quanto a abordagem, quanto a natureza, quanto aos objetivos e quanto aos procedimentos (UFRGS, 2009). Do ponto de vista da natureza, a pesquisa pode ser básica, objetivando contribuir a partir de conhecimentos teóricos sem aplicação prática. Ou pode também ser definida como aplicada, onde o objetivo é a resolução de problemas específicos. (UFRGS, 2009).

Ainda sobre a pesquisa aplicada, Dresch, Lacerda e Antunes (2015), definem como um processo centrado em gerar informações que possam ser atribuídas a realidade.

Do ponto de vista da natureza, esta pesquisa é considerada de forma aplicada, tendo por objetivo a resolução de problemas envolvendo soluções práticas, no caso a implementação do uso da manufatura aditiva, em um processo de produção.

Quanto a abordagem, a pesquisa pode ser quantitativa ou qualitativa. A pesquisa quantitativa utiliza técnicas estatísticas a fim de quantificar informações para classificá-las. Já a qualitativa não faz uso de métodos e técnicas estatísticas, sendo o ambiente a fonte dos dados, e o pesquisador o instrumento. (GIL, 2002; UFRGS 2009). Esta pesquisa se enquadra na abordagem qualitativa, necessitando explicar o porquê das coisas, não utilizando de técnicas estatísticas. (UFRGS, 2009).

Em relação aos objetivos, este trabalho tem caráter exploratório. Este tipo de pesquisa tem por objetivo agregar maiores informações a um tema já utilizado, no caso a implementação da manufatura aditiva em processos produtivos, visando ampliar conhecimento científico. Para Gil (2010), estas pesquisas envolvem levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que atuam na área e análise de exemplos que estimulem a compreensão.

Miguel (2018), observa que a tipologia divide os estudos em sete categorias, sendo elas, o levantamento tipo *survey*, o estudo de caso, a modelagem, a simulação, o estudo de campo, o experimento, e teórico ou conceitual.

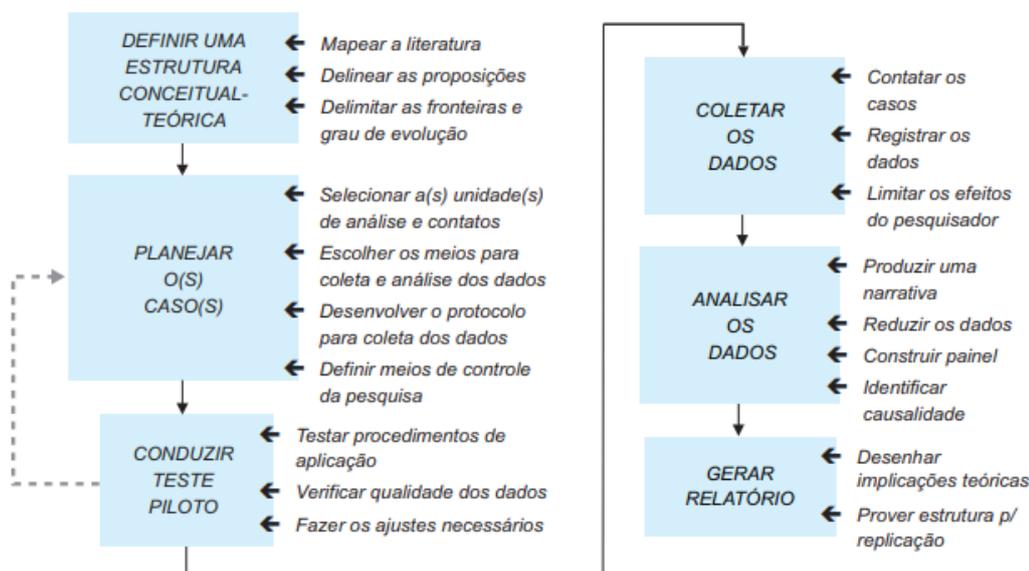
Dentro dos possíveis métodos de pesquisa, esta monografia se enquadra em um estudo de caso. Para Gil (2010), o estudo de caso consiste em “um estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento”. Yin (2010), diz que os estudos de caso podem ser utilizados quando há desejo de se entender um fenômeno real em suas condições contextuais.

Segundo Yin (2010), estudo de caso é indicado em questões onde a pergunta são como, e por quê. É realizado através da observação direta do pesquisador, além de entrevistas. Para Dresch, Lacerda e Antunes Jr. (2015), o estudo de caso é uma pesquisa empírica, útil na compreensão de fenômenos contemporâneos em seu real contexto. Para Yin (2010), o estudo da teoria em estudos de caso, relaciona teoria e prática, possibilitando o pesquisador chegar a diferentes resultados.

Com base nos contextos expostos acima, foi utilizado como procedimento teórico para esta pesquisa, o estudo de caso.

Para Miguel (2007), o desenvolvimento de um estudo de caso se baseia em uma sequência de etapas, conforme figura 15.

Figura 15 – Etapas da condução de estudos de caso.



Fonte: Miguel (2007).

A seguir, será apresentado o método de trabalho utilizado nesta pesquisa, baseado na sequência de atividades proposta por Miguel (2007).

### 3.4 MÉTODO DE TRABALHO

O método de trabalho apresenta a sequência lógica utilizada para alcançar os objetivos propostos pelo pesquisador. (DRESCH, LACERDA e ANTUNES, 2015). Para seguimento deste estudo, os passos propostos para atingir os objetivos são descritos separadamente.

#### 3.4.1 Definir uma estrutura conceitual-teórica

A primeira etapa desta pesquisa consiste na definição da estrutura conceitual-teórica. Para Miguel (2007), é necessário um mapear a literatura, delinear as proposições e delimitar as fronteiras e grau de evolução.

Alinhado ao objetivo central desta pesquisa, foram pesquisados e apresentados artigos com temas que abrangem a área de manufatura aditiva. A busca e seleção dos artigos foi realizada a partir de uma revisão sistemática da literatura (RSL), método

proposto por Morandi e Camargo (2015), e apresentado na seção de justificativa acadêmica.

No referencial teórico foram abordados os conceitos gerais da indústria 4.0, e de manufatura aditiva de forma mais aprofundada. Além disso o referencial apresentou conceitos básicos sobre os processos de manufatura subtrativa relevantes para contextualização do objeto desta pesquisa.

### **3.4.2 Planejar o caso**

A segunda etapa, proposta por Miguel (2007), é o planejamento de caso. Nesta etapa, deve-se selecionar a unidade de análise, os meios para coleta e análise de dados, desenvolver o protocolo para coleta de dados, e definir os meios de controle da pesquisa.

Miguel (2007) define como uma das primeiras tarefas para o planejamento do estudo de caso, a escolha da unidade de análise, ou seja, do caso a ser estudado. Para Yin (2010), o estudo de caso pode ser único, ou de múltiplos casos, e ainda de acordo com o recorte temporal pode ser retrospectivo, quando investiga o passado, coletando dados históricos, ou longitudinal, investigando o presente, superando as limitações do retrospectivo.

Esta pesquisa tratará de um estudo de caso único, e longitudinal. Estudos de caso únicos permitem maior aprofundamento na investigação e para estes casos, utiliza-se preferencialmente a pesquisa longitudinal. (MIGUEL, 2007)

Foi delimitado então que este estudo de caso, será realizado no processo de fabricação de moldes de alumínio fundido, com posterior processo de texturização química, sendo este um dos processos com maior volume de trabalho dentro da empresa em estudo.

Este processo inicia com o desenvolvimento 3D, realizado no software “*Rhinoceros*”, do modelo da maquete a ser utilizada no processo de fundição. Após o projeto de CAD, esta passa para a área de manufatura. Inicia com a programação da usinagem subtrativa. Para este processo, utiliza-se programa de manufatura computadorizada (CAM), no caso da empresa em estudo, o software utilizado é o “*Machining Strategist*”. Na programação é gerado o programa numérico para manufatura das maquetes em centros de usinagem CNC. Nesta etapa é de fato manufaturada a maquete, esta usinada em resina epóxi, chamada *Cibatool*.

Posteriormente, a maquete manufatura vai para o processo de fundição, e posterior texturização química.

Para o processo futuro, será utilizada a manufatura aditiva como alternativa ao processo de usinagem da maquete. Para a manufatura aditiva, o modelo 3D será convertido para STL, e enviado para impressoras 3d do tipo SLA, que consiste na polimerização de resina líquida. Detalhes específicos sobre a resina, e parâmetros técnicos de máquina, não serão divulgados por questão de sigilo da empresa em análise.

Para realizar o estudo de impacto no processo produtivo, será necessário o uso de ferramenta de visualização dos processos atual e futuro, para tanto, será utilizado o mapa de fluxo de valor (MPF).

Após definido o mapeamento, serão realizadas entrevistas com contatos identificados como relevantes ao processo de manufatura da empresa. Yin (2010), recomenda utilizar fontes de informação onde o pesquisador tenha amplo e livre acesso, para que a confiabilidade seja satisfatória.

Desta forma, foram selecionados representantes da empresa que tenham relação direta com o processo de manufatura de forma geral. O Quadro 3 apresenta a lista de entrevistados que fizeram parte da pesquisa.

Quadro 3 – Lista de entrevistados

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Cargo</b>
<b>E1</b>	Entrevistado 1	Diretor Industrial
<b>E2</b>	Entrevistado 2	Gerente Industrial
<b>E3</b>	Entrevistado 3	Gerente de projetos
<b>E4</b>	Entrevistado 4	Projetista

Fonte: Elaborado pelo autor.

Morandi e Camargo (2015), citam como principais técnicas de coleta de dados a técnica documental, bibliográfica, entrevistas, grupo focal, questionários e observação direta. Para obtenção de dados referente ao processo atual, com o uso da manufatura subtrativa, serão trianguladas informações de distintas fontes de evidência, como registros, documentos e observação direta. Já para a situação futura, onde se faz o uso da manufatura aditiva, os dados serão obtidos através de entrevista semiestruturada com os envolvidos no processo de manufatura da empresa.

Para elaboração da entrevista, as questões devem conter fundamentação teórica, fontes de evidência e objetivo. (YIN, 2010). As questões elaboradas são abertas e possuem a função de fornecer dados para comparação dos processos atual e futuro.

Yin (2010) classifica as entrevistas como uma das mais importantes fontes de informação, por possuir fonte essencial de evidências para estudos de caso. As entrevistas podem ser classificadas em dois tipos: padronizada/estruturada e despadronizada/não estruturada. No caso da entrevista estruturada, o entrevistador define um roteiro e o segue sem modificações. Já o modelo não estruturado permite ao entrevistador explorar de maneira mais ampla. (DRESCH, LACERDA e ANTUNES, 2015). Esta pesquisa fez uso do método não estruturado e o roteiro proposto é apresentado no quadro 4.

Para garantir que o método de coleta de dados seja confiável, Yin (2010) propõe a utilização de um protocolo de pesquisa. Segundo Miguel (2007), um protocolo de pesquisa possui três partes principais: contexto da pesquisa, a parte a ser investigada, e as variáveis de controle.

Para esta entrevista serão contatados os entrevistados e apresentado o objetivo desta pesquisa via contato direto. Após foi enviado via *e-mail* o questionário para uma avaliação do entrevistado, e depois de um período de uma semana realizado novo contato para verificar a disponibilidade para agendamento da entrevista mediada. O questionário será aplicado *in loco*, de forma pessoal havendo a possibilidade de novos questionamentos conforme o andamento da entrevista.

Dados referentes ao entrevistado serão utilizados apenas para controle do pesquisador, sem a divulgação por motivo de privacidade.

Quadro 4 – Roteiro para Entrevistas

Argumento Teórico	Autor	Pergunta	Objetivo
O uso da Manufatura Aditiva possibilita a confecção de peças que são muito difíceis de serem usinadas.	WONG, K. V.; HERNANDEZ, A (2012)	A geometria do produto a ser manufaturado, impacta na escolha do seu processo de fabricação?	Avaliar o impacto da Manufatura Aditiva quanto a liberdade geométrica dos projetos.
O espaço de construção das máquinas de manufatura aditiva, definem um limite físico nas dimensões dos modelos.	WELLER, Christian; KLEER, Robin; PILLER, Frank (2015)	Há algum limitante técnico para que o uso da MA seja padronizado na fabricação das maquetes?	
Entre os avanços apresentados pelo uso da Manufatura Aditiva no desenvolvimento de produtos, estão a redução de tempo de ciclo e custo.	WONG, K. V.; HERNANDEZ, A (2012)	Qual impacto percebido no tempo de desenvolvimento de produto da empresa com a implementação da Manufatura Aditiva?	Identificar impacto do uso da MA no lead time do processo de fabricação do molde
A manufatura aditiva aumenta a velocidade de prototipagem e, portanto, acelera todo o processo de desenvolvimento.	MEIER, Marlon; TAN, Kim Hua (2019)	O uso da Manufatura Aditiva teve impacto no lead time dos moldes?	
A manufatura aditiva apresenta maior agilidade de fabricação, sendo necessário apenas um único setup de máquina.	MARQUES, Gastão Boccardi Junior; COSTA, Carlos Alberto (2019)	Quais etapas foram acrescidas ou eliminadas no processo após a implementação da manufatura aditiva?	
O uso da manufatura aditiva, acarreta em menor interferência humana no processo.	WONG, K. V.; HERNANDEZ, A (2012)	Qual impacto em mão de obra, gerado pelo uso da MA?	Identificar impacto da interferência humana no processo de manufatura das maquetes
A manufatura aditiva aumenta a velocidade de prototipagem e, portanto, acelera todo o processo de desenvolvimento.	MEIER, Marlon; TAN, Kim Hua (2019)	Qual impacto do uso da Manufatura aditiva nos prazos de entrega dos moldes?	Identificar impacto do uso da MA na otimização dos recursos
		Foi percebido aumento disponibilidade de recursos após a implementação da manufatura aditiva?	

Em alguns casos, a manufatura aditiva apresenta imprecisão dimensional, o que pode ser uma fonte de problemas.	NISHIMURA, Paula Lumi Goulart. et. al. (2018)	A manufatura aditiva, atende aos mesmos critérios de qualidade tolerâncias e acabamento da manufatura tradicional?	Identificar impacto do uso da MA na qualidade
A manufatura aditiva propicia eliminação mais rápida de falhas, permitindo produto final mais bem acabado que no processo convencional.	MEIER, Marlon; TAN, Kim Hua (2019)	Há processos posteriores necessários para adequar as maquetes aos padrões de qualidade exigidos?	Identificar impacto do uso da MA na qualidade
O custo de aquisição dos equipamentos e o processo relativamente lento para impressão de peças de qualidade, ainda tornam o preço final da peça impressa elevado.	MARQUES, Gastão Boccardi Junior; COSTA, Carlos Alberto (2019)	Qual impacto do uso da MA no custo final do molde fabricado?	Identificar impacto do uso da MA no custo de fabricação dos moldes.
Os custos de fabricação deste processo se apresentam altos ainda, principalmente em função dos preços dos equipamentos e das matérias-primas de impressão 3D.	MARQUES, Gastão Boccardi Junior; COSTA, Carlos Alberto (2019)	É viável maior investimento em maquinário, a fim de substituir completamente o processo de manufatura das maquetes?	Identificar impacto do uso da MA no investimento.
O uso da manufatura aditiva, pode economizar energia, e reduzir os impactos ambientais.	TANG, Yunlong; MAK, Kieran; ZHAO, Yaoyao Fiona (2016)	Como os impactos de sustentabilidade do processo são percebidos pelos clientes?	Identificar impacto do uso da MA em termos de sustentabilidade
		Em termos de sustentabilidade, quais vantagens do uso da MA comparado a usinagem? (resíduos/consumo energético)	
A manufatura aditiva está em evolução e tem grande potencial em abrir novos mercados.	MEIER, Marlon; TAN, Kim Hua (2019)	Qual impacto percebido pelo cliente final, do uso da manufatura aditiva em substituição a manufatura tradicional das maquetes?	Identificar impacto do uso da MA no fator inovação

Fonte: Elaborado pelo autor

### **3.4.3 Conduzir teste piloto**

Para Miguel (2007) o teste piloto não é uma prática comum em estudos de caso, porém considera relativamente importante sua realização antes de partir para a coleta de dados. O objetivo do teste piloto é verificar se os procedimentos utilizados estão de acordo e satisfazem o objetivo da entrevista. Com ele é possível avaliar a qualidade dos dados obtidos e fazer correções e ajustes necessários. (MIGUEL, 2007).

Para esta pesquisa, o teste piloto será aplicado junto ao gerente industrial da unidade de manufatura.

### **3.4.4 Coletar os dados**

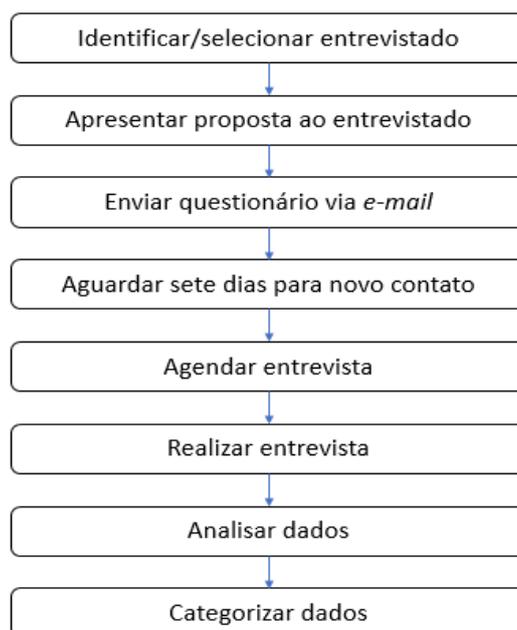
Segundo Miguel (2007), para a coleta de dados primeiramente deve ser realizado contato com o executivo sênior a fim de autorizar a condução da pesquisa, e esclarecer que a condução da pesquisa trará benefícios mútuos.

Ao mediador, alguns fatores devem ser considerados: ter capacidade para fazer questões adequadas e interpretar as respostas, ser bom ouvinte e não ter nenhum tipo de preconceito, estar bem embasado teoricamente, ser receptivo e flexível. (Yin, 2010).

Quanto ao registro das entrevistas, existem várias formas de serem realizados. Para esta pesquisa será feito uso do gravador a fim de obter melhor precisão de análise posterior. Em caso de o entrevistado não se sentir confortável, serão feitas anotações para análise futura.

Os dados obtidos serão transcritos e analisados, e posteriormente discutidos com o entrevistado a fim de evitar qualquer influência do mediador. Por fim os dados serão categorizados para poder realizar a triangulação de informações convergentes. A sequência para coleta de dados será conforme fluxo representado na figura 16.

Figura 16 – Fluxo de coleta de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.4.5 Analisar os dados

Por fim a análise de dados apresenta uma triangulação entre a análise de conteúdo obtido através das entrevistas, da observação direta do pesquisador e do conteúdo teórico obtido na literatura.

Para Yin (2010), a análise de dados consiste em examinar, categorizar, classificar ou recombina evidências tendo em vista as preposições do estudo. Segundo Miguel (2007) o pesquisador deve produzir uma narrativa geral do caso a partir dos dados coletados. Nesta análise deve apenas ser incluso o que for essencial e que tenha ligação com os objetivos da pesquisa.

A produção de uma narrativa geral do caso, considerando as evidências, não é suficiente para análise adequada do caso. Segundo Miguel (2007), uma das práticas utilizadas é a da codificação. Partes da narrativa são marcados com um código que represente uma categoria. Estas categorias devem corresponder a propriedades teóricas. Estes códigos não respondem à questão de pesquisa, eles são fios que conduzem a análise de dados.

Bardin (2011), define a análise de conteúdo como um conjunto de técnicas de análise que visa obter condições de produção, a partir de procedimentos sistemáticos.

Segundo o autor, a análise de conteúdo prevê três fases: pré-análise, considerada a fase organizacional; a exploração do material, codificando e classificando; e tratamento dos resultados, sendo esta etapa a interpretação do autor através das informações classificadas anteriormente.

Ainda, segundo Bardin (2011), a análise de conteúdo pode ter enfoque qualitativo ou quantitativo, sendo o enfoque desta pesquisa qualitativo, onde o pesquisador busca interpretar a partir de padrões contidos nos documentos em análise.

Nesta pesquisa, os dados foram categorizados e codificados a fim de fazer uma análise cruzada, identificando convergências e divergências entre as fontes de evidência, sendo estas, as entrevistas e os artigos selecionados para estudo.

Desta forma, a partir dos dados obtidos na literatura, foram classificadas as categorias conforme quadro abaixo.

Quadro 5 – Categorias de análise

<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>
Tempo	Relacionado a fatores de tempo no processo de manufatura.
Custo	Relacionado aos custos de manufatura.
Liberdade geométrica	Relacionado a maior gama de complexidade em modelos geométricos possíveis de fabricar.
Otimização dos recursos	Relacionado a disponibilidade dos recursos de manufatura, impactando no cumprimento de prazos
Qualidade	Relacionado a qualidade do produto manufaturado, e ao produto final.
Interferência humana	Relacionado ao processo de manufatura, onde há menor interferência humana quando comparado ao modelo convencional.
Investimento	Relacionado ao custo de investimento na tecnologia
Inovação	Relacionado ao impacto gerado ao mercado.
Sustentabilidade	Relacionado a aspectos ambientais, como resíduos gerados no processo e consumo energético.

Fonte: Elaborado pelo autor

Após definir os procedimentos metodológicos, o próximo capítulo apresenta a aplicação do estudo.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

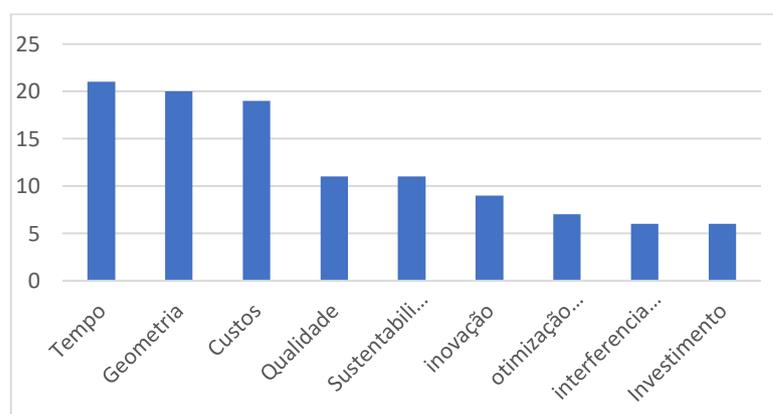
Este capítulo apresenta a análise dos conteúdos obtidos, sendo esta análise dividida em duas etapas. Na primeira etapa, são descritos os resultados obtidos através da pesquisa documental. A segunda etapa apresenta a análise de dados obtidos através de pesquisa realizada na empresa em estudo.

### 4.1 ANÁLISE DOCUMENTAL SOBRE OS IMPACTOS DA MANUFATURA ADITIVA

No intuito de identificar os impactos da manufatura aditiva observados pela literatura selecionada, foi quantificada a presença de citações conforme a categorização proposta.

Segundo a análise, os impactos de maior incidência na literatura foram tempo, geometria e custos, conforme Figura 17, onde é possível observar a incidência de citações de todas as categorias.

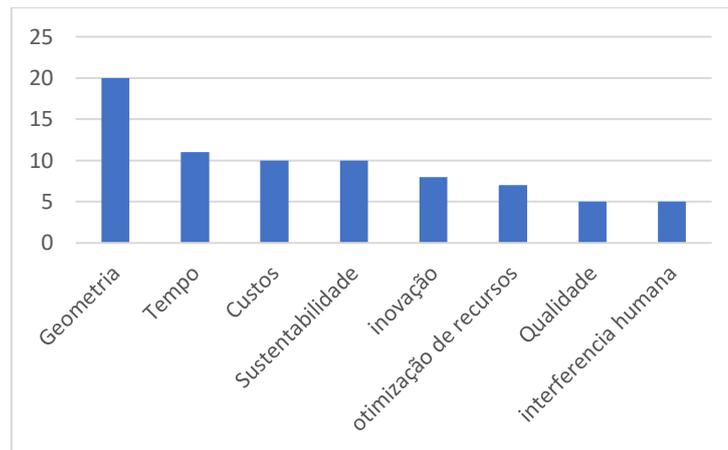
Figura 17 - Impactos Gerais da Manufatura Aditiva na Literatura



Fonte: Elaborado pelo autor

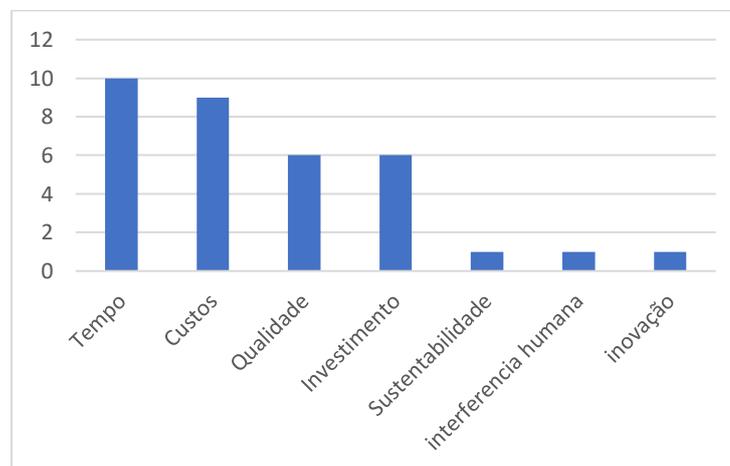
Com as citações categorizadas, é possível realizar uma análise individual e identificar se os impactos percebidos foram positivos ou negativos. De acordo com o material selecionado para análise, foi identificada maior presença de impactos positivos do que negativos. Dentro dos impactos positivos, os de maior relevância foram geometria, tempo custos e sustentabilidade. Já referente aos impactos negativos, os de maior destaque foram tempo, custos, investimento e qualidade. Nas imagens 18 e 19 são apresentados os dados de incidência separadamente em impactos positivos e impactos negativos.

Figura 18 - Impactos Positivos da Manufatura Aditiva na Literatura



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 - Impactos Negativos da Manufatura Aditiva na Literatura



Fonte: Elaborado pelo autor

Apresentados os resultados qualitativos da análise de conteúdo, a seguir serão analisados os impactos referentes a cada categoria de forma individual.

#### 4.1.1 Tempo

Tempo é uma das categorias com maior relevância na literatura, sendo percebida como ponto positivo e também negativo.

Em comparação aos métodos tradicionais de manufatura, o tempo de produção dos processos aditivos é relativamente lento, para atingir certo nível de qualidade (ATTARAN, 2017; JUNIOR; COSTA, 2019). Para Nishimura et al. (2018), a velocidade

é um grande inconveniente para o processo de produção na manufatura aditiva, podendo esta até duplicar tempos de fabricação.

Entretanto, a manufatura aditiva quando aplicada em algumas etapas do processo de produção, são percebidas reduções nos tempos de lead time, caso observado por Bahnini et al. (2018).

Bahnini et al. (2018) cita como uma vantagem do processo a produção em um único setup, diferente das máquinas CNC, onde se faz necessário maior planejamento do processo. Nenhuma ferramenta é necessária, o que reduz significativamente o tempo de produção e despesas (MELLOR; HAO; ZHANG, 2014). Além disso as máquinas de manufatura aditiva possibilitam a fabricação de várias peças ao mesmo tempo, o que pode auxiliar na otimização do processo (BAHNINI et al., 2018).

Outro ponto observado na literatura é referente as modificações de projeto, segundo Attaran (2017) 60% dos projetos sofrem algum tipo de alteração durante a produção, com o auxílio da manufatura aditiva as possibilidades de experimentação são mais facilitadas, o que garante maior confiabilidade na manufatura, e otimizando tempo de processo.

A utilização da manufatura aditiva acelera o processo de desenvolvimento de produto e este seria um dos motivos que levam tantas empresas a implementar seu uso (TANG; MAK; ZHAO, 2016).

Attaran (2017), comenta que a manufatura aditiva permite uma descentralização da manufatura, ou seja, os projetos podem ser transferidos de forma digital. Isso pode impactar consideravelmente na redução em tempos de logística do processo, além de redução de custo e impactos ambientais.

#### **4.1.2 Custo**

Custo foi a terceira categoria com maior repercussão dentre a literatura selecionada, e seus impactos foram percebidos de forma positiva e negativa em proporções semelhantes.

O custo da manufatura aditiva é visto como uma das maiores barreiras para adoção na indústria, porém, há exemplos que apontam que o valor agregado ao produto supera o problema com os custos (THOMPSON et al., 2016).

Estudos sobre manufatura aditiva apontam que quatro fatores são determinantes para o custo dos processos aditivos, tempo de operação, custo de máquina, custos de mão de obra e custos de material (MELLOR; HAO; ZHANG, 2014).

Para Manoharan et al. (2013), a manufatura aditiva impacta em menor tempo de desenvolvimento de protótipo, resultando em menor custo. Weller, Kleer e Piller (2015) cita que os custos de produção aumentam de acordo com a complexidade do projeto. A manufatura aditiva auxilia na produção de peças móveis e sistemas de resfriamento sem adicionar etapas no processo (WELLER; KLEER; PILLER, 2015; MANOGHARAN; WYSK; HARRYSSON, 2015).

Entretanto, para Bahnini et al. (2018), o uso da manufatura aditiva em substituição a usinagem CNC auxilia na redução de lead time, custos e tempo de projeto. Bahnini et al. (2018) ainda observa que na indústria aeroespacial a manufatura aditiva não se limita a fabricação de novos componentes, mas também ao conserto de peças de motores de aeronaves, refletindo em redução de custo e estendendo a vida útil.

Tang, Mak, Zhao (2016) comenta que, embora a manufatura tradicional seja mais econômica em casos de produção em massa, a manufatura aditiva é menos onerosa em produção de peças avulsas.

Attaran (2017) relata que 60% dos projetos enviados para ferramenta, passam por modificações durante o processo de produção, para estes casos, a manufatura aditiva tem impacto significativo na redução dos custos do processo.

Em um estudo de comparação entre a manufatura aditiva e subtrativa, Nishimura et al. (2018), observou que o custo de manufatura das peças obtidas por manufatura subtrativa tende a ser menor, levando em consideração custos de maquinário, insumos e custo hora/máquina.

#### **4.1.3 Geometria**

O impacto com maior incidência na literatura foi referente ao design. A possibilidade de manufatura de peças de geometria complexa com maior facilidade do que da forma subtrativa é citada por Junior e Costa (2019), Bahnini et al. (2018) e Nishimura et al. (2018). Esta liberdade geométrica, remove restrições tradicionais de fabricação (TANG; MAK; ZHAO, 2016).

Além de menores restrições no processo de design, a manufatura aditiva permite a fabricação de produtos otimizados funcionalmente (WELLER; KLEER; PILLER, 2015).

Nishimura et al. (2018), em comparação a manufatura subtrativa, aponta facilidades da manufatura aditiva na elaboração de detalhes internos dos modelos, além da possibilidade de obter peças ocas ou com ângulos negativos. Além disso recomenda o uso das tecnologias aditivas em modelos complexos onde detalhes internos podem dispensar futuras montagens.

Outro ponto é apresentado por Mellor, Hao e Zhang (2014), a facilidade e velocidade de alterar o design, além da personalização de produtos, o que em sua visão, possibilita a redução de desperdícios.

Segundo Tang, Mak, Zhao (2016), a manufatura aditiva também possibilita a redução de consumo de material, peso e até de resíduos produzidos, o que, aliado aos demais benefícios proporcionados pela liberdade geométrica a torna uma tecnologia inovadora. O potencial de redução de peso, através da liberdade de design, pode gerar uma economia em massa ao longo do ciclo de vida do produto (MELLOR; HAO; ZHANG, 2014). A liberdade de design, além de possibilitar novos produtos, abre novos mercados (MEIER; TAN, 2018).

Mellor, Hao e Zhang (2014) cita que além do design do produto, a manufatura impacta também sobre os designers. Por fim, Wong e Hernandez (2012) define a imaginação do engenheiro de produto como limite de design para peças a serem manufaturadas.

#### **4.1.4 Otimização de recursos**

A otimização dos recursos também foi considerada um impacto relevante pelo uso da manufatura aditiva.

Para Junior e Costa (2019), Weller, Kleer e Piller (2015) e Bahnini et al. (2018), fato de a manufatura aditiva permitir a produção em um único setup, além de reduzir tempos de processo, possibilita um aumento de disponibilidade dos recursos da corporação, possibilitando ainda a redução de custos, referente a redução destas etapas.

Outro benefício em relação ao método convencional é a oportunidade de utilização do tempo ocioso, muitas vezes os fins de semana podem ser utilizados para produção de peças demoradas (TANG; MAK; ZHAO, 2016).

Para Attaran (2017), as economias em tempo e custo, fornecem foco as outras áreas, o que torna as empresas mais eficientes e competitivas. Tang, Mak e Zhao (2016) complementa citando possível redução da cadeia de suprimentos, o que aumenta o espaço de lucro para a empresa.

#### **4.1.5 Qualidade**

A qualidade foi a quarta categoria em quantidade de citações na literatura em estudo. Como a manufatura aditiva possui diversos mecanismos de construção e movimentação de mesa é bastante difícil definir de uma maneira geral a precisão de qualidade no processo (BAHNINI et al., 2018).

Em comparação a usinagem CNC não há tolerâncias dimensionais específicas baseadas em normas como a ISO, que neste caso garantem a qualidade final de produção das peças (BAHNINI et al., 2018).

Dentre os tipos de manufatura aditiva existentes, Manoharan et al. (2013) aponta o SLA em vantagem técnica frente aos outros modelos existentes, sendo sua precisão dimensional dentro de 0,1mm e tendo melhor acabamento superficial entre todas as técnicas de impressão 3D.

Para Nishimura et al. (2018), fator determinante para a qualidade e robustez do produto, é a orientação da peça, pois a impressão em fatias gera efeito de degrau entre as camadas, afetando diretamente na qualidade do produto. Outro fator relevante apresentado por Nishimura et al. (2018), é também relacionado ao posicionamento da peça, em caso de detalhes frágeis não serem observados na construção, o modelo poderá apresentar alta fragilidade mecânica.

Em um experimento realizado por Nishimura et al. (2018), foram manufaturadas duas peças com mesma geometria, uma através da manufatura aditiva, outra em manufatura convencional. O modelo produzido através da manufatura aditiva, apresentou imprecisão dimensional ante ao modelo 3D, diferentemente do modelo fabricado através da usinagem CNC. Além disso, o modelo impresso apresentou o

efeito serrilhado, ocasionado pelas camadas de impressão, problema também inexistente na peça feita com manufatura subtrativa.

Bahnini et al. (2018) observa que a manufatura aditiva permite a produção de peças com geometrias complexas e estrutura anisotrópica, em tempos longos de produção.

Em termos de qualidade, a tecnologia tem grande potencial para avanços futuros. (ATTARAN, 2017).

#### **4.1.6 Interferência Humana**

A interferência humana é outro impacto encontrado na bibliografia, porém com menor incidência. Bahnini et al. (2018) cita como um impacto positivo a manufatura aditiva ser realizada em apenas um setup, reduzindo assim etapas no processo de fabricação quando comparado ao processo de usinagem CNC, onde peças complexas necessitam reposicionamento e realocação das peças, além de interferência humana no processo. A possibilidade de produzir peças em um único estágio, proporciona maior agilidade ao processo (JUNIOR; COSTA, 2019).

Determinar a sequência de programa para usinagem CNC é bastante complexo. Parâmetros de máquina, seleção de ferramentas são algumas das possíveis falhas que podem resultar em riscos a máquina ou até mesmo a segurança. Entretanto na manufatura aditiva ainda ocorrem falhas de interferência humana no design dos modelos (BAHNINI et al., 2018).

A redução de interferência humana também auxilia na redução de tempo de desenvolvimento do produto, uma vez que a eliminação de setups de ferramenta reduz significativamente o tempo de produção e despesas do processo (GARDAN, 2015; MELLOR; HAO; ZHANG, 2014).

Para Meier e Tan (2018), a redução de possíveis erros humanos proporciona um padrão e confiabilidade de se produzir peças exatamente iguais.

#### **4.1.7 Investimento**

A categoria investimento foi uma das categorias com menor número de citações na literatura selecionada, sendo que os autores que se referiram a esta categoria, a

consideraram como um impacto negativo na implementação da manufatura aditiva, porém ainda a ser explorado e com potencial para que o cenário mude de patamar.

Peças obtidas no processo de manufatura subtrativa tendem a ter o custo de produção menor do que com o uso da manufatura aditiva, devido ao alto valor de investimento em maquinário, aliado aos insumos que também costumam ter custo mais elevado (NISHIMURA et al., 2018).

Junior e Costa (2019), analisa o custo de investimento em maquinário de manufatura aditiva como alto em relação ao processo ainda ser relativamente lento para que seja possível atingir um nível de qualidade aceitável, o que acaba elevando também o preço final do produto. Entretanto, Junior e Costa (2019) justifica os custos de investimento elevado por se tratar de uma tecnologia ainda em evolução, o que permitirá uma redução dos custos deste processo no futuro.

Normalmente as impressoras 3D costumam ter uma de duas possíveis deficiências, ou possuem recursos altos, com preço elevado, ou possui recursos primitivos com custo baixo (ATTARAN, 2017). No entanto, Mellor, Hao e Zhang (2014) e Attaran (2017) comentam que esta realidade está mudando rapidamente, e que é apenas questão de tempo para que as impressoras se tornem mais acessíveis.

#### **4.1.8 Inovação**

Outra categoria analisada foi a de inovação. Para Attaran (2017), o uso da manufatura aditiva é verdadeiramente inovador, pois possibilita melhorias de eficiência de fabricação. Além disso, abre novas oportunidades de mercado.

A manufatura aditiva não substituirá completamente os métodos convencionais de manufatura, mas espera-se que haja uma revolução nas áreas de nicho (ATTARAN, 2017).

Para Meier e Tan (2018), as tecnologias de manufatura aditiva tem alto potencial para ampliar o processo de inovação na indústria de equipamentos esportivos, possibilitando novas formas de design, o que resulta em um aprimoramento no processo de desenvolvimento de produto, oportunizando reduções de consumo de material, peso do produto, além da quantidade de resíduos produzidos.

Mellor, Hao e Zhang (2014), considerava à época, que mesmo a manufatura aditiva ainda em fase inicial na maioria dos processos, sua implementação traria alto potencial de vantagem competitiva por meio da inovação e investimento na tecnologia.

Contudo, Meier e Tan (2018) observa que o conhecimento em equipamentos para implantação da manufatura aditiva ainda é muito baixa na indústria esportiva, mostrando um certo atraso em comparação a outros setores da indústria.

#### **4.1.9 Sustentabilidade**

Por fim, a sustentabilidade é outra categoria com consideráveis impactos no uso da manufatura aditiva. Entre eles, a geração de resíduos do processo é menor em comparação aos processos de manufatura subtrativa, pois é utilizado apenas o material necessário para confecção do produto (TANG; MAK; ZHAO, 2016; BAHNINI et al., 2018). Esta eliminação de resíduos deixa uma pegada ambiental menor (ATTARAN, 2017).

Meier e Tan (2018) observa que os processos de manufatura aditiva são menos sujeitos a falhas de produção, o que auxilia na menor taxa de desperdício de materiais.

Ainda em relação ao impacto ambiental, ponto relevante é o consumo energético, este consideravelmente inferior ao consumo de processos convencionais de manufatura, além disso a liberdade de design obtida na manufatura aditiva pode auxiliar também na eficiência energética do processo (TANG; MAK; ZHAO, 2016).

Para Nishimura et al. (2018), um dos problemas da manufatura aditiva em termos de sustentabilidade, é a menor taxa de reuso do suporte utilizado para a impressão das peças, entretanto o pó residual pode ser reaproveitado para construção de outras peças.

Em comparação ao processo de fresagem CNC Tang, Mak e Zhao (2016) observa que o processo de manufatura aditiva produz menos da metade de CO<sub>2</sub> devido a combinação de material, desperdício de fluido de corte e consumo energético.

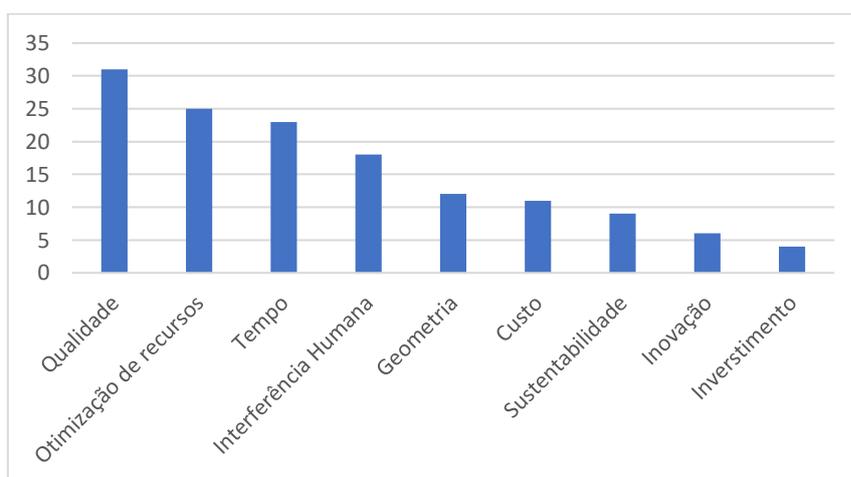
Outro ponto relevante é citado por Attaran (2017), a manufatura aditiva auxilia na fabricação descentralizada, ou seja, tem capacidade de reduzir potencialmente necessidades logísticas, uma vez que os projetos podem ser transferidos virtualmente, reduzindo além dos custos de transporte, o impacto ambiental.

## 4.2 ANÁLISE DAS ENTREVISTAS SOBRE OS IMPACTOS DA MANUFATURA ADITIVA

Assim como proposto para análise documental, foi quantificada a presença de citações conforme prévia categorização. Segundo esta análise, os impactos de maior incidência nas entrevistas foram a qualidade, seguida pela otimização de recursos e tempo.

Na Figura 20 é possível observar a incidência de citações, de cada categoria, nas entrevistas realizadas.

Figura 20 - Impactos Gerais da Manufatura Aditiva nas Entrevistas

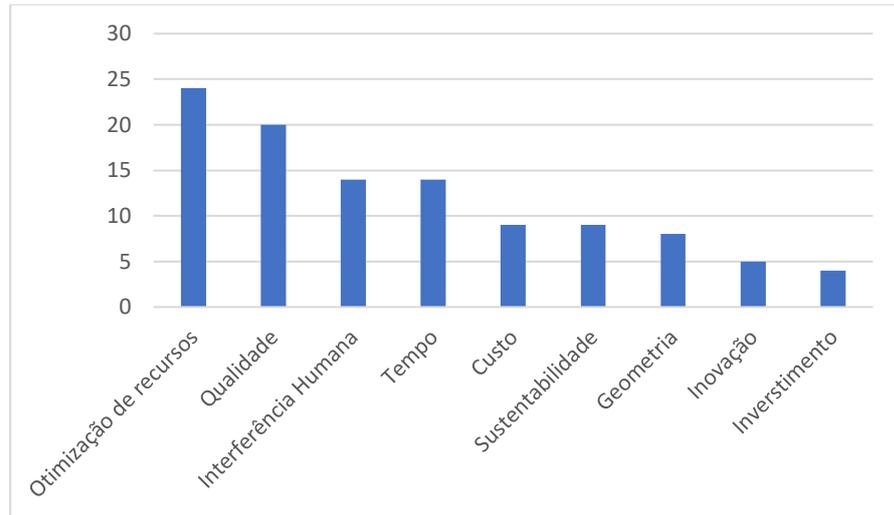


Fonte: Elaborado pelo autor

Após a categorização das citações, realizou-se uma análise individual a fim de identificar se o impacto percebido foi positivo ou negativo na percepção de cada entrevistado.

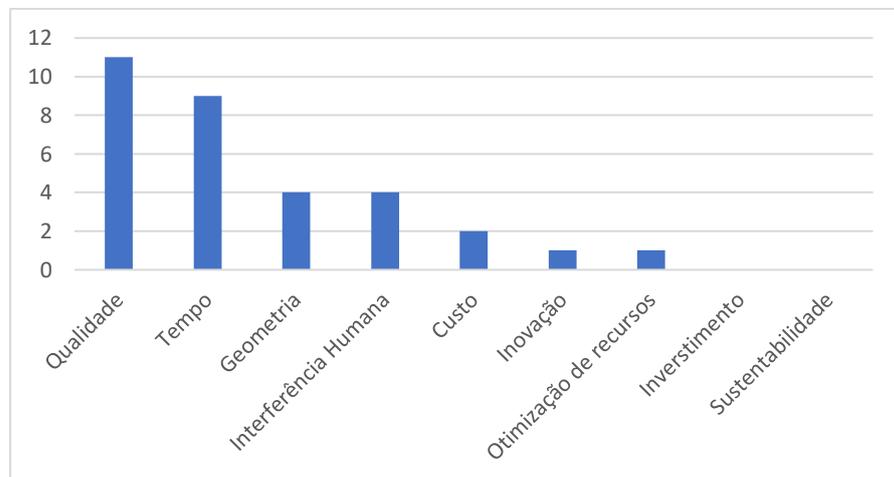
Assim como na literatura, os impactos positivos foram mais citados do que os impactos negativos, e dentro dos impactos positivos, os de maior relevância para os entrevistados foi a otimização de recursos, seguida pela qualidade, com destaque também para a interferência humana e o tempo. Em termos de impactos negativos citados pelos entrevistados, a qualidade e o tempo foram os de maior presença. A quantificação dos impactos positivos e negativos são apresentados nas figuras 21 e 22 respectivamente.

Figura 21 - Impactos Positivos da Manufatura Aditiva nas Entrevistas



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 - Impactos Negativos da Manufatura Aditiva nas Entrevistas



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados qualitativos da análise das entrevistas, a seguir foi realizada análise individual de cada categoria.

#### 4.2.1 Tempo

O tempo foi a categoria de maior equilíbrio entre os impactos positivos e negativos percebidos pelos entrevistados. Na percepção dos entrevistados, os impactos positivos, em sua maioria são percebidos não de forma exclusiva à

impressão, mas sim, levando em conta a comparação dos processos de fabricação das maquetes da forma convencional e impressa.

A implementação da manufatura aditiva impactou em outras áreas da empresa, e como o processo de fabricação do molde fundido foi alterado, a redução do lead time é percebida, como relata o Entrevistado 1 “[...] reduziu, porém ainda é difícil mensurar o quanto foi significativo no processo como um todo”.

[...] em maquetes sem textura, sem dúvida houve redução, mas em maquetes mais complexas, ainda não. Como disse, isso é mais referente a outras mudanças de processos que estão sendo aprimorados na empresa (Entrevistado 1).

Na comparação ao processo convencional antes utilizado pela empresa, a impressão da maquete, mesmo sendo mais lenta do que a usinagem, é percebida como positiva para a área de manufatura da empresa, devido a liberação da área de usinagem para produção de outros produtos, além de trazer maior confiabilidade e previsibilidade ao processo, conforme comenta o Entrevistado 1 “[...] temos um ganho na produtividade com a liberação das máquinas CNC. Uma impressora libera dois centros de usinagem.”

[...] O processo da manufatura aditiva por vezes pode até ser mais lento que a usinagem, porém temos a precisão de que estará pronto em determinado tempo, temos previsibilidade e melhor planejamento. Já na usinagem haviam outros problemas como setup, ferramenta, programa, então com essa menor interferência humana, o retrabalho é quase zero. (Entrevistado 3)

Já na percepção da área criativa da empresa, a manufatura aditiva auxiliou na agilidade em aprovações no visual de design, o que deu agilidade ao processo de desenvolvimento de sola, conforme cita o Entrevistado 2 “[...] o impacto foi bem grande e positivo, houve uma redução considerável no tempo de espera para uma aprovação.” Isso impacta diretamente no tempo de desenvolvimento de produto da empresa.

Antes do uso da manufatura aditiva, uma fabricação de uma maquete visual para aprovação do design levava 3 dias, hoje temos essa impressão de um dia para o outro, o que permitiu maior agilidade e assertividade ao pessoal da área de design. (Entrevistado 2)

Sobre os impactos negativos percebidos pelos entrevistados, o tempo de aplicação da textura via software teve grande repercussão. [...] “a aplicação de textura nas maquetes ainda é um ponto que não evoluímos para redução de tempo de desenvolvimento”, cita o Entrevistado 3. Para o Entrevistado 2 a aplicação de textura nas maquetes tem grande impacto no tempo de confecção [...] o CAM e a usinagens são processos mais lentos em maquetes sem textura, em caso de aplicação e impressão o processo é mais lento que o convencional [...]”.

Este processo, por se tratar de algo com muito detalhamento, acaba levando muito tempo de processamento de máquina, este tempo que me refiro que não foi mensurado de forma correta. Este tempo de aplicação é tão grande ou até maior do que o tempo de aplicação da textura química nos moldes, em horas quase se equivale, porém se torna mais rápido em caso de coleções, pois o modelo pode ser escalado, e aí sim se tem um ganho real. (Entrevistado 3)

Ainda referente aos impactos negativos relativos ao tempo percebidos pelos entrevistados no processo, ambos relatam que muito desta percepção se deu por uma alta expectativa gerada e não confirmada. Para o Entrevistado 3, “[...] houve sim uma redução no tempo de processo, mas não conforme o esperado. Durante o processo de implementação tivemos maior percepção do real impacto[...]”. corroborando com a análise do Entrevistado 4 “[...] acredito que não tão grande quanto era a expectativa. O processo de aplicar a textura no modelo 3D ainda é bastante grande e complexo, essa etapa não havia sido estimada [...]”, e também do Entrevistado 1 “[...] ainda não chegamos no resultado que desejamos.”

Quando começamos a prospectar a implementação da impressão 3D, tínhamos uma expectativa muito alta, porém, apesar de estarmos falando de uma tecnologia de ponta, ainda há limitações em termos de qualidade e velocidade [...] (Entrevistado 3).

Quanto a não redução do lead time em alguns casos, ambos entrevistados justificam outros motivos para que não seja perceptível. “[...] hoje produzimos no mesmo tempo, pois ainda temos bastante retrabalho no processo de fabricação dos moldes [...]” comenta o Entrevistado 1. Para o Entrevistado 2 e redução de tempo foi absorvida por outras etapas do processo produtivo “[...] esses 30% são absorvidos por outras etapas que estão sendo trabalhadas em melhorias”.

Ainda não tivemos a tempo de redução, devido a demanda. Com o aumento da demanda, trabalhamos com mais projetos em paralelo. Não reduzimos o lead time de uma coleção, porém aumentamos a nossa capacidade de atender a demanda [...] (Entrevistado 3).

Contudo, os entrevistados ainda acreditam que com a melhoria dos processos internos, haverá sim uma redução no tempo de desenvolvimento de produto. “[...] para o desenvolvimento do produto final, ainda não tivemos um resultado de acordo com o objetivo traçado, mas acredito que estamos no caminho [...]” conforme pode ser observado:

Sem dúvida a manufatura aditiva vai atingir uma redução impactante no lead time dos moldes, mas os processos que dela dependem ainda estão passando por melhorias e estas, ainda não atingiram o nível que desejamos em termos de redução de tempo [...] (Entrevistado 1).

Em síntese, a manufatura aditiva apresenta como impactos positivos na categoria tempo, a redução de lead time dos moldes, e a redução no desenvolvimento de produto. Já como impacto negativo, o tempo do ciclo de impressão é visto como grande obstáculo ainda da tecnologia. Dando sequência, a próxima seção apresenta os impactos percebidos pelos entrevistados na área de custos.

#### **4.2.2 Custo**

O custo, foi uma categoria que não teve tanta representatividade na percepção dos entrevistados. Porém quando citado, seus impactos positivos se sobressaíram aos impactos negativos percebidos.

De acordo com o Entrevistado 1 a redução de custo é percebida no tempo de manufatura, “[...] essa redução de custo é mais perceptível pelo tempo de fabricação do que uma redução de custo da maquete [...]”, e complementa, “[...] a nossa rentabilidade foi sim maior, houve a redução de custo, devido ao tempo que leva [...]”. Essa redução de custo da maquete, não foi repassada no valor do molde, conforme relata o Entrevistado 2 abaixo:

[...] Temos dois tipos de maquetes e dois tipos de resina. No geral, em termos de custo, estimo que o custo chegue a 50% menor, levando em consideração

material, mão de obra e máquina. Tem casos que o custo da maquete pode chegar até a 70% menos do que no processo convencional. Essa redução de custo, não foi repassada no valor do molde [...] (Entrevistado 2).

Também foi percebida uma redução de custo referente a matéria-prima, pessoas e processos, isso se deu pela redução das etapas de usinagem CNC e todos os seus custos agregados, além da área de gravação química, onde os insumos tem sua relevância no custo de fabricação dos moldes. Isto pode ser observado nos trechos a seguir:

Houve a redução em custo de matéria-prima e processos, além da redução do custo das áreas que não são mais utilizadas, como usinagem e textura química. (Entrevistado 3)

[...] o custo do molde foi reduzido, isso pela redução das etapas de fabricação da maquete. O custo da maquete em si, se equipara a maquete usinada, mas vendo o custo do molde, houve sim uma redução. Além disso o preço do molde foi mantido, isso aumentou também nossa margem de lucro. (Entrevistado 4)

Outro ponto observado foi em relação redução de terceirização de usinagem CNC, algo obtido através do aumento da disponibilidade da área de usinagem após o implemento da manufatura aditiva, conforme comentado pelo Entrevistado 2 “[...] com o recurso da impressão, tivemos o aumento da disponibilidade de usinagem, o que nos fez reduzir a necessidade de terceirizar alguns projetos [...]” e também observado pelo Entrevistado 1 “[...] isso também reflete na terceirização de usinagem, hoje a terceirização foi reduzida, mesmo com aumento da demanda.” Esta redução da terceirização de usinagem impacta diretamente nos custos da empresa.

Como aspecto negativo relativo a custo, foi citado o custo da mão de obra especializada que teve que ser contratada para a área de 3D, conforme pode ser observado no trecho abaixo:

Hoje o processo de manufatura foi digitalizado, e essa digitalização nos traz consistência, ou seja, temos repetibilidade, o que nos trouxe ganhos ao produto. Só que essa digitalização aumentou a mão de obra da área de projetos da empresa (Entrevistado 1)

Em resumo os impactos percebidos pelos entrevistados para a categoria de custos foram a redução de custo de matéria-prima da maquete, redução do custo operacional, redução ou eliminação de serviços de usinagem terceirizados, estes vistos de forma positiva. Já de forma negativa, foi observado pelos entrevistados o custo operacional de mão de obra especializada para a área de engenharia. Na próxima sessão são apresentados os impactos observados pelos entrevistados na categoria geometria.

### 4.2.3 Geometria

A geometria foi a quinta categoria em citações observadas nos relatos dos entrevistados, e assim como a maioria das categorias, seus impactos positivos tiveram maior destaque em relação aos impactos negativos.

De acordo com os entrevistados, a geometria da maquete impacta diretamente na forma como ela vai ser manufaturada (impressa ou usinada), quanto mais complexa sua geometria, mais interessante o uso da manufatura aditiva. Através da implementação da manufatura aditiva foram reduzidos alguns limitantes geométricos nas maquetes, conforme observado pelo Entrevistado 3, “[...] hoje com a impressão, não temos mais a limitação que tínhamos no passado [...]”. Para a empresa, a manufatura aditiva simplificou o processo de manufatura de maquetes que possuem geometria com ângulos negativos, como pode ser observado abaixo:

[...] trabalhamos em torno de 95% da usinagem em 3 eixos, então peças com geometria negativa impacta na possibilidade ou não de ser manufaturada. A usinagem em 4° eixo foi iniciada posterior a implementação da impressão 3d, e então nem havia a possibilidade de detalhamento e qualidade necessários. Muitos dos projetos em fundição, só são possíveis, graças a manufatura aditiva, acabaram as limitações nesse sentido. (Entrevistado 3)

[...] ao mesmo tempo, há peças com ângulos negativos ou áreas que são mais complexas para confecção do modelo via manufatura convencional, nesses casos a manufatura aditiva favorece ao processo. (Entrevistado 2).

Um contraponto é posto pelo Entrevistado 1, de que não somente a limitação geométrica hoje define a forma de manufatura das maquetes, mas também uma otimização dos recursos disponíveis de acordo com a demanda, conforme comenta sobre a existência da limitação geométrica:

Sim, mas ao passo que ela é sim, também é passível de interpretação, pois isso depende de capacidade x demanda. Mas sim, a geometria influencia muito na escolha da forma a ser produzida a maquete (Entrevistado 1).

Entretanto a manufatura aditiva possui alguns limitantes técnicos que inviabilizam seu uso de forma a ser descontinuado o uso de manufatura subtrativa para a confecção das maquetes, conforme pode ser observado nos comentários abaixo sobre a limitação técnica do processo de impressão:

Alguns casos ainda são limitantes que tornam o uso inviável. Alguns modelos de textura, exigem nível de detalhamento maior do que a resolução atingido pelas impressoras. Claro, isso deve refletir em uns 5% dos projetos. Outra questão é a qualidade das impressoras por vezes é menor que a usinagem, e aí sim, voltamos aquela questão sobre a geometria do produto impactar na escolha de fabricação da maquete, tem sim casos em que a usinagem atende melhor aos requisitos do que a manufatura aditiva, porém no todo a qualidade é superior nas maquetes impressas. (Entrevistado 1).

[...] algumas maquetes tem alguns cantos vivos, que na usinagem conseguimos melhor acabamento do que nas maquetes impressas, isso devido ao serrilhado das camadas de impressão. Em maquetes usinadas, o modelo sai perfeito. (Entrevistado 4).

[...] primeiro ponto seria a precisão. O processo ainda não atende o nível de precisão para todos os projetos que trabalhamos, nesses casos a usinagem CNC ainda é superior (Entrevistado 2).

Em síntese a categoria geometria teve repercussão positiva entre os entrevistados, visto que simplificou a manufatura de maquetes de geometria complexa, possibilitou a produção de maquetes que antes não eram possíveis através da manufatura convencional. Entretanto a tecnologia ainda não atinge 100% da

demanda devido a resolução das impressoras ser inferior em termos de qualidade a definição atingida pela texturização química.

#### 4.2.4 Otimização de recursos

Para os entrevistados, uma das categorias com maiores impactos da manufatura aditiva, foi a otimização de recursos, ficando apenas atrás da categoria qualidade no quantitativo de citações. De acordo com os entrevistados, esta é a categoria com maior impacto positivo dentro da empresa.

Dentro do processo de fabricação dos moldes, a impressão das maquetes fez com que fossem reduzidas algumas etapas, entre elas a gravação química, a usinagem e conseqüentemente a área de programação para usinagem (CAM). Com a eliminação destas etapas no processo da fabricação de maquetes, essas áreas da empresa tiveram aumento de sua disponibilidade conforme é observado pelos entrevistados:

[...] aumentamos a nossa capacidade produtiva, sem necessidade de aumento de maquinário ou mão de obra, inclusive com redução de mão de obra, visto que nossa área de textura foi reduzida, desde a introdução das maquetes impressas. Obtivemos um aumento de disponibilidade de recursos, principalmente nos setores de usinagem CNC e gravação química (Entrevistado 3).

[...] temos um ganho de 50% na produtividade, que seria a liberação das máquinas CNC para usinagem de outros produtos. Uma impressora, libera praticamente dois centros de usinagem CNC (Entrevistado 1).

Esse aumento da disponibilidade oportunizou a empresa escolher o método de fabricação das maquetes não apenas pela viabilidade econômica ou geométrica, mas também de acordo com a capacidade x demanda, onde a escolha é feita de acordo com a melhor otimização dos recursos da empresa, conforme pode ser observado nos comentários abaixo:

[...] uma maquete pode ser economicamente e tecnicamente viável ser fabricada via manufatura aditiva, entretanto, se estamos com demanda alta, e esse é um projeto de classificação fácil ou média, ele pode ser direcionado

para fabricação via usinagem CNC, assim como o inverso também é verdadeiro, há casos que maquetes são simples e de menor custo para usinagem, mas a capacidade da área inviabiliza a fabricação e nesse caso, as maquetes podem ser impressas. Então, eu diria que além da viabilidade técnica e econômica, a demanda de usinagem ou impressão ajuda no direcionamento do processo de manufatura das maquetes. É uma escolha mais pela capacidade x demanda, e não somente pela geometria (Entrevistado 1).

Aumentou a nossa capacidade de absorver a demanda. Antes tínhamos 3 máquinas CNC fabricando maquetes, hoje temos uma impressora que supre a demanda que estas 3 máquinas CNC realizariam, hoje isso já não é o suficiente para atender a demanda de projetos, e por isso ainda temos que balancear a impressão e usinagem de acordo com a necessidade prazos e qualidade. (Entrevistado 2).

Esta otimização nos recursos refletiu também nos prazos de entrega dos moldes, conforme comenta o Entrevistado 3, “Os prazos ficaram menores, e mais precisos. Hoje temos número inexpressivo de atraso em entrega destes moldes”.

Outro ponto observado pelos entrevistados foi a redução da terceirização de usinagem que foi atingida com esta otimização dos recursos, como comentam abaixo:

Com o uso da manufatura aditiva, enquanto as maquetes estão sendo impressas, temos a liberação de nossa área de usinagem, e aí que foi nosso maior ganho. Isso também reflete na terceirização de usinagem, hoje a terceirização de usinagem foi reduzida, mesmo com o aumento da demanda. (Entrevistado 1).

Com o recurso da impressão, tivemos o aumento da disponibilidade de usinagem, o que nos fez reduzir a necessidade de terceirizar alguns projetos. Com a chegada da nova impressora, acredito que conseguiremos balancear melhor ainda essa demanda, e tornar esse ganho de disponibilidade mais visível no processo (Entrevistado 2).

Em contrapartida, um impacto negativo foi percebido por um dos entrevistados, no que se referiu a otimização de recursos. Foi a necessidade da ampliação da área de projetos para preparação da maquete e aplicação da textura nas mesmas “achávamos que teríamos apenas a redução mesmo, porém tivemos sim acréscimo

de etapas que não mensuramos da forma correta” comentou o Entrevistado 3 sobre a contratação de mão de obra especializada para a área de projetos.

Em síntese os impactos percebidos pelos entrevistados na categoria otimização de recursos foram no aumento da disponibilidade produtiva nas áreas de usinagem e gravação química. Este aumento de disponibilidade oportunizou o aumento da produtividade, e melhor administração dos recursos de acordo com a demanda. Além disso, a otimização dos recursos refletiu em redução nos prazos de entrega, e na necessidade de terceirização de usinagem por falta de capacidade.

#### 4.2.5 Qualidade

Qualidade foi a categoria com maior número de citações pelos entrevistados, sendo o de maior frequência de citações referentes a impactos negativos. Os impactos positivos em sua maioria constatam uma melhoria dos processos e do produto final, como foi observado abaixo:

[...] o processo de manufatura foi digitalizado, e essa digitalização nos traz consistência, ou seja, temos repetibilidade, o que nos trouxe ganhos ao produto. [...] a qualidade do molde final, hoje, é sem dúvida maior [...] (Entrevistado 1).

Muito da percepção dos impactos positivos percebidos, são em uma comparação a como era o processo de manufatura antes do uso das impressoras na empresa, então a categoria qualidade teve maior repercussão positiva em melhorias do processo do que de fato na qualidade do produto maquete, visto que pontos comentados pelos entrevistados como melhoria na qualidade, são consequência de impactos percebidos em outras categorias como a interferência humana, o tempo, e geometria, como pode ser observado nas citações abaixo:

[...] prazos ficaram menores, e mais precisos. Hoje temos número inexpressivo de atraso em entrega destes moldes. Obtivemos melhoria de qualidade, em menor tempo, além do enorme aumento de disponibilidade que tivemos nas áreas de usinagem e também de textura química (Entrevistado 3).

Comparado aos erros de processo de usinagem hoje as falhas são mínimas, mas isso mais por razão de falha humana mesmo, havia muitos erros na área de usinagem relativos a diferenças de usinagem, ferramentas erradas. [...] A qualidade das impressoras por vezes é menor que a usinagem, e aí sim, voltamos aquela questão sobre a geometria do produto impactar na escolha de fabricação da maquete, tem sim casos em que a usinagem atende melhor aos requisitos do que a manufatura aditiva, porém no todo a qualidade é superior nas maquetes impressas. Isso visto a nossa realidade como matrizaria, onde ainda não temos o “zero-point” (sistema de fixação), não temos quarto e quinto eixos simultâneos o que dá margem a falha humana. (Entrevistado 1).

Quando feita uma comparação de produto entre maquetes usinadas e impressas, o Entrevistado 3 comenta que são produtos distintos, uma vez que as maquetes usinadas não são produzidas com a textura, e sim os moldes são texturizados posteriormente “[...] para maquetes com textura, não há parâmetros de comparação, já que antes as maquetes eram usinadas sem a textura, e sim havia o processo de gravação química.”

Alguns impactos negativos também são percebidos sobre a qualidade das maquetes impressas. Ambos entrevistados citam a emenda das camadas como negativo, conforme citado pelo Entrevistado 3 “[...] O sistema que usamos, o SLA trabalha com camadas, então sempre há a emenda das camadas [...]”. Este serrilhado necessita um trabalho de acabamento posterior nas maquetes, e em alguns poucos casos, inviabiliza que a maquete seja impressa. Este acabamento posterior é citado pelo Entrevistado 2 “[...] há necessidade de um acabamento pois ainda fica aquele serrilhado do fatiamento das camadas, porém é mais ágil do que o acabamento pós usinagem”. Em contrapartida, o Entrevistado 2 comenta que no processo de usinagem, as maquetes também apresentam falhas inerentes ao processo de tombamento, visto que a empresa não trabalha com usinagem de 5 eixos simultâneos, conforme relata no trecho abaixo:

As maquetes feitas no CNC, ficam com as marcas de tombamento de eixos, ficam as marcas de encontro das usinagens o que acaba gerando bastante trabalho de ajuste e acabamento (Entrevistado 2).

Outro ponto observado foi referente a precisão e tolerâncias do processo de manufatura aditiva. Para os entrevistados, a tecnologia não atinge os mesmos níveis de qualidade da manufatura subtrativa, conforme relata abaixo:

A manufatura aditiva, por melhor equipamento que seja, ainda não alcançou os níveis de precisão e qualidade de um CNC de alta precisão. O processo ainda não atende o nível de precisão para todos os projetos que trabalhamos, nesses casos a usinagem CNC ainda é superior. (Entrevistado 2).

Sobre esta falta de precisão os entrevistados comentam que são poucos os casos que a tecnologia não atende visto a gama de projetos executados, e que a limitação de capacidade ainda é maior, e este detalhe acaba não sendo percebido, como pode ser observado nos comentários abaixo:

[...] ainda há casos onde é necessário que seja usinado, mas são muito poucos os casos, pois mesmo com a marca das camadas, o acabamento manual posterior já é suficiente para atingir o nível de qualidade exigido, na maioria dos casos, então a opção de usinar acaba se dando mais pela demanda ser maior por vezes do que a capacidade de impressão (Entrevistado 3).

Em nosso caso, é mais de acordo com a capacidade x demanda. Caso nossa demanda esteja dentro da capacidade produtiva, as tolerâncias podem ser ajustadas no modelo 3D, faria o projeto, verificaria as distorções de tolerâncias e ajustaria o 3D antes da impressão. No caso, utilizaria esse ajuste como um recurso para adaptar as tolerâncias a necessidade, reduzindo esse limitante técnico da impressão (Entrevistado 2). Alguns casos ainda são limitantes que tornam o uso inviável. Alguns modelos de textura, exigem nível de detalhamento maior do que a resolução atingido pelas impressoras. Claro, isso deve refletir em uns 5% dos projetos (Entrevistado 1).

Em resumo, a qualidade é percebida pelos entrevistados de forma positiva e também negativa. De forma positiva, os entrevistados comentam as melhorias de qualidade no produto final e nos processos. Já como impactos negativos os entrevistados apontam as emendas das camadas e a menor precisão e tolerâncias, quando comparado ao processo de usinagem CNC.

#### **4.2.6 Interferência Humana**

Esta categoria foi a quarta com maior número de impactos percebidos pelos entrevistados, assim como nas outras, os grandes impactos desta categoria, foram

percebidos de forma positiva, visto que com a implementação da manufatura aditiva, houve redução na interferência humana no processo, o que teve impacto direto na qualidade das maquetes, e conseqüentemente dos moldes.

Impacto que teve grande repercussão entre os entrevistados foi a redução do número de pessoas envolvidas no processo. Essa redução da mão de obra se deu através da eliminação da necessidade de usinagem das maquetes, conforme observado abaixo:

Em mão de obra, reduzimos a interferência de 3 pessoas no processo. Foi eliminado um operador de CAM, um operador CNC e reduziu o trabalho de acabamento manual, esse não foi eliminado, apenas reduziu. (Entrevistado 2).

Avaliando o processo, tínhamos 3 equipes envolvidas no processo de fabricação da maquete, e hoje temos apenas uma. Logo reduzimos a chance de erro por falha humana na confecção das maquetes, além de outras falhas inerentes aos processos. (Entrevistado 4).

A quantia de mão de obra foi reduzida, mas também houve o acréscimo de posto de trabalho com a implementação da manufatura aditiva. Para a impressão das maquetes, o processo foi digitalizado e houve a necessidade de incremento de mão de obra especializada, o que auxiliou na redução de falhas no processo, conforme observa o Entrevistado 1, “[...] reduzimos a mão de obra “artesanal”, e digitalizamos o processo, com mão de obra especializada. Nosso índice de erro hoje por falha humana é quase zero.” Esta digitalização citada pelo Entrevistado 1, impactou diretamente na qualidade final das maquetes, como observado abaixo:

Havia um fator relevante nesse ponto, que o sucesso da execução da maquete, dependia de um projetista, um programador, e um operador da máquina CNC. Hoje temos apenas um projetista. A chance de erro continua existindo, mas foi minimizada, já que hoje eliminamos duas pessoas envolvidas no processo. (Entrevistado 3)

A redução da interferência humana também aumenta a confiabilidade do processo, conforme cita o Entrevistado 3 “[...] Essa redução de pessoas, além de custo, agrega maior confiabilidade e previsibilidade da produção”. Essa maior

confiabilidade citada vai de encontro a comparação realizada pelo Entrevistado 1 frente as falhas de ambos os processos, conforme segue abaixo:

Comparado aos erros de processo de usinagem hoje as falhas são mínimas, mas isso mais por razão de falha humana mesmo, havia muitos erros na área de usinagem relativos a diferenças de usinagem, ferramentas erradas (Entrevistado 1).

Após a maquete impressa ainda há necessidade de um acabamento, devido a imperfeições gerada pelas camadas da impressão, entretanto segundo os entrevistados, este acabamento já era realizado com as maquetes usinadas e com maior necessidade conforme citam abaixo:

O processo de maquetaria, é o mesmo. Por vezes é necessário maior ajuste, por vezes menor interferência. Mas no geral, a finalização da maquete é muito semelhante nos processos de impressão e usinagem, porém a frequência menor. Por exemplo, as maquetes impressas têm esse ajuste fino do processo mesmo. As maquetes usinadas, como falamos antes, apresentavam muitas falhas dos processos anteriores o que gerava um maior trabalho de acabamento, uma maior interferência humana para ajustes. (Entrevistado 1).

As maquetes feitas no CNC, ficam com as marcas de tombamento de eixos, ficam as marcas de encontro das usinagens o que acaba gerando bastante trabalho de ajuste e acabamento. (Entrevistado 2).

[...] semelhantes aos de acabamento de uma maquete usinada. É necessário por vezes um pequeno ajuste nessas emendas das camadas, mas ainda assim, o trabalho de acabamento nas maquetes impressas é menor do que nas maquetes usinadas. (Entrevistado 3).

Em síntese os impactos referentes a interferência humana identificados nas entrevistas, foram na sua maioria impactos positivos, sendo destaque entre eles a redução do número de pessoas envolvidas no processo de manufatura, o que impactou diretamente em custo e qualidade das maquetes.

#### 4.2.7 Investimento

Referente ao investimento, foi a categoria de menor número de citações pelos entrevistados. Entretanto quando citada, sempre seu impacto foi percebido de forma positiva pelos entrevistados. Interpretando a visão dos entrevistados, investimento foi também tratado como área de custo, e por isso a abordagem de forma específica teve pouca relevância de conteúdo nas suas respostas.

Outra possível interpretação é a de que o custo para investimento nas impressoras é baixo, quando comparado aos centros de usinagem, logo este tema não é visto como uma barreira para empresa. Questionado sobre a substituição de centros de usinagem pelas impressoras, o Entrevistado 3 dá respaldo, como pode ser observado no trecho “[...] sem dúvida, o investimento em uma impressora a mais, nos abre disponibilidade de no mínimo dois centros de usinagem CNC. Havendo demanda, é sim viável”.

Do ponto de vista do Entrevistado 4, para haver uma substituição completa da tecnologia para manufatura das maquetes, é necessário que haja maior evolução na qualidade das impressoras, em termos de resolução, para que abranja a necessidade da empresa, conforme cita “[...] Completamente, só se as máquinas evoluírem a nível de precisão em qualidade, pois hoje ainda temos muitos modelos que são necessários a manufatura subtrativa”.

Sobre a possibilidade de ampliar o investimento em novas impressoras, além de considerar a viabilidade, alguns entrevistados comentam que já foi solicitada a aquisição para atender a demanda futura, conforme pode ser observado no relato do Entrevistado 2 “[...] Já estamos fazendo a aquisição de mais uma impressora igual a que já temos, para dobrar a capacidade”. E também comentado pelo Entrevistado 1 “[...] já temos planejamento para ampliação do recurso para manufatura aditiva.”

Em resumo, o impacto percebido na categoria investimento, foi de forma positiva, sendo este o baixo custo de aquisição, frente a aquisição de centros de usinagem CNC, apenas com a ressalva de que a substituição por completo da tecnologia apenas será viável quando a resolução das impressoras atender o nível de qualidade exigido para 100% da demanda.

#### 4.2.8 Inovação

Inovação foi outra categoria de baixa repercussão entre os entrevistados, tendo maior número de citações apenas do que a categoria investimento. Ponto de destaque foi a possibilidade de a área criativa da empresa poder inovar em seus produtos, visto que a geometria não mais é um limitante para o design de produto, graças a utilização da manufatura aditiva, como pode ser percebido no trecho abaixo:

Do ponto de vista de inovação, a implementação da manufatura aditiva permite a fabricação de maquetes em formatos que antes não eram nem cogitados, então isso abriu a gama de possibilidades até para o pessoal do criativo [...] (Entrevistado 1).

Ainda como impacto positivo, os entrevistados apontam o uso da manufatura aditiva como um diferencial de mercado junto aos clientes, conforme observa o Entrevistado 4, “[...] hoje somos vistos como referência no mercado. Além da percepção de antigos clientes, ampliamos nosso alcance em novos clientes.”, que vai de encontro aos comentários que seguem sobre o tema:

Alguns de nossos fornecedores trabalham com programas de inovação onde os fornecedores são avaliados. De acordo com a classificação desta avaliação os fornecedores são categorizados, conforme o nível de inovação da empresa. Após a implementação da MA a empresa mudou de patamar, e hoje fazemos produtos de lançamento mundial paralelamente a Ásia (Entrevistado 3).

Somos vistos com ótimos olhos desde a implementação, muitos projetos de marcas que são confidenciais, hoje são escolhidos a serem feitos aqui, pela manufatura aditiva. Aumentou a nossa gama de participação em projetos de grandes marcas parceiras (Entrevistado 2).

Um contraponto é apresentado pelo Entrevistado 1 referente a limitação na diversificação de matéria-prima a ser manufaturada, o que acaba reduzindo as possibilidades de aplicação da manufatura aditiva pelo setor calçadista como um todo, como pode ser observado abaixo:

[...] De uma forma geral, sobre a tecnologia, não apenas utilizada na confecção de maquetes, mas como um todo, vejo como ainda como grande limitante da tecnologia a matéria-prima. Por exemplo, se conseguíssemos imprimir EVA, isso nos traria uma gama muito maior de aplicação da tecnologia. (Entrevistado 1).

Em síntese, os impactos percebidos nas entrevistas para a categoria inovação foram a possibilidade da manufatura de novas geometrias, o que teve impacto direto na área de design. Também a tecnologia impactou de forma positiva nos critérios competitivos de mercado, visto que a empresa é avaliada pelos clientes, e a implementação da manufatura aditiva foi um diferencial na sua classificação como fornecedor em determinados casos. Como ponto negativo relativo à tecnologia na área de inovação, foi apontada a falta de diversificação da matéria-prima da resina como um limitante para maior utilização da tecnologia na área calçadista.

#### **4.2.9 Sustentabilidade**

Apesar da área de sustentabilidade ter grande relevância na literatura, teve baixa repercussão entre os entrevistados, ficando apenas a frente das categorias inovação e investimento em número de citações nas entrevistas realizadas. A sustentabilidade, quando citada, foi apenas lembrada de forma positiva pelos entrevistados, o que nos mostra que nenhum dos entrevistados percebe algum impacto negativo da implementação da tecnologia em termos de sustentabilidade.

Na visão dos entrevistados a redução de consumo energético, além da menor geração de resíduos são pontos favoráveis na comparação ao processo de manufatura utilizado anteriormente. A redução do consumo energético foi citada por todos entrevistados, entretanto o Entrevistado 1 cita que a eficiência energética das impressoras comparada aos centros de usinagem, apesar de serem grandes, apresentam um impacto pequeno quando comparado a outras áreas da empresa, onde o consumo energético tem maior impacto, conforme cita abaixo:

[...] por exemplo, comparando a uma melhoria de eficiência energética em uma injetora, o ganho de sustentabilidade é mínimo, porém é mais um ponto para somar entre todas as outras frentes que atuamos na área de sustentabilidade (Entrevistado 1).

Já referente a geração de resíduos, os entrevistados apontam que a manufatura convencional, na forma de usinagem, gera maior volume de resíduos frente a manufatura aditiva, como comenta o Entrevistado 2 abaixo:

[...] a usinagem CNC gera uma infinidade de resíduos como o cavaco, óleo lubrificante entre outros. Na manufatura aditiva não temos perda de resina, apenas o suporte, que é biodegradável. (Entrevistado 2)

[...] a usinagem gera bastante resíduo em comparação a resina de impressão, onde há apenas o suporte, porém este é reciclável. Também há menor consumo energético (Entrevistado 4).

Para o Entrevistado 4 a confiabilidade da manufatura aditiva também impacta em termos de sustentabilidade, conforme cita “[...] tem uma repetibilidade, um padrão de qualidade e isso gera menor retrabalho, conseqüentemente melhor uso dos recursos [...]”.

A responsabilidade ambiental além de ser uma das marcas da empresa, é acompanhada de perto por alguns clientes que incluem a sustentabilidade em avaliações e validações de fornecedores, como indica o comentário que segue:

Alguns dos nossos clientes tem políticas de sustentabilidade e sim, são rígidos com estes controles, então além de todos outros benefícios relativos à sustentabilidade que a manufatura aditiva promove, a empresa é vista com bons olhos para nossa classificação como fornecedores (Entrevistado 3).

Entretanto esta visão da sustentabilidade promovida pela manufatura aditiva ter um impacto sobre o cliente é percebida de outra forma pelo Entrevistado 1, que diminui a relevância do impacto direto da manufatura aditiva no contexto ambiental percebido pelo cliente “[...] isso não é percebido especificamente, porém é visto num contexto geral e aí, faz sim a diferença. Isso soma a outros critérios para nossa classificação como fornecedores de nossos clientes. Já o Entrevistado 2 entende como uma abordagem diferente na comunicação com o cliente, onde o foco foi em apresentar o uso da tecnologia, como um recurso de inovação e não com impacto sustentável “[...]”

isso ainda não está sendo monitorado na comunicação com o cliente, ainda é apresentado como um recurso tecnológico, não ecológico.”

Em resumo, os impactos percebidos pelos entrevistados na categoria sustentabilidade foram a redução do consumo energético, a redução da geração de resíduos. Sobre a sustentabilidade ser utilizada como um critério competitivo de mercado, os entrevistados divergiram, ela sim é monitorada por determinados clientes, porém pouco explorada pela área de comunicação e marketing.

### 4.3 ANÁLISE ESTUDO DE CASO

Nesta seção serão apresentadas as análises obtidas no estudo de caso realizado na empresa “Gravasul”. Primeiramente uma breve contextualização da empresa e do processo, e em seguida o MVF sem a utilização da manufatura aditiva, e posterior sua implementação.

#### 4.3.1 Contextualização da empresa

O estudo de caso foi realizado na empresa “Gravasul Projetos e Matrizes de Solados”, pertencente ao “Grupo Dass”, fabricante de artigos esportivos no mercado nacional e internacional.

A Gravasul teve sua fundação em 1985 como fábrica de carimbos, em 1999 passou a produzir matrizes e moldes para borracha e plástico injetados ou moldados por compressão, neste mesmo ano passou a contar com infraestrutura de CNC's para usinagem. No ano de 2004 juntou-se a sociedade da empresa o grupo Dilly Nordeste S/A, este que veio a ser fundido ao “Clássico”, dando início ao Grupo Dass. No ano de 2018 por questões estratégicas, a Gravasul passa a ser controlada em sua integralidade pelo Grupo Dass.

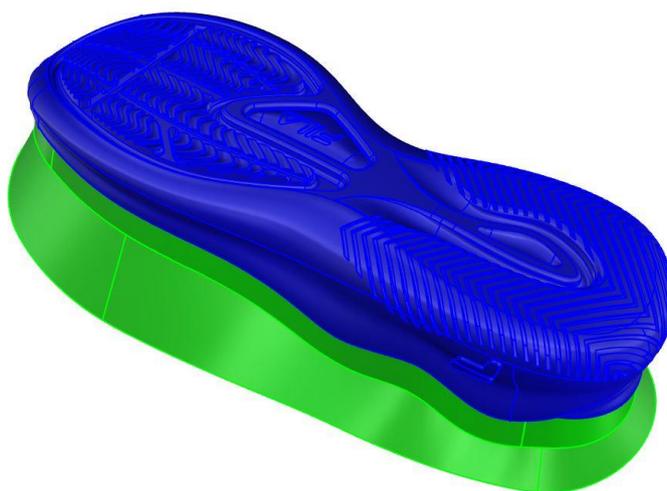
A unidade de realização desta pesquisa, atua na fabricação e desenvolvimento de moldes e matrizes para o segmento calçadista. A empresa conta com tecnologia e infraestrutura completa para desenvolvimento do projeto desde seu início até o teste final de produto, contando com as áreas de projeto, fundição (aço e alumínio), usinagem, texturização química, laboratório de engenharia reversa, maquetaria e injeção.

Dentre os produtos feitos pela empresa, podemos destacar moldes para injeção de EVA expandido, PU, PVC, além de matrizes para confecção de cabedais.

#### 4.3.2 Estudo de Caso

Para este estudo de caso, foi escolhido um dos produtos de maior produção da empresa, moldes para injeção de EVA expandido. Estes moldes são fundidos em alumínio, e para sua fabricação se faz necessário o uso de maquetes. Estas maquetes são projetadas no software de 3D “*Rhinoceros*”, conforme Figura 23, e após manufaturadas de acordo com o processo a ser realizado, podendo este ser convencional, onde a maquete é usinada em centros de usinagem CNC, ou através da manufatura aditiva, onde as maquetes podem ser ou não impressas já com o processo de texturização.

Figura 23 - Projeto 3D da maquete para fundição



Fonte: Elaborado pelo autor

Para o estudo foi utilizado um modelo real de produção, e para a comparação, foram manufaturadas duas maquetes, uma pelo método convencional, e outra através da manufatura aditiva. No processo convencional de manufatura dos moldes, as maquetes são produzidas em resina epóxi chamada “*cibatool*”, e usinadas em centros de usinagem CNC, conforme pode ser observado na figura 24.

Figura 24 - Maquete em *cibatool* - Usinada

Fonte: Elaborado pelo autor

Já para o processo onde é empregada a manufatura aditiva, a maquete foi produzida em impressoras “*Formlabs*” do tipo SLA, já com a aplicação da texturização na maquete, como pode ser observado nas figuras 25 e 26 onde pode ser melhor observada a região onde a textura foi aplicada na maquete impressa.

Figura 25 - Maquete impressa



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 - Detalhamento da textura aplicada na maquete



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a manufatura das maquetes, foi realizado o mapeamento de fluxo de valor (MFV) do processo de fabricação dos moldes para ambas as situações a fim de analisar os impactos da utilização da manufatura aditiva no processo como um todo.

#### **4.3.3 Mapeamento do Processo**

Para o estudo, foram produzidos dois moldes de uma mesma coleção, um utilizando o processo convencional na fabricação da maquete, e outro utilizando a manufatura aditiva. As figuras 27 e 28 apresentam respectivamente o mapeamento do processo.

Para a confecção do molde, via processo convencional de manufatura da maquete, ou seja, através da usinagem CNC, o início se dá na área de projeto da empresa, onde é realizado o desenho 3D do modelo, e posterior programação CAM, após é realizada a usinagem da maquete em centros de usinagem. Dando sequência ao processo, é realizada a fundição do molde em alumínio e posterior escaneamento para ajustes de engenharia reversa. O molde retorna a área de usinagem, e após é

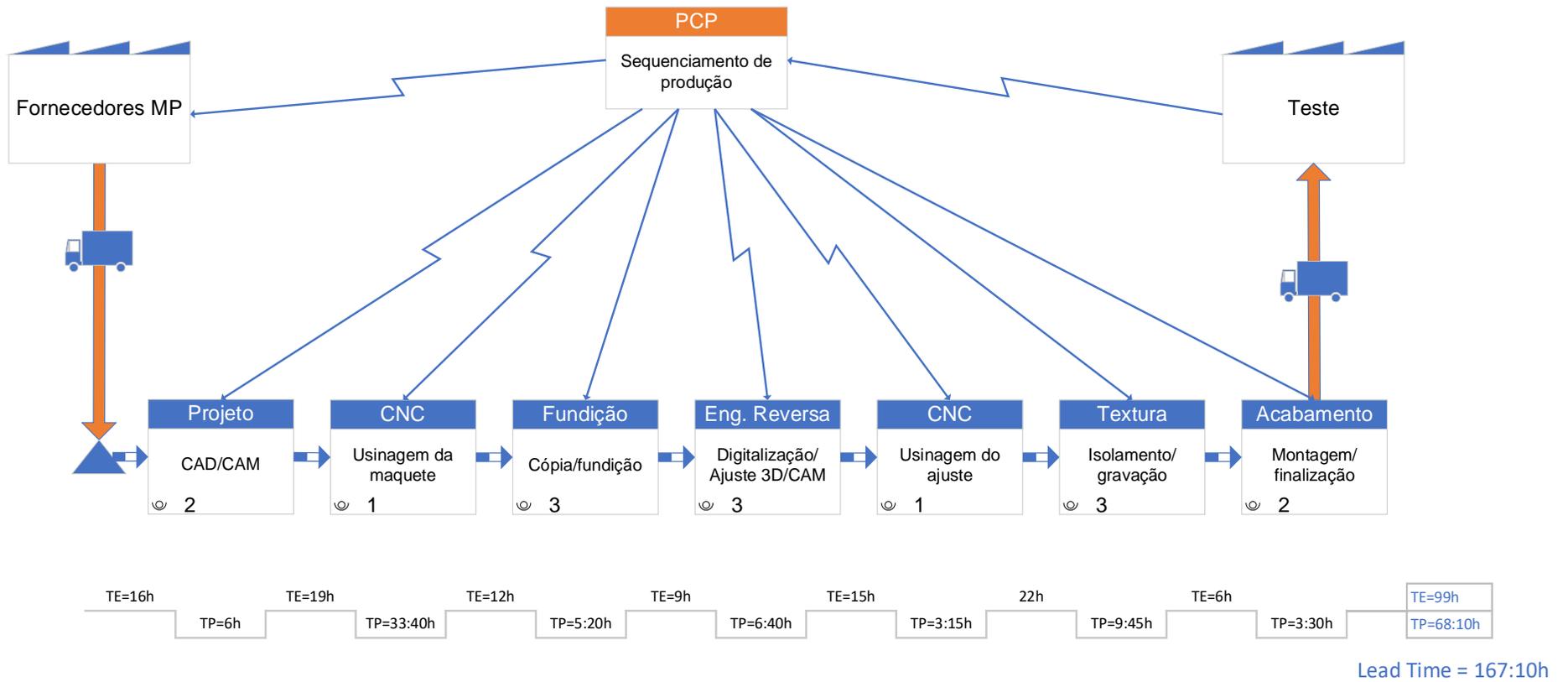
feita a texturização química. Por fim, é realizado o acabamento e montagem, e enviado para área de teste.

Já no processo em que é utilizada a manufatura aditiva para a confecção das maquetes, são reduzidas algumas etapas do processo. Assim como no processo convencional, o início ocorre na área de projetos, no entanto, após o modelo 3D estar aprovado, este é enviado para o fatiamento e aplicação da textura, uma preparação via software antes da impressão ser realizada. Finalizada a aplicação da textura no modelo 3D, a maquete é impressa. Com a maquete finalizada, o processo de fabricação do molde é semelhante ao realizado no processo com a maquete usinada, com exceção da etapa de gravação química.

Como pode ser observado nos mapeamentos, houve a redução no lead time de fabricação dos moldes, além da redução do número de pessoas envolvidas nos processos, fatores estes determinantes na identificação de outros impactos identificados neste estudo e que são descritos individualmente por categoria na análise dos resultados.

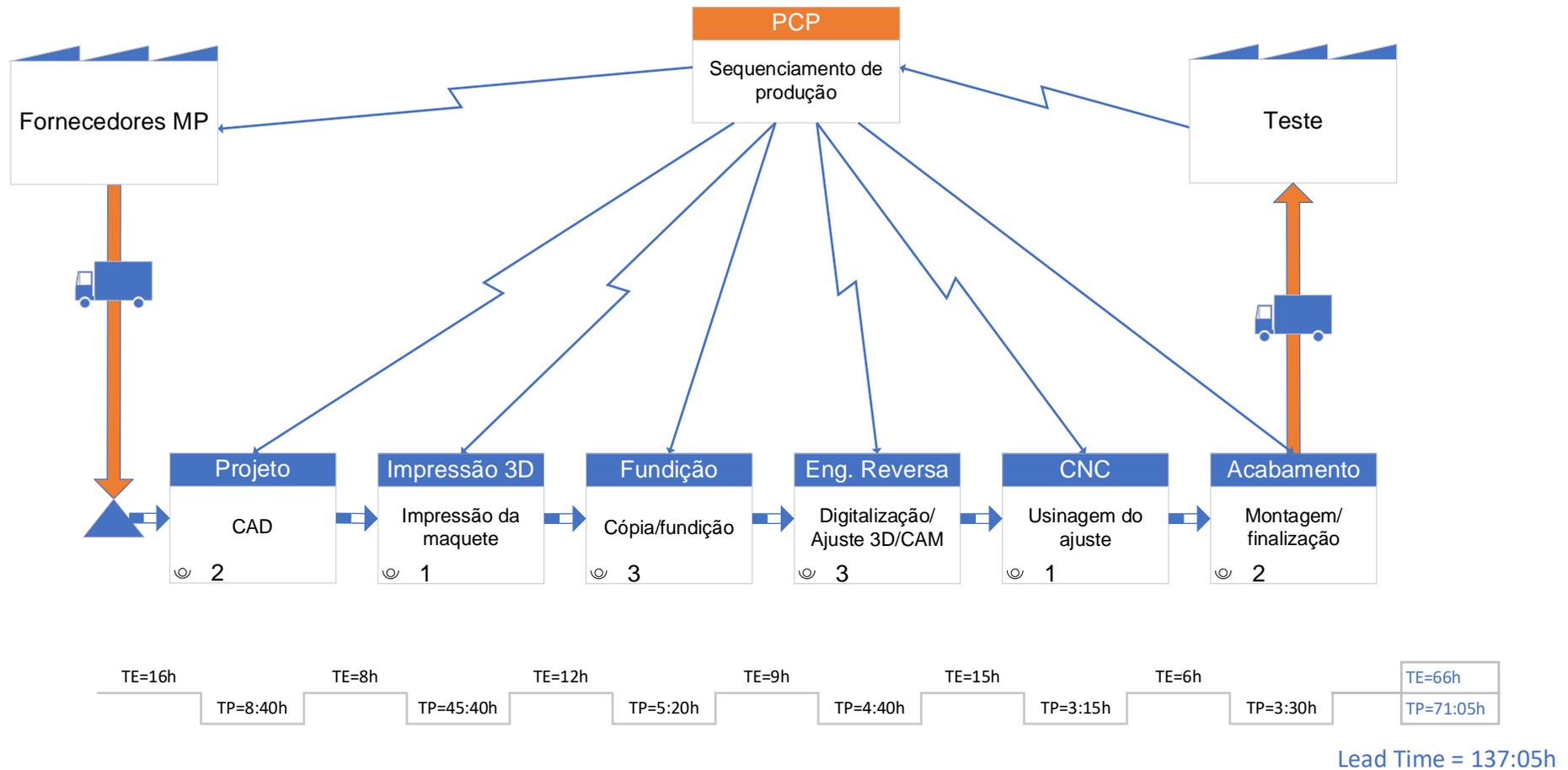
Abaixo segue imagens do mapeamento dos processos conforme comentado, respectivamente MFV do processo convencional e MFV após a implementação da manufatura aditiva.

Figura 27 - MFV do processo convencional



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 - MVF do processo com a utilização da Manufatura aditiva



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Nesta etapa serão apresentados os resultados comparativos entre os impactos percebidos na literatura, nas entrevistas realizadas, e no estudo de caso conforme mapeamento do processo posterior a implementação da manufatura aditiva na empresa em estudo.

##### 4.4.1 Tempo

Os impactos percebidos na categoria Tempo, na literatura e entrevistas, foram os que tiveram maior índice de confirmação no estudo de caso. Todos os impactos relatados foram confirmados na prática, como pode ser observado no Quadro 6.

Quadro 6 - Triangulação dos Impactos na Categoria Tempo

Tempo				
Impacto percebido		Literatura	Entrevistas	Estudo de caso
Positivo	Redução do lead time	X	X	X
	Redução do tempo de setup	X		X
	Aumento da disponibilidade		X	X
	Redução do tempo de desenvolvimento de produto	X	X	X
Negativo	Maior tempo de ciclo	X	X	X

Fonte: Elaborado pelo autor

A redução do lead time foi um impacto com bastante relevância na literatura, nas entrevistas, e confirmado no estudo de caso. Essa redução do lead time está ligada diretamente a outro impacto convergente, que é a redução não somente do lead time referente ao processo de fabricação dos moldes, mas também na redução no tempo de desenvolvimento de produto, no caso da empresa, o calçado. A redução do lead time do molde oportuniza vantagens competitivas a empresa no mercado.

Essa redução no tempo de desenvolvimento do molde, é possível através de outros impactos relacionados nessa categoria, como a redução no tempo de setup, indicada na literatura, e confirmada no estudo de caso, além do aumento da

disponibilidade de recursos na empresa, uma vez que a não utilização da área de usinagem para a manufatura das maquetes, abre a possibilidade da manufatura de outros produtos pela empresa.

Como impacto negativo, há também convergência sobre o maior tempo de ciclo da manufatura aditiva, em comparação a manufatura convencional. Impacto esse, minimizado na empresa onde o estudo foi realizado, com o aumento da capacidade de impressão, através da aquisição de um número significativo de impressoras, superando a capacidade de produção atingida pela manufatura convencional.

#### 4.4.2 Custo

Os impactos que repercutiram na categoria Custo foram na sua maioria de forma positiva. Nenhum dos impactos identificados nessa categoria foram convergentes em todas as áreas de análise, como pode ser observado no Quadro 7.

Quadro 7 - Triangulação dos Impactos na Categoria Custo

Custo				
Impacto percebido		Literatura	Entrevistas	Estudo de caso
Positivo	Menor tempo de desenvolvimento	X		X
	Redução de etapas no processo	X	X	X
	Menor tempo de manufatura		X	X
	Menos onerosa em produção única	X		
	Menor custo hora/máquina	X	X	
	Redução de custo de matéria-prima da maquete		X	
	Redução do custo operacional		X	X
	Redução/eliminação de serviços de usinagem terceirizados		X	
Negativo	Elevado custo de maquinário	X		
	Não recomendada para produção em massa	X		
	Mão de obra especializada (engenharia)		X	

Fonte: Elaborado pelo autor

Por opção da empresa em estudo, não foram levantados valores para um comparativo efetivo de custo dos processos, no entanto, impactos positivos são identificados e alguns destes tem reflexo direto no custo de produção. Entre estes impactos, é possível citar o menor tempo de manufatura e conseqüente menor tempo

de desenvolvimento de produto, além da redução de etapas no processo como a de gravação química realizada nos moldes onde é utilizada a manufatura convencional.

Outro ponto relevante a redução de custo é a redução da terceirização de usinagem, recurso este bastante utilizado pela empresa antes da implementação da manufatura aditiva, com a sua implementação se deu o aumento da disponibilidade da área de usinagem, impactando diretamente na otimização deste recurso.

Os impactos negativos relatados na literatura, não foram identificados nas entrevistas e na empresa onde o estudo foi aplicado. No caso do custo elevado e maquinário, isto não é percebido pela empresa pelo parâmetro de comparação de custo, entre uma impressora e um centro de usinagem CNC, sendo o custo das impressoras significativamente inferior ao dos CNC's. Já referente a não recomendação para a utilização da manufatura aditiva para produção em massa, não se aplica a empresa em estudo, pois cada maquete é única, não havendo então a produção de peças repetidas.

Outro impacto negativo comentado foi sobre a mão de obra especializada citada nas entrevistas. Esta se refere ao aumento de custo com a ampliação de mão de obra na área de engenharia da empresa, no entanto, é discutível, já que no modo convencional de manufatura, também há mão de obra especializada na área de CAM.

#### 4.4.3 Geometria

A categoria Geometria, foi onde o estudo de caso validou todos os impactos positivos observados na literatura e nas entrevistas. No Quadro 8 são apresentados os impactos identificados em cada etapa da pesquisa.

Quadro 8 - Triangulação dos Impactos na Categoria Geometria

Geometria				
Impacto percebido		Literatura	Entrevistas	Estudo de caso
Positivo	Liberdade geométrica	X	X	X
	Redução de peso	X		X
	Customização	X		X
	Simplificação da manufatura de maquetes de geometria complexa		X	X

Negativo	Baixa resolução para determinadas texturas		X	
----------	--	--	---	--

Fonte: Elaborado pelo autor

A liberdade geométrica foi o ponto de convergência observado na pesquisa. Esta liberdade, e a simplificação do processo de manufatura de maquetes com geometria complexa, como por exemplo maquetes onde há presença de usinagens negativas, além de facilitar a manufatura, trouxe novas possibilidades para a área de design da empresa, uma vez que os limitantes técnicos foram reduzidos através da manufatura aditiva.

Outro impacto percebido foi referente à redução de peso e a customização da maquete, ambas citadas na literatura e confirmadas no estudo de caso. Quanto ao peso, a redução foi superior a 50% no peso da maquete, já no que se refere a customização, a aplicação da textura já na maquete impressa é o grande diferencial da tecnologia para a empresa, para a redução no tempo de desenvolvimento de produto, como observado no mapeamento do processo.

Como impacto negativo, foi identificada apenas a baixa resolução das impressoras para determinados tipos de textura. Como citado nas entrevistas, este impacto negativo é percebido em uma parcela muito pequena de modelos produzidos pela empresa, não se aplicando ao modelo utilizado no estudo.

#### 4.4.4 Otimização de Recursos

A categoria Otimização de Recursos foi onde todos os impactos identificados na literatura e entrevistas foram validados, sendo eles positivos ou negativos, como mostra o Quadro 9.

Quadro 9 - Triangulação dos Impactos na Categoria Otimização de Recursos

Otimização de Recursos				
Impacto percebido		Literatura	Entrevistas	Estudo de caso
Positivo	Setup único	X		X
	Aumento da disponibilidade	X	X	X
	Otimização do tempo ocioso (Fim de semana)	X		X
	Redução da cadeia de suprimentos	X	X	X

	Melhora na eficiência		X	X
	Redução de etapas de manufatura		X	X
	Otimização dos recursos		X	X
	Redução de atrasos		X	
Negativo	Ampliação área de projetos		X	X

Fonte: Elaborado pelo autor

Os impactos de total convergência foram a redução da cadeia de suprimentos e o aumento da disponibilidade, impactos estes também citados em outras categorias. O setup único, identificado na literatura e no estudo de caso, é de grande relevância, pois afeta diretamente na redução de lead time e na interferência humana no processo, ou seja, interfere em tempo e na redução de erros no processo. Além do setup único, outro fator que impacta no lead time, é a redução de etapas de manufatura, uma vez que a maquete já é impressa com a textura, este processo é eliminado, oportunizando, junto aos outros impactos citados na melhoria da eficiência e consequente otimização dos recursos disponíveis.

Um ponto interessante a ser comentado é a otimização do tempo ocioso, no caso os fins de semana. A área de manufatura aditiva integra a área de projetos da empresa, sendo assim, trabalha em turno único de 8 horas, no entanto, as impressoras são programadas de acordo com melhor aproveitamento de tempo de ciclo, ou seja, maquetes mais demoradas são prioritariamente programadas para manufatura que compreenda o período da noite, ou até mesmo fins de semana.

Impacto citado apenas nas entrevistas, foi a redução de atrasos, este consequente dos outros impactos já citados, uma vez que foi possível através da redução do lead time e da otimização dos recursos da empresa.

Como impacto negativo, foi citada a ampliação da área de projetos. Com a implementação da manufatura aditiva, foi necessário o aumento do espaço físico da área de projetos na empresa, já que 9 impressoras fazem parte do parque de impressão. Além disso, a área de projetos teve o incremento de uma pessoa capacitada para atuar na área 3D da empresa.

#### 4.4.5 Qualidade

Na categoria Qualidade, uma das que teve maior repercussão nas entrevistas, os impactos relatados na literatura, em sua maioria foram confirmados ou nas entrevistas, ou no estudo de caso. Ponto de convergência sendo o “efeito serrilhado” apresentado na emenda das camadas de impressão, sendo este um impacto negativo identificado, e a redução de erros, como impacto positivo.

Os resultados da análise da categoria Qualidade são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 - Triangulação dos Impactos na Categoria Qualidade

Qualidade				
Impacto percebido		Literatura	Entrevistas	Estudo de caso
Positivo	Redução de erros	X	X	X
	Aumento da qualidade do produto	X		X
	Repetibilidade		X	X
	Melhorias no processo		X	X
Negativo	Falta de tolerâncias dimensionais normatizadas	X		
	Efeito "serrilhado" entre camadas	X	X	X
	Fragilidade mecânica	X		X
	Imprecisão dimensional	X	X	

Fonte: Elaborado pelo autor

A redução de erros é um impacto também percebido em outras categorias como interferência humana, essa redução de erros apontada na literatura é comentada nas entrevistas, e confirmada no estudo de caso, uma vez que a maquete impressa não houve a necessidade de acabamento posterior a sua manufatura, contrário ao que ocorreu com a maquete usinada, onde as marcas dos tombamentos do dispositivo de fixação ficaram aparentes, e houve a necessidade de acabamento anterior ao processo de fundição do molde.

Como a manufatura aditiva, não depende de fatores externos, a repetibilidade é outro impacto positivo relatado na entrevista e confirmado pelo estudo de caso. A repetibilidade neste caso ocorre em coleções de maquetes, são tamanhos diferentes de um mesmo modelo, que uma vez validado, mantém o padrão de qualidade para toda a coleção.

Como impacto negativo, a literatura aponta a falta de tolerâncias dimensionais normatizadas, diferente do que ocorre na usinagem. Este impacto não foi identificado

nas entrevistas ou no estudo de caso, no entanto é de grande relevância para o sucesso da implementação da manufatura aditiva em maior escala na indústria. A literatura ainda aponta a imprecisão dimensional como um impacto negativa, este sim, confirmado pelas entrevistas, no entanto não ocorrido no estudo prático.

#### 4.4.6 Interferência Humana

A segunda categoria com maior número de impactos validados no estudo de caso, foi a Interferência Humana. Os impactos identificados nessa categoria foram somente de forma positiva, como pode ser observado no Quadro 11.

Quadro 11 - Triangulação dos Impactos na Categoria Interferência Humana

Interferência Humana				
Impacto percebido		Literatura	Entrevistas	Estudo de caso
Positivo	Setup único	X	X	X
	Maior padronização e confiabilidade	X		X
	Redução no lead time	X		X
	Redução do número de pessoas envolvidas no processo		X	X
	Melhoria da qualidade		X	X
	Redução de erros no processo		X	
	Digitalização do processo		X	X

Fonte: Elaborado pelo autor

Um dos impactos já identificados em outras categorias foi o setup único, nesta categoria sua percepção convergiu em todas as áreas de estudo. O setup único minimiza a interferência humana no processo e além redução do lead time, tem influência direta na qualidade do produto, sendo que muito dos erros históricos na empresa referente ao processo de manufatura das maquetes são de origem em falhas humanas.

Outro impacto identificado nas entrevistas foi a digitalização do processo. Através da manufatura aditiva, praticamente todo o processo é realizado de forma virtual, reduzindo o número de pessoas envolvidas no processo.

Divergente do que apresentou a entrevista, a redução de erros no processo, para o caso em estudo foi falha. A região onde deveria ser aplicada a textura foi identificada de forma incorreta, ocasionando da perda de uma maquete. Este não é

um erro comum, segundo relatos da equipe envolvida na manufatura da empresa, no entanto, identificado no estudo de caso.

#### 4.4.7 Investimento

A categoria investimento foi a de menor relevância dentro do contexto estudado. Impactos percebidos foram divergentes entre literatura e a empresa em estudo, como pode ser observado no Quadro 12.

Quadro 12 - Triangulação dos Impactos na Categoria Investimento

Investimento				
Impacto percebido		Literatura	Entrevistas	Estudo de caso
Positivo	Baixo custo de aquisição, frente a aquisição de centros de usinagem CNC		X	X
Negativo	Alto custo de investimento	X		

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a literatura, o custo de aquisição das impressoras é considerado uma barreira. Dentro do contexto da empresa onde o estudo foi realizado, este impacto diverge, pois, as impressoras são utilizadas como alternativa a centros de usinagem, estes com custo de aquisição e manutenção maiores do que os utilizados na manufatura aditiva.

Há de ser citado, no entanto, que novas tecnologias de impressão em metal de fato têm maior valor de investimento, este não é o caso atual da empresa, porém foi citado por um dos entrevistados como uma possível nova área de pesquisa para futuro.

#### 4.4.8 Inovação

Um dos grandes diferenciais desta tecnologia, é o fator inovação, e os impactos percebidos nessa categoria podem ser observados no Quadro 13.

Quadro 13 - Triangulação dos Impactos na Categoria Inovação

Inovação				
Impacto percebido		Literatura	Entrevistas	Estudo de caso
Positivo	Melhor eficiência produtiva	X		X
	Novos mercados	X	X	
	Aprimoramento no desenvolvimento de produto	X	X	X
	Vantagem competitiva	X		
Negativo	Limitação de matéria-prima da resina		X	

Fonte: Elaborado pelo autor

Dentre os impactos positivos foi unanimidade o aprimoramento no desenvolvimento de produto, sendo a liberdade geométrica proporcionada pela tecnologia não mais um limitante técnico e sim um recurso. Este recurso proporciona uma vantagem competitiva e possibilidade de novos mercados.

Ainda em relação a inovação, um dos entrevistados aponta como um impacto negativo a limitação de matéria-prima nas resinas, pois ainda são poucos os componentes do calçado que podem fazer uso da tecnologia.

#### 4.4.9 Sustentabilidade

No ponto de vista da sustentabilidade, apesar do grande potencial apontado na literatura, para a empresa este não é fator impactante na tomada de decisão. No Quadro 14 é possível analisar os impactos percebidos na análise.

Quadro 14 - Triangulação dos Impactos na Categoria Sustentabilidade

Sustentabilidade				
Impacto percebido		Literatura	Entrevistas	Estudo de caso
Positivo	Redução na geração de resíduos	X	X	X
	Menor pegada ambiental	X		
	Redução na emissão de carbono	X		
	Confiabilidade do processo		X	
	Maior eficiência energética	X	X	X
Negativo	Reuso do suporte	X		

Fonte: Elaborado pelo autor

Os pontos convergentes foram referentes a geração de resíduos e a eficiência energética, ambos considerados impactos positivos para o uso da manufatura aditiva. A confiabilidade apontada como impacto positivo compreende-se pela minimização do retrabalho, o que impacta diretamente na geração de resíduos e consumo energético. Quanto a menor pegada ambiental e a redução na emissão de carbono, citadas na literatura, não foram abordadas pelos entrevistados e nem percebidas no estudo de caso.

Como impacto negativo identificado, a literatura comenta sobre o reuso do suporte utilizado na impressão, este não foi considerado um impacto negativo no estudo de caso, visto que o suporte utilizado na empresa é feito em matéria-prima biodegradável.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após análise dos impactos identificados na literatura, nas entrevistas e no estudo de caso, esta seção tem por objetivo discutir os resultados encontrados, avaliar vantagens e desvantagens da implementação da manufatura aditiva em substituição a manufatura convencional para fabricação de maquetes na empresa em estudo.

No que tange a categoria Tempo, o tempo de ciclo é citado na literatura como um impacto negativo da manufatura aditiva, e confirmado no estudo de caso. No entanto a maquete manufaturada através da manufatura aditiva já é impressa com a textura, reduzindo assim a etapa de texturização química necessária quando a maquete é produzida através da manufatura convencional, indo de encontro ao que cita Bahnini et al. (2018), que a manufatura aditiva, quanto utilizada em etapas do processo da produção impactam em redução no lead time.

A manufatura aditiva proporcionou a redução do tempo de setup na fabricação das maquetes, uma vez que o processo da manufatura aditiva ocorre em setup único, diferente da manufatura convencional. Além disso, a não utilização da área de usinagem para a fabricação das maquetes proporcionou o aumento da disponibilidade dos centros de usinagem, aumentando assim a capacidade de produção da empresa.

A eliminação do processo de texturização química, é grande responsável pela redução do lead time e conseqüente redução no tempo de desenvolvimento de produto alcançada pela empresa com a utilização da manufatura aditiva, convergindo com Tang, Mak, Zhao (2016), onde comenta que a manufatura aditiva acelera o processo de desenvolvimento de produto, sendo este o grande motivo das empresas implementarem seu uso.

A redução do lead time no processo de fabricação dos moldes é ainda maior em caso de repetição dos moldes, situação comum na fabricação de coleções de matrizes. Cada coleção de moldes produzidos, tem no mínimo uma repetição de cada molde. Nestes casos a maquete utilizada para a manufatura é a mesma já impressa, eliminando assim as etapas de projeto e impressão da maquete e iniciando o desenvolvimento do molde já na etapa de fundição, reduzindo o lead time em mais de 50% nos moldes de repetição.

Na categoria Custo, por opção da empresa, não foram discutidos valores específicos de materiais e processos, no entanto a redução de etapas no processo de fabricação, a redução no lead time e conseqüente redução do tempo de

desenvolvimento, impactam diretamente em uma redução de custo com a implementação da manufatura aditiva. Corroboram com esta afirmação o exposto por Manoharan et al. (2013), onde comenta que a manufatura aditiva impacta em menor tempo de desenvolvimento, resultando em menor custo.

Para a literatura, o custo também está ligado a produção em massa, sendo a manufatura aditiva menos onerosa e recomendada para peças em produção única, sendo este, o caso das maquetes manufaturadas pela empresa onde o estudo foi aplicado.

Apesar de os custos não terem sido mensurados, os entrevistados comentaram que houve a redução em custo de matéria-prima e em processos, como pode ser observado nos trechos “[...] houve a redução em custo de matéria-prima e processos, além da redução do custo das áreas que não são mais utilizadas, como usinagem e textura química” (Entrevistado 3) e “[...] o custo do molde foi reduzido, isso pela redução das etapas de fabricação da maquete” (Entrevistado 4).

Além disso, outro ponto observado nas entrevistas foi a redução da terceirização de usinagem, esta viabilizada pelo aumento de disponibilidade na área de usinagem, como comenta o Entrevistado 1 “[...] isso também reflete na terceirização de usinagem, hoje a terceirização foi reduzida, mesmo com aumento da demanda.”

A liberdade geométrica foi o ponto de convergência na categoria Geometria. Tang, Mak, Zhao (2016) comenta que a liberdade geométrica promovida pela manufatura aditiva, remove restrições tradicionais de fabricação. Esta afirmação vai de encontro ao que comenta o Entrevistado 3 “[...] hoje com a impressão, não temos mais a limitação que tínhamos no passado [...]”.

Redução de peso e customização são outros impactos positivos percebidos na literatura e validados pelo estudo. Apesar dos impactos positivos, a manufatura aditiva não pode ser aplicada em todos os projetos da empresa devido a alguns limitantes técnicos da tecnologia, como a precisão dimensional, citada pelo Entrevistado 2 “[...] o processo ainda não atende o nível de precisão para todos os projetos que trabalhamos, nesses casos a usinagem CNC ainda é superior”, e a baixa resolução das impressoras para determinadas formas de textura, como comenta o Entrevistado 1 “[...] alguns modelos de textura, exigem nível de detalhamento maior do que a resolução atingido pelas impressoras”.

A categoria Otimização de Recursos foi a de maior destaque entre os entrevistados. Os impactos percebidos nesta categoria também são identificados em outras categorias de estudo.

Para Junior e Costa (2019), Weller, Kleer e Piller (2015) e Bahnini et al. (2018), a manufatura aditiva permite a produção em um único setup, além de reduzir tempos de processo, possibilita um aumento de disponibilidade dos recursos da corporação, possibilitando ainda a redução de custos, referente a redução destas etapas. Este aumento de disponibilidade foi percebido pela empresa e comentado pelo Entrevistado 3 [...] aumentamos a nossa capacidade produtiva, sem necessidade de aumento de maquinário ou mão de obra”.

Outro impacto positivo identificado foi a otimização do tempo ocioso, sendo que as impressoras são utilizadas 24 horas, aproveitando o máximo de sua eficiência. Este impacto também converge a literatura, conforme Tang, Mak, Zhao (2016), a oportunidade de utilização do tempo ocioso, por vezes em fins de semana é outro benefício em relação ao processo convencional.

A otimização de recursos também teve reflexo nos prazos de entrega, como comentado pelo Entrevistado 3, “Os prazos ficaram menores, e mais precisos. Hoje temos número inexpressivo de atraso em entrega destes moldes”.

Na categoria Qualidade, a digitalização do processo, citada pelo Entrevistado 1, [...] o processo de manufatura foi digitalizado, e essa digitalização nos traz consistência, ou seja, temos repetibilidade, o que nos trouxe ganhos ao produto [...]”, oportunizou a redução de erros, a repetibilidade e um aumento na qualidade do produto. No entanto quando comparada a qualidade da maquete impressa com as maquetes manufaturas através da usinagem CNC, as camadas serrilhadas são apontadas como um fator negativo, como comenta o Entrevistado 3 “[...] Este serrilhado necessita um trabalho de acabamento posterior nas maquetes, e em alguns poucos casos, inviabiliza que a maquete seja impressa”.

Em contrapartida, as maquetes usinadas em CNC apresentam marcas dos tombamentos de eixos de usinagem, ocasionados pela fixação em dispositivos, como comenta o Entrevistado 2:

[...] as maquetes feitas no CNC, ficam com as marcas de tombamento de eixos, ficam as marcas de encontro das usinagens o que acaba gerando bastante trabalho de ajuste e acabamento.

A falta de tolerâncias dimensionais normatizadas é apontada por Bahnini et al. (2018) como grande desvantagem frente ao processo convencional. Sendo a qualidade apontada também por Attaran (2017) como um dos grandes potenciais de avanços futuros para a tecnologia.

A Interferência Humana é outra categoria que teve repercussão direta em qualidade e custo. Para os entrevistados a redução de pessoas envolvidas no processo está diretamente ligada a redução de erros, como é observado pelo Entrevistado 1 “[...] reduzimos a mão de obra “artesanal”, e digitalizamos o processo, com mão de obra especializada. Nosso índice de erro hoje por falha humana é quase zero.” Essa redução de mão de obra se deu pela não utilização das áreas de usinagem e gravação química.

A menor interferência humana possibilitou maior confiabilidade ao processo, como citado pelo Entrevistado 3 “[...] Essa redução de pessoas, além de custo, agrega maior confiabilidade e previsibilidade da produção”, e reforçado pelo Entrevistado 1 “[...] comparado aos erros de processo de usinagem hoje as falhas são mínimas, mas isso mais por razão de falha humana mesmo, havia muitos erros na área de usinagem”.

Corroborando com a visão dos entrevistados citados, Meier e Tan (2018) avaliam que a redução de erros humanos proporciona maior padrão e confiabilidade.

Na categoria Investimento, literatura e entrevistas divergem. Para Nishimura et al. (2018) o alto valor de maquinário e insumos impactam como fator negativo para implementação da manufatura aditiva. Attaran (2017) comenta que impressoras possuem duas possíveis deficiências, ou possuem recursos altos, com preço elevado, ou possui recursos primitivos com custo baixo.

Na empresa em estudo, o custo de investimento não foi considerado elevado, isto pois o parâmetro de comparação são os centros de usinagem utilizados na manufatura das maquetes anterior a implementação da manufatura aditiva. Entretanto a substituição completa do processo de manufatura das maquetes para a manufatura aditiva ainda não é considerada viável pelo Entrevistado 4 “[...] completamente, só se as máquinas evoluírem a nível de precisão em qualidade, pois hoje ainda temos muitos modelos que são necessários a manufatura subtrativa”.

O aprimoramento no desenvolvimento de produto foi o impacto de convergência na categoria Inovação. Para os entrevistados a área de design da

empresa pode inovar em seus produtos, visto que a geometria não é mais um limitante técnico que inviabilize projetos, conforme observado pelo Entrevistado 1:

[...] a implementação da manufatura aditiva permite a fabricação de maquetes em formatos que antes não eram nem cogitados, então isso abriu a gama de possibilidades até para o pessoal do criativo.

Outro impacto positivo identificado foi apontado pelo Entrevistado 4, onde a tecnologia auxilia a empresa em um posicionamento estratégico de mercado, “[...] hoje somos vistos como referência no mercado. Além da percepção de antigos clientes, ampliamos nosso alcance em novos clientes”.

Por fim, na categoria Sustentabilidade a redução na geração de resíduos é apontada como impacto de maior relevância. Para o Entrevistado 4 a comparação na geração de resíduos é amplamente favorável a manufatura aditiva, “[...] a usinagem gera bastante resíduo em comparação a resina de impressão, onde há apenas o suporte, porém este é reciclável”. Attaran (2017) atribui a esta redução de resíduos gerado pela manufatura aditiva como uma menor pegada ambiental.

Outro ponto observado foi referente ao consumo energético, consideravelmente inferior aos processos convencionais, além disso, para o Entrevistado 4, a confiabilidade do processo e a redução do retrabalho também impactam positivamente na sustentabilidade.

A responsabilidade ambiental é uma das marcas da empresa, e uma área monitorada por alguns clientes em avaliações e validações de fornecedores. Além do impacto ambiental proporcionado pelo uso da tecnologia, estar alinhado com o pensamento ecológico de parceiros comerciais pode ser um grande diferencial de mercado.

## 6 CONCLUSÃO

A manufatura aditiva já é uma realidade na indústria mundial. A tecnologia vista até pouco tempo como distante, hoje já faz parte do cotidiano industrial no mundo. Dentro do contexto empresarial estudado a implementação da tecnologia se fez relevante, impactando das mais diversas formas.

Identificando os impactos positivos e negativos da utilização da manufatura aditiva na fabricação de maquetes para fabricação de moldes fundidos para sola de calçado esportivo, foi atingido o objetivo geral desta pesquisa. Sendo a manufatura aditiva considerada responsável pela melhoria no processo de fabricação da empresa, impactando positivamente na redução do tempo de desenvolvimento de produto.

O tempo de ciclo ainda é considerado grande limitante da tecnologia, no entanto, a manufatura das maquetes já com a aplicação da textura, impactou na redução de etapas do processo de manufatura do molde, reduzindo assim o lead time e o tempo de desenvolvimento de produto.

Além da eliminação da texturização química, a manufatura aditiva proporcionou o aumento da disponibilidade da área de usinagem da empresa, aumentando assim a capacidade de produção, além da redução da necessidade de terceirização de usinagem, refletindo diretamente nos prazos de entrega e redução de custos.

A liberdade geométrica é outro impacto relevante do uso da manufatura aditiva na produção das maquetes, além da possibilidade da impressão já com a textura, a liberdade geométrica reduziu limitantes técnicos e possibilitou um aprimoramento do desenvolvimento de produto, tendo grande impacto na área de design.

Entretanto a manufatura aditiva ainda apresenta limitantes técnicos que inviabilizam sua padronização para todos modelos produzidos pela empresa, isso devido à falta de precisão dimensional das impressoras utilizadas. Além disso a literatura aponta como a falta de uma normatização como a ISO, como grande desvantagem da tecnologia frente aos processos convencionais de manufatura, e classifica este como um dos grandes potenciais para avanços futuros.

Como limitantes do estudo de caso, a falta de dados referente a custos específicos dificultou uma análise mais profunda dos impactos percebidos na categoria Custos. Outro limitante foi a falta da utilização de um sistema MES (Manufacturing Execution System) para o controle da manufatura, que oportunizaria maior confiabilidade aos dados apresentados no mapeamento do processo.

Para estudos futuros sugere-se a análise de viabilidade do uso da impressão em metal, eliminando o processo de fundição, reduzindo ainda mais o processo de manufatura dos moldes.

Por fim, com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, a manufatura aditiva, se apresenta como um diferencial de grande relevância para a indústria calçadista, oportunizando além da maior liberdade criativa, redução de custos e no tempo de desenvolvimento de produto, auxiliando no posicionamento estratégico da empresa.

## REFERÊNCIAS

- ABICALÇADOS. **Relatório Setorial Industria de Calçados Brasil 2019**. Novo Hamburgo, 2019. Disponível em: <http://abicalcados.com.br/publicacoes/relatorio-setorial>. Acesso em: 20 set. 2019.
- ATTARAM Mohsen. *The rise of 3d printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing*. **Business Horizons**, v60, p. 677-688, 2017.
- ATTARAN, Mohsen. *Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics*. **Journal of Service Science and Management**, v.10, n.3, p.189-206, 2017.
- BAHNINI, Insaf. *et. al. Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.97, p.97-147, 2018.
- BARBOSA, Vanessa. Um Passo Além: New Balance lança tênis com impressão 3D. *In: Exame*. [São Paulo], 2019. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/marketing/um-passo-alem-new-balance-lanca-tenis-com-impressao-em-3d/>. Acesso em: 08 nov. 2019.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo. Edição 70, 2011.
- BRETTEL, M. *et. al. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective*. **International Journal of Science, Engineering and Technology**. v8. p.37-44. 2014.
- CHENG, Andria. *How Adidas Plans To Bring 3D Printing To The Masses*. *In: Forbes [New Jersey]*, 2018. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/andriacheng/2018/05/22/with-adidas-3d-printing-may-finally-see-its-mass-retail-potential/#63826684a607>. Acesso em: 8 nov. 2019.
- CHONG, Li; RAMAKRISHNA, Seeram; SINGH, Sunpreet. *A review of digital manufacturing-based hybrid additive manufacturing process*. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.** v.95. p.2281-2300. 2018.
- COELHO, Pedro Miguel Nogueira. **Rumo à Indústria 4.0**. Dissertação de Mestrado em Engenharia e gestão Industrial. Universidade de Coimbra. 2016.
- COMO A Manufatura aditiva pode contribuir em diferentes setores. *In: VDI Brasil*. São Paulo. [2019?]. Disponível em: <http://www.vdibrasil.com/como-a-manufatura-aditiva-pode-contribuir-em-diferentes-setores/>. Acesso em: 21 set. 2019.
- COSTA, Cesar da. Indústria 4.0: o futuro da indústria nacional. POSGERE PósGraduação *In: Revista/IFSP-Campus São Paulo*, v.1, n.4, p.5-14, 2017
- DAVIA-ARACIL, Miguel; JIMENO-MORENILLA, Antonio; SALAS, Faustino. *A new methodological approach for shoe sole design and validation*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.86. p.3495-3516. 2016.

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

ESSOP, Anas. *New Balance and Formlabs Reveal triplecell sneaker with upgraded 3d printed forefoot*. In: **3D Printing Industry**. [S.l.]. 20 set. 2019. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/new-balance-and-formlabs-reveal-triplecell-sneaker-with-upgraded-3d-printed-forefoot-162012/>. Acesso em: 08 nov. 2019.

EVANS, Dave. A Internet das Coisas. Como a Próxima evolução da internet está mudando tudo. In: **CISCO Internet Business Solutions Group**. San Jose. CA., 2011. Disponível em: [https://www.cisco.com/c/dam/global/pt\\_br/assets/executives/pdf/internet\\_of\\_things\\_iot\\_ibsg\\_0411final.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/pt_br/assets/executives/pdf/internet_of_things_iot_ibsg_0411final.pdf). Acesso em: 20 nov. 2019.

FORMLABS. Site da **Formlabs**. Disponível em: <https://formlabs.com>. Acesso em: 20 nov. 2019.

FRANÇA, Allan. Nike desenvolve tênis através de tecnologia de impressão 3D. In: **Tecmundo**. Curitiba. 22 abril 2018. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/mercado/129423-nike-desenvolve-tenis-tecnologia-impressao-3d.htm>. Acesso em: 30 out. 2019.

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

GARDAN, Julien. *Additive Manufacturing Technologies: State of the art and trends*. **International Journal of Production Research**. v.54. n10. p.3118-3132. 2016.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5ª edição. São Paulo: Atlas, 2010.

GRILLETTI, Laís. Indústria 4.0: as oportunidades de negócio de uma revolução que está em curso. In: **Endeavor**. [S.l.]. 29 mar. 2018. Disponível em: <https://endeavor.org.br/tecnologia/industria-4-0-oportunidades-de-negocio-de-uma-revolucao-que-esta-em-curso/>. Acesso em: 20 nov. 2019.

HERMANN, M; PENTEK, T; OTTO, B. **Design Principles for industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review**. 2015. Disponível em: [http://www.snom.mb.tudortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4\\_0-Scenarios.pdf](http://www.snom.mb.tudortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf). Acesso em: 20 nov. 2019.

HUANG, S. et al. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 5-8, p. 1191-1203, 15 jul. 2013

IMPRESSÃO 3D: Evento em NY mostra como GE, Adidas, BMW e Boeing usam essa tecnologia. In: **Época Negócios**. [São Paulo], 2018. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Caminhos-para-o-futuro/Desenvolvimento/noticia/2018/05/impressao-3d-evento-em-ny-mostra-como-ge-adidas-bmw-e-boeing-usam-essa-tecnologia.html>. Acesso em: 20 nov. 2019.

KIMINAMI, Claudio Shvinti. et. al. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. 1 ed. São Paulo. Blucher. 2013

LEE, Jay, et. al. *A cyber-physical systems architecture for industry 4.0 based manufacturing systems*. **Manufacturing letters**, v3, p18–23. Jan. 2015.

MACHADO, Alisson Rocha. et. al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. Ed. São Paulo. Blucher. 2015.

MANOGHARAN, Guha; WYSK, Richard; HARYSSON, Ola. *Additive Manufacturing-integrade hybrid manufacturing and subtractive processes: economic model and analysis*. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**. v.29. n.5. p.473-488. 2016.

MANOHARAM, Vivek. et. al. *Application of additive manufacturing techniques in sports footwear*. **Virtual and Physical Prototyping**. v.8. n.4. p.249-252.

MARQUES, Gastão Boccardi Junior; COSTA, Carlos Alberto. *Manufatura aditiva aplicada na fabricação de moldes de injeção termoplásticos*. **Scientia Cum Indústria**, v.7, n.2, p.76-82, 2019.

MATTERN, F.; FLOERKEMEIER, C. From the Internet of Computers to the Internet of Things. **InformatikSpektrum**, v.33, p.107–121, 2010.

MEIER, Marlon; TAN, Kim Hua. *Unlocking innovation in the sport industry throught additive manufacturing*. **Business Process Management Journal**. v.25. n.3. p.456-475. 2019.

MELLOR, Stephan; HAO, Liang; ZHANG, David. Additive Manufacturing: A Framework for implementation. **Int. J. Productions Economics**. v.149. p.194-201. 2014.

MORANDI, M. I. W. M.; CAMARGO, L. F. R. Revisão Sistemática da Literatura. In: **Design Science Research: Método de Pesquisa para Avanço da Ciencia e Tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015a. p. 141-172.

NISHIMURA, Paula Lumi Goulart. et. al. *Processo, complexidade e qualidade: comparação entre artefatos semelhantes produzidos por diferentes tecnologias de prototipagem rápida*. **Recyt**. v.29. p.50-56. 2018.

O QUE É quarta revolução industrial? In: **Salesforce**. San Francisco, c2016. Disponível em: <https://www.salesforce.com/br/blog/2018/Janeiro/O-que-e-Quarta-Revolucao-Industrial.html>. Acesso em: 10 out. 2019.

OLIVEIRA, Filipe. *Impressoras 3D reduzem custo de empresas, mas preço ainda é entrave*. In: **Folha de São Paulo**. São Paulo, 20 ago. 2018. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/08/impressoras-3d-reduzem-custos-de-empresas-mas-preco-ainda-e-entrave.shtml>. Acesso em: 20 nov. 2019.

PALLAROLAS, E.A.F.F. **Revisão Técnica de Processos de Manufatura Aditiva e Estudo de Configurações para Estruturas de Impressoras Tridimensionais**. Monografia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

- PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Universidade Feevale: EDITORA FEEVALE, 2013. 277 p. v. 1. Disponível em: <http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2019.
- RIBEIRO, Claudio José Silva. Big Data: Os novos desafios para o profissional da informação. **Informação e Tecnologia (ITEC)**. João Pessoa, v1, p96-105 jun. 2014.
- ROMERO, David. Et. al. Towards an Operator 4.0 Typology: A Human-Centric Perspective on the Fourth Industrial Revolution Technologies. CIE46 Proceedings. Tianjing. China. 2016
- RUBMANN, R. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. In: **The Boston Consulting Group (BCG)**. Boston, 2015.
- SACOMANO, José Benedito. et. al. **Indústria 4.0: Conceitos e Fundamentos**. 1 ed. São Paulo. Blucher. 2018
- SANTOS, Givanildo Alves dos. **Tecnologias Mecânicas: materiais, processos e manufatura avançada**. São Paulo. Érica, 2021.
- SCHWAB, Klaus. **A Quarta revolução industrial**. Tradução: Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016.
- SHER, Davide. *Volkswagen produces 10,000 3D printed ID.3 models using HP Metal Jet technology*. In: **3D Printing Media Network**. [S.l.]. 07 nov. 2019. Disponível em: <https://www.3dprintingmedia.network/10000-3d-printed-id-3-models/> (acesso em 08/11/19. Acesso em: 08 nov. 2019.
- SINGH, Shelly. 3D Printing Market Worth \$ 42.9 billion by 2025 with a growing CAGR of 23.3%. In: **Markets and Markets**. [S.l.] 2019. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/3d-printing.asp>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- SOLDING, P.; GULLANDER, P. **Concepts for simulation based value stream mapping**. In: Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter. IEEE, 2009. p. 2231-2237.
- SOUZA, Adriano Fagali de; ULBRICH, Cristiane Brasil Lima. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: princípios e aplicações**. São Paulo: Artliber, 2009. 332 p.
- SPRICIGO, Bruno. Resumo sobre Indústria 4.0: entenda rapidamente os conceitos e benefícios. In: **Pollux**. Joinville, 26 mar. 2018. Disponível em: <https://www.pollux.com.br/blog/resumo-sobre-industria-4-0-entenda-rapidamente-os-conceitos-e-beneficios/>. Acesso em: 10 out. 2019.
- STEVAN JR, Sergio Luiz; LEME, Murilo Oliveira; SANTOS, Max Mauro Dias. **Industria 4.0: fundamentos, perspectivas e aplicações**. Ed.1 São Paulo. Saraiva. 2018

SUÁREZ, Jorge Carro. et. al. *Industria 4.0 y Manufatura Digital: um Método de Diseño Aplicando Ingeniería Inversa*. **Revista Ingeniería**. v.14. p.6-28. 2019

SULAVIK, Chris. *3D Printing comes of age in US industrial manufacturing*. In **PWC Global** [S.I.]. abr. 2016 Disponível em: [https://www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/assets/pwc-next-manufacturing-3d-printing-comes-of-age.pdf?fbclid=IwAR2VqA8lZbCrkEnGAwsi7As0y0HAeyeaXlqMi3Pe\\_FQLAd4efzmlm0oEQwE](https://www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/assets/pwc-next-manufacturing-3d-printing-comes-of-age.pdf?fbclid=IwAR2VqA8lZbCrkEnGAwsi7As0y0HAeyeaXlqMi3Pe_FQLAd4efzmlm0oEQwE). Acesso em: 26 out. 2019.

TANG, Yunlong; MAK, Kieran; ZHAO, Yaoyao Fiona. *A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing*. **Journal of Cleaner Production**. v.137. p.1560-1572. 2016.

TAURION, Cezar. **Big Data**. Rio de Janeiro. Brasport. 2013

THOMPSON, Mary Kathryn. et. al. *Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations and constraints*. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**. v.65. p.737-760. 2016.

Towers-Clark, Charles. *3D Printing – Discussing New Balance and Root Canals With Formlabs Davis Lakatos*. In **Forbes** [New Jersey], 2019 Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/charlestowersclark/2019/04/26/3d-printing-discussing-new-balance-and-root-canals-with-formlabs-david-lakatos/#4b62a9517999>. Acesso em: 8 nov. 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>>. Acesso em: 08/11/2019

VIALVA, Tia. *Gillette and New Balance offer insights in consumer 3D printing at Formlabs User Summit 2019*. In: **3D Printing Industry**. [S.I.]. 10 mai. 2019. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/gillette-and-new-balance-offer-insights-in-consumer-3d-printing-at-formlabs-user-summit-2019-155180/>. Acesso em: 08 nov. 2019.

VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da Manufatura Aditiva**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 2017.

WEF. **Impact of the Fourth Industrial Revolution on Supply Chains**. Genebra, Suíça: WEF, 2017.

WELLER, Christian; KLEER, Robin; PILLER, Frank. *Economic Implications of 3D printing: Market Structure Models in light of additive manufacturing revisited*. **Int. Production Economics**. v.164. p.43-56. 2015.

Will Additive Manufacturing Replace Conventional Manufacturing? In: **Stratfor Worldview**. [S.I.]. out. 2013. Disponível em: <https://worldview.stratfor.com/article/will-additive-manufacturing-replace-conventional-manufacturing>. Acesso em: 17 nov. 2019.

WOHLERS, T. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. [s.l.]: **Wohlers Report**, 2018.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A Review of Additive Manufacturing. **ISRN Mechanical Engineering**, 2012.

YIN, R. K. **Estudo de caso: Planejamento e Métodos**. 4. ED. PORTO ALEGRE: BOOKMAN, 2010.

## APENDICE A: PROTOCOLO DE REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

**Framework conceitual:** Identificar estudos que apresentem impactos do uso da manufatura aditiva aplicados em processos de fabricação de modo geral.

**Contexto:** Analisar os impactos da utilização do uso de manufatura aditiva nos processos de produção.

**Horizonte:** Sem imposição de limite temporal nas buscas.

**Correntes teóricas:** Manufatura aditiva.

**Idiomas:** Para a pesquisa não será limitado o idioma, porém os termos de busca serão utilizados em inglês.

**Questão de revisão:** Qual o impacto do uso de manufatura aditiva na confecção de maquetes utilizadas no processo de fabricação de moldes de alumínio fundido?

**Estratégia de revisão:** ( ) Agregativa ( X ) Configurativa

**Crítérios de busca:** Publicações que abordem a manufatura aditiva de forma geral, e também buscando casos relacionados à indústria calçadista.

**Termos de busca:** "Additive Manufacturing"; "Additive Manufacturing" AND "footwear industry"; "Additive Manufacturing" AND "Shoes".

Fontes de busca			
Bases de dados	Anais	Internet	Outras
(x) Periódicos Capes (x) EBSCO ( ) Web of Science ( ) Scopus   Elsevier (x) Scielo ( ) ProQuest ( ) Emerald	( ) Enegep	( ) Google acadêmico	