

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**A IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO NA
MANUFATURA ADITIVA**

**João Vitor dos Santos
Ryan Pereira de Campos**

**Pindamonhangaba - SP
2022**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**A IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO NA
MANUFATURA ADITIVA**

João Vitor dos Santos

Ryan Pereira de Campos

Projeto de pesquisa apresentado à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba como exigência para a conclusão da disciplina de Projeto de Trabalho de Graduação, no Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa

Pindamonhangaba - SP

2022

S237i Santos, João Vitor dos.
A importância da Manutenção na Manufatura aditiva / João
Vitor dos Santos; Ryan Pereira de Campos / FATEC
Pindamonhangaba, 2022.
64f.: il.

Orientador Professor Dr. Luis Filipe de F. Wiltgen
Barbosa
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade
de
Tecnologia de Pindamonhangaba. 2022

1. Gestão da Manutenção. 2. Planos da Manutenção. 3.
Manufatura Aditiva. 4. Impressão 3D. 4. Manufatura Avançada. I.
Santos, João Vitor dos. II. Barbosa, Luis Filipe de Faria. III. Título.

CDD 658

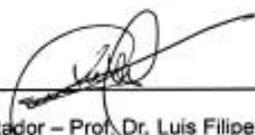
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

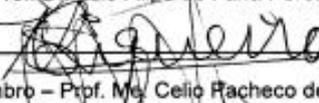
**“A IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO NA
MANUFATURA ADITIVA”.**

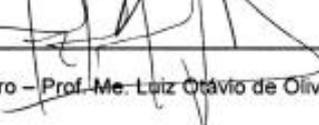
**João Vitor dos Santos
Ryan Pereira de Campos**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Manutenção Industrial.

Comissão Examinadora


Orientador – Prof. Dr. Luis Filipe de Faria Pereira Wiltgen Barbosa


Membro – Prof. Me. Celio Pacheco de Siqueira


Membro – Prof. Me. Luiz Otávio de Oliveira Arouca

Pindamonhangaba, 12 de dezembro de 2022.

DEDICATÓRIA

ESTUDANTE 1

Dedico esta pesquisa a minha família e aos professores e amigos, principalmente ao Prof. Filipe Wiltgen.

ESTUDANTE 2

Dedico esta pesquisa a minha família e aos professores e amigos, principalmente ao Prof. Filipe Wiltgen.

AGRADECIMENTO

ESTUDANTE 1

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa. Aos meus pais, que proporcionaram toda condição necessária para a conclusão desta faculdade, e aos meus irmãos, pela amizade.

Ao Prof. Filipe Wiltgen, pelo inestimável apoio na orientação nesta pesquisa.

Aos colegas de classe, com quem nesses anos de estudo tive a felicidade de conviver.

ESTUDANTE 2

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa. Aos meus pais, que proporcionaram toda condição necessária para a conclusão desta faculdade, e aos meus irmãos pela amizade.

Ao Prof. Filipe Wiltgen, pelo inestimável apoio na orientação nesta pesquisa.

Aos colegas de classe, com quem nesses anos de estudo tive a felicidade de conviver.

“Não está na natureza das coisas qualquer homem fazer uma descoberta súbita e violenta, a ciência vai passo a passo, e cada homem depende do trabalho de seus antecessores”.

Ernest Rutherford

CAMPOS, R. P. SANTOS, J. V. **A importância da manutenção na manufatura aditiva**. 2022. 60 p. Trabalho de Graduação (Curso de Manutenção Industrial). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2022.

RESUMO

Esta pesquisa trata da manutenção dos equipamentos que realizam a transformação na manufatura aditiva, uma das principais tecnologias da Manufatura Avançada (Indústria 4.0), visando estabelecer um plano de manutenção eficaz em garantir a confiabilidade do sistema produtivo. Para tanto, o objetivo principal foi desenvolver um plano mestre de manutenção efetivo em garantir a confiabilidade nos equipamentos que realizam a manufatura aditiva. A metodologia é baseada em um estudo de caso para desenvolvimento de um plano de manutenção para um dos tipos de impressora 3D utilizadas industrialmente para confecção de protótipos e produtos. Como principal resultado constatou-se que os planos de manutenção influenciam na promoção da manutenibilidade, disponibilidade e confiabilidade operacional dos sistemas produtivos através do planejamento e controle das ações gerenciais e técnicas para gestão eficaz das instalações, máquinas e equipamentos que viabilizam a transformação de entradas em saídas satisfatórias em atender as necessidades da produção. Por fim, acredita-se que apenas com a análise dos dados históricos do equipamento em consonância com a utilização de ferramentas de gestão diagnósticas pode levar a otimização do planejamento, programação e controle da manutenção através da adequação de suas atividades a realidade do processo e criticidade de cada componente.

Palavras-chave: Gestão da Manutenção; Planos da Manutenção; Manufatura Aditiva; Impressão 3D; Manufatura Avançada.

CAMPOS, R. P. SANTOS, J. V. *The importance of maintenance in additive manufacturing*. 2022. 60 p. Trabalho de Graduação (Curso de Manutenção Industrial). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2022.

ABSTRACT

This research deals with maintenance of equipment that promote transformation of manufacturing into additive, one of main technologies of Advanced Manufacturing (Industry 4.0), seeking to establish an effective maintenance plan to guarantee the reliability of production system. Therefore, main objective was to develop an effective maintenance master plan to guarantee reliability of equipment that performed additive manufacturing. The methodology is based on a case study for development of a maintenance plan for one of types of 3D printer used industrially for making prototypes and products. As a main result, it was found that maintenance plans influence promotion of maintenance, availability and operational reliability of production systems through planning and control of managerial and technical actions for effective management of facilities, machines and equipment that enable transformation of inputs into satisfactory outputs in meeting production needs. Finally, it is believed that only with the analysis of historical data equipment in line with use of diagnostic management tools can lead to optimization of planning, programming and maintenance control through orientation of its activities to reality process and criticality of each component.

Keywords: Maintenance Management; Maintenance Plans; Additive Manufacturing; 3D printing; Advanced Manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da manutenção industrial	17
Figura 2 – Realização dos planos corretivos planejados e preventivos	26
Figura 3 – Desenvolvimento do plano de manutenção preventiva	27
Figura 4 – Modelo de sistema de gestão da manutenção	29
Figura 5 – Etapas para concepção do sistema de gestão da manutenção	30
Figura 6 – Exemplo da aplicação do FMEA	33
Figura 7 – Etapas para confecção de produtos da manufatura aditiva	36
Figura 8 – Processos da manufatura aditiva e suas tecnologias	42
Figura 9 – Tecnologia de Estereolitografia ou SLA	43
Figura 10 – Tecnologia FDM	44
Figura 11 – Tecnologia PolyJet	44
Figura 12 – Tecnologia LOM	45
Figura 13 – Tecnologia SLS	46
Figura 14 – Tecnologia 3DP	47
Figura 15 – Tecnologia LENS	47
Figura 16 – Metodologia da pesquisa	49
Figura 17 – Componentes do equipamento da tecnologia FDM	51
Figura 18 – Árvore de falhas do FDM	53
Figura 19 – Indicadores de desempenho prospectados para o equipamento e componentes do FDM	56
Figura 20 – Exemplo de Kanban para execução do plano de manutenção	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Processos de Manufatura Aditiva	38
Quadro 2 – Vantagem e desvantagem das tecnologias da manufatura aditiva	40
Quadro 3 – Matriz de avaliação de criticidade da tecnologia FDM	52
Quadro 4 – FMEA dos equipamentos do FDM	53
Quadro 5 – Roteiro de inspeção da manutenção	54
Quadro 6 – Notificação de manutenção	55
Quadro 7 – 5W2H para escopo das responsabilidades e atividades	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Aplicações da manufatura aditiva

35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMA DA PESQUISA	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 JUSTIFICATIVA	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 A EVOLUÇÃO DA GESTÃO DA MANUTENÇÃO	17
2.2 PLANOS DE MANUTENÇÃO	23
2.2.1 Ferramentas e técnicas para adequação do plano de manutenção	28
2.3 MANUFATURA ADITIVA	34
2.3.1 Vantagens e desvantagens da manufatura aditiva	38
2.3.2 Principais tecnologias da manufatura aditiva	42
3 METODOLOGIA	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 RESULTADOS	51
4.2 DISCUSSÃO	57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais atribuições da gestão da manutenção a construção do plano mestre de manutenção que engloba indicar o melhor tipo de manutenção para cada equipamento, máquina e componentes do sistema produtivo, tendo como objetivo principal a garantir a confiabilidade e a disponibilidade. Assim, esta pesquisa delimitou-se a discorrer sobre o estabelecimento de planos de manutenção para a manufatura aditiva, umas das principais tecnologias da Manufatura Avançada (Indústria 4.0), que representa a quebra de paradigmas operacionais no setor industrial.

A manufatura aditiva tem como característica o alto investimento em equipamentos, sendo preciso então, um bom planejamento e controle da manutenção para que ele possa garantir o desempenho durante o seu ciclo de vida útil que possa garantir o retorno de seu investimento (WILTGEN, 2022; WILTGEN, 2020; WILTGEN e ALCALDE, 2019). Como diz o nome, a manufatura aditiva é relativa ao processo de confecção de peças através da adição de material, sendo o equipamento considerado uma espécie de impressora 3D, o que permite sua produção ter grande precisão de detalhes e as mais diferentes formas (ALCALDE e WLTGEN, 2018; COMENALE e WILTGEN, 2021; TAMANINI e WILTGEN, 2022).

Desta forma, suas principais aplicações na engenharia são para a prototipagem rápida de objetos físicos reais para teste operacional e de novos produtos ou componentes, visando atestar que a necessidade projetada para ser atendida por ele tem efetividade em cumprir a tarefa ou se precisa de melhorias para atingir a expectativa dos criadores (WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2022). Esta produção é viabilizada através de programas, como CAD (*Computer Aided Design* ou Desenho Assistido por Computador), que dimensionam e formatam o modelo tridimensionalmente para produção.

Portanto, como a Gestão da Manutenção Avançada é direcionada pela gestão de ativos, tornando-se necessário aplicar métodos e técnicas que fomentem a melhoria contínua dos fatores direcionadores de sucesso da manufatura aditiva nos planos mestres de manutenção dos equipamentos e componentes críticos para o processo. Desta maneira, delimita-se a debater a importância da manutenção para garantir a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos na manufatura aditiva.

Para tanto, foi realizado um estudo de caso para aplicação de ferramentas de gestão da manutenção que colaboram para indicar quais seriam os melhores planos de manutenção para os equipamentos e componentes no processo de fabricação aditiva.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

Como esses equipamentos necessitam de uma alta precisão, eles precisam ser sempre vistoriados e passar por uma manutenção preventiva, porém atualmente no mercado de trabalho existe uma falta de estudo sobre os planos de manutenção destes maquinários. Com esse pressuposto, elencou-se o seguinte problema da pesquisa. Qual a importância de se estabelecer planos de manutenção efetivos para gestão dos ativos físicos da manufatura aditiva?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um plano mestre de manutenção efetivo em garantir a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos que realizam a manufatura aditiva.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- a) Investigar a evolução da gestão da manutenção;
- b) Discorrer sobre os planos de manutenção e como ele pode ser elaborada através de ferramentas de gestão e controle dos processos;
- c) Conhecer a manufatura aditiva, suas vantagens e desvantagens e as principais tecnologias e equipamentos;
- d) Realizar um estudo de caso para elaboração de um plano de manutenção efetivo para os equipamentos da manufatura aditiva.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para a manutenção da competitividade no setor industrial é fundamental a confiabilidade operacional do sistema produtivo para que a demanda prospectada possa ser atendida no tempo certo, com a qualidade esperada ao menor custo possível. Para tanto, é necessário a utilização eficiente e eficaz dos fatores produtivos, principalmente os equipamento e máquinas, cuja disponibilidade serve para garantir a produtividade.

Portanto, observa-se que a relevância do tema vem da importância da excelência operacional dos sistemas produtivos para manutenção da competitividade e na manufatura aditiva não é diferente, ainda mais que ela se destaca pela precisão de seus equipamentos para o desenvolvimento de produtos. Desta maneira, considera-se que a gestão da manutenção deve assumir uma função estratégica para administrar eficientemente as variáveis envolvidas para garantir a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, planejando desde pequenos reparos e limpeza até grandes projetos para paradas programadas.

Tendo em vista que a manufatura aditiva permite a fabricação com mais velocidade, além de possibilitar produzir os mais complexos formatos (WILTGEN, 2019), este processo ainda tem a vantagem de oferecer personalização de produtos, tornado chamativa este tipo de tecnologia para as empresas, pois, a demanda por produtos personalizados tem crescido exponencialmente.

Desta forma, indica-se planos de manutenção para detectar e controlar ações de resposta para possíveis avaria na máquina, pois, a manutenção corretiva não planejada fica mais difícil e até mesmo, inviável em alguns casos, devido à falta de mão de obra para manutenção deste tipo de equipamento, além é claro da falta de pesquisas nesta área. Assim, torna-se pertinente a melhor compreensão dos aspectos que garantem a desempenho dos equipamentos da manufatura aditiva para colaborar o sucesso do setor no país.

Mostrar como será feita a manutenção de forma efetiva e prática dos equipamentos de manufatura aditiva tanto para aqueles que não possuem muito conhecimento na área quanto para os que trabalham com esses equipamentos na indústria, apontando as diferenças que cada execução do processo pode afetar a máquina. Com isso torna-se relevante ações para manutenção dos equipamentos (impressoras 3D), como: levantamento das principais causas de paradas de manutenção; identificação dos componentes críticos e principais avariais que resultarão na parada do equipamento, e o desenvolvimento de um plano de manutenção.

Por fim, justifica-se a discussão sobre a importância dos planos de manutenção para a confiabilidade operacional dos sistemas produtivos, neste caso, delimitado a manufatura aditiva, para evidenciar medidas que possam aumentar a confiabilidade dos equipamentos e

máquinas do sistema produtivo, contribuindo para que as organizações do setor industrial brasileiro com os novos paradigmas da nova revolução industrial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

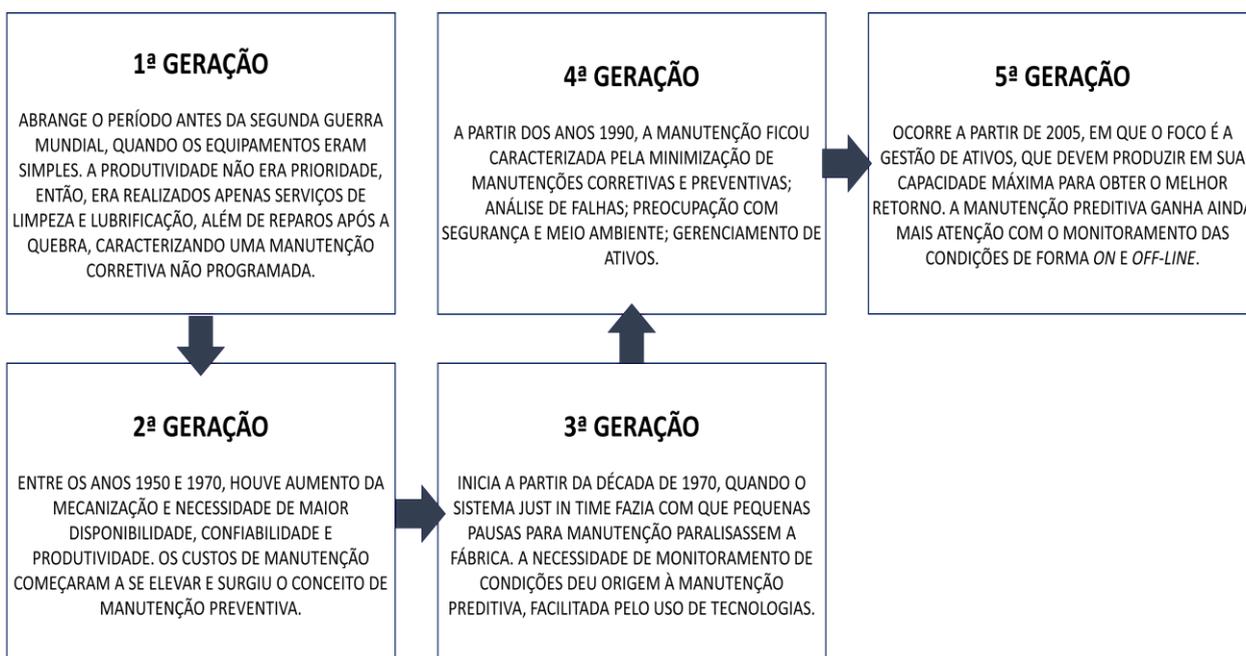
2.1 A EVOLUÇÃO DA GESTÃO DA MANUTENÇÃO

A manutenção teve seu significado definido de diferentes formas por normas e certificações e pela evolução de suas diferentes abordagens de ação, entretanto, todos destacam o bom funcionamento dos equipamentos e instalações como a principal razão de sua existência (ALMEIDA, 2015). Com a evolução dos sistemas produtivos e o aumento da competitividade gerado pela globalização a manutenção se tornou medida estratégica, tornando sua gestão mais complexas.

A manutenção passou de mero setor de reparos para um importante departamento estratégico para que a empresa possa alcançar os objetivos e das metas da organização (LUCATO *et al.*, 2017). Isto, porque através dos anos, para otimizar seus processos, as empresas vêm investindo nos mais modernos sistemas mecânicos e eletromecânicos, de maior grau de complexidade, alto custo e exigências elevadas quanto ao nível da manutenção.

Na Figura 1 é possível observar a evolução da manutenção industrial dividida em cinco gerações.

Figura 1 – Evolução da manutenção industrial.



Fonte – Gregório e Silveira (2018).

Portanto, o aumento da complexidade dos sistemas de funcionamento dos equipamentos, máquinas e seus componentes os tipos de manutenção foram se alterando para aumentar a confiabilidade, disponibilidade e desempenho destes ativos. Assim, surgiram vários tipos de manutenção e modelos de gestão a cada geração para sustentar seu perfil estratégico para otimização da competitividade no setor industrial (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018).

Os tipos de manutenção relatados durante a evolução da manutenção podem ser descritos da seguinte maneira:

- a) **Manutenção Corretiva:** refere-se à realização das ações de reparo apenas após a falha do equipamento. Pode ser emergencial, quando realizada imediatamente após a falha, ou programada, quando se planeja a ação para um momento posterior à mesma;
- b) **Manutenção Preventiva:** é a realização do reparo ou troca antes da falha, mas pode ser após um defeito. Pode ser sistemática, muitas vezes baseada em intervalos de tempo pré-definidos, ou por oportunidade, ao aproveitar determinadas condições operacionais do equipamento para a realização da manutenção;
- c) **Manutenção Preditiva:** é o monitoramento de um ou mais parâmetros de um item com o objetivo de realizar as ações necessárias antes que a falha aconteça, também é conhecida como manutenção baseada na condição;
- d) **Manutenção Detectiva:** atuação efetuada em sistemas de proteção, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção.

É através destes tipos de manutenção que se construiu o papel estratégico e as políticas que compõe o sistema de manutenção (FOLIATTO e RIBEIRO, 2009). Para tanto, surgiram novas ferramentas para a análise de falhas e para a busca da minimização de sua ocorrência, que provê uma rica variedade de contextos nos quais surgem considerações acerca da confiabilidade, principal premissa adotada ao lado da disponibilidade e desempenho dos ativos com a evolução da manutenção.

Em seu sentido mais amplo, a confiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas (VIANA, 2006). E o desempenho está ligado a operação eficaz do sistema produtivo. A disponibilidade

retrata a produtividade do equipamento e pode atestar a efetividade do plano de manutenção, sendo assim, portanto, necessária a quantificação destes princípios para colaborar com o controle e melhoria contínua do papel estratégico da manutenção.

Para exercer papel estratégico, a manutenção precisa estar voltada para os resultados empresariais da organização. É preciso, sobretudo, deixar de ser apenas eficiente para se tornar eficaz; ou seja, não basta, apenas, reparar o equipamento ou instalação tão rápido quanto possível, mas é preciso, principalmente, manter a função do equipamento para a operação, reduzindo a probabilidade de uma parada de produção não planejada. (KARDEC; NASCIF, 2019, p. 13).

As ações de manutenção têm passado por mudanças profundas tanto no aspecto gerencial quanto no aspecto tecnológico e, por conseguinte, em relação a mão de obra e sua especialização.

Essas alterações são consequências das seguintes condições: aumento do número e da diversidade dos itens físicos (instalações, equipamentos e edificações) que precisam ser conservados; programas mais complexos de produção; novas tecnologias de manutenção; novos enfoques sobre a organização da manutenção e suas responsabilidades.

As atividades da manutenção industrial visam responsabilidades que podem ser divididas em quatro grupos de diferentes atribuições relacionadas ao planejamento; à organização; à execução; e ao controle da manutenção de ativos. Desta forma, uma das principais ações direcionadas ao gerenciamento da manutenção é a criação do plano de manutenção, no qual todas essas atribuições devem convergir com os objetivos da produção.

A evolução das práticas atuais de manutenção teve um enfoque empresarial, razão principal para a obtenção da competitividade, necessária à sobrevivência da empresa. Há um esforço conjunto em todas as áreas coordenadas pela sistemática da Gestão de Ativos. O engenheiro de manutenção deixou de ser apenas uma pessoa que conserta máquinas para ser um gestor de máquinas milionárias que estão no pátio da empresa, ou seja, sua função passou a ser garantir o programa de produção de acordo com as metas propostas pelos investidores da empresa (LUCATO; OLÍVIO; SOEIRO, 2017, p. 15).

Desta forma, a evolução da manutenção industrial ela assumiu os seguintes objetivos prioritários para buscar garantir estrategicamente o aumento de desempenho dos ativos do sistema produtivo (BRANDON-JONES et al., 2020), são eles:

- a) Redução de custos: através da manutenção preventiva podem-se reduzir defeitos, impactando em menos ações corretivas, as quais têm valor de custo mais elevado que as ações de prevenção;
- b) Maior qualidade de produtos: equipamentos em estado perfeito de funcionamento garantem a qualidade dos produtos;
- c) Maior segurança: setor produtivo limpo e em boas condições de operação propicia maior segurança, confiança e motivação aos trabalhadores;
- d) Melhor ambiente de trabalho: ambiente de trabalho limpo, seguro e organizado através de atividades da manutenção autônoma, melhoram o nível de trabalho dos funcionários;
- e) Desenvolvimento profissional: deve-se desenvolver novas habilidades e também crescimento profissional aos colaboradores pelo seu envolvimento direto nas decisões de aumento de produtividade da empresa;
- f) Maior ciclo de vida útil dos equipamentos: elevação da vida útil dos ativos, através de ações de prevenção e melhorias específicas nos equipamentos;
- g) Maior confiabilidade dos equipamentos: monitoramento para prospectar o maior intervalo de tempo de reparo possível, o que resulta em maior disponibilidade e velocidade de produção;
- h) Instalações da produção com maior valorização: instalações bem mantidas têm maior valor de mercado;
- i) Maior poder de investimento: a redução de custos obtida através da manutenção tem relação direta com o aumento de investimentos, o que beneficia os acionistas, os funcionários e a comunidade ao entorno da empresa;
- j) Preservação do meio ambiente: com o bom funcionamento e controle das variáveis pertinentes para a boa desempenho dos ativos há economia de recursos naturais e diminuição dos impactos ambientais.

A organização e o planejamento da manutenção, por meio da reflexão e da decisão sobre o que fazer, quando fazer, quem deve fazer, como fazer, entre outros. Controlar as ações de manutenção também ganhou destaque, pois contribuiu para avaliar a efetividade das ações planejadas e realizadas ao apresentar os pontos críticos, nos quais mudanças mostram-se necessárias, e os pontos não críticos, mas

passíveis de melhoria contínua.

Quanto aos modelos de gestão, os principais são:

- a) **Manutenção Produtiva Total (MPT):** é uma maneira de mudar os paradigmas operacionais da manutenção e de desenvolver o trabalho de equipe e desempenho de seus colaboradores, trazendo uma série de benefícios, uma vez que implica na melhoria profissional dos operadores para a realização das tarefas de manutenção corretiva, preventiva ou preditiva. Essas tarefas são indispensáveis na prática da MPT e alicerçam as estratégias da Manutenção Industrial;
- b) **Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC):** baseia-se em sistemáticas de administração que visam eliminar e prevenir defeitos, eliminando suas causas. Indicada nos casos em que falhas ou defeitos podem causar tragédias e grande prejuízo. ao conhecer as falhas e suas prováveis causas a MCC direciona a prática mais viável que possa garantir que as instalações possam produzir no tempo certo, com a qualidade especificada, aos menores custos possíveis;
- c) **Engenharia da Manutenção (EM):** dentre outros fatores, ela age para aumentar a confiabilidade, disponibilidade, segurança e mantabilidade; eliminar problemas crônicos e solucionar problemas tecnológicos; melhorar gestão de pessoal, materiais e sobressalentes; participar de novos projetos e dar suporte à execução; fazer análise de falhas e estudos; elaborar planos de manutenção, fazer análise crítica; acompanhar indicadores, e zelar pela documentação técnica que possa prospectar a melhoria contínua do sistema;
- d) **Manutenção Classe Mundial (MCM):** é a gestão voltada a busca de melhorias contínuas no sistema de manutenção por meio de práticas inovadoras para conduzir até a MCM referentes as melhores práticas do setor, visando contribuir significativamente para a qualidade do sistema. O alcance da MSM depende do entendimento e da prática de dois fundamentos: (i) sair do estágio atual relacionado à manutenção e alcançar a manutenção classe mundial; (ii) caminhar na direção dos melhores com velocidade compatível e se manter entre eles.

Deste modo, seguindo estas estratégias e modelos de gestão existe o conceito da Gestão da Manutenção considerada a última evolução da manutenção baseada nas tecnologias da última revolução industrial, que é direcionada pela gestão do desempenho dos ativos e monitoramento automático para antever a falha, sendo necessário aplicar métodos e técnicas que fomentem a melhoria contínua dos fatores direcionadores (confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade) para estabelecer um padrão de operação ótima a todo sistema produtivo.

Um dos fatores chave para ser gerido na manutenção da Indústria 4.0 é o *wrench-time* (tempo-chave), que é o tempo de resposta da manutenção para que as atividades sejam realizadas, que vai desde a aquisição de peças necessárias até a entrega do equipamento para a produção, realizado por tecnologias da informação e o *Big Data* (SACOMANO *et al.*, 2020).

Os principais fundamentos que sustentam a Manufatura Avançada são: sistemas cyber físicos; automação total; robótica avançada; simulação e virtualização; acompanhamento em tempo real; integração de sistemas; análise de dados e Big Data; computador em nuvem; cibersegurança; *blockchain*; internet das coisas; manufatura aditiva; Inteligência Artificial; e realidade virtual (WILTGEN, 2020; COMENALE e WILGEN, 2021; BUENO, 2020).

As tecnologias da Manufatura Avançada são direcionadas na manutenção para a efetivação da gestão do desempenho dos ativos. Deste modo, os processos se tornam mais autônomos e customizáveis e é possível antecipar a detecção de problemas, o que seria uma manutenção proativa, com a qual, em vez de solucionar falhas, são identificadas as suas causas a partir de análise de indicadores de desempenho, removendo-as antes do início da falha.

Sendo assim, conforme relata além das tecnologias para a coleta, tratamento e comunicação de dados de forma automática para auxiliar na tomada de decisão quanto as intervenções técnicas e ações gerenciais na gestão da manutenção, faz-se uso da robótica colaborativa, sensores e da visão artificial para possíveis ajustes corretivos e preventivos, visando aumentar o ciclo de vida útil dos equipamentos e máquinas do sistema produtivo.

A manufatura aditiva na manutenção industrial pode ser utilizada para produzir possíveis peças sobressalentes necessárias para a manutenção dos equipamentos e máquinas (COMENALE e WILTGEN, 2022).

A conectividade entre dispositivos, processos, arranjos produtivos e consumidor final, o que torna o processo flexível a ponto de poder customizar solicitações de produção partindo diretamente deste consumidor final. Isso estabelece a necessidade de a manutenção atender com muito mais eficiência e assertividade à demanda de sua rotina que é a de atuar mantendo o processo disponível e confiável.

2.2 PLANOS DE MANUTENÇÃO

Os planos de manutenção são práticas de direcionamento para as possíveis soluções em equipamentos de produção, pois, se houver muitas falhas consecutivas em determinados equipamentos significa que algo ali está sendo mal executado (VIANA, 2006).

Neste sentido, no critério considerado como modos de intervir nos instrumentos, deixa em evidenciar a existência de um consenso, salvo algumas variações irrelevantes de acordo com os tipos de manutenção que irão compor o plano mestre da manutenção.

Os planos de manutenção correspondem a estratégia de manutenção planejada para cada ativo sob a responsabilidade do setor, detalhando e disponibilizando informações e orientações precisas para a execução eficaz das atividades de manutenção, sendo a princípio, preventivo. Para garantir a efetividade das atividades de identificação da ocorrência de falhas e defeitos, deve-se adotar ações preventivas, planejar recursos e insumos, programar e planejar a parada de manutenção.

O plano de manutenção é um documento importante que contém a lista de equipamentos da indústria, os tipos de manutenções mais adequados para cada equipamento, o momento do reparo, troca, restauração e/ ou monitoramento, os procedimentos a serem adotados, os recursos materiais e humanos envolvidos, entre outros. Será a base consultada frequentemente pelo setor para o exercício de sua função. As avaliações do plano e de sua execução são fundamentais para gerar feedbacks e direcionar as próximas ações do setor (GREGÓRIO; PRATA; SANTOS, 2018, p. 51).

A manutenção, quando realizada de forma planejada, apresenta benefícios que justificam a realização dos planos de manutenção, como, por exemplo: (i) segurança: menos riscos de falhas e acidentes de trabalho; (ii) qualidade: desempenho dentro ou acima do padrão; (iii) confiabilidade: menos interrupções nas atividades de produção;

(iv) vida útil: cuidado regular, limpeza e lubrificação prolongam a vida útil dos equipamentos.

Alguns fatores devem ser levados em consideração para a definição da melhor estratégia de manutenção industrial para elaboração dos planos de manutenção, são eles:

- a) Recomendação do fabricante: informações sobre conservação, periodicidade de manutenção, ajustes e calibrações, procedimentos para correção de falhas, entre outros;
- b) Segurança do trabalho e meio ambiente: é necessário obedecer às exigências legais a fim de obter a integração perfeita entre homem/máquina/meio ambiente;
- c) Características do equipamento (falha e reparo): observar o tempo médio entre falhas, a vida mínima, o tempo médio de reparo;
- d) Fator econômico: custos de manutenção, como recursos humanos, material, interferência na produção e perdas no processo.

Após a análise desses fatores, é escolhida a melhor estratégia de manutenção industrial que irão compor o plano mestre de manutenção que irá reger as ações para garantir a confiabilidade, disponibilidade e desempenho dos ativos. Assim, o plano mestre de manutenção é baseado nas manutenções principalmente na preventiva, podendo existir ações corretivas planejadas e, tendo a periodicidade determinado pelo monitoramento preditivo, ou em alguns casos, também é indicada a manutenção detectiva.

Os planos de manutenção podem ser desenvolvidos em categorias, conforme a seguinte sequência: plano de inspeção; plano de lubrificação; monitoramento de parâmetros dos equipamentos; manutenção corretiva programada e substituição de componentes; e por fim, o plano de manutenção preventiva. Os planos de inspeção são definidos por roteiros de inspeção através de detalhamento das linhas de processo, orientados por ativos, por similaridade, por tempo de operação, por criticidade do ativo para o sistema de produção (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009; VANA, 2006).

A manutenção corretiva ocorre após a falha do equipamento, com o objetivo de trazê-lo de volta ao estado operante no menor tempo possível, no plano mestre de

manutenção ela é sempre corretiva planejada, sendo realizada baseada nas análises de falhas e monitoramento da condição dos ativos físicos, podendo ser visualizada a sua necessidade até mesmo durante a manutenção preventiva, preditiva e/ou detectiva, corrigindo falhas antes de se tornarem perdas maiores. A eficiência das ações do plano de manutenção corretiva é medida através da disponibilidade do equipamento.

O plano de manutenção corretiva é indicado quando: existir períodos predeterminados que os equipamentos estarão em modo de espera; não for possível prevenir a falha, devendo apenas monitor para antecipá-la com a manutenção corretiva; for nulo o impacto da falha; for baixo o custo do reparo e sem grande impacto na produção, inviabilizando o custo de fazer manutenção preventiva e preditiva.

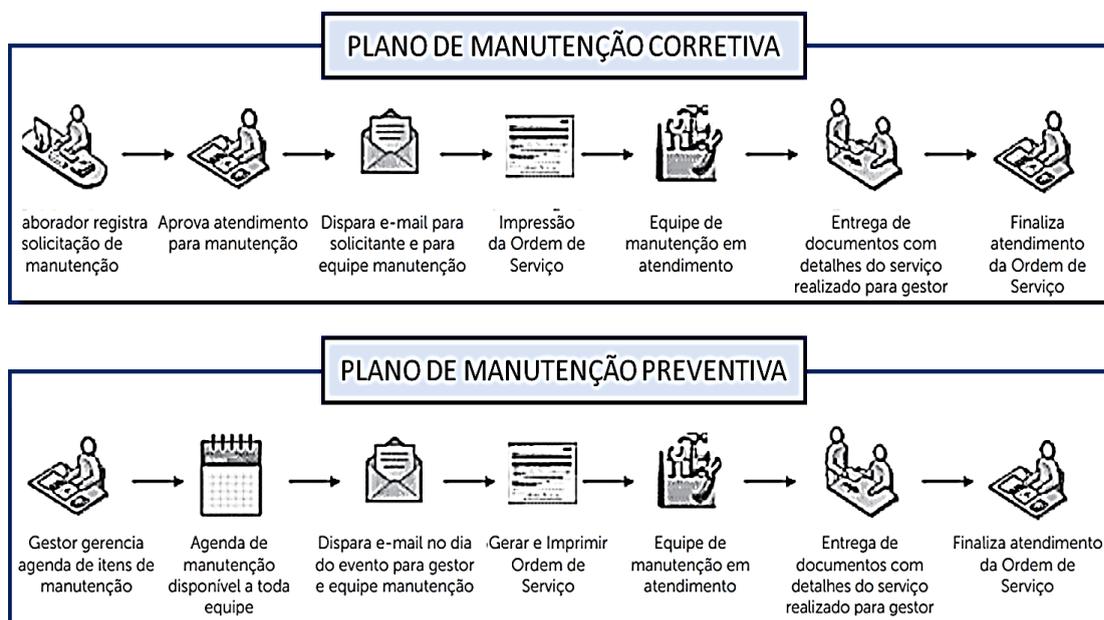
Enquanto a empresa estiver consertando o equipamento, devido às falhas apresentadas nos relatórios de manutenção preditiva, ela realizará o plano de manutenção corretiva, sem causar problemas ao setor produtivo. Deste modo, ela se difere da preventiva apenas pelas atividades realizadas serem de natureza corretiva e não de prevenção com o objetivo de minimizar o desgaste do equipamento para aumentar seu ciclo de vida útil.

No fluxograma da Figura 2, relativo aos planos da manutenção corretiva e preventiva, são apresentadas as diferentes etapas do fluxo e do tratamento da informação na solicitação de serviço de manutenção, que é iniciado com o registro da solicitação de manutenção, a qual é identificada no roteiro de inspeção da manutenção para ação imediata.

Deste modo, os planos de manutenção corretiva planejada são únicos e não periódicos, sendo assim, depois de executados não irão se repetir, devendo somente ser verificada a desempenho do equipamento e/ou o componente objeto do plano, registrando para que o histórico de manutenção corretiva possa colaborar para a tomada de decisão sobre a solução de ocorrência de falhas em potencial para estabelecimento de outras ações corretivas necessárias.

O plano de manutenção preventivo ocorre antes da falha do equipamento, sendo constituída de ações como lubrificação e reposição de partes e componentes, e pequenos ajustes com o foco principal de aumentar a confiabilidade do equipamento, retardando a ocorrência de falhas (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). A eficiência das ações do plano de manutenção preventiva é avaliada pelo incremento resultante na confiabilidade do equipamento.

Figura 2 – Realização dos planos corretivos planejados e preventivos.



Fonte – Lucato, Olívio e Soeiro (2017).

O plano de manutenção preventiva é utilizado em equipamentos de alta criticidade, cujas consequências da falha são graves para critérios como produção, qualidade, custo, segurança, meio ambiente e outros que a indústria julgar importante (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018). Assim, considera que toda as ações da manutenção realizadas em equipamentos e máquinas que estejam em condições operacionais, ainda que com algum defeito, deve ser considerado no plano de manutenção preventiva.

A manutenção preventiva é mais conveniente quanto mais simples for a reposição, quanto mais altos forem os custos das falhas e quanto mais prejudiciais forem as mesmas (KARDEC e NASCIF, 2019). Destacam-se os seguintes fatores na adoção da manutenção preventiva:

- a) Quando não é possível fazer manutenção preditiva;
- b) Aspectos relacionados à segurança pessoal ou patrimonial que tornam obrigatória a intervenção, normalmente, para substituição de componentes;
- c) Equipamentos críticos de difícil liberação da produção;
- d) Riscos de impacto ao meio ambiente;

e) Sistemas complexos e/ou processos de produção contínuo.

Para a manutenção preventiva pode ser subdividida em duas, sendo: preventiva por estado: realizado em máquinas que estejam em condições operacionais, mas nas quais se detectou a degradação de parâmetros do equipamento; e preventiva sistemática: realizada, de modo sistemático, em equipamentos que estejam em condições operacionais (GREGÓRIO *et al.*, 2018).

A Figura 3 apresenta as etapas de implantação do plano de manutenção preventiva.

Figura 3 – Desenvolvimento do plano de manutenção preventiva.



Fonte – Gregório, Prata e Santos (2018).

Deste modo, os planos de manutenção preventiva devem ser adequados a cada instalação industrial, agindo como um roteiro de ações que deve ser realizado periodicamente, de forma disciplinada (LUCATO *et al.*, 2017).

O objetivo principal é garantir a confiabilidade dos ativos do sistema produtivo para evitar paradas não planejadas, gastos extras, prevenção de desgastes, quebras e falhas de equipamentos e componentes, elevação do consumo energético e perda de energia.

Quanto à manutenção preditiva, para o estabelecimento de um plano de manutenção efetivo, sendo que equipamentos distintos têm parâmetros de

monitoramento diferentes, alguns exemplos de parâmetros são ruídos, temperatura, vibração, qualidade do óleo, entre outros (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018). Assim como a manutenção preventiva, a implantação da manutenção preditiva, quando necessária, deve ser estruturada.

As etapas para implantação da manutenção preditiva são:

- a) Identificação dos equipamentos que cumprem os requisitos necessários para serem monitorados/inspecionados;
- b) Identificação de um ou mais parâmetros que serão monitorados e os respectivos procedimentos de monitoramento;
- c) Identificação e quantificação dos recursos materiais e pessoais necessários à implantação da manutenção preditiva. Entre os recursos materiais, estão os instrumentos de medições, que podem ser necessários para acompanhar os parâmetros e os responsáveis pelo acompanhamento.

De acordo com os dados coletados pelo monitoramento preditivo têm como objetivo o desenvolvimento de planos cada vez mais efetivos, pois, acompanharam o desenvolvimento não só dos equipamentos e máquinas, mas também da eficiência e eficácia exigida pela alta competitividade no setor industrial. Portanto, ela valia as reais condições de funcionamento da máquina ou do equipamento, bem como suas peças, para aproveitamento eficiente da vida útil e planejamento das intervenções de manutenção (ALMEIRA, 2015).

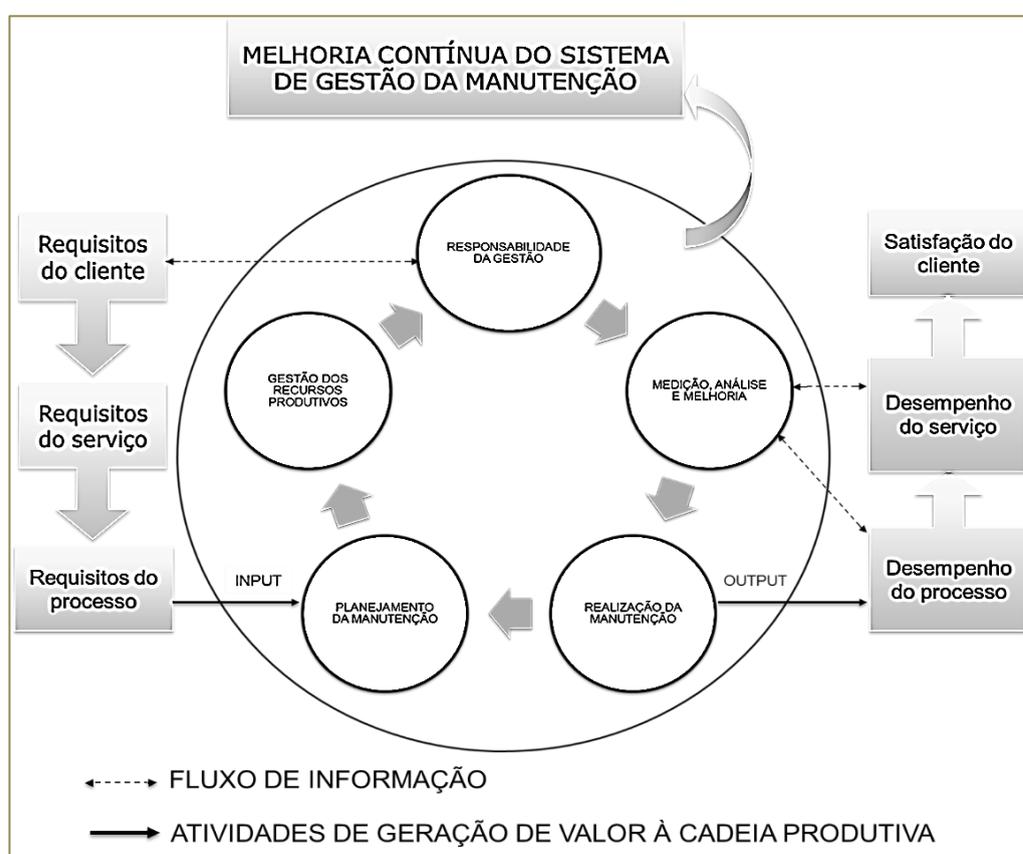
Por fim, os planos de manutenção são importantes componentes dos sistemas de gestão da manutenção, que devem interagir com os sistemas ligados a produção, como a Logística, Qualidade, Segurança do Trabalho, Meio Ambiente. Com essa interação deve-se buscar o desenvolvimento eficaz e aos menores custos as atividades de manutenção, garantindo o funcionamento correto das instalações, equipamentos e máquinas ligadas aos processos produtivos, de forma que ele tenha a confiabilidade necessária (SELEME, 2015).

2.2.1 Ferramentas e Técnicas para Adequação do Plano de Manutenção

Para implementar as práticas de manutenção é necessário estabelecer um sistema de gestão da manutenção (SGM), que deve dispor dos recursos técnicos que

permitam atingir eficazmente os objetivos e deve gerar informação útil, que permita medir parâmetros, desempenhos e o cumprimento das metas da manutenção (BARREIROS, 2012). Geralmente, os sistemas de gestão da manutenção seguem uma abordagem PDCA (planejar; executar; controlar; e atuar), orientando-se para a melhoria contínua, como visto na Figura 4.

Figura 4 – Modelo de sistema de gestão da manutenção.



Fonte – Adaptado de Barreiros (2012).

Este ciclo PDCA deve reger a SGM, sendo que um ciclo inadequado do PDCA provoca instabilidades não desejadas no sistema, tais como: aumento de falhas, demora na correção dos problemas (LUCATO *et al.*, 2017). Um dos principais erros é focar continuamente na etapa da execução (Do), ou seja, cada vez mais se tem procurado executar melhor o reparo, tornando-o mais eficiente, mas também é preciso buscar diminuir o que fazer, ou seja, buscar eliminar a necessidade do reparo em si.

Para implementar e desenvolver um SGM deve-se primeiramente estabelecer as estratégias da manutenção e o plano mestre de manutenção, que é composto por planos preventivos e corretivos planejados, rotas de lubrificação, rotas de inspeção e,

por fim, pela construção e execução das ordens de serviço, além de se estabelecer quais equipamentos são críticos o suficiente para receberem monitoramento preditivo ou detectivo (BUENO, 2020).

A Figura 5 apresenta a construção de um sistema de gestão baseado nas premissas relatadas.

Figura 5 – Etapas para concepção do sistema de gestão da manutenção.



Fonte – Adaptada de Lucato, Olívio e Soeiro (2017).

Um sistema de gestão é um conjunto de partes integrantes e interdependentes que formam um todo unitário com determinado objetivo e efetuam determinada função, produzindo um ou mais resultados. O sistema de gestão engloba e direciona pessoas, recursos e procedimentos para um resultado comum. Deste modo, um sistema de gestão eficaz deve ser integrado a outros requisitos de gestão (SELEME, 2015).

Existem ferramentas de gestão que sustentam as tomadas de decisão e a busca pela melhoria contínua dos planos nos sistemas de gestão, colaborando para que a excelência global do sistema seja atingida (MORAES, 2015). As ferramentas

mais básicas para o planejamento e controle das ações dos planos nos sistemas de gestão são:

- a) **PDCA**: cada letra significa uma etapa do gerenciamento, sendo assim, o P é a etapa de planejar as ações através de planos de ação; na etapa do D são executadas as ações planejadas, no C são checados ou verificar as ações planejadas; e o A é a etapa de corrigir ou agir de forma corretiva as ações planejadas que apresentaram não conformidade. Essa ferramenta é uma das mais importantes utilizadas em todos os sistemas de gestão implantados, inclusive todas as normas ISO;
- b) **5S (Seire: utilização; Seiton: ordenação; Seiso: limpeza; Seiketsu: saúde e segurança; Shitsuke: autodisciplina)**: É um tipo de filosofia que visa formar uma cultura de melhorias em todas as ações da empresa. Para cada senso é elaborado um checklist atribuindo pontuações para atestar a efetividade das ações. É importante lembrar que as empresas buscam certificações o programa 5S é uma ferramenta indispensável;
- c) **Brainstorming**: é a mais conhecida das técnicas de geração de ideias. Trata-se de uma reunião para propor soluções criativas e inovadoras para os problemas e auxiliam as tomadas de decisões levando em conta a opinião de todos os *stakeholders*;
- d) **Diagrama de Ishikawa**: é uma técnica largamente utilizada, que mostra a relação entre um efeito e as possíveis causas que podem estar contribuindo para que ele ocorra;
- e) **Fluxograma**: utiliza alguns símbolos que representam diferentes tipos de ações, atividades e situações. O emprego dos fluxogramas permite uma ampla visualização de todo o processo. Também é possível visualizar quais operações são realizadas, no qual realiza as operações, quais as entradas e saídas e como fluem as informações, quais os recursos gastos no processo, qual o volume de trabalho, qual o tempo de execução, se parcial ou total;
- f) **5W2H**: é uma ferramenta utilizada para planejar a implementação de uma solução, sendo que o texto deve ser sempre claro e sucinto e elaborado em resposta às questões a seguir: O quê: Qual ação vai ser desenvolvida? (*What*); Quando: Quando a ação será realizada? (*When*); Por quê: Por que

foi definida essa solução? (*Why*); Onde: Onde a ação será desenvolvida? (*Where*); Como: Como a ação vai ser implementada? (*How*); Quem: Quem será o responsável pela sua implantação? (*Who*); Quanto: Quanto será gasto? (*How much*).

Outras ferramentas que podem ajudar na elaboração do plano mestre de manutenção (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009), são:

- a) **FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis* ou *Análise dos Modos e Efeitos de Falha*)**: técnica de confiabilidade que tem como objetivos: (i) reconhecer e avaliar as falhas potenciais que podem surgir em um produto ou processo, (ii) identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dessas falhas, e (iii) documentar o estudo, criando um referencial técnico que possa auxiliar em revisões e desenvolvimentos futuros do projeto ou processo; e a
- b) **FTA (*Failure Tree Analysis* ou *Análise de Árvores de Falha*)**: que é uma técnica de confiabilidade que tem como objetivos: (i) partindo de um evento de topo, indesejável, identificar todas as combinações de causas que podem originá-lo; (ii) estudar a probabilidade de ocorrência dessas causas, e em função disso, do evento de topo; (iii) priorizar ações que visam bloquear essas causas.

Utilizar outras ferramentas para padronização das ações que resultem na otimização da disponibilidade dos equipamentos, como o Seis Sigma, metodologia para identificar e eliminar causas da variabilidade e defeitos dos processos consonância com gráficos de dispersão, histogramas, além do FMEA para identificação dos problemas primários e as causas que podem afetar o funcionamento e disponibilidade das instalações e equipamentos (BUENO, 2020).

FMEA é uma ferramenta muito utilizada não só na implantação da MCC, mas também, na análise dos equipamentos críticos do processo produtivo, auxiliando na identificação e priorização das falhas por meio da estimativa do seu risco, o que colabora para a tomada de decisão de quais as melhores e mais efetivas práticas de manutenção a se realizar para equipamento (GREGÓRIO e SILVEIRA, 2018).

A Figura 6 apresenta o formulário utilizado para aplicar a FMEA, sendo que os

índices são Severidade (S); Ocorrência (O); Detecção (D); e Risco (R).

Figura 6 – Exemplo da aplicação do FMEA.

Descrição do produto/processo	Função(ões) do produto	Tipo de falha potencial	Efeito de falha potencial	Causa da falha em potencial	Controles atuais	Índices			Ações de melhoria						
						S	O	D	Ações recomendadas	Responsável/prazo	Medidas implantadas	Índices atuais			
												S	O	D	R

Fonte – Gregório e Silveira (2018).

FMEA realiza a identificação do ativo crítico, suas funções, falhas, efeitos e causas das falhas, além de fazer uma estimativa de risco (GREGÓRIO *et al.*, 2018). Essa estimativa ocorre por meio da:

- a) **Severidade:** qual é a consequência da falha para o cliente interno, externo, para a empresa e para os critérios que são considerados importantes? Quanto maior a severidade, maior será o risco da falha;
- b) **Ocorrência:** qual é a frequência de acontecimentos desta falha? Quanto maior a frequência, maior será o risco da falha.
- c) **Detecção:** quão difícil é detectar a ocorrência desta falha? Quanto mais fácil detectar a falha, menos o risco da mesma;
- d) **Risco:** potencial da falha ou quebra causar problemas com segurança, produtivo, meio ambiente entre outros.

Todos os tipos de equipamentos e infraestruturas nas organizações estão, ao longo do seu tempo de vida e utilização, sujeitos a deterioração, portanto, para se prolongar sua vida útil é necessário tomar medidas que possam garantir o funcionamento do equipamento na função para qual foi concebido, a esta atividade dá-se o nome de manutenção (BARREIROS, 2012). Os objetivos da manutenção devem ser mensuráveis e consistentes com a política da manutenção, sendo assim, outra ferramenta de gestão importantes são os indicadores de desempenho da manutenção.

Os principais indicadores utilizados na manutenção são para medir a confiabilidade, disponibilidade e desempenho dos ativos, sendo um dos mais

importantes a eficiência global dos equipamentos, que triangula a qualidade dos produtos fabricados; o desempenho dos equipamentos e sua confiabilidade.

Outros indicadores importantes são os que ajudam a validar o planejamento e controle da manutenção, podendo ser financeiros ou de medição da desempenho dos processos. O processo de tomada de decisão é mais assertivo quando o gestor da manutenção se cerca de informações confiáveis sobre o histórico de funcionamento dos equipamentos, das falhas apresentadas, das causas das falhas, e das ações de manutenção realizadas.

Por meio dessas informações, muitos indicadores de manutenção podem ser mensurados, o que permite averiguar a eficiência das ações implantadas e melhorar o plano de manutenção.

2.3 MANUFATURA ADITIVA

Relata a manufatura aditiva não é uma tecnologia nova, porém, a evolução dos materiais, da automação e dos sistemas mecânicos e eletrônicos que viabilizaram seu uso em várias aplicações na Manufatura Avançada (COMENALE e WILTGEN, 2021; SACOMANO *et al.*, 2018). A manufatura aditiva, prototipagem rápida ou impressão 3D, como também é conhecida, foi inventada por Chuck Hull, um norte-americano do estado da Califórnia, em 1984, utilizando a Estereolitografia, tecnologia precursora da impressão 3D (ALCALDE e WILTGEN, 2018; WILTGEN, 2019; WILTGEN, 2022).

De acordo com Almeida (2019), em 2010, a Sociedade Americana para Ensaio e Materiais (abreviada em inglês como ASTM) redefiniu o nome para Manufatura Aditiva por considerar um termo mais amplo, que engloba a filosofia de manufatura, bem como as diferentes tecnologias desenvolvidas. A manufatura aditiva consiste em um processo de impressão de objetos a partir da deposição de variados materiais em diversas camadas (ALCALDE e WILTGEN, 2018).

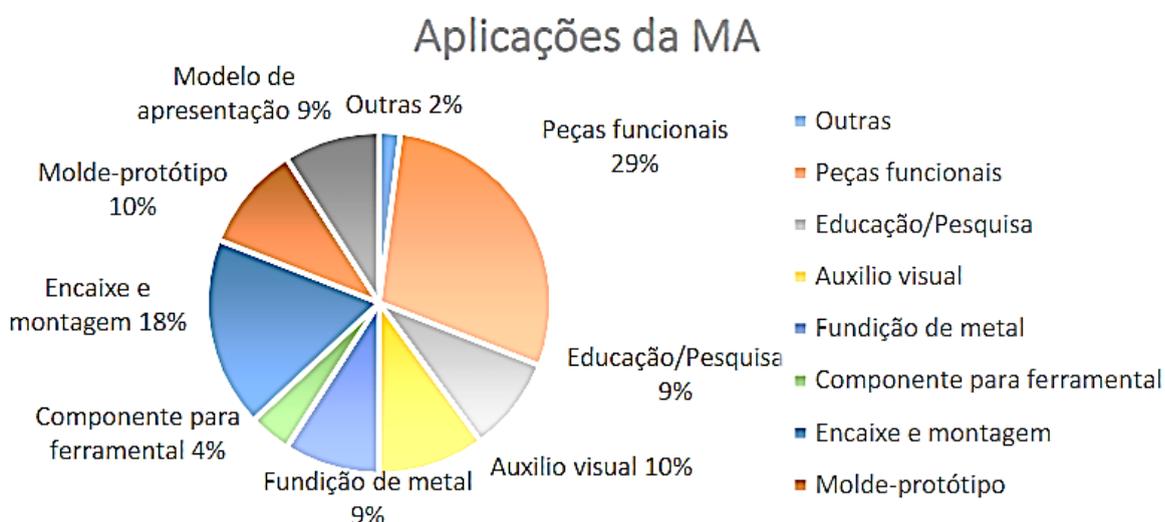
A impressão 3D é uma tecnologia de manufatura aditiva, isto é, a construção é baseada na adição de material, diferentemente da manufatura subtrativa, que remove material para construir (WILTGEN, 2019). Com a evolução, essa tecnologia se torna cada vez rápida e com menor custo, de modo que seu uso industrial vem crescendo, tanto para prototipagens rápidas quanto para produção de peças em massa (TAMANINI e WILTGEN, 2022; ARAÚJO, 2022; QUINTINO *et al.*, 2019).

A manufatura aditiva é considerada um sistema de produção avançado que dependem da integração das atividades que dependem do uso da automação, tecnologias da informação, computação, software, sensores e redes. Assim, a manufatura aditiva realiza a transformação de forma automatizada através de um programa que desenvolve o desenho da peça ou produto tridimensionalmente para confecção na impressora 3D (WILTGEN, 2019).

O processo agiliza a fabricação de determinadas peças no local em que serão utilizadas, em vez de produzi-la em outro local e enviá-la às pressas, ou de forma custosa, para o local de consumo. Há impressoras 3D que fabricam peças metálicas, plásticas e até de concreto, sendo, também, possível a construção de edificações com o uso dessa tecnologia associada a outras técnicas construtivas. Além de peças para a indústria, são confeccionadas próteses humanas e de animais, calçados e vários outros produtos. Pelo seu amplo campo de utilização, a impressão 3D deverá trazer grandes benefícios (SACOMANO et al., 2018, p. 43).

A transformação no processo da manufatura aditiva é feita através da adição sucessiva de materiais, a partir de um modelo geométrico tridimensional obtido de forma computacional. Este processo permite a utilização de vários tipos de materiais, formas e aplicações, tendo a possibilidade de criar peças com geometrias complexas, que seriam muito difíceis de fabricar via outros processos de manufatura subtrativa. As principais aplicações da manufatura aditiva (MA) são apresentadas no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Aplicações da manufatura aditiva.



Fonte – Volpato (2017).

A partir da programação dos cabeçotes da impressora 3D, o produto é obtido

com detalhes e dimensões precisas, o que dependerá da resolução da máquina, que pode chegar a 0,01 mm, ou seja, a menor medida que a máquina é capaz de manter em sua utilização. Essa estratégia pode ser adotada para criar produtos personalizados, capazes de oferecer vantagens de construção e desenhos complexos, além de possibilitar a fabricação de protótipos, proporcionando redução de custos em grandes processos de ferramentaria de moldes para plástico, que são construídos em aço-liga especialmente desenvolvidos para esta finalidade.

As novas técnicas da manufatura aditiva foram aumentando as possibilidades em vista das necessidades, porém, as etapas de transformação destas técnicas seguem etapas muito parecidas (ARIES *et al.*, 2019), sendo:

- a) Realização do desenho da peça com o uso de algum software CAD;
- b) Fazer a conversão do modelo desenhado no software para o modelo que a máquina reconheça;
- c) Corrigir e definir os parâmetros, como a orientação, posicionamento e espessura de deposição;
- d) Envia-se o documento para a máquina e começa-se a produzir;
- e) Remove-se a peça do aparelho;
- f) A seguir, no pós-processamento, faz-se a limpeza de eventuais impurezas que podem conter no objeto.

Na Figura 7 pode ser visto as etapas para confecção de protótipos e produtos através dos processos de transformação da manufatura aditiva desde o processamento do modelo tridimensional até sua fabricação por adição de camadas.

Figura 7 – Etapas para confecção de produtos da manufatura aditiva.

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte – Volpato (2017).

Conforme ressalta as formas da matéria-prima na manufatura aditiva incluem (i) polímeros líquidos que são curados, camada por camada, transformando-se em polímeros sólidos; (ii) pós que são agregados e aderidos, camada a camada; (iii) materiais fundidos que são solidificados, camada a camada; e (iv) folhas laminadas sólidas que são combinadas para criar a peça sólida. Os tipos de material incluem cera, polímeros, metais e cerâmicas (GOMES e WILTGEN, 2020; GROOVER, 2017).

Além da matéria-prima, existem vários processos formadores de camada pelos quais cada camada é criada para construir a peça. Esses processos incluem (i) lasers, (ii) cabeças de impressão que operam usando tecnologia de jato de tinta e (iii) cabeçotes de extrusão. Outros processos se baseiam em feixes de elétrons, facas de corte e sistemas de luz ultravioleta.

Na Figura 8 percebe-se que, basicamente utiliza-se este mesmo processo para que o projeto possa ser impresso, para a escolha do equipamento que o usuário irá utilizar e, o material necessário para a construção da peça desejada, dependendo do seu ramo de atividade.

Além do processo formador de camada, vários modos de operação são utilizados, os chamados modos de canal. Os três modos de canal básicos são (1) ponto móvel; por exemplo, um ponto de laser se movendo em um plano x-y para solidificar quimicamente uma camada de polímero líquido por fotopolimerização; (2) uma linha móvel consistindo em uma matriz linear de pontos que varre toda a camada em um movimento de translação, de modo parecido com o funcionamento das impressoras jato de tinta; e finalmente (3) um modo camada usando um sistema de projeção de máscara no qual a camada inteira é criada ao mesmo tempo. As formas da matéria-prima na manufatura aditiva incluem (1) polímeros líquidos que são curados, camada por camada, transformando-se em polímeros sólidos; (2) pós que são agregados e aderidos, camada a camada; (3) materiais fundidos que são

solidificados, camada a camada; e (4) folhas laminadas sólidas que são combinadas para criar a peça sólida. Os tipos de material incluem cera, polímeros, metais e cerâmicas (GROOVER, 2017, p. 312).

O Quadro 1 apresenta alguns dos processos de manufatura aditiva, as tecnologias, o material utilizado e o modo de canal.

Quadro 1 – Processos de Manufatura Aditiva.

Forma da matéria-prima	Sistema PR/MA	Tipos de material comuns	Processos de formação de camadas	Modo de canal
Polímero líquido	SL	Fotopolímero	Cura a laser	Ponto móvel
	MPSL	Fotopolímero	Cura a laser	Nível de camada
Pós	SLS	Polímeros, metais	Fusão ou sinterização a laser	Ponto móvel
	3DP	Ligante aplicado aos pós de polímero	Cabeçote de impressão baseada em gotas	Linha móvel
Material fundido	FDM	Polímeros, cera	Cabeçote de extrusão	Ponto móvel
	DDM	Polímeros, cera, metais de baixo ponto de fusão	Cabeçote de impressão baseada em gotas	Ponto móvel ou linha móvel
Chapas sólidas	LOM	Papel ou polímero	Laser ou faca	Ponto móvel

Legenda: SL = estereolitografia, MPSL = estereolitografia por máscara de projeção, SLS = sinterização seletiva a laser, 3DP = impressão tridimensional, FDM = modelagem por deposição de material fundido, DDM = fabricação por deposição em gotas, LOM = manufatura de objeto em lâminas.

Fonte – Groover (2017).

Por fim, cada método e equipamento da manufatura aditiva apresenta vantagens e desvantagens, e delas depende a escolha que as empresas fazem. Os principais fatores que influenciam a escolha do tipo de máquina e, conseqüentemente, do processo, é a velocidade de impressão, o custo do produto/peça acabado, o custo das matérias-primas e a capacidade de imprimir em uma ou várias cores.

2.3.1 Vantagens e Desvantagens da Manufatura Aditiva

Pode-se elencar como pontos fortes da manufatura aditiva os seguintes aspectos:

- a) Capacidade de produzir formas tridimensionais complexas e detalhadas;

- b) Redução de prazos de entrega para peças únicas;
- c) Possibilidade de instalação em ambientes não industriais, dado que é uma tecnologia que não produz poluição sonora ou desperdícios;
- d) Redução substancial do tempo de lançamento do novo produto no mercado, em razão da diminuição da necessidade de testes;
- e) Redução de custos associados ao projeto de produtos, uma vez que o protótipo rápido poderá auxiliar e evidenciar as deficiências e lacunas existentes nos processos de manufatura.

Outras vantagens são, a eficiência na utilização dos recursos energéticos e de matéria prima, o que resulta também em baixo desperdício de materiais. Além disso, a impressora 3D, principal equipamento da manufatura aditiva não precisa de um suporte de fixação como em ativos de outros processos de fabricação, não há necessidade de mudanças de *setup* de ferramentas e as peças passam por um único equipamento, sendo o processo muito mais funcional.

O funcionamento da impressora 3D é baseado no fatiamento do modelo em 3D que representa um determinado objeto em pequenas camadas, no qual cada camada forma uma determinada altura do objeto. Assim sendo um objeto impresso em 3D tem melhor definição quanto mais camadas forem feitas com o menor tamanho possível (WILTGEN, 2019).

A manufatura aditiva é um sistema avançado de manufatura, pois, traz consigo importantes princípios produtivos que fazem dela uma boa opção para garantir a competitividade no setor industrial (GOMES e WILTGEN, 2020; GROOVER, 2017; TAMANINI e WILTGEN, 2022).

Dado a flexibilidade da impressão 3D é possível acompanhar as mudanças contínuas de produtos e materiais atendendo os prazos de entrega, volumes de produção, ampliação ou redução de variedade de produtos. E permitindo realizar qualquer componente ou peça independente de sua complexidade, além de ser mais fácil garantir as especificações de qualidade na fase de projeto na modelagem pré-produção, além da sustentabilidade de sua produção, devido ao processo de adição de material por camadas a matéria-prima evitando desperdício.

A impressora 3D possui um forte viés inovador limitado apenas pela criatividade do projetista e dimensões da máquina.

A manufatura aditiva tem inúmeras vantagens em relação à manufatura subtrativa, principalmente a facilidade de construir peças com geometrias extremamente complexas a partir de um único processo. Isso é possível não somente pela sua tecnologia de hardware, mas, principalmente, de software, pois constrói objetos a partir de um modelo tridimensional, desenvolvido por softwares de modelagem 3D. Após o desenvolvimento do modelo tridimensional, gera-se um arquivo no formato STL (Standard Triangle Language) e, subsequentemente, o arquivo é exportado para o software da impressora, que será responsável pela geração do G-code (Geometric Code), que é a codificação utilizada pelos computadores para se comunicar à impressora 3D, não sendo diferente de outras tecnologias CNC (comando numérico computadorizado) em sua essência (QUINTINO et al., 2019, p. 26).

Diferentes tipos de tecnologias da manufatura aditiva possuem diferentes limitações na utilização de determinados materiais. Quando a manufatura é comparada com outros processos de fabricação de grande volume industrial os custos ainda são mais elevados (TAMANINI e WILTGEN, 2022).

As vantagens e desvantagens de cada tecnologia de impressão 3D são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Vantagem e desvantagem das tecnologias da manufatura aditiva.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
FDM	Vasta gama de materiais que podem ser utilizados	Tempo de construção do produto final (ciclo)
	Maior resistência do material	Precisão limitada
SLA	Tempo de construção do produto final (ciclo)	Materiais limitados
	Tecnologia mais utilizada	Custo alto dos materiais
		Fabricação de formas pequenas
POLY JET	Alta resolução do produto final	Produtos mais frágeis quando relacionados com a SLS e SLA
	Qualidade	Necessita utilização de um polímero gel para complemento do processo
SLS	Vasta gama de materiais que podem ser utilizados	Precisão limitada
	Não há perda de MP, pois o pó não utilizado pode ser reciclado	Fácil oxidação
EBM	Pode processar uma variedade de materiais pré-ligados	Ainda necessita ser realizado em uma câmara a vácuo
LENS	Pode ser usada para reparação de peças	Necessita de processos de pós-produção para garantir um melhor acabamento
	Não requer operações de queima secundária como a sinterização	Limitação geométrica para superfícies complexas
	Força e ductilidade (grau de deformação que a peça suporta até quebrar)	Necessidade de uma base metálica para iniciar o processo de fabricação
3DP	velocidade de fabricação mais rápida entre as tecnologias de manufatura aditiva	Acabamento de superfície áspera
	Baixo custo dos materiais	Limitações de tamanho de peças
		Custo elevado do equipamento
PROMETAL	Construção de ferramentas	Remoção de material excedente
		Necessidade de processo complementar
LOM	variedade de materiais	instabilidade dimensional
	tecnologia barata	necessita subtração de parte do material
	não emite gases tóxicos	tempo de pós produção para acabamento e melhoria da qualidade

Fonte – Veit (2018).

Desta maneira, outra vantagem dos processos da manufatura aditiva é a rápida construção de protótipos capazes de desenvolver respostas práticas para os problemas de engenharia, podendo atender a diferentes e complexos requisitos quanto a forma e especificações de qualidade para um determinado projeto de pesquisa ou produto tecnológico, atuando em benefício da diminuição do tempo para se obter resultados científicos que impactam na vida humana (WILTGEN, 2019).

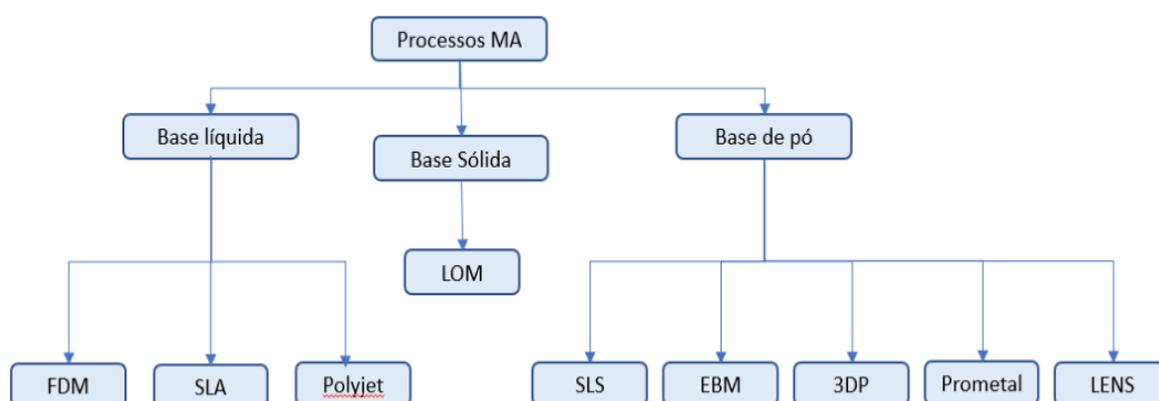
2.3.2 Principais Tecnologias da Manufatura Aditiva

Existem várias tecnologias para a manufatura aditiva e elas são divididas segundo seus processos em processos a base líquida; processos a base sólida; e processos a base de pó (ALCALDE e WILTGEN, 2018; VOLPATO, 2017).

Dentro destas classificações os processos mais relevantes são: fusão por deposição de material (FDM - *Fused Deposition Modeling*), Estereolitografia (SLA - *Stereolitografia*), Manufatura de laminação de objetos (LOM - *Laminated Object Manufacturing*), sinterização seletiva a laser (SLS), fusão por feixe de elétrons (EBM - *Electron Beam Melting*), *Laser Engineering Net Shaping* (LENS), impressão 3D (3DP - *Three-Dimensional Printing*) e Prometal.

A Figura 8 apresenta as tecnologias de manufatura aditiva de acordo com sua classificação.

Figura 8 – Processos da manufatura aditiva e suas tecnologias.



Fonte – Veit (2018).

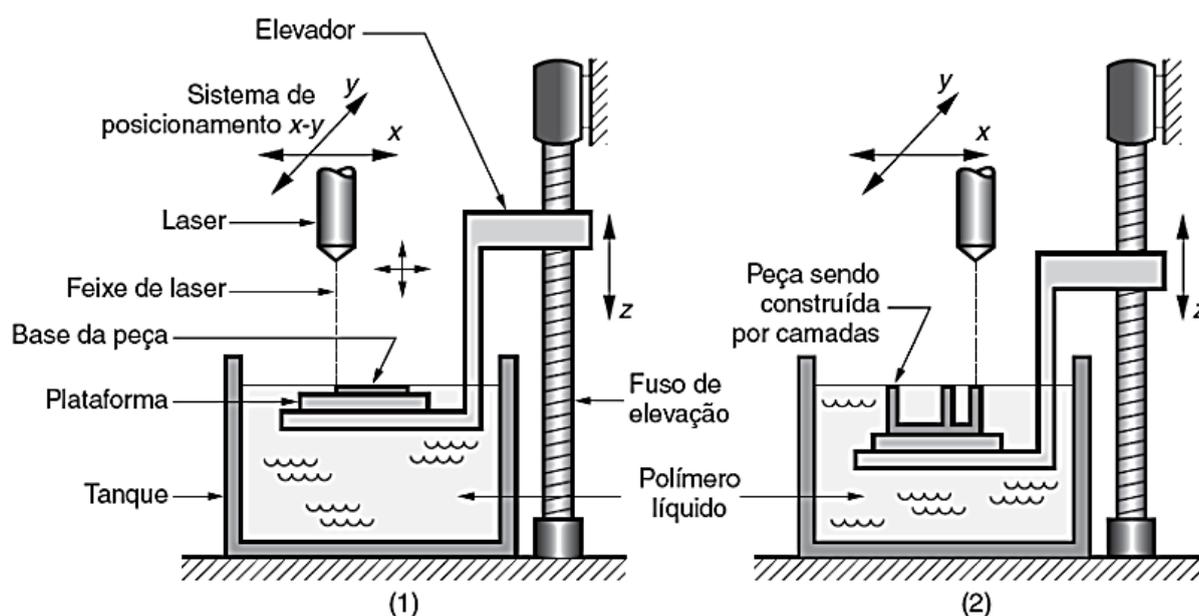
Os processos a base líquida, como Estereolitografia ou SLA foi a primeira tecnologia de prototipagem rápida com adição de material. É um dos métodos de manufatura aditiva mais utilizados.

A estereolitografia é o processo de fabricação de uma peça sólida de plástico a partir de um polímero líquido fotossensível utilizando um feixe direto de laser para solidificar o polímero. Estereolitografia convencional descrita anteriormente utiliza um único feixe de laser em movimento para curar o fotopolímero em uma determinada camada.

Existe ainda a estereolitografia por máscara de projeção (MPSL - *Mask Projection Stereolithography*), no qual a camada inteira do fotopolímero líquido é exposta de uma só vez a uma fonte de luz ultravioleta por meio de uma máscara, em vez de utilizar um feixe de laser. O processo de endurecimento de cada camada no processo MPSL é, portanto, muito mais curto do que o processo SLA convencional (WILTGEN, 2021; GOMES e WILTGEN, 2020; VEIT, 2018).

A configuração geral do processo de SLA pode ser visto na Figura 9, no qual em (1) tem-se o começo do processo em que a camada inicial é adicionada à plataforma; e (2) após várias camadas terem sido adicionadas, de modo que a geometria da peça toma forma gradualmente.

Figura 9 – Tecnologia de Estereolitografia ou SLA.



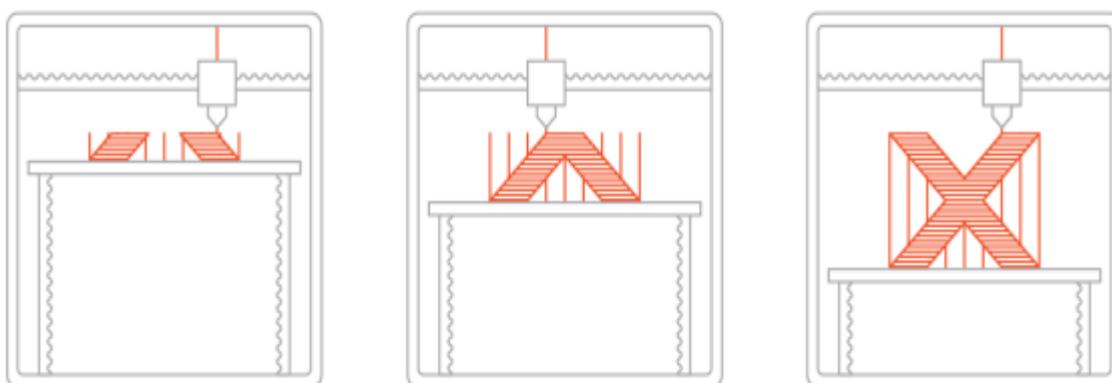
Fonte – Groover (2017).

O processo de FDM (WILTGEN, 2019; ALCALDE e WILTGEN, 2018; GOMES e WILTGEN, 2020), processo da manufatura aditiva a base líquida, consiste na fusão de filamento e posterior extrusão, no qual 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, como pode ser visto na Figura 10.

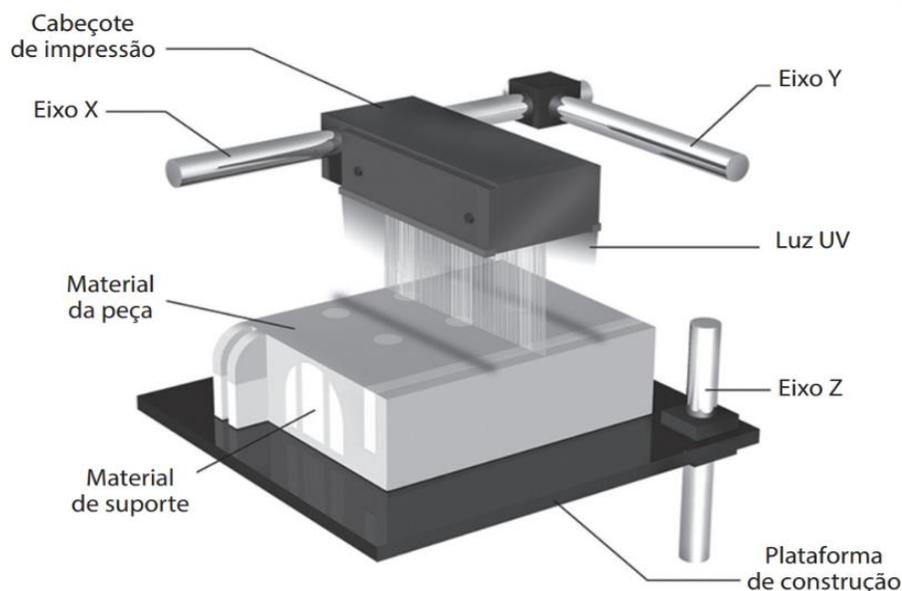
Figura 10 – Tecnologia FDM.



Fonte – Alcade e Wiltgen (2018).

A tecnologia *PolyJet*, consiste no jateamento de uma resina fotossensível sobre uma plataforma e na realização imediata da polimerização dessa resina utilizando uma fonte de luz ultravioleta (UV). Essa tecnologia utiliza, na sua forma básica, pelo menos dois materiais diferentes para a fabricação, um é uma resina para a impressão da peça, e o outro, um material na forma de gel, também fotossensível, para gerar os suportes que serão removidos no final do processo, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Tecnologia PolyJet.



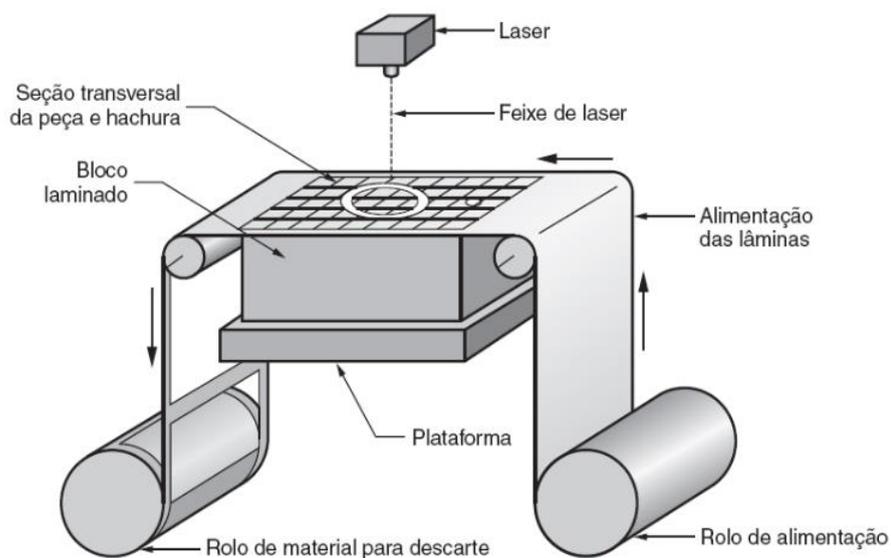
Fonte – Volpato (2017).

A técnica LOM combina técnicas aditivas e subtrativas na construção de peças camada por camada, sendo que a impressora 3D faz a adição e as outras ferramentas acopladas a subtração, geralmente através de 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 laminas muito afiadas ou mesmo laser, no qual a velocidade e foco são ajustados de acordo com a profundidade de corte, este por sua vez, deve corresponder exatamente a espessura da camada (GROOVER, 2017; VOLPATO, 2017). Na Figura 12 pode ser visto um exemplo do processo realizada pelo LOM.

Dentre as tecnologias a base de pó, o principal é o SLS, que realiza seus processos através de um feixe de laser para criar os produtos tridimensionalmente, sendo diferenciada da SLA apenas pelo tipo de material utilizado, o pó ao invés da resina. Após a conclusão das camadas da peça a mesa desce e uma nova camada de pó armazenada nas laterais da máquina é colocada por sobre a camada anterior e novamente atingida pelo feixe de laser. Este processo se repete camada a camada, até que o objeto seja finalizado (ALCALDE e WILTGEN, 2018).

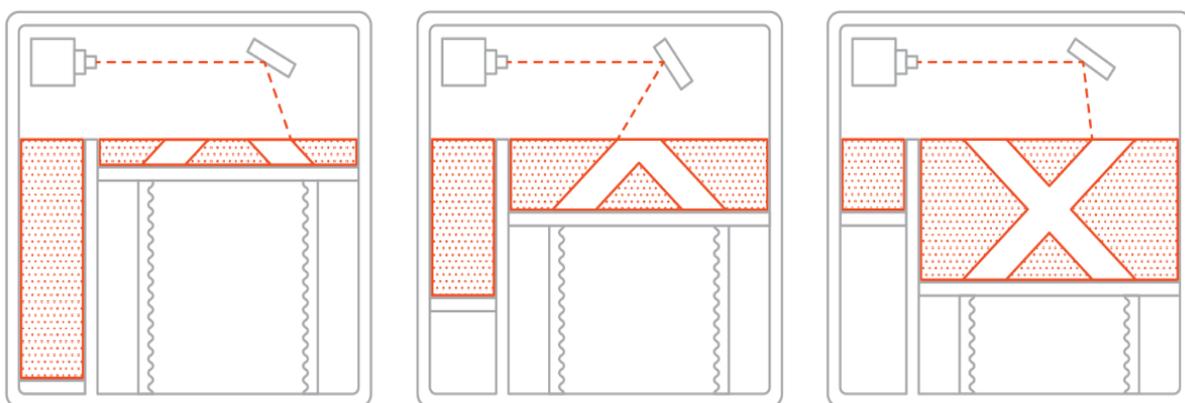
Figura 12 – Tecnologia LOM.



Fonte – Groover (2017)

Na Figura 13 observa-se o esquema de funcionamento da impressora para prototipagem rápida SLS, no qual o feixe de laser solidifica o pó que está na superfície da máquina conforme o mesmo é projetado imprimindo uma imagem.

Figura 13 – Tecnologia SLS.



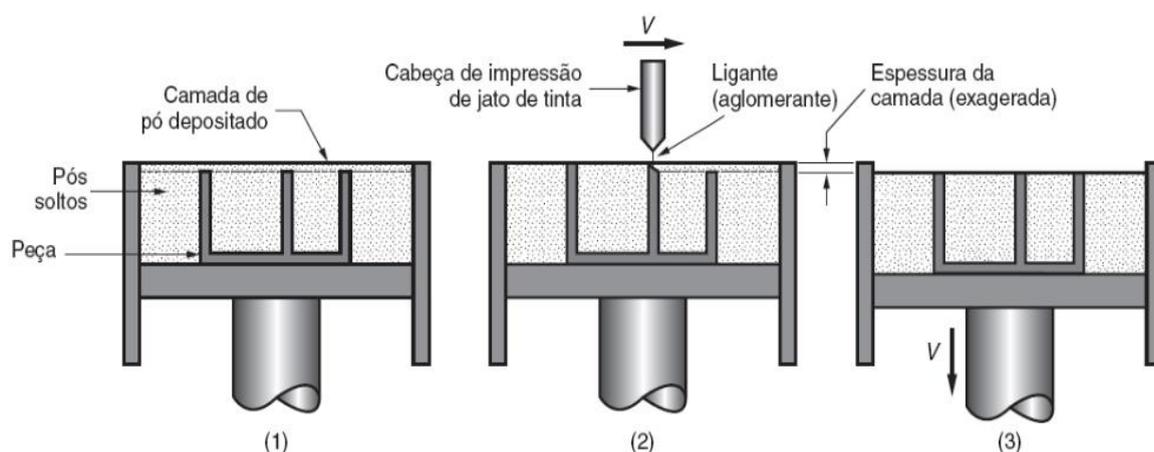
Fonte – Alcate e Wiltgen (2018).

A tecnologia 3DP constrói a peça usando uma impressora jato de tinta para ejetar material adesivo de ligação entre sucessivas camadas de pó. O ligante é depositado em áreas correspondentes às seções transversais da peça sólida, conforme determinado pelo fatiamento do modelo CAD em camadas. O ligante

une os pós para formar a peça sólida, e os pós não ligados permanecem soltos para serem removidos mais tarde. Enquanto os pós soltos estão aplicados no processo de construção, eles servem para suportar as características salientes e frágeis da peça. Quando o processo de construção está completo, os pós soltos são removidos. Para reforçar ainda mais a peça, pode ser realizada uma etapa adicional de sinterização para unir os pós ligados.

Na Figura 14 apresenta o funcionamento da tecnologia 3DP para impressão aglutinada, onde em (1) a camada de pó é depositada, (2) a impressão a jato de tinta das áreas que farão parte da peça, e (3) o pistão é abaixado para a próxima camada (chave: v = movimento).

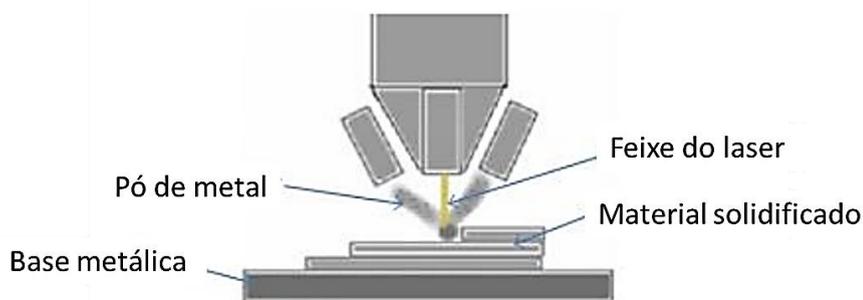
Figura 14 – Tecnologia 3DP.



Fonte – Groover (2017).

A LENS tem como procedimento mover o substrato abaixo do feixe de laser para realizar as camadas que darão o formato e geometria da peça (GOMES e WILTGEN, 2020; VEIT, 2018). Depois deste processamento, os produtos manufaturados pela LENS devem passar por outros processos de subtração, como fresamento, torneamento e polimento, por exemplo.

Figura 15 – Tecnologia LENS.



Fonte – Veit (2018).

Quanto ao EBM, foi desenvolvido pela empresa Arcam através do processo denominado fusão por feixe de elétrons, que utiliza um feixe de elétrons em vez de laser para fundir o material. A velocidade de construção das peças do processo EBM é maior em virtude da maior velocidade de varredura do feixe e da elevada temperatura alcançada.

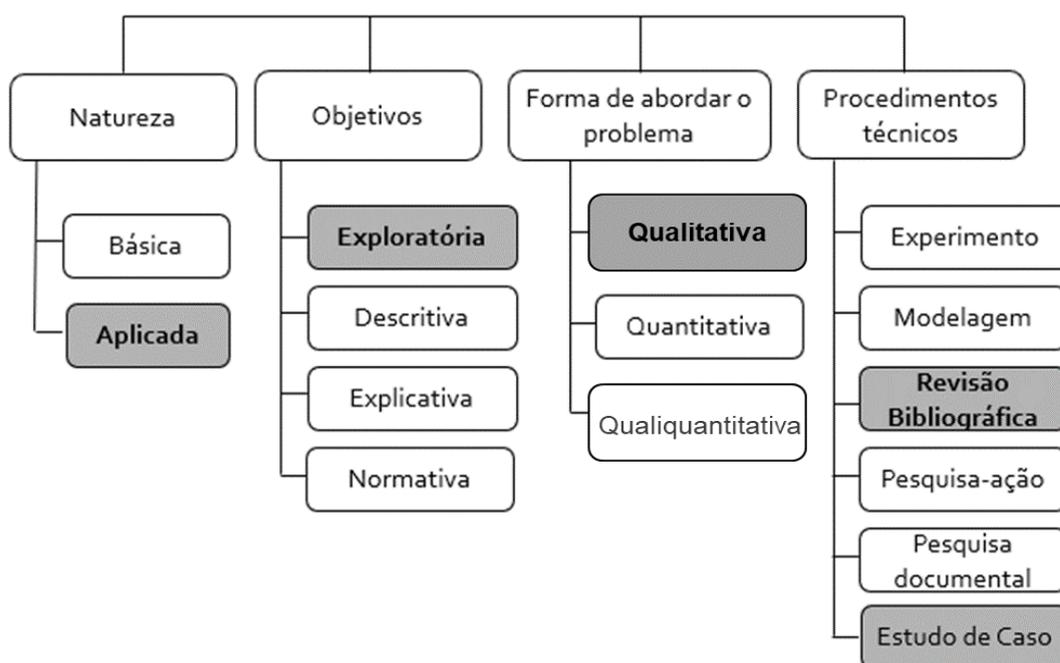
As tecnologias da manufatura aditiva foram viabilizadas pela integração de processos tradicionais de manufatura (como metalurgia do pó, extrusão, soldagem e usinagem CNC) com diversas outras tecnologias (como controles de movimento de alta precisão, sistemas de impressão a jato de tinta, tecnologias laser e feixe de elétrons) e pelo desenvolvimento de materiais adequados a cada um desses processos (ALCALDE e WILTGEN, 2018; VOLPATO, 2017). Em virtude de seu princípio, a manufatura aditiva possui um enorme potencial para fabricar geometrias complexas, uma vez que transforma uma geometria 3D em uma sequência de geometrias 2D (camadas) mais simples

Por fim, a opção por um destes métodos de produção implica que seja calculado, previamente, o Ponto de Equilíbrio Conceitual, o qual resulta da interseção entre as curvas de custo associadas a cada uma destas metodologias, permitindo identificar o volume de produção até ao qual é economicamente mais vantajoso optar pelas várias tecnologias da manufatura aditiva em alternativa à produção tradicional/convencional subtrativa (WILTGEN, 2019; ARAUJO, 2022).

3 METODOLOGIA

Para a realização desta pesquisa, a definição do método da pesquisa se classifica de natureza aplicada, objetivos exploratórios, forma de abordagem quantitativa, e procedimentos técnicos de revisão bibliográfica e estudo de caso (ESTRELA, 2018; GIL, 2018; LAKATOS e MARCONI, 2022; MATIAS-PEREIRA, 2019). A estrutura, é descrita no fluxograma da Figura 16.

Figura 16 – Metodologia da pesquisa.



Fonte – Adaptado de Gil (2018).

Quanto a natureza aplicada, diz respeito aos conhecimentos adquiridos durante a formação para aplicação prática e voltados para a solução de problemas concretos da vida moderna. Portanto, nesta pesquisa, a aplicação dos conhecimentos será para realização de um plano de manutenção para garantir a desempenho, disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos dos processos de fabricação da manufatura aditiva (GIL, 2018; LAKATOS e MARCONI, 2022; ESTRELA, 2020).

O objetivo exploratório, esse tipo de pesquisa busca desvendar se existe ou não um fenômeno, devendo ser considerado, sempre, como o primeiro passo na investigação. Quando o pesquisador quer investigar tópicos que existe pouco conhecimento. Deveria ser simples, mas muito completo. Às vezes, o objetivo da

investigação é o próprio método de investigação. Assim, esta pesquisa visa investigar quais são as melhorias práticas para combater as perdas e falhas que podem reduzir a confiabilidade dos equipamentos da manufatura aditiva.

A pesquisa qualitativa objetiva obter uma compreensão particular do objeto que investiga. Como focaliza sua atenção no específico, no peculiar, seu interesse não é explicar, mas compreender os fenômenos que estuda dentro do contexto em que aparecem (LAKATOS e MARCONDES, 2022). Tanto o enfoque qualitativo como o quantitativo utilizam processos rigorosos, metódicos, empíricos, visando produzir conhecimento.

Portanto, essa pesquisa se classifica como qualitativa, pois, não se tem a pretensão de medir quantitativamente a pesquisa, mas apenas expor as melhores práticas para o desenvolvimento de um plano de manutenção que poderá ser aplicado as tecnologias e equipamentos da manufatura aditiva.

Deste modo, quanto a Revisão Bibliográfica, é a base de qualquer pesquisa científica, sendo elaborada com base em material publicado com o propósito de fornecer fundamentação teórica da pesquisa, bem como a identificação do estágio atual do conhecimento referente ao tema. Nesta pesquisa, na fundamentação teórica consultou-se livros, artigos e dissertações publicadas entre os anos de 2009 e 2022.

O estudo de caso refere-se ao levantamento com mais profundidade de determinado caso ou grupo humano sob todos os seus aspectos. Entretanto, é limitado, pois se restringe ao caso estudado, que não pode ser generalizado. Eles podem ser: intrínsecos: representação de traços particulares; instrumentais: esclarecimentos de traços sobre algumas questões; e coletivos: abordagem de vários fenômenos conjuntamente.

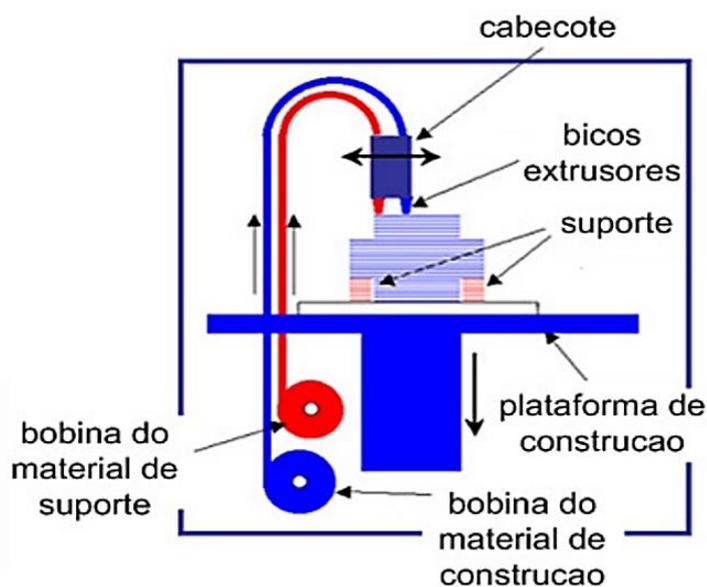
Nesta pesquisa, o estudo de caso teve como finalidade investigar profundamente o porquê da ocorrência de determinados fatores que causam, ou que podem ter potenciais para a ocorrência de avarias e/ou defeitos em determinadas partes dos equipamentos da manufatura aditiva e seus componentes, que podem atrapalhar seu funcionamento com o intuito de prolongar seu ciclo de vida útil.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS

A principal tecnologia a ser investigada nessas condições adversas, é a FDM, levando em conta que é a tecnologia mais comum as máquinas de MA disponíveis no mercado. Os componentes deste tipo de tecnologia são: bicos extrusores, suporte, bobina do material de suporte, bobina do material de construção, cabeçote, motor de passo, sensor de temperatura, resistência elétrica, plataforma de construção, entre outros. Na Figura 17 é possível ver os principais componentes do FDM, sendo que dentro do cabeçote estão a grande maioria dos componentes.

Figura 17 – Componentes do equipamento da tecnologia FDM.



Fonte – Adaptado de Volpato (2017).

Para avaliar a criticidade de cada um desses componentes dos equipamentos da manufatura aditiva, com foco de melhor atender quais deverão ter a prioridade das ações para que se realiza o processo sem perdas ou desperdícios que podem gerar custos extras e diminuição da efetividade dos equipamentos na produção. O Quadro 3 mostra a matriz de avaliação de criticidade para determinação de aspectos relevantes para atestar a confiabilidade do sistema, sendo que cada fator de avaliação de criticidade tem um índice apontando o grau de criticidade, no qual 1 é baixo, grau 2 é médio e o (3) grande,

Quadro 3 – Matriz de avaliação de criticidade da tecnologia FDM.

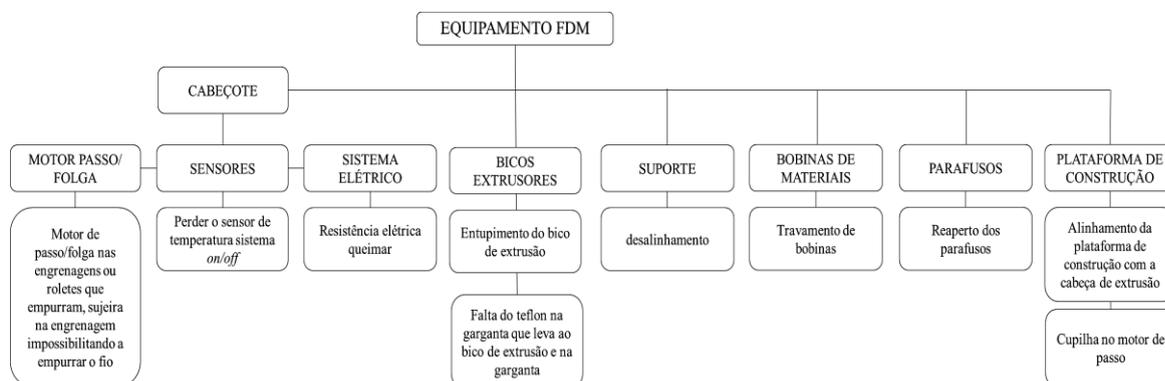
Componente	Segurança	Qualidade	Regime de Operação	Atendimento	Frequência	Custo
Bicos extrusores	2	3	3	3	2	2
Suporte	1	3	3	3	1	1
Bobina do material de suporte	2	2	2	3	1	1
Bobina do material de construção	3	2	3	3	1	1
Cabeçote;	1	3	3	3	2	3
Motor de passo/folga	1	2	3	3	2	3
Sensor de temperatura	1	2	2	2	1	1
Sistema elétrico	1	2	2	3	1	1
Plataforma de construção	1	3	2	3	2	1
Sistemas elétricos	1	1	3	3	1	1
parafusos	1	1	3	3	1	1

Fonte – Próprios Autores (2022).

Com o classificação (*benchmarking*) foi realizado em conjunto o levantamento teórico para encontrar os maiores e principais problemas do FDM para buscar soluções, são eles: 1º entupimento do bico de extrusão; 2º falta do teflon na garganta que leva ao bico de extrusão e na garganta; 3º perder o sensor de temperatura sistema on/off (pt100); 4º resistência elétrica queimar; 5º motor de passo/folga nas engrenagens ou roletes que empurram, sujeira na engrenagem impossibilitando a empurrar o fio; 6º reaperto dos parafusos; 7º cupilha no motor de passo; 8º alinhamento da plataforma de construção com a cabeça de extrusão.

Com as possíveis falhas estabelecidas, além da criticidade para cada área preponderante para o funcionamento adequado do aparelho, se montou a FTA (árvores de falhas) apenas para associar o problema ao local do equipamento para melhor visualização de onde são originadas as principais falhas e problema relatados para o equipamento de manufatura aditiva FDM, na Figura 18 pode se ver a FTA.

Figura 18 – Árvore de falhas do FDM.



Fonte – Próprios Autores (2022).

Com esse levantamento realizou-se a última ação diagnóstica para estabelecimento do plano de manutenção ideal para o equipamento da manufatura aditiva FDM, que foi o desenvolvimento da ferramenta de gestão FMEA, como apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – FMEA dos equipamentos do FDM.

Descrição	Função	Tipo de falha potencial	Efeito da falha potencial	Causa da falha potencial	Índices				Ações recomendadas	Responsável/ prazo	Ações de melhoria	Índices atuais			
					S	O	D	R				S	O	D	R
Bicos extrusores	Injetar o material nas camadas	Entupimento do bico extrusor; falta do teflon	Falha funcional/ Perdas com parada	Falta de inspeção inicial	5	5	5	125	Inspeção; limpeza e preventiva	Operador/ colaboradores da manutenção	Manutenção autônoma/ plano de inspeções	5	4	2	40
Suporte	Alinhar a peça	Desalinhamento	Diminuição da qualidade	Rotina cotidiana	4	2	5	40	Inspeção e corretiva planejada	Operador/ colaboradores da manutenção	Manutenção autônoma/ plano de inspeções	4	2	4	32
Bobina do material de suporte	Suprir o material de suporte para modelagem da peça	Travamento das bobinas	Falha funcional	Material travado nas bobinas	3	3	4	36	Inspeção e corretiva planejada	Operador/ colaboradores da manutenção	Manutenção autônoma/ plano de inspeções	3	2	3	18
Bobina do material de construção	Suprir o material de construção para confecção da peça	Travamento das bobinas	Falha funcional/ Perdas com parada	Material travado nas bobinas	3	3	4	36	Inspeção e corretiva planejada	Operador/ colaboradores da manutenção	Manutenção autônoma/ plano de inspeções	3	2	3	18
Cabeçote	Comanda o fluxo do material para o bico extrusor	Problemas mecânicos e elétricos	Falha funcional/ Perdas com parada	Falta de preventivas mecânicas e eletroeletrônica	5	5	5	125	Preventiva	Operador/ colaboradores da manutenção	Manutenção autônoma/ monitoramento de parâmetros relevantes	5	4	2	40
Motor de passo/folga	Conjunto mecânico que ajuda na extrusão do material	Problemas nas engrenagens ou roletes. Sujeira nas engrenagens	Falha funcional/ Perdas com parada	Mau funcionamento dos sistemas mecânicos e elétricos	5	4	4	100	Inspeção/ Preventiva	Operador/ colaboradores da manutenção	Manutenção autônoma/ monitoramento de parâmetros relevantes	5	3	3	45
Sensor de temperatura	Controla o parâmetro temperatura do material	Mau funcionamento dos sensores	Diminuição da efetividade do processo	Impactos, falta de calibração ou sinalização	3	4	3	36	Inspeção e corretiva planejada	Operador/ colaboradores da manutenção	Manutenção autônoma/ plano de inspeções	3	3	2	18
Sistema elétrico	Permite o funcionamento da máquina	Resistência elétrica queimada	Falha funcional/ Perdas com parada	Sobrecarga no sistema	5	2	3	30	Preventiva	Operador/ colaboradores da manutenção	Manutenção autônoma/ monitoramento de parâmetros relevantes	4	2	3	24
Plataforma de construção	Alinhar a peça ao bico	Desalinhamento da plataforma	Variação dos parâmetros e variáveis de qualidade	Produção cotidiana.	3	5	4	60	Inspeção e ajustes corretivos planejados	Operador/ colaboradores da manutenção	Manutenção autônoma/ plano de inspeções/ monitoramento de parâmetros relevantes	1	2	2	4
Parafusos	Fixar os componentes	Reaperto de parafusos	Vibrações inadequadas e parada	Vibrações e uso cotidiano	3	5	2	30	Inspeção, análise de vibrações e corretivos planejados	Operador/ colaboradores da manutenção	Manutenção autônoma/ plano de inspeções	3	1	2	6

Fonte – Próprios Autores (2022).

Com esse diagnóstico estabeleceu-se as prioridades do plano de manutenção para as ações preventivas e a padronização das ações corretivas planejadas devido à grande necessidade delas para alguns dos componentes. Os principais componentes críticos visualizados são os bicos extrusores, cabeçote e motor de passo/ folga. Deste modo, estabeleceu um roteiro de inspeção para o equipamento FDM analisado para fomentar a manutenção autônoma dos operadores das impressoras, apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Roteiro de inspeção da manutenção.

ROTEIRO DE INSPEÇÃO DA MANUTENÇÃO (RIM)										RIM Nº
LINHA DE PROCESSO: IMPRESSORA 3D – TIPO FDM										FREQUÊNCIA DIÁRIA:
COMPONENTES	CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO	INSPEÇÕES							OBSERVAÇÃO	
			VIBRAÇÕES	RUIDOS	LIMPEZA	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO	INSTALAÇÕES	CONSERVAÇÃO GERAL		
Bicos extrusores										
Suporte										
Bobina do material de suporte										
Bobina do material de construção										
Cabeçote										
Motor de passo/folga										
Sensor de temperatura										
Sistema elétrico										
Plataforma de construção										
Parafusos										
LEGENDA DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO: O – EM OPERAÇÃO; P – PARADO; F – COM FALHA										
EXECUTADO POR:					DATA:			SUPERVISIONADO POR:		

Fonte – Próprios Autores (2022).

Deste modo, se durante estas inspeções o operador responsável visualizar possíveis problemas em algum equipamento parado ou com alguma ocorrência de falha, ele deverá completar o preenchimento do roteiro conforme legenda de ações e para repassar o preenchimento a equipe de manutenção que providenciará uma notificação de manutenção, conforme exemplo no Quadro 6.

Quadro 6 – Notificação de manutenção.

NOTIFICAÇÃO DE MANUTENÇÃO (NM)								NM:	
LINHA DE PROCESSO: IMPRESSORA 3D – TIPO FDM								PAG. ___/___	
CÓDIGO DO EQUIPAMENTO (TAG)	OCORRÊNCIA	AÇÕES				COMPONENTES MATERIAIS E INSUMOS			
		EMERGÊNCIA	URGÊNCIA	PREVENTIVA	MONITORAR	CÓDIGO DO SOBRESSALENTE	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	UNIDADE
LEGENDAS DAS AÇÕES: EMERGÊNCIA = AÇÃO IMEDIATA/ URGÊNCIA = MONITORAR E PLANEJAR A INTERVENÇÃO/ PREVENTIVA = EXECUTAR NA PARADA PARA MANUTENÇÃO PREVENTIVA/ MONITORAR = ACOMPANHAR A EVOLUÇÃO DA OCORRÊNCIA.									
EXECUTADO POR:				DATA: ___/___/___			SUPERVISADO POR:		

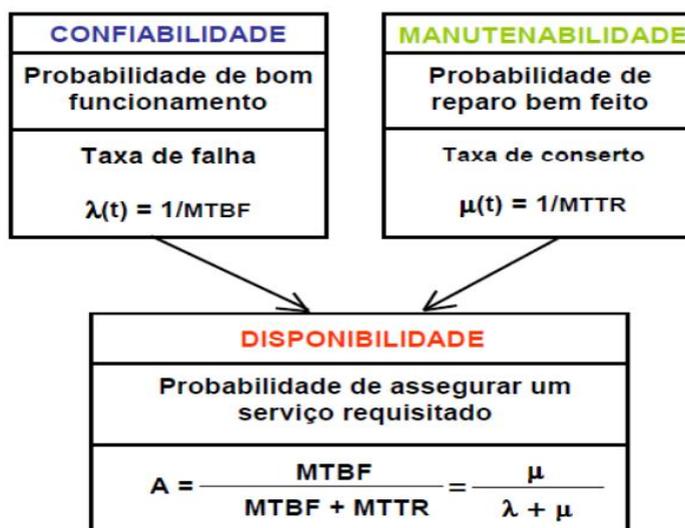
Fonte – Próprios Autores (2022).

Com base nesses dados se estabeleceu os indicadores necessários para que se possa comprovar a efetividade dos planos de manutenção desenvolvidos, garantindo que as suas ações foram as melhores para esta situação. Estes indicadores de desempenho podem ser alimentados através de planilhas que relatam as causas, deste modo, baseado nas informações da RIM e NM deve-se formar um banco de dados que através de um programa, simples com Excel ou mais complexo como os sistemas de informação para manutenção, para estabelecimento automático destes indicadores baseados nos dados históricos levantados.

Na Figura 19 é possível observar como esses índices devem ser calculados, sendo necessário o estabelecendo de algumas métricas que compõe estes indicadores, como o período médio entre falhas (MTBF - *Mean Time Between Failures*); e o tempo médio de reparo (MTTR - *Mean Time to Repair*).

Assim, para estabelecer o escopo das responsabilidades e atividades de todas as partes interessadas desenvolveu-se a ferramenta de gestão 5W2H. O Quadro 6 apresenta as atividades dentro do plano de manutenção que serão realizadas para buscar aumentar os índices de desempenho indicados para validar a eficácia do planejamento proposto em garantir a confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade necessária para ser competitivo no setor de manufatura aditiva.

Figura 19 – Indicadores de desempenho prospectados para o equipamento e componentes do FDM.



Fonte – Próprios Autores (2022).

Quadro 7 – 5W2H para escopo das responsabilidades e atividades.

O que? (What?)	Quando? (When?)		Quem? (Who?)	Onde? (Where?)	Por quê? (Why?)	Como? (How?)	Quanto? (How Much?)	
	Freq.	Tempo					Freq.	Tempo
Inspeção de rotina	Diária	Ao final do turno	Operador	FDM	Garantir a disponibilidade e manutenibilidade dos equipamentos	Limpeza, monitoramento das variáveis pertinentes	5/semana	15 minutos
Ações preventivas	Quinzenal	Aos sábados	Planejador + colaborador da manutenção	FDM	Garantir a confiabilidade	lubrificação e reposição de partes e componentes, pequenos ajustes	1/quinze dias	1 turno
Ações corretivas planejadas	Semanal	Aos sábados	Planejador + colaborador da manutenção	FDM	Garantir a disponibilidade dos equipamentos	Reestabelecimento da efetividade do equipamento	1/semana (se pertinente)	Depende da ação corretiva

Fonte – Próprios Autores (2022).

Deste modo, estabeleceu-se um plano de manutenção mensal que deverá ter sua periodicidade adequada com base nos dados históricos levantados pelas planilhas de histórico de falhas. Para ajudar sugere-se o estabelecimento de cartões *Kanban* para garantir que as ações planejadas e os roteiros de inspeção serão seguidos.

Na Figura 20 pode ser visto um exemplo de aplicação de *Kanban* para garantia da efetividade do plano de manutenção estabelecido para o equipamento FDM, sendo que as corretivas planejadas são apenas exemplos, pois, como eventos únicos, pode ser que em algumas semanas eles não precisem ser realizados.

Figura 20 – Exemplo da técnica *Kanban* para execução do plano de manutenção.

SEGUNDA-FEIRA	TERÇA-FEIRA	QUARTA-FEIRA	QUINTA-FEIRA	SEXTA-FEIRA	SÁBADO	DOMINGO
1 Inspeção diária	2 Inspeção diária	3 Inspeção diária	4 Inspeção diária	5 Inspeção diária	6 Preventiva Corretivas Planejadas	7 Sem produção
8 Inspeção diária	9 Inspeção diária	10 Inspeção diária	11 Inspeção diária	12 Inspeção diária	13 Corretivas Planejadas	14 Sem produção
15 Inspeção diária	16 Inspeção diária	17 Inspeção diária	18 Inspeção diária	19 Inspeção diária	20 Preventiva Corretivas Planejadas	21 Sem produção
22 Inspeção diária	23 Inspeção diária	24 Inspeção diária	25 Inspeção diária	26 Inspeção diária	27 Corretivas Planejadas	28 Sem produção
29 Inspeção diária	30 Inspeção diária	31 Inspeção diária	1 Inspeção diária	2 Inspeção diária	3 Preventiva Corretivas Planejadas	4 Sem produção

 NORMAL

 ATENÇÃO

 CRÍTICO

 RELATO DE CORRETIVAS NÃO PLANEJADAS

Fonte – Próprios Autores (2022).

Com o estabelecimento do uso destas ferramentas, pode-se utilizar o ciclo PDCA para prospectar melhorias contínuas no planejamento e controle da manutenção. Portanto, a avaliação e verificação no ciclo é realizada pelos indicadores de desempenho e a meta é a atingir a manutenção classe mundial, tendo como comparativo as grandes organizações que tem como foco a manufatura aditiva.

4.2 DISCUSSÃO

Com a análise da criticidade dos componentes realizada através da matriz de avaliação foi possível perceber que o funcionamento integrado e adequado dos componentes do equipamento FDM analisado é muito importante, pois, quase todos eles tem grande nível de criticidade para a Qualidade, indicando que a falha deles tem potencial para causar variações na qualidade do produto; para o Regime de operações, indicando que possíveis falhas podem afetar o tempo de operação programado; e para o Atendimento, que é quando a falha provoca interrupção imediata do processo.

Com a FTA ou árvore de falhas foi possível associar as falhas, prospectadas pelo benchmarking de empresas e autônomos do setor, além das pesquisas realizadas, aos componentes e equipamentos do FDM para facilitar o operador ou colaborador da manutenção na identificação e diagnóstica das falhas em potencial para que se possa agilizar as ações para reparo e a programação de preventivas e corretivas planejadas, pois, vários dos equipamentos críticos é de simples reparo e custo, não sendo viável a preventiva.

Destaca-se também que o *benchmarking* e as pesquisas colaboraram também no estabelecimento da criticidade tanto na matriz de avaliação, como no desenvolvimento do FMEA.

Relata-se que o FMEA colaborou para expor ainda mais criticidade, além de prospectar as medidas para minimizar os efeitos e combater as causas das falhas no equipamento FDM, sendo que se pode observar que os componentes mais críticos são o bico extrusor, o cabeçote e o motor de passo/ folga, que além de ter um grande número de falhas, tem os maiores valores agregados, tornando necessário um bom planejamento e controle da manutenção para que se possa aumentar o ciclo de vida útil do equipamento aos menores custos possíveis.

Quanto aos roteiros de inspeção e notificação de manutenção são uma medida para não só integrar todas as partes interessadas do processo para efetivar a gestão da desempenho dos ativos, mas também, construir uma base de dados fidedigna baseada no histórico de falhas e intervenções que podem ser utilizadas como métricas para o estabelecimento de indicadores de desempenho que ajudaram a adaptar o plano de manutenção em seu estado ótimo, sem paradas não programadas e redução de corretivas.

Quanto aos indicadores de desempenho elencados, percebe-se que eles podem colaborar para justificar a confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade em função do investimento realizado nas ações técnicas e gerenciais desenvolvidas nos planos de manutenção preventivos e corretivos planejados. Assim, constata-se que baseado nestes dados cabe ao gestor da manutenção escolher a que traz o maior custo-benefício a organização e ao sistema de gestão da manutenção.

Considera-se que a utilização do 5W2H pode ser ampliada para todas as ações relativas as ações preventivas efetivas para combater as principais causas e falhas relatadas, porém, expôs-se apenas exemplos para compreensão do conceito geral e importância da aplicação desta ferramenta de gestão para o estabelecimento dos planos de manutenção. Desta maneira, se estabeleceu a inspeção diária porque a maioria das falhas relatadas, como o entupimento do bico extrusor ou desalinhamento da plataforma de construção, são facilmente visualizadas para que o padrão seja mantido para evitar variações que pode diminuir a qualidade dos produtos manufaturados.

Com isto, as últimas ferramentas relatadas são para controlar a efetividade dos planos de manutenção estabelecimento, garantindo que eles serão realizados e

aumentando o controle sobre as ações da manutenção através da gestão visual dos cartões *Kanban*. Além disso, o PDCA complementa as técnicas utilizadas para que se possa realizar ajustes que levem a otimização do plano de manutenção a cada ciclo completado dependendo das condições de uso visualizadas.

Por fim, observa-se que o desempenho do sistema produtivo não deve recair apenas sobre o departamento de manutenção, entretanto, as suas decisões técnicas e gerenciais afetam todas as áreas de negócio.

Desta forma, espera-se que a utilização da manutenção industrial possa ajudar na utilização da manufatura aditiva na indústria aumentando e mantendo a confiabilidade e disponibilidade dos ativos físicos da indústria de transformação para alcançar as suas metas e obter o desenvolvimento e o alinhamento com a manufatura avançada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que o objetivo principal foi contemplado, pois, através da revisão bibliográfica realizada pode-se entender que a importância dos planos de manutenção e das ferramentas de gestão para realização das ações para planejar, programar e controlar as atividades para a preservação das condições operacionais das instalações, equipamentos e máquinas, visando principalmente, a minimização de custos com paradas não planejadas. Portanto, suas atribuições devem convergir ações gerenciais e técnicas para efetivar essa premissa.

Deste modo, ao contextualizar a Gestão da Manutenção percebeu-se que para sua efetividade ela deve estabelecer políticas e estratégias sólidas para implementação de um plano de manutenção eficaz que possa garantir que a produção aconteça no prazo certo e ao menor custo possível. Assim sendo, considera-se que a manutenção é uma das principais áreas de apoio a produção através da gestão de seus ativos, garantindo que eles possam operar em seu estado ótimo.

Nos planos de manutenção constatou-se que os principais benefícios são quanto suas ações prospectarem melhorias contínuas do sistema de gestão da manutenção. Estas atribuições para o planejamento e controle da manutenção estão na realização dos planos táticos e estratégicos de manutenção e dos controles operacionais para garantir o equilíbrio produtivo através da otimização da manutenibilidade, da disponibilidade e da confiabilidade dos ativos tangíveis.

Ao demonstrar quais são as principais ferramentas de gestão e índices da manutenção, compreendeu-se que as estratégias são relacionadas as técnicas e tipos de intervenções para reestabelecer a eficiência operacional dos ativos da empresa. Quanto aos indicadores de manutenção pode-se verificar que são instrumentos para o apoio a tomada de decisão gerencial e avaliação do desempenho para que se possa prospectar melhorias contínuas que levem ao estado operacional ótimo.

Desta maneira, ao discorrer sobre a manufatura aditiva pode-se entender que ela é um processo de fabricação através da adição de material, o que evita desperdícios e perdas no processo de transformação. As principais entradas desta tecnologia disruptiva, considerada uma das principais revoluções da indústria, são os materiais poliméricos e metálicos (pó), tendo uma grande variedade de aplicações, porém, a principal é na prototipagem rápida para concepção de novos produtos e componentes, o que colabora com o crescimento das inovações na engenharia.

Sendo assim, a manufatura aditiva possui várias vantagens, porém, destaca-se não só a sua capacidade de manufaturar formas tridimensionais complexas e detalhadas em prazos menores, garantindo um menor tempo de concepção de novos produtos, mas também, a eficiência na utilização dos recursos produtivos.

Apesar de ser considerada umas das tecnologias disruptivas a tecnologia da manufatura aditiva teve seus primeiros equipamentos na década de 80.

No estudo de caso, constatou-se que um bom plano de manutenção é necessário para garantir a confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade dos ativos que realizam as transformações nos sistemas produtivos diversos e na manufatura aditiva não é diferente. Para tanto, é necessário a aplicação de ferramentas de gestão diagnósticas para entender a natureza das causas e efeitos das falhas para poder adequar as ações técnicas e gerenciais da manutenção a criticidade de cada componente visando não só que a produção opere em seu estado ótimo, como também, que os ativos prolonguem seu ciclo de vida útil, que garante um retorno maior do que o investido neles.

Por fim, o principal questionamento da pesquisa pode ser respondido indicando que os planos de manutenção influenciam na promoção da confiabilidade operacional dos sistemas produtivos através de ações gerenciais e técnicas para gestão eficaz dos ativos tangíveis, além do controle da efetividade delas.

Enfim, conclui-se que os planos de manutenção devem agir para que os ativos da empresa possam funcionar de modo eficiente para atender satisfatoriamente as necessidades da produção.

REFERÊNCIAS

- ALCALDE, E.; WILTGEN, F. Estudo das Tecnologias em Prototipagem Rápida: Passado, Presente e Futuro. **Revista de Ciências Exatas Universidade de Taubaté**. v.24(02), p.12-20, 2018.
- ALMEIDA, P. S. **Manutenção Mecânica Industrial**: princípios técnicos e operações. (Série Eixos). São Paulo: Érica, 2015.
- ALMEIDA, P. S. **Indústria 4.0**: princípios básicos, aplicabilidade e implantação na área industrial. São Paulo: Érica, 2019.
- ARAÚJO, N.H. **O papel da Manufatura Aditiva na competitividade das empresas do setor Metalúrgico e Metalomecânico num contexto de mudança**. 2022. 186 P. Tese de doutorado (Avaliação da Tecnologia). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. Portugal, Lisboa. 2022.
- BARREIROS, T.J. **Sistema de Gestão da Manutenção de Equipamentos e Instalações Técnicas**. 165 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Eletrotécnica e Automação). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, Porto, 2012.
- BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R.; SLACK, N. **Administração da Produção**. Tradução: Daniel Vieira. 8ª ed. São Paulo: Atlas, 2020.
- BUENO, E.R. **Gestão da Manutenção de Máquinas**. Curitiba: Contentus, 2020.
- COMENALE, W.; WILTGEN, F. Automação Industrial para a Manufatura Avançada com Apoio da Engenharia de Sistemas & Requisitos. **11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, ABCM, Curitiba, 24 a 26 maio, p.1-9. 2021.
- ESTRELA, C. **Metodologia Científica**: ciência, ensino, pesquisa. 3ª ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 2018.
- FOGLIATTO, F.S.; RIBEIRO, J.L. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- GIL, A.C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2018.
- GOMES, J.; WILTGEN, F. Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas. **Revista Tecnologia**, v.41(01), p.1-16, 2020.
- GREGÓRIO, G.F.; SILVEIRA, A.M. **Manutenção Industrial**. Revisão técnica: Henrique Martins Rocha. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

GREGÓRIO, G.F.; PRATA, A.B.; SANTOS, D.F. **Engenharia de Manutenção**. Revisão técnica: André Shataloff. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

GROOVER, M.P. **Fundamentos da Moderna Manufatura**: v.2. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

KARDEC, A.P.; NASCIF, J.A. **Manutenção**: função estratégica. 5ª edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro: Qualitymark/ Petrobrás, 2019.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. **Metodologia Científica**. Atualização: João Bosco Medeiros. 8ª ed. Barueri: Atlas, 2022.

LUCATO, A.V.; OLIVIO, A.; SOEIRO, M.V. **Gestão da Manutenção**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.

MATIAS-PEREIRA, J. **Manual de Metodologia da Pesquisa Científica**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2019.

MORAES, M.V. **Sistema de Gestão**: princípios e ferramentas. São Paulo: Érica, 2015.

QUINTINO, L.F. **Indústria 4.0**. Revisão técnica: Marcos Antônio Abdalla Júnior. Porto Alegre: SAGAH, 2019.

SACOMANO, J.B. **Indústria 4.0**: Conceitos e Fundamentos. São Paulo: Blucher, 2018.

SELEME, R. **Manutenção Industrial**: Mantendo a fábrica em funcionamento. Série Administração da Produção. Curitiba: Editora InterSaberes, 2015.

TAMANINI, C.; WILTGEN, F. Manufatura Aditiva e as Mudanças na Indústria Automotiva. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**. v.13(90), p.104-118, 2022.

VEIT, D.R. **Impactos da Manufatura Aditiva nos Sistemas Produtivos e suas Repercussões nos Critérios Competitivos**. 2018. 348 p. Tese doutorado (Engenharia de Produção e Sistemas). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 2018.

VIANA, H.R. **Planejamento e Controle da Manutenção**. 2ª edição. Rio de Janeiro: QualityMark, 2006.

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

WILTGEN, F. Protótipos e Prototipagem Rápida Aditiva sua Importância no Auxílio do Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. UFSCar, São Carlos, 5 a 7 agosto, p.1-4. 2019.

WILTGEN, F.; ALCALDE, E. Prototipagem Rápida Aditiva Aplicada em Dispositivos Funcionais de Auxílio Humano. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de**

Fabricação. São Carlos, 5-7 agosto, p.1-6. 2019.

WILTGEN, F. A Manufatura Avançada Precisa de uma Engenharia Avançada. **Revista Tecnologia.** v.41(02), p.1-11, 2020.

WILTGEN, F. Manufatura Aditiva em Metais - Leve, Forte e Inovador. **Revista de Engenharia e Tecnologia.** v.13(02), p.1-12, 2021.

WILTGEN, F. Fabricação de Protótipos para Testes Experimentais. **Revista de Engenharia e Tecnologia.** v.14(02), p.9-22, 2022.