

MANUFATURA ADITIVA PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE MANUTENÇÃO

ADDITIVE MANUFACTURING FOR THE PRODUCTION OF MAINTENANCE PARTS

Gabriela Alves de Araújo Lopes

Edwin Vladimir Cardoza Galdamez

Universidade Estadual de Maringá – Centro de Tecnologia – Departamento de Engenharia de
Produção – Maringá – Paraná.

Resumo

A utilização de novas tecnologias existentes no mercado pode trazer diversas vantagens às indústrias. Esse é o caso da manufatura aditiva, que proporciona novas formas de fabricação, com redução de custo, flexibilização da produção e personalização de produtos em relação a outras técnicas de fabricação. O estudo propõe a determinação de critérios para priorização de peças de manutenção para impressão 3D em uma indústria que tem produção de 8.300 toneladas por ano, e utilizou como ferramenta o método Analytic Hierarchy Process (AHP) e ainda, por meio da impressão das peças priorizadas, foram analisados os desempenhos das mesmas nos equipamentos industriais e foi observado o impacto que a tolerância nas dimensões de impressão e materiais utilizados causam às peças de manutenção. A partir dessa análise observou-se que peças de manutenção exigem precisão e exatidão maiores que a impressão 3D do mercado nacional pode oferecer atualmente.

Palavras-chave: *Manufatura aditiva; Impressão 3D; Peças de manutenção.*

Abstract

The use of new technologies on the market can bring several advantages to industries. This is the case of additive manufacturing, which provides new ways of manufacturing, reducing costs, making production flexible and personalizing products in relation to other manufacturing techniques. The study proposes the determination of criteria for prioritization of maintenance parts for 3D printing in an industry that produces 8.300 tons per year, and used the Analytic Hierarchy Process (AHP) as a tool and also, through the printing of the prioritized parts, the performance of these parts was analyzed in the industrial equipment and the impact that the tolerance in the print dimensions and materials used cause to the maintenance parts. From this analysis it was observed that maintenance parts require greater precision and accuracy than 3D printing of the national market can offer currently.

Keywords: *Additive manufacturing; 3D printing; Maintenance parts.*

1. Introdução

Inovação é necessária na sociedade, que precisa a cada dia se reinventar frente às limitações do meio. Parte da ideia de inovação vem traduzida em novos produtos, para atender às novas necessidades dos consumidores.

O processo de desenvolvimento de produto (PDP), no entanto, é uma estratégia de negócio crítica, visto que é um desafio tanto quando se fala de custos quanto de riscos ao processo (KOKSAL, 2014). Segundo Filippini *et al.* (2004), o rápido desenvolvimento de produto tem se tornado uma prioridade nas organizações, de forma que atendam as necessidades dos clientes, tornando-as competitivas na comercialização. A rapidez com que um produto é desenvolvido é um ponto de vantagem, pois está diretamente ligado à participação de mercado e além da velocidade do processo de desenvolvimento, é importante a integração de todos os setores do negócio (LIM *et al.*, 2006).

Uma das fases do PDP que mais contribuem para a rápida finalização de um projeto é a prototipagem, visto que através dela obtêm-se um entendimento completo do produto pois, o mesmo pode ser analisado fisicamente, eliminando confusão e potencial mal-entendido que podem se originar da interpretação de especificações abstratas, além de facilitar a comunicação entre desenvolvedores e usuários (BASKERVILLE e STAGE, 1996). Isso é confirmado por Koksál (2014), pois segundo o autor, a capacidade de desenvolvimento das atividades como prototipagem, teste de produção e rápida distribuição do produto são cruciais para o sucesso do produto no mercado.

Dentre as tecnologias de prototipagem está a impressão 3D, que comparado a tecnologias tradicionais, oferece inúmeras vantagens como customização de produtos, alta precisão e rápida fabricação. Os benefícios econômicos dessa tecnologia incluem o desenvolvimento da manufatura, e apesar disso, a quantidade de indústrias que usam da tecnologia de impressão 3D para peças funcionais ainda é menor que 2% (WOHLERS e GORNET, 2014; YEH e CHEN, 2017).

Dentro das indústrias, apesar das manutenções realizadas nos equipamentos, máquinas e peças podem se quebrar repentinamente devido ao desgaste sofrido em seu processo de funcionamento, e para minimizar o tempo de máquinas paradas é necessário que o *lead time* de manutenção seja o menor possível.

A falta de componentes para manutenção gera perdas e elevados custos à produção, baixos níveis de serviço além de afetar clientes e fornecedores (ESPÍNDOLA *et al.*, 2012).

Para estar preparado em caso de necessidade de manutenção, deve-se estar sempre atento ao estoque dessas peças, visto que seu gerenciamento é dificultado pela quantidade de peças existente em uma indústria, parte delas é requerida esporadicamente, com tempos de reposição (*lead time*) elevados, além de terem um custo elevado, principalmente quando se faz necessária a urgência da entrega da peça (HUA *et al.*, 2007;).

O objetivo desse trabalho é determinar critérios de priorização de peças de manutenção de equipamentos para prototipagem utilizando o processo de produção em impressão 3D e analisar a qualidade das peças impressas.

Para que o objetivo fosse alcançado, foi preciso estudar e entender os tipos de impressão 3D e materiais utilizados, para que as peças impressas atendam às características necessárias para funcionamento. Foram selecionadas peças no almoxarifado e entendeu-se a criticidade de cada uma, para priorizar a impressão e teste entre uma peça e outra. Por fim, cada impressão 3D foi analisada e testada, observando-se seu desempenho quando inserida no equipamento.

Tais ações foram necessárias, pois toda máquina tem desgaste em suas peças e essas precisam ser substituídas o mais rapidamente possível para minimizar as perdas de produção. No entanto podem ocorrer falhas repentinas em que as peças em estoque não atendem a demanda, sendo necessária a aquisição das mesmas. No entanto, peças importadas, que são maioria na indústria estudada que tem produção anual em torno de 8.300 toneladas/ano, tem um *lead time* de aquisição longo o que impacta diretamente na produção da empresa devido ao equipamento parado. Dessa forma, a impressão 3D surgiu como uma alternativa de tornar a aquisição de tais peças mais ágil, com um *lead time* menor.

A pesquisa utilizou o método de pesquisa-ação, pois há interesse coletivo na resolução do problema e os pesquisadores estão envolvidos no trabalho de forma cooperativa no desenvolvimento da pesquisa, em sua coleta de dados e na implantação da proposta (PRODANOV e FREITAS, 2013).

A seção 2 apresenta o referencial teórico sobre os assuntos que necessitam ser conhecidos para a determinação dos critérios de seleção de peças de manutenção de equipamentos para sua impressão 3D. A seção 3 destaca o procedimento metodológico da pesquisa. A seção 4 relata os resultados da pesquisa e a seção 5 expõe as conclusões do estudo.

2. Revisão de Literatura

2.1 Processo de Desenvolvimento de Produtos

O processo de desenvolvimento de produtos (PDP) é um conjunto de atividades nas quais, a partir das necessidades do mercado e das restrições tecnológicas, desenvolve-se o projeto do produto e planejam-se seus meios produtivos de forma que a manufatura seja capaz de produzi-lo. Novos produtos são desenvolvidos para atender diferentes necessidades e mercados (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Para Ulrich e Eppinger (2012) o desenvolvimento de produtos é um conjunto de atividades que começam com a percepção de uma oportunidade de mercado, e terminam com a produção, venda e entrega do produto. Para Rozenfeld *et al.* (2006), esse ciclo vai além, sendo necessário planejar também seu fim de vida.

Existem cinco pontos a serem observados no PDP que devem ser cumpridos para alcançar um desenvolvimento de produtos lucrativos e rentáveis: qualidade do produto, custo do produto, tempo de desenvolvimento, custo de desenvolvimento e capacidade de desenvolvimento. Possuir uma alta performance nesses pontos, aproxima o projeto ao sucesso (ULRICH e EPPINGER, 2012).

Para todo processo de desenvolvimento é importante haver métodos estruturados, e utilização de ferramentas para que os processos de decisões tenham justificativa sólida e sejam explícitos, o que permite que o projeto seja desenvolvido sem haver dúvidas sobre o que foi feito. Serve como um *checklist* para que as fases do desenvolvimento sejam cumpridas e nada seja esquecido e também possibilita e facilita a documentação, que pode ser utilizada para verificar etapas e decisões passadas e até mesmo em projetos futuros (YEH *et al.*, 2008; ULRICH e EPPINGER, 2012).

Segundo Rozenfeld *et al.* (2006), o PDP pode ser dividido em três macrofases denominadas pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento e essas são divididas em fases.

– Pré Desenvolvimento

A macrofase de pré desenvolvimento é vital para o sucesso do novo produto, porém, é crítica devido as incertezas no gerenciamento do projeto pois, são poucas as definições do projeto do produto (KOKSAL, 2014). Nessa macrofase está a fase de planejamento do projeto, onde é identificada a oportunidade e de acordo com a estratégia da empresa são

desenvolvidos os escopos do projeto e produto (conceito), equipes de desenvolvimento, prazos e orçamentos, que são documentados no plano do projeto. O objetivo dessa fase é conhecer a estratégia da empresa para que seja desenvolvido o melhor portfólio de produtos e garantir que haja uma definição clara e um consenso de onde se quer chegar ao final do projeto (ROZENFELD *et al.*, 2006; ULRICH e EPPINGER, 2012).

– **Desenvolvimento**

Na macrofase de desenvolvimento é onde são definidos detalhes técnicos do novo produto, da produção e comercialização do mesmo. É aqui que os protótipos são feitos e aprovados e são definidos os recursos e tecnologias para produção. Pessoas são treinadas para produção, venda e suporte (ROZENFELD *et al.*, 2006). Essa macrofase é dividida em outras fases e atividades.

(a) Projeto Informacional

A primeira fase da macrofase de desenvolvimento é o projeto informacional onde o grau de incertezas é grande e há muitas possibilidades de escolhas de soluções. É a partir das escolhas de solução feitas nessa fase que se determina aproximadamente 85% do custo do produto. Aqui também são criados, a partir da minuta do projeto e do plano do projeto, as especificações-meta, ou seja, é a fase onde se escuta as necessidades do cliente e descreve o que se deseja alcançar. Para isso constam os requisitos e informações qualitativas sobre o produto e requisitos com valores-meta (ROZENFELD *et al.*, 2006).

(b) Projeto Conceitual

A segunda fase do desenvolvimento é o projeto conceitual em que a entrega é a concepção do produto, ou seja, as soluções do projeto são geradas e estudadas até que se encontre a melhor opção para o atendimento das especificações-meta. É nessa fase que se desenvolve a arquitetura do produto com informações técnicas, lista-se os principais sistemas, subsistemas e componentes e desenvolve-se os desenhos iniciais dos componentes e produto (ROZENFELD *et al.*, 2006; ULRICH e EPPINGER, 2012).

(c) Projeto Detalhado

Segundo Rozenfeld *et al.* (2006), na fase do projeto detalhado inicia-se o ciclo de projetar (novas alternativas) – construir – testar – otimizar. Aqui a concepção do produto é estudada detalhadamente, gerando documentos com o detalhamento de cada item que compõe o projeto e como serão seus processos de fabricação. Nessa fase são desenvolvidos protótipos funcionais que podem ser feitos de diversas formas e tecnologias, o projeto dos recursos e o

plano de fim de vida que estabelece a descontinuidade e reciclagem do produto. Quando o protótipo é aprovado, depois de todos os ciclos de projetar – construir – testar – otimizar, o produto é homologado e as especificações finais são concluídas, então a equipe determina a forma que o produto será produzido, o que será feito dentro da empresa, o que será adquirido de fornecedores e quais serão os fornecedores, e finalmente, como será lançado no mercado.

(d) Preparação da Produção

A fase de preparação da produção traz o planejamento e execução do lote piloto, ou seja, os testes são realizados em produtos que utilizaram a linha de produção, buscando-se obter resultados com a mesma qualidade do protótipo, e quando o lote piloto é aprovado, há a homologação da produção, e a empresa comunica que o produto começará a ser produzido, dessa forma é necessário que haja a liberação da produção, especificações dos processos de produção e manutenção e capacitação das pessoas. Após a fase de preparação da produção, há o lançamento do produto com especificação e treinamento da equipe de processo de venda, distribuição, assistência técnica e atendimento ao cliente (ROZENFELD *et al.*, 2006).

– **Pós-Desenvolvimento**

O pós-desenvolvimento tem como principal objetivo o acompanhamento do desempenho do produto pela equipe de desenvolvimento e documentação das melhorias executadas durante o ciclo de vida do produto, o que permite que esses conhecimentos sejam utilizados em outros projetos. Compreende também a descontinuação do produto no mercado, atentando-se a requisitos ambientais, avaliação do desempenho do produto e a avaliação dos clientes (ROZENFELD *et al.*, 2006).

2.2 Técnicas de Fabricação e Prototipagem

Segundo Volpato *et al.* (2007) os principais processos de fabricação mecânicos são realizados por: *i.* Fusão e posterior moldagem do material (ex: injeção de plástico, fundição de metais); *ii.* Remoção de material (ex: torneamento, fresamento, usinagem); *iii.* Conformação - a geometria final da peça é gerada a partir da deformação plástica do material inicial (ex: extrusão, laminação, metalurgia do pó) e *iv.* Adição de matéria – que podem promover a junção de partes mais simples para compor uma peça mais complexa (ex: soldagem, colagem).

A manufatura aditiva são processos que unem materiais para fazer objetos físicos em 3D a partir de sistemas virtuais. Essa tecnologia faz a adição de material camada sobre

camada, ao contrário da remoção de material, ou seja, só se paga pela matéria prima realmente usada logo, não há materiais retirados como resíduos (STUCKER, 2011). Outra vantagem desse tipo de fabricação é de que a parte impressa não precisa de qualquer ferramenta intermediária, e ainda assim pode criar objetos de alta complexidade (LYONS, 2011).

O processo de adição de material foi utilizado inicialmente em produção rápida de peças para visualização da ideia, sem ser necessário atender, a princípio, questões de resistência e precisão, o que lhe deu o nome de Prototipagem Rápida (VOLPATO *et al.*, 2007).

De acordo com Ulrich e Eppinger (2012) existem dois tipos abrangentes de prototipagem. O primeiro tipo são as prototipagens físicas e analíticas. Prototipagens físicas são artefatos tangíveis, se parecem com o produto e são usadas para testar uma ideia rapidamente e validar a funcionalidade do produto. A prototipagem analítica é uma representação não tangível, geralmente métodos matemáticos ou visuais, que podem ser representados em simulações e modelos computacionais de geometria tridimensional.

O segundo tipo é o que trata do grau de abrangência do protótipo. Os protótipos abrangentes, que são a maioria, se tratam de peças totalmente operacionais e feitas em grande escala. Podem ser utilizadas para serem entregues aos clientes, para que estes identifiquem qualquer tipo de falha antes de se iniciar a produção. Contudo os protótipos focalizados analisam pequenos números de atributos de um produto, geralmente para visualizar como determinada parte do produto irá se parecer ou como funcionará (ULRICH e EPPINGER, 2012).

Um protótipo pode ser usado principalmente como ferramenta de comunicação não só entre a equipe de desenvolvimento do produto, mas também com os demais interessados no projeto (*stakeholders*). Não se limitando à comunicação, os protótipos são usados também para aprendizado durante o projeto, para integração entre os sistemas, subsistemas e componentes e em marcos peculiares, para mostrar a evolução do produto, atendimento de metas e funcionalidade. (UPCRAFT e FLETCHER, 2003; ULRICH e EPPINGER, 2012).

A possibilidade de criar protótipos tridimensionais a partir da impressão 3D permite que a peça seja ajustada e testada funcionalmente durante o processo de criação do objeto. Esse processo reduz o tempo necessário para corrigir projetos e criar novos protótipos, permitindo a detecção de erros antes da produção propriamente dita reduzindo custos de erros de projeto descobertos na produção (STUCKER, 2011).

Cada tecnologia de prototipagem rápida tem suas vantagens e desvantagens e estas devem ser verificadas antes de se escolher um sistema de prototipagem para que não se corra o risco de se escolher uma tecnologia que não atenda os requisitos necessários (UPCRAFT e FLETCHER, 2003).

2.3 Prototipagem com Impressão 3D

A tecnologia de prototipagem rápida permite que protótipos com partes complexas, incluindo geometrias com cavidades internas, ou características que sejam de difícil execução com outra tecnologia possam ser feitos mais rapidamente e com menor custo em relação aos métodos convencionais (UPCRAFT e FLETCHER, 2003; STUCKER, 2011).

Entre os processos de prototipagem rápida está o de impressão 3D que podem ser classificados de acordo com a forma inicial da matéria prima utilizada na impressão. Segundo Volpato *et al.* (2007) existem três estados em que esse material pode ser utilizado: líquido, sólido ou em pó.

- Líquido: antes de ser processada, a matéria prima encontra-se no estado líquido. Entre as tecnologias de polimerização, está a Estereolitografia a Laser (SLA) onde a resina líquida é solidificada por um laser UV ou o Processamento de Luz Digital (DLP).
- Sólido: o material sólido está na forma de filamento e o processo de impressão funde esse material antes da sua deposição. Esse modelo é o de extrusão e chamado de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM).
- Pó: a matéria prima é inicialmente um pó que em seu processamento utiliza-se laser, chamado de Sinterização Seletiva a Laser (SLS).

Os processos de impressão 3D SLA e DLP proporcionam bom acabamento superficial e apesar de as duas tecnologias serem estereolitográficas há uma diferença entre elas onde a SLA utiliza laser para a solidificação do objeto, e esse laser desenha as formas de acordo com o projeto digital. A tecnologia DLP não utiliza laser, mas sim, luz digital e essa luz é projetada na camada em uma única imagem (SILVA, 2017).

Entre as vantagens dessa tecnologia estão o bom acabamento superficial e a fácil obtenção de geometria complexa. Uma das desvantagens é a necessidade de estrutura de suporte durante a construção do produto, e as resinas, em sua maioria, são frágeis o que exige cuidado ao se manusear (UPCRAFT e FLETCHER, 2003).

Um dos métodos mais comuns e com menor custo é o da tecnologia FDM (extrusão), que constrói o objeto depositando material camada a camada dando o contorno desejado.

Quando a impressora 3D FDM constrói objetos com vazios, é necessário que seja depositado também um material suporte que pode ser removido ao final da impressão. O material é depositado na plataforma da impressora que se move verticalmente (Z) e os movimentos horizontais (X, Y) são feitos pelo bocal por onde sai o material para deposição (NAKAJIMA *et al.*, 2015).

A tecnologia SLS permite a construção camada a camada utilizando pó de diversos materiais, o que coloca essa tecnologia em vantagem. O calor do laser solidifica o material em pó, uma camada após a outra de acordo com a geometria pré-determinada (SHAHZAD *et al.*, 2013).

A manufatura aditiva traz a possibilidade de trabalho com diversos materiais, desde básicos como plástico, a resinas fotossensíveis, que incluem cerâmica, vidro, inúmeros metais, fibra de carbono e novos termoplásticos, além de todo o material que vem sendo criado (D'AVENI, 2015).

Dois aspectos importantes distinguem a impressão 3D das demais tecnologias de prototipagem rápida, a primeira é quanto ao custo, visto que a impressora 3D é mais barata que outras tecnologias, e o segundo aspecto é que as impressoras 3D são integradas com software CAD e ao final do processo o arquivo pode ser salvo para ser utilizado em outro momento (BERMAN, 2012).

Apesar da tecnologia de impressão 3D trazer facilidade e vantagens para as organizações, a mesma não é amplamente utilizada, o estudo de Wohlers e Gornet (2014) apontam que a impressão 3D está presente em menos de 2% das indústrias e um dos motivos para a baixa adesão é que dentro da linha de produção, essa tecnologia ainda é cara, devido ao seu modo de custeio baseado em tempo/velocidade e material de impressão (YEH e CHEN, 2017).

A tecnologia aditiva não oferece economia em escala, no entanto supera a fabricação padrão quando se trata da possibilidade de flexibilidade de produtos (D'AVENI, 2015). Dessa forma, essa tecnologia viabiliza a impressão em pouca quantidade e produtos personalizados a um custo relativamente baixo (ÖZCEYLAN *et al.*, 2017).

No entanto, empresas como a *Boeing* utilizam a impressão 3D (SLS) devido às suas características de construção da peça e do material utilizado, que são leves, não porosos, com a possibilidade de construção de paredes finas e complexas geometricamente, de maneira que sejam resistentes, utilizem pouco material devido a geometria e sejam econômicos (LYONS, 2011).

Dentre as vantagens da impressão 3D, está a capacidade de fabricar objetos a um custo aproximado, independente da complexidade do mesmo, dependendo mais fortemente do tempo de impressão, material utilizado, e preenchimento (quão sólida é a peça), ou seja, um objeto impresso cheio de cavidades tem um custo parecido com um objeto sólido. O objeto cheio de cavidades ainda poderá ter um custo menor do que o mesmo objeto usinado, já que a cada curva a mais na peça aumenta o tempo de produção, desperdiça material, energia, aumentando o custo do produto (LIPSON, 2011).

Özceylan *et al.* (2017) destacam que além das oportunidades de utilização da manufatura aditiva já citadas, como redução de desperdícios, produção de peças complexas, rápida produção de peças, ainda há a possibilidade de redução de *lead time*, agilizando o processo de aquisição de itens, assim como ocorre na indústria de saúde. No *Nicklaus Children's Hospital de Miami*, a impressão 3D é utilizada na preparação e planejamento dos procedimentos de cirurgias no coração de crianças, onde é possível criar um modelo 3D anatomicamente preciso dos pacientes, com base na anatomia de cada criança. São utilizados sistemas de imagens sofisticados que permitem a impressão de uma réplica exata, e dá oportunidade ao médico de estudar a melhor forma de realizar a cirurgia antes mesmo de ter o paciente em uma sala cirúrgica (STRATASYS, 2018).

A *Amazon* vem estudando a possibilidade de ter um caminhão com uma impressora 3D para atender a uma região de forma mais rápida, sendo possível imprimir diversos itens, principalmente brinquedos, e serem entregues mais agilmente (OZCEYLAN *et al.*, 2017).

Além da aplicação na medicina e estudos como da *Amazon*, a impressão 3D está sendo aplicada em peças funcionais. A *Siemens Mobility GmbH* criou uma instalação digital de manutenção ferroviária, o Centro de Assistência Ferroviária, na Alemanha. O Centro oferece serviços com impressão 3D na tecnologia FDM. Dentre as vantagens encontradas pela *Siemens Mobility* está a eliminação da necessidade de estoque de determinadas peças de substituição, e a redução no tempo de fabricação dessas peças em 95% pois as mesmas podem ser produzidas em poucas horas, em contraste com o fornecedor que tem um prazo de seis semanas para produção (TI INSIDE, 2018).

Para tomadas de decisão sobre a reposição de peças sobressalentes são indispensáveis as previsões dos tempos entre falha de equipamentos industriais, no entanto essa previsão pode ser imprecisa (ELWANY e GEBRAEEL, 2008). Isso gera possíveis faltas de peças para manutenção, implicando em parada de equipamentos até que se consigam novas peças para substituição. A impressão 3D vem sendo usada na fabricação de peças definitivas e peças de reposição (TAKAGAKI, 2012; D'AVENI, 2015). Assim, a impressão 3D pode ser inserida

nas indústrias como opção de tecnologia em casos de emergência, como falta de peças para manutenção, por sua agilidade na produção e disposição do seu produto final. Porém, para que isso ocorra, é necessário que haja o desenvolvimento do projeto das peças, seguindo o PDP utilizando engenharia reversa.

Ainda há algumas restrições da tecnologia de impressão 3D pois, apesar da capacidade de impressão de objetos complexos, as impressoras oferecem variações na precisão dimensional, no acabamento da superfície e no atendimento de requisitos do produto dependendo do material e tecnologia utilizada, o que pode afetar o uso da peça impressa posteriormente.

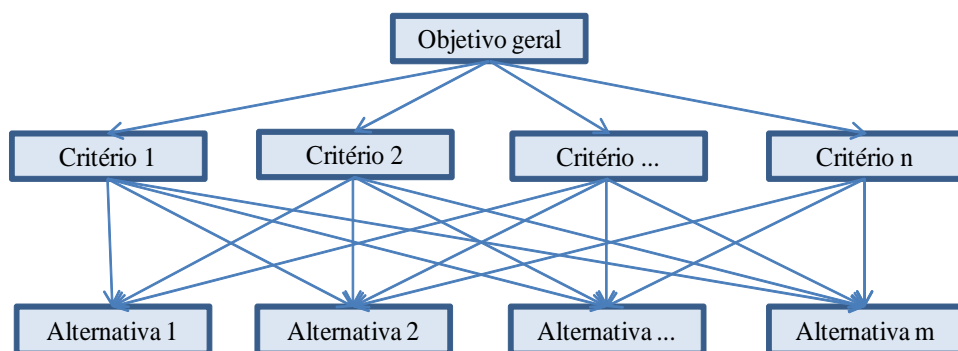
2.4 Análise Hierárquica

A utilização do método hierárquico traz vantagem devido a possibilidade de comparar múltiplos critérios, além de possibilitar a comparação par a par sem ter preocupação com os demais elementos (SAATY, 1990).

A ferramenta *Analytic Hierarchy Process* (AHP) foi proposta por Tomas L. Saaty na década de 80. A mesma auxilia na tomada de decisão de forma que não seja intuitiva e sim racional, além de permitir a avaliação de elementos quantitativos e qualitativos (MARTINS e COELHO, 2011).

Para aplicar a ferramenta AHP, primeiramente é necessário estruturar os níveis hierárquicos (Figura 1) onde deve-se determinar qual o objetivo geral da análise (primeiro nível), identificar os critérios de decisão que contribuem com o objetivo (segundo nível) e listar as alternativas de soluções que serão avaliadas em relação aos critérios (terceiro nível) (SAATY, 1990).

Figura 1 – Níveis hierárquicos



Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

Assim sendo, os itens se tornam visualmente organizados, o que ajuda no entendimento da hierarquia do problema, ou seja, mostra a relação entre os itens dos níveis hierárquicos e prepara os avaliadores para as análises seguintes. Em seguida faz-se as comparações par a par e as mesmas utilizam a escala fundamental de Saaty (2005) apresentada na Tabela 1 em que as importâncias variam de “1” à “9”.

Tabela 1 – Escala fundamental de Saaty

Escala	Avaliação numérica	Recíproco
Mesma importância	1	1
Importância moderada de um sobre outro	3	1/3
Importância forte ou essencial	5	1/5
Importância muito forte	7	1/7
Importância extrema	9	1/9

Fonte: Adaptado de Saaty (2005)

Dessa forma, é possível realizar comparações entre critérios qualitativos e quantitativos de acordo com a importância dos itens para os avaliadores, o que representa vantagem na utilização do método AHP, devido à **flexibilidade das análises**.

Os critérios são organizados em uma matriz quadrada (Tabela 2), possibilitando assim as comparações par a par. Então define-se a importância do critério da linha em relação ao da coluna (SAATY, 1990).

Tabela 2 – Matriz de comparação

	Critério 1	Critério 2	Critério ...	Critério n
Critério 1	1	a_{12}	...	a_{1n}
A= Critério 2	$1/a_{12}$	1	...	a_{2n}
Critério
Critério n	$1/a_{n1}$	$1/a_{n2}$...	1

Fonte: Adaptado de WOLLMANN *et al.* (2011)

Onde $a_{ij} = 1 \therefore a_{ji} = 1$

A diagonal principal sempre será igual a 1, pois um critério comparado a ele mesmo tem mesma importância. Os elementos a serem analisados são sempre os que estão acima da diagonal principal e os elementos abaixo da diagonal principal são os valores recíprocos, como se observa na Matriz de comparação, o que diminui a chance de inconsistência da análise.

A partir da comparação, calcula-se o Autovetor, que fornece a prioridade entre os critérios. O autovetor de prioridades mostra a prioridade relativa dos critérios, ou seja, qual dos critérios é mais importante segundo as notas atribuídas na matriz de comparação (SAATY, 2005).

Para que o autovetor seja calculado é necessário normalizar a matriz, onde se divide cada elemento da matriz pela soma da sua respectiva coluna. Então é calculada a média de cada linha ou critério obtendo assim o autovetor (MARTINS e COELHO, 2012).

Após o cálculo do Autovetor, é necessário fazer as comparações par a par entre as alternativas de soluções (terceiro nível). Assim como feito entre os critérios, as alternativas subjetivas são organizadas em uma matriz e utilizando a escala de Saaty (2005), Tabela 1, são feitas as comparações. No entanto se a alternativa for objetiva deve-se apenas indicar o valor da unidade, que será somado com os demais valores dentro desse critério e em seguida dividido pelo total dessa soma (SAATY, 2005; WOLLMANN *et al.*, 2011).

As comparações das alternativas de soluções em relação a cada critério mostram qual das soluções é a melhor opção para cada critério e para isso também é calculado o autovetor das comparações das alternativas de soluções. Nesse ponto é possível observar qual das alternativas é a melhor opção para cada critério, no entanto não é possível escolher qual das alternativas é a melhor solução para o objetivo geral.

No último passo é necessário multiplicar a matriz das comparações das alternativas de soluções com o Autovetor da matriz de comparação, dessa forma é possível determinar qual das possíveis soluções melhor atende o objetivo geral (SAATY, 2005; MARTINS e COELHO, 2012). Dessa forma a alternativa de solução com maior valor é a que melhor atende ao objetivo geral.

No entanto, como as comparações nas matrizes são subjetivas, pode haver inconsistência lógica. Segundo Vargas (2010), para verificar a consistência lógica da avaliação, é necessário seguir as seguintes etapas:

1. Cálculo do autovalor máximo (λ_{\max}), que mostra se há lógica na comparação dos dados. O autovalor máximo é calculado a partir do somatório do produto de cada elemento do autovetor pela soma de cada coluna da matriz de comparação.
2. Cálculo do índice de consistência (CI) onde:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

em que n é a quantidade de critérios avaliados.

3. Cálculo da taxa de consistência (CR) que é dada pela razão entre o índice de consistência e o índice de consistência aleatória (RI) apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Índices de consistência aleatória (RI)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (2005)

Para ser aceito, a RC deve ter um valor menor a 0,1, ou seja, menor que 10% o que indica que a inconsistência da análise é aceitável, caso contrário deve ser feita uma nova avaliação das comparações, pois as importâncias dadas na matriz de comparações foram inconsistentes.

3. Metodologia

Este trabalho tem classificação de natureza aplicada, onde é necessário gerar conhecimentos para serem aplicados na prática com a intenção de solucionar determinado problema (PRODANOV e FREITAS, 2013). Tem objetivo explicativo que, segundo Gil (2002), busca aprofundar e explicar o motivo e causas das coisas. Ainda, sobre a abordagem do problema, é considerado qualitativo. Prodanov e Freitas (2013) ressaltam que em uma pesquisa qualitativa os dados coletados são descritivos e retratam a maior quantidade possível de elementos no ambiente estudado. Tem como foco a qualidade e a amostra é pequena, não tendo grande representatividade.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos trata-se de uma pesquisa-ação, onde segundo Mello *et al.* (2012) o conhecimento é adquirido guiado pela prática pois, os pesquisadores participam da pesquisa e implementam ações para solução do problema, baseados em suas investigações na literatura. A pesquisa-ação é dividida em cinco fases, e cada uma foi desenvolvida da forma como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 – Quadro das atividades desenvolvidas no estudo relacionado à descrição das fases da pesquisa-ação.

Fases	Detalhamento	Atividades realizadas
1-Planejar a pesquisa-ação	Definição do problema	Entender o problema
	Mapeamento de literatura e definição do objetivo da pesquisa	Estudar tipos de impressão 3D e materiais
	Seleção das unidades de análise e técnica de coleta de dados	Selecionar peças que a impressão e teste são possíveis de acontecer sem grandes riscos aos equipamentos
	Delimitar o problema e definir critérios de avaliação	Determinar critérios de priorização da amostra que será impressa, a partir do método AHP
2-Coleta de dados	Registro de dados e tabulação dos dados	Criterizar peças de acordo com suas características
3-Analisar dados	Comparação de dados empíricos com teóricos e elaboração do plano de ação	Avaliação das peças impressas
4-Implementar ações	Implementar plano de ações	Inserir peças impressas nos equipamentos
5-Avaliar resultado	Avaliar resultados	Observar o desempenho
	Redigir relatório	Concluir e relatar estudo

Fonte: Elaborado pelos autores (2018)

A primeira fase da pesquisa-ação, planejar a pesquisa-ação, divide-se em quatro atividades, onde se deve identificar o problema, identificar o que motivou a realização do estudo, definir o objetivo da pesquisa e mapear a literatura para entendimento dos conceitos e do que já foi estudado sobre o assunto. Também é necessário selecionar as unidades de análise que é a identificação das peças em que é possível realizar testes e definir as técnicas de coleta de dados, além de delimitar o problema e definir os critérios de avaliação.

Na segunda fase é onde acontece a coleta de dados da forma definida na fase anterior, no caso desse estudo, é onde acontece a caracterização das peças de manutenção para criterização das mesmas. Na terceira fase faz-se a análise dos dados a partir da comparação dos dados empíricos com os dados teóricos e a partir dos resultados, elabora-se um plano de ação.

Na quarta fase implementa-se o plano de ação que nesse estudo é caracterizado pela inserção das peças nos equipamentos para avaliar seu desempenho e na quinta fase do ciclo da pesquisa-ação avalia-se os resultados obtidos e gera-se o relatório.

4. Resultados

4.1 Reposição de Peças da Manutenção

O estudo foi desenvolvido em uma Indústria de Fios pertencente a uma Cooperativa Agroindustrial de grande porte. Essa indústria foi inaugurada em 1982, já que na época, a região Noroeste do Paraná se destacava pela produção de fibra de algodão.

Em 2018 a Indústria de Fios está preparada para industrializar e comercializar produtos e subprodutos têxteis, possuindo uma capacidade de produção instalada de 8.300 ton/ano de fios de algodão, poliéster e mistos.

A indústria está em contínuo crescimento para criação de novos produtos, tendo como base as necessidades dos clientes, maior rendimento da produção global e, por consequência, maiores lucros.

Mesmo após 36 anos de funcionamento da indústria, parte dos equipamentos ainda não foram substituídos. Um desses equipamentos, que tem peça avaliada nesse trabalho, é a máquina de fiação a rotor (*Open End*), com ano de fabricação de 1996. Esse equipamento é utilizado na transformação da fita (*input*) em fio (*output*) por meio da abertura das fibras e posterior torção e estiramento. Seus componentes não são mais fabricados, tornando esse equipamento obsoleto. Faltam peças de reposição e manutenção para os mesmos no mercado e no estoque. Sendo assim, é necessário o desenvolvimento de novos fornecedores para que a demanda dessas peças seja suprida e não prejudique o tempo de manutenção do equipamento.

Há outra parte da produção equipada com equipamentos novos, todos importados de países como Japão e Alemanha que tem forte influência na indústria têxtil. Alguns desses equipamentos, cujas peças também foram avaliadas no trabalho, foram adquiridos na última modernização de equipamentos e são modelos 2010 – 2012. Tratam-se dos seguintes equipamentos.

- i) *Passador* que uniformiza o peso por unidade de comprimento, paralelizam as fibras através da estiragem e faz mistura de fibras;
- ii) *Maçaroqueira* transforma a fita em pavio, com cerca de 3 a 5 mm por meio do estiramento e torção;
- iii) *Conicaleira* retira as irregularidades do fio, como pontos grossos e finos. Além disso, faz a mudança de embalagem, passando o fio para a bobina.

Assim como os equipamentos, as peças para manutenção também são importadas, o que acarreta um *lead time* logístico de meses, dependendo da peça, origem e fornecedor.

Em casos de emergência como a falta dessas peças no estoque, o tempo de manutenção, se eleva devido à espera pela aquisição e chegada das peças que passam por burocracias internas e externas à empresa, levando a perdas de produção devido a máquina parada.

Durante o desenvolvimento do projeto, a Engrenagem Helicoidal que é utilizada no Passador, uma das peças escolhida para impressão 3D, teve seu estoque zerado devido ao desgaste das engrenagens de vários equipamentos em um curto intervalo de tempo, ou seja, caso a Engrenagem Helicoidal de mais um Passador se danificasse, haveria perda de produção devido à máquina parada até a chegada de uma nova peça, o que justifica mais uma vez a realização do estudo.

Dessa forma se faz necessário criar alternativas de aquisição de peças para manutenção de forma que o *lead time* de aquisição das mesmas seja curto, ou seja, menor que o tempo convencional de espera, tanto para peças de equipamentos obsoletos quanto para peças importadas, pois em caso de falha, as peças danificadas devem ser substituídas o mais rápido possível e em casos de emergência quando faltarem peças de reposição em estoque, o equipamento não fique tanto tempo parado, reduzindo assim as perdas de produção.

Uma alternativa estudada por essa indústria é a utilização da impressão 3D para a produção de peças de manutenção, pois a tecnologia apresenta a capacidade de impressão desde peças simples às mais complexas, e grande diversidade de materiais de forma que possam substituir parte dos materiais de peças originais, e atender às necessidades da indústria no quesito de tempo de chegada da peça para execução da manutenção.

A equipe que desenvolve esse projeto é formada por seis pessoas, quais sejam, a gerente industrial, supervisor de manutenção, almoxarife, analista de processos, programador de manutenção e estagiária da engenharia de processos da indústria de fios.

A seleção de peças de manutenção em estoque que podem ser impressas e testadas foi realizada pelo supervisor de manutenção, almoxarife e o programador de manutenção levando em consideração risco ao equipamento em caso de falha do teste da peça impressa, dificuldade de acesso ao local da peça no equipamento e programação de paradas de máquina para manutenção, para que fosse possível instalar a peça impressa para teste.

4.1.1 Definição de critérios de avaliação

A impressão 3D é utilizada principalmente em prototipagem para visualização da peça, ou seja, visualização do protótipo para aprovação. Porém, para peças funcionais seu uso

ainda é pequeno e um dos motivos é o custo do serviço de impressão e materiais disponíveis para impressão.

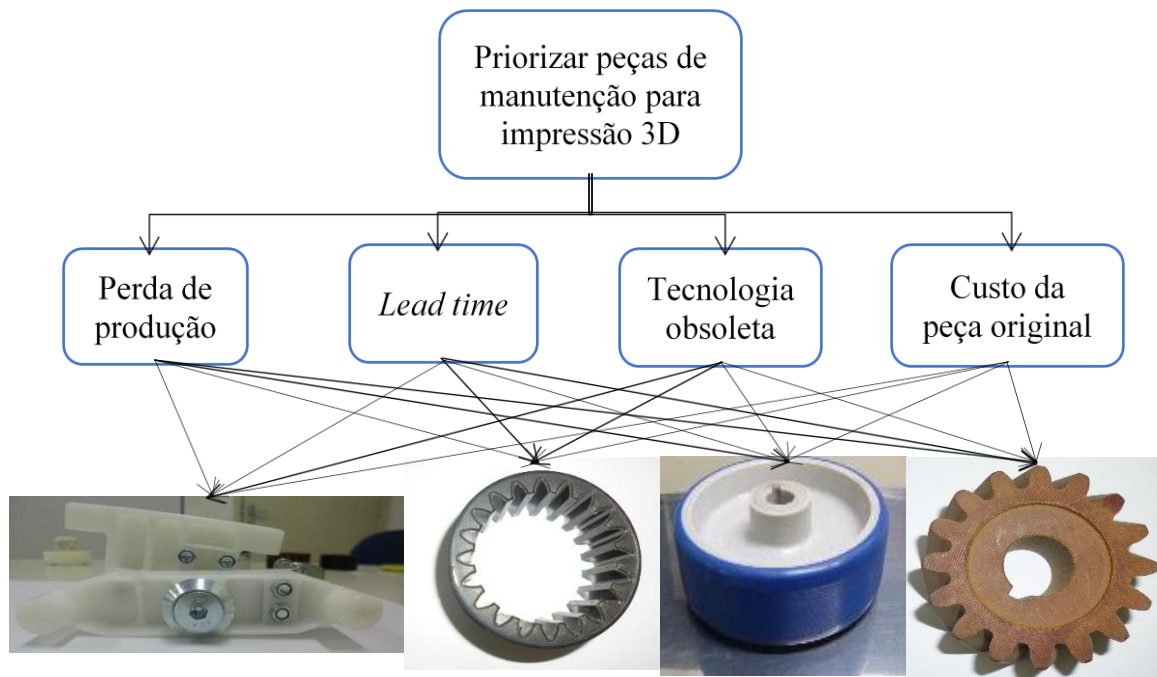
Para realização do estudo, foram definidos critérios para a tomada de decisão sobre a escolha de quais peças de manutenção seriam selecionadas para impressão. Os mesmos foram definidos em conjunto pela equipe e essa seleção deu-se pelo fato de cada um dos critérios ter grande influência na produção da indústria. Ainda, os critérios foram estabelecidos de forma que qualquer indústria que queira testar impressão 3D para produção de peças de manutenção possa utilizar, por serem genéricos. Tais critérios são:

- i) *Perda de produção*, devido à perda causada por máquina parada aguardando pela manutenção pela falha em determinada peça, seja na máquina inteira ou apenas em parte dela ou a redução da garantia de qualidade do produto;
- ii) *Lead time* logístico, a partir do tempo que a peça demora a estar disponível para a equipe de manutenção, que tem influência direta com a perda de produção em caso de falta de peças para manutenção;
- iii) *Tecnologia obsoleta* no caso de equipamentos que não tem mais as peças fabricadas, portanto, é necessário desenvolver novos fornecedores;
- iv) *Custo da peça original*, pois peças baratas são compradas em grande volume e dificilmente tem o estoque zerado além de o serviço de impressão 3D ainda ter um custo elevado.

Para a definição dos pesos de cada critério na tomada de decisão, foi utilizado o método AHP. Tal método foi utilizado para dar consistência à escolha da alternativa de solução de forma lógica e que pudesse ser justificada.

A Figura 2 mostra a estruturação do modelo hierárquico do problema com o objetivo de priorizar peças de manutenção para impressão 3D. Para a seleção de peças foi considerado o *status* atual da tecnologia de impressão 3D, ou seja, materiais e tecnologias disponíveis na região da indústria onde ocorreu o projeto.

Figura 2 – Modelo hierárquico



Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

Na Figura 2 pode-se observar o modelo hierárquico contendo o objetivo geral do problema “Priorizar peças de manutenção para impressão 3D”, os critérios selecionados que tem grande impacto na decisão de atendimento ao objetivo geral e as alternativas de solução, o que clarifica os níveis de cada item do problema.

Tais peças foram selecionadas, pois além de serem de fácil acesso na máquina, caso ocorra algum dano durante os testes, esse dano é facilmente identificado e a máquina não será danificada, no entanto o Acoplamento, apesar de ser de difícil acesso e de grande risco ao equipamento em caso de defeito foi escolhido por ser uma peça obsoleta.

Utilizando a escala relativa de Saaty (2005), a equipe do projeto elaborou em conjunto, com uma única avaliação, a matriz de comparações apresentada na Tabela 4, em que mostra a relevância de um critério sobre outro.

Tabela 4 – Matriz de comparação entre critérios e soma das colunas

	Perda de Produção	Lead Time	Tecnologia Obsoleta	Custo da Peça Original
Perda de Produção	1	5	7	9
Lead Time	0,2	1	5	9
Tecnologia Obsoleta	0,14	0,2	1	3
Custo da Peça Original	0,11	0,11	0,33	1
Soma	1,45	6,31	13,33	22

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

A tabela 4 mostra que para a equipe, o critério perda de produção e *lead time* tem maior relevância em relação aos demais critérios. A partir da comparação e da soma das colunas, foi calculado o autovetor da matriz de comparação mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Autovetor da matriz de comparação

	Perda de Produção	<i>Lead Time</i>	Tecnologia Obsoleta	Custo da Peça Original	Autovetor
Perda de Produção	0,69	0,79	0,52	0,41	0,60
<i>Lead Time</i>	0,14	0,15	0,37	0,41	0,27
Tecnologia Obsoleta	0,10	0,03	0,07	0,13	0,08
Custo da Peça Original	0,07	0,02	0,02	0,04	0,05

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

A Tabela 5 foi calculada dividindo cada célula da matriz de comparação pela soma da coluna a qual faz parte. O autovetor foi calculado pela média de cada coluna e mostra que o critério Perda de Produção tem maior relevância em relação aos demais.

4.2 Coleta de dados

Para julgamento das alternativas de solução em relação a cada critério, não foi necessário a utilização da matriz de comparação, pois os critérios são todos objetivos, ou seja, tem valores exatos. Dessa forma, foi calculado o autovetor das alternativas sob cada critério, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Autovetor das alternativas de solução

Perda de Produção	Kg/dia	AV
Guia Correia	3000	0,32
Acoplamento	3000	0,32
<i>Puleggia</i>	3000	0,32
Engrenagem	150	0,016
Lead Time	Dias	AV
Guia Correia	90	0,29
Acoplamento	90	0,29
<i>Puleggia</i>	120	0,39
Engrenagem	3	0,009
Tecnologia Obsoleta	Obsoleto	AV
Guia Correia	0	0
Acoplamento	10	1
<i>Puleggia</i>	0	0
Engrenagem	0	0
Custo da Peça Original	Reais	AV
Guia Correia	1.081,00	0,43
Acoplamento	112,61	0,16
<i>Puleggia</i>	702,08	0,28
Engrenagem	276,00	0,11

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

Da Tabela 6 observa-se que a melhor opção para cada critério está bem distribuída entre as alternativas de soluções, assim, para definir qual a melhor opção para atendimento do objetivo geral entre as alternativas de soluções realizou-se o cálculo de prioridade, cujo resultado é mostrado na Tabela 7, em que se multiplica o valor dos autovetores das alternativas de soluções em relação a cada critério pelo autovetor da matriz de comparação normalizada.

Tabela 7 – Prioridade

Peça	Prioridade	%
Guia Correia	0,29	29
Acoplamento	0,37	37
<i>Puleggia</i>	0,31	31
Engrenagem	0,017	1,7

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

Portanto, entre as peças selecionadas, a prioridade para testes de peças de manutenção para impressão 3D é o Pinhão de acoplamento, seguido pela *Puleggia*, Guia Correia e Engrenagem.

Para verificar a consistência das comparações entre os critérios determinados pela equipe do projeto, é necessário fazer o teste de inconsistência e confirmar se a importância dada a um critério em relação ao outro faz sentido quando são todos analisados juntamente.

Para o teste de inconsistência foi calculado o autovalor máximo, índice de consistência, taxa de consistência e índice de consistência aleatória apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Cálculos para teste de inconsistência

$\lambda_{\text{máx}}$	4,35
n	4
IC	0,12
IR	0,9
RC	0,13

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

O RC calculado é de 13% portanto, um valor aceitável, ou seja, houve consistência nas decisões na matriz de comparação, dessa forma, pode-se considerar a escolha da peça como correta.

A priorização das peças é fundamental para que peças corretas sejam escolhidas para teste, que de acordo com a equipe de desenvolvimento do projeto são as que têm maior impacto na produção.

4.3 Impressão 3D

O projeto na indústria de fios consistiu no estudo da viabilidade de utilizar tecnologias de impressão 3D para produção de peças de manutenção. As tecnologias testadas nas peças selecionadas foram FDM e SLS.

Inicialmente buscaram-se fornecedores de serviço de impressão na região noroeste do Paraná e a primeira tecnologia testada foi a impressora FDM *Desktop* de mesa aquecida, testada em duas impressoras diferentes. Após a análise das peças impressas nessas impressoras, buscaram-se fornecedores com tecnologias diferentes. As novas impressões foram realizadas em São Paulo com Impressora FDM Industrial e Impressora SLS.

Os materiais impressos foram o PLA (Poliácido Láctico), ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), Ulten 9085 (Liga Polieterimida) e o Nylon/FC (Nylon + Fibra de Carbono). As tecnologias, material utilizado e preenchimento são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Impressoras e materiais testados

Impressora	Material	Preenchimento
Impressora 1	PLA	40%
Impressora 2	PLA	40%
	PLA	100%
	ABS	100%
Impressora 3	Ulten 9085	100%
Impressora 4	Nylon/FC	100%

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

- Impressora 1: se trata de uma impressora FDM *desktop* com extrusão dupla, mesa aquecida, cujo diâmetro de filamento é de 1,75mm e tem precisão de $\pm 0,254$ mm;
- Impressora 2: é uma impressora FDM *desktop* de mesa aquecida, com diâmetro de filamento de 1,75 mm e precisão de $\pm 0,254$ mm;
- Impressora 3: se trata de uma impressora FDM industrial de mesa aquecida, a espessura da camada pode chegar a 0,330mm e a mesma tem precisão de $\pm 0,254$ mm;
- Impressora 4: impressora SLS industrial com resolução no eixo Z de 50 microns e nos eixos X e Y de 100 microns, e tolerância de $\pm 0,254$ mm.

As tecnologias de impressão utilizadas, bem como o material e preenchimento foram indicações dos fornecedores do serviço de impressão. As indicações realizadas partiram do contato com a peça modelo e vídeos e explicações sobre seu funcionamento.

A partir dos testes realizados, observou-se grande diferença entre as impressões 3D FDM Desktop e Industrial. Percebeu-se que nas impressões 3D FDM Industrial há maior exatidão nas dimensões das peças impressas, ou seja, a tolerância de erro na impressão é menor em relação à Desktop. O material utilizado na Impressora Industrial tem maior resistência à impactos e desgaste, além de possuir propriedades térmicas superiores aos materiais utilizados na Desktop.

A Impressora 3D SLS é uma tecnologia diferente das Impressoras 3D FDM, e traz diferentes possibilidades de utilização de materiais para impressão. Assim como as demais, a Impressora SLS também tem tolerância aos erros dimensionais da peça impressa, o que também prejudica a instalação das mesmas nos equipamentos.

4.4 Análise Mecânica das Peças de Manutenção

As peças que foram impressas são as mesmas da criterização realizada pelo método AHP, no entanto a prioridade de impressão dada a elas foi diferente da encontrada no método,

pois, quando a criterização pelo método AHP foi desenvolvida para este trabalho, as peças já haviam sido impressas pela equipe de desenvolvimento do projeto.

Cada uma dessas peças tem um desempenho de trabalho esperado e para isso devem atender à sua respectiva característica, que são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Características necessárias para as peças selecionadas

Peça	Tração	Dureza	Resistência à impacto	Tenacidade	Vibração	Alta Temperatura	Ajuste Justo
Acoplamento	x	x		x	x	x	x
<i>Puleggia</i>	x	x	x	x	x		x
Guia Correia	x	x	x				x
Engrenagem	x	x		x		x	x

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

Nota-se que as características necessárias em cada peça são variadas, no entanto, todas elas precisam de dimensões exatas devido ao encaixe no equipamento e seu material deve ter resistência à tração e dureza.

Realizou-se uma análise dimensional das peças que foram impressas a partir da medição da amostra (peça original) e das peças impressas utilizando paquímetro. As medidas foram realizadas diversas vezes, em dias diferentes e com instrumentos diferentes para diminuir as chances de erros do relatório.

a) Acoplamento

Peça que faz parte do equipamento *Open End*. Não foi desenvolvido impressão 3D da mesma. Um dos motivos foi que não havia programação de parada para manutenção desse item, outro ponto relevante é que o material da peça original é metal e devido às suas características de trabalho optou-se por não correr o risco de inserir um teste no equipamento pelos riscos de falha e dano a máquina. Portanto, não foi possível testá-la.

b) *Puleggia Motorizzata*

Utilizada na Maçaroqueira, foi impressa apenas uma vez na Impressora 2, utilizou-se como matéria prima o PLA e teve um preenchimento de 40%. Antes de ser colocada para teste no equipamento, realizaram-se todas as medidas comparativas entre o protótipo e a peça original. As comparações entre dimensões são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Medidas comparativas *Puleggia Motorizzata*

Dimensões Relevantes	Modelo (mm)	Protótipo (mm)	Diferença (mm)
D1	112,70	112,60	0,10
D2	37,65	37,20	0,45
D3	40,00	40,50	0,50
D4	34,40	35,00	0,60
D5	16,00	15,70	0,30
D6	5,00	4,80	0,20
D7	3,00	2,50	0,50
D8	101,30	101,10	0,20
Média			0,36

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

É possível observar que todas as dimensões apresentadas no protótipo diferem da peça modelo e que o item mais crítico foi a dimensão D7, com uma diferença de 0,5 mm. Essa diferença impediu que a peça fosse instalada no equipamento, o que impossibilitou seu teste pois a mesma exige uma precisão maior do que a oferecida pela impressora 3D utilizada.

c) Guia Correia

Peça da Conicaleira, cuja função é inverter o sentido de deslocamento do carro limpador viajante. A Guia Correia é formada por duas partes, apresentadas na Figura 4, que foram separadas para que fosse realizada a análise de suas dimensões.

Figura 4 – Partes que formam a Guia Correia

a) Parte móvel da Guia Correia



b) Parte fixa da Guia Correia



Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

No primeiro momento, a peça foi impressa duas vezes por diferentes fornecedores, uma em PLA com preenchimento de 40% impressa na Impressora 1 e outra em PLA com

preenchimento de 100% impressa na Impressora 2, ambas impressoras FDM Desktop com mesa aquecida, porém de diferentes marcas. Dessa forma, a Tabela 11 traz a comparação das dimensões entre a peça modelo e as duas impressões.

Tabela 11 – Comparação das dimensões da Guia Correia (PLA)

	Dimensões Relevantes	Modelo (mm)	PLA 40% (mm)	Diferença PLA 40% (mm)	PLA 100% (mm)	Diferença PLA 100% (mm)
Parte Móvel	D1	111,50	115,50	4,00	110,80	0,70
	D2	25,75	25,55	0,20	25,40	0,35
	D3	14,00	14,00	0,00	13,00	1,00
	D4	5,20	5,25	0,05	5,20	0,00
	D5	7,90	8,45	0,55	8,00	0,10
	D6	12,00	11,70	0,30	12,00	0,00
	D7	66,90	64,00	2,90	65,90	1,00
	D8	27,75	27,60	0,15	28,45	0,70
	D9	17,80	17,30	0,50	17,80	0,00
Média				0,96		0,39
Parte Fixa	D1	50,20	50,10	0,10	50,35	0,15
	D2	88,00	87,10	0,90	87,35	0,65
	D3	45,00	44,50	0,50	44,65	0,35
	D4	12,00	12,10	0,10	12,00	0,00
	D5	5,90	5,35	0,55	5,45	0,45
	D6	3,70	3,80	0,10	5,35	1,65
	D7	15,60	15,00	0,60	16,00	0,40
	D8	22,00	22,00	0,00	22,36	0,36
	D9	6,06	6,00	0,06	7,60	1,54
	D10	5,75	5,80	0,05	5,00	0,75
Média				0,29		0,68

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

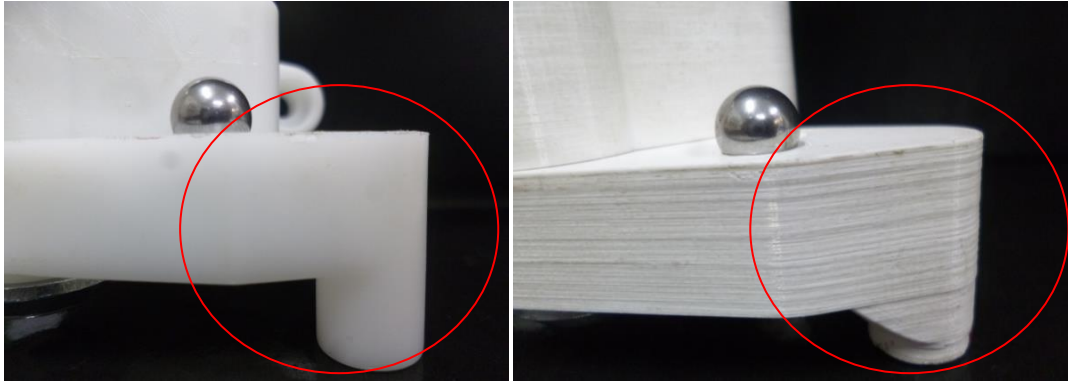
Nota-se que dentre as diferenças da peça impressa na Impressora 1, apenas 10% das dimensões são iguais à peça modelo e da peça impressa na Impressora 2, apenas 21% tem as mesmas dimensões da peça modelo.

Além das diferenças dimensionais, ambas as peças apresentaram desalinhamento entre a parte móvel e fixa. O desalinhamento é um problema para o funcionamento da peça no equipamento, no entanto o que impediu o teste das peças foi a diferença dimensional entre as impressões e a peça modelo, não sendo possível encaixá-las no equipamento.

Um ponto interessante a ser observado na impressão da Guia Correia foi a possibilidade de melhora no desenho da peça. Foi identificado pelo supervisor de manutenção o ponto onde a Guia Correia é danificada durante seu funcionamento, assim, foi realizado no

arquivo CAD uma melhoria no desenho da peça, com um reforço no ponto onde ocorrem as trincas, como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Ponto de melhoria na Guia Correia



Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

No segundo momento a Guia Correia foi novamente impressa, mas dessa vez utilizou-se a Impressora 3, que garante maior precisão na impressão e o material utilizado foi o Ulten 9085. Para a nova impressão foram mantidas as melhorias realizadas no desenho CAD para reforço da peça. A Tabela 12 apresenta a comparação entre as dimensões da peça modelo e as impressões em Ulten 9085.

Tabela 12 – Comparação das dimensões da Guia Correia (Ulten 9085)

	Dimensões Relevantes	Modelo (mm)	Ulten 9085 (mm)	Diferença Ulten 9085 (mm)
Parte Móvel	D1	111,50	111,25	0,25
	D2	25,75	25,70	0,05
	D3	14,00	13,90	0,10
	D4	5,20	5,35	0,15
	D5	7,90	8,10	0,20
	D6	12,00	12,00	0,00
	D7	66,90	71,00	4,10
	D8	27,75	28,60	0,85
	D9	17,80	18,00	0,20
Média				0,70
Parte Fixa	D1	50,20	50,60	0,40
	D2	88,00	88,10	0,10
	D3	45,00	45,00	0,00
	D4	12,00	12,20	0,20
	D5	5,90	5,50	0,40
	D6	3,70	2,70	1,00
	D7	15,60	13,40	2,20
	D8	22,00	22,20	0,20
	D9	6,06	7,85	1,79
	D10	5,75	5,30	0,45
Média				0,78

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

Apesar das diferenças dimensionais, as partes obtiveram alinhamento adequado e com alguns ajustes realizados pelo pessoal da manutenção, foi possível instalar a peça impressa na Conicaleira. Até o momento a mesma está funcionando há um mês, o que mostra que o material utilizado na impressão (Ulten 9085) é adequado para as características de trabalho dessa peça, apresentado na Tabela 10, e que nesse caso específico, as diferenças dimensionais causadas pela imprecisão da impressora, não tem grande interferência no funcionamento da Guia Correia impressa.

d) Engrenagem Helicoidal

A engrenagem, peça utilizada no Passador, apesar de ser a última na priorização do método AHP, foi a peça que teve mais impressões em diferentes tipos de impressoras e materiais, sendo que foi impressa em todas as quatro impressoras. Isso se deu pelo fato de a equipe do projeto acreditar que a engrenagem precisa atender a muitas características para um bom funcionamento e que dessa forma, seria possível avaliar diferentes tecnologias e materiais.

Foram realizados 4 testes com a engrenagem, cada um com uma peça diferente. A mesma foi impressa na Impressora FDM Desktop em material PLA e preenchimento de 40%, na Impressora FDM Desktop em ABS com preenchimento de 100%, em Impressora Industrial com Ulten 9085 com preenchimento de 100% e em Impressora SLS com Nylon/FC.

Assim como nas peças anteriores, foram realizadas comparações dimensionais entre a peça modelo e as impressas, apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparações dimensionais das Engrenagens Helicoidais

Dimensões Relevantes	Modelo (mm)	ABS 100% (mm)	Diferença ABS 100% (mm)	PLA 40% (mm)	Diferença PLA 40% (mm)	Ulten 9085 (mm)	Diferença Ulten 9085 (mm)	Nylon/FC (mm)	Diferença Nylon/FC (mm)
Diâmetro Interno	17,00	18,00	1,35	15,70	1,40	16,90	0,10	17,00	0,10
Diâmetro Externo	56,00	56,00	0,00	56,00	0,00	51,10	1,10	57,20	1,20
Largura (Chaveta)	5,30	5,50	0,20	5,45	0,20	4,90	0,40	5,20	0,10
Profundidade (chaveta)	2,70	2,00	1,25	1,45	1,30	2,50	0,20	2,45	0,30
Ressalto	25,00	25,00	0,40	25,20	0,40	25,10	0,30	24,80	0,00
Diâmetro da Cavidade	35,00	34,00	0,80	35,50	0,80	34,50	0,20	34,70	0,10
Profundidade Da Cavidade	2,00	2,00	0,00	2,00	0,00	2,05	0,05	2,00	0,00
Média			0,571		0,5857		0,335		0,257

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

Tanto a engrenagem impressa em PLA 40% quanto a impressa em ABS, apesar das diferenças dimensionais, puderam ser instaladas no equipamento, no entanto, com poucos segundos de funcionamento o Passador parou de funcionar pois seu modo de segurança foi ativado devido alguma avaria no equipamento. Foi identificado que a avaria se tratava das engrenagens, pois ambas as peças começaram a derreter e a apresentar rompimento em seus filetes, problema atribuído às diferenças dimensionais. Dessa forma foi reprovado tanto o material utilizado quanto a dimensão da peça.

A engrenagem impressa em Ulten 9085 não pode ser testada, devido às diferenças dimensionais, ou seja, a precisão da Impressora Industrial também não atendeu às necessidades do equipamento.

A engrenagem impressa em Impressora SLS, no material Nylon/FC pode ser instalada no Passador. Essa engrenagem funcionou por 3 horas e ao ser retirada não havia defeitos na mesma, indicando que o material estava resistindo às necessidades indicadas na Tabela 9, no entanto, devido às diferenças dimensionais houve interferência no sensor de análise da qualidade do material produzido no Passador, o que impediu que a engrenagem continuasse em teste, logo, a mesma foi reprovada devido às dimensões.

Nessa peça em específico pode-se avaliar a média das diferenças das dimensões do modelo e da peça impressa, para todas as tecnologias testadas, pois todas foram impressas a partir de um mesmo desenho CAD, e observou-se que o erro da Impressora FDM Industrial e da Impressora SLS são respectivamente 43% e 56% menor que na Impressora FDM *Desktop*.

4.5 Análise dos Resultados

Observa-se que um ponto crítico do mercado nacional, se tratando da impressão 3D para peças de manutenção, é a precisão da impressora, pois todas elas tem uma tolerância que na maioria dos testes fez com que a peça fosse reprovada e na única peça que foi possível instalar no equipamento, houve necessidade de ajustes. A Tabela 14 mostra os erros relativos de cada impressora em cada impressão de peça e mostra ainda o erro relativo médio de cada impressora.

A Tabela 14 mostra o erro relativo de cada tipo de impressora por peça impressa. Para se obter o erro relativo, foi dividido a diferença nas dimensões de cada medida pela dimensão da peça modelo, por fim foi feito uma média dos erros relativos de cada dimensão para cada uma das peças.

Tabela 14 – Erro relativo das impressoras

	Peça impressa	Custo da impressão	Erro relativo (%)	Erro relativo médio (%)
Impressora 1	Guia Correia	R\$ 800,00	2,28	5,72
	Engrenagem Helicoidal	R\$ 200,00	9,15	
Impressora 2	Guia Correia	R\$ 2450	5,85	6,02
	Engrenagem Helicoidal	R\$ 400,00	8,84	
	<i>Puleggia Motorizzata</i>	R\$ 250,00	3,37	
Impressora 3	Guia Correia	R\$ 1.400,00	5,56	4,36
	Engrenagem Helicoidal	R\$ 350,00	3,11	
Impressora 4	Engrenagem Helicoidal	R\$ 307,00	2,29	2,29

Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

Nota-se que dentre as impressoras FDM o menor erro relativo está na Impressora 3, que além do menor erro, ainda é a que teve capacidade de imprimir no material que foi aprovado (Ulten 9085 – Guia Correia).

A Impressora 4 é a que traz menor erro relativo, no entanto foi possível fazer impressão na mesma apenas uma vez, o que limita sua análise, além disso, apesar de o material ter reusado ao teste, a peça impressa também foi reprovada devido suas dimensões.

No caso de peças para manutenção, por menor que seja a imprecisão e a diferença entre as dimensões da peça modelo e a impressa, pode haver o impedimento de utilização dessas peças, tanto por falta de encaixe quanto por mal funcionamento no equipamento.

A variação dos custos das peças se deve tanto a diferença de materiais, quanto das tecnologias de impressão 3D utilizadas.

Também é necessário estudar e avaliar os tipos de materiais a serem utilizados na impressão, dependendo da utilização da peça, para que não haja problemas de desempenho durante seu funcionamento, como ocorrido com a Engrenagem Helicoidal impressa em PLA e ABS que derreteram durante o teste.

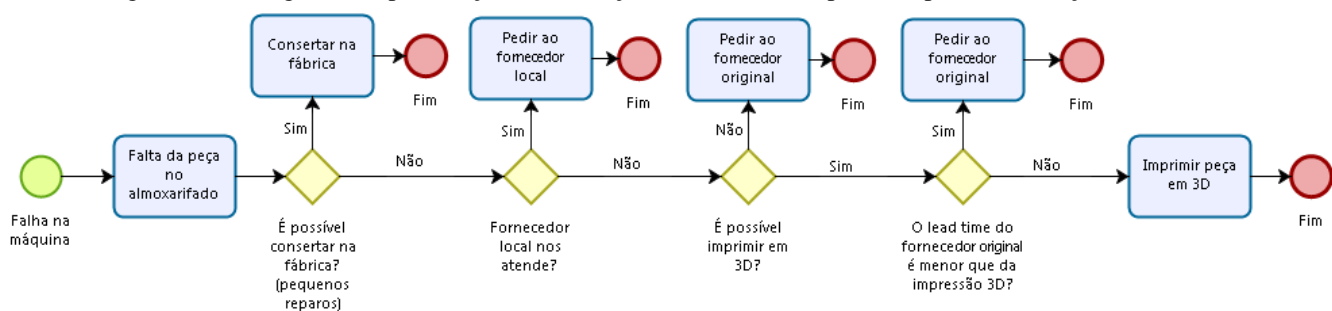
Avaliando a Guia Correia produzida na Impressora 3, que foi a única que permaneceu em teste, é possível observar as vantagens da utilização da impressão 3D. Na falta da Guia Correia original, a produção tem dano diário em 3.000 kg, além disso o tempo para aquisição da mesma é de 90 dias. Portanto, caso haja necessidade de manutenção dessa peça e não exista uma peça de reposição no estoque, a perda de produção total seria de 270.000 kg. Para a peça impressa, que teve um custo próximo da peça original com diferença de apenas R\$

319,00, o tempo de aquisição é de apenas 5 dias, totalizando uma perda de produção de 15.000 kg.

A diferença entre aguardar por uma Guia Correia original importada e uma peça impressa, sendo essa do fornecedor do projeto, gira em torno de 255.000 kg. Essa diferença representa 3% da produção anual de fios da indústria e é significativa se tratando do faturamento da linha de produção na qual a Conicaleira está inserida.

Apesar de ser uma tecnologia com diversos benefícios, a impressão 3D ainda não é uma preferência para substituição na aquisição das peças de manutenção na indústria de fios, devido à precisão da impressora, custo do serviço de impressão e incerteza quanto à resistência do material. Para tanto, a Figura 6 apresenta um fluxograma para priorização da utilização dos recursos disponíveis para aquisição de peças de manutenção em geral.

Figura 6 – Fluxograma de priorização da utilização dos recursos disponíveis para manutenção



Fonte: Elaborado pelos Autores (2018)

A Figura 06 apresenta as opções para aquisição de todas as peças de manutenção da indústria de fios em casos de emergência, onde não exista estoque da peça em questão e o *lead time* logístico do fornecedor seja elevado, fazendo com que o tempo de manutenção seja elevado, aumentando as perdas de produção.

Primeiramente é dada preferência pelo conserto na oficina da fábrica, depois se busca um fornecedor local, como terceira opção há o fornecedor original e por último, caso seja possível imprimir a peça, utiliza-se a impressão 3D. Para a priorização das opções em casos de emergência foi levado em conta o *lead time* de aquisição das peças em condição de uso, de forma que a primeira opção é o que tem menor *lead time*.

Das peças selecionadas para estudo, o Acoplamento e a Engrenagem Helicoidal podem ser usinadas em um fornecedor local, no entanto a *Puleggia* e a Guia Correia não tem fornecedor local de forma que possa substituir as peças originais, portanto devem ser adquiridas do fornecedor original ou impressas.

5. Considerações Finais

A proposta desse trabalho foi determinar critérios de priorização de peças de manutenção de equipamentos para prototipagem utilizando o processo de produção em impressão 3D. Dessa forma verificaram-se os tipos de prototipagem, conhecendo-se melhor a manufatura aditiva. Buscou-se esclarecer quais as principais tecnologias de impressão 3D e seus materiais, e foi constatado que existem materiais de impressão 3D desenvolvidos para aplicação industrial, que requer características diferenciadas em relação aos materiais de prototipagem para visualização.

Selecionou-se peças do almoxarifado que, a partir do estudo realizado sobre a tecnologia de impressão 3D, pudessem ser impressas e testadas, para isso utilizou-se o método de análise hierárquica. Essa priorização foi necessária, pois os recursos financeiros foram limitados, e por se tratar de um estudo de uma tecnologia nova com aplicação que não é comum para fornecedores de serviço de impressão 3D, foi necessário realizar testes para avaliação da tecnologia, o que gerou custos. Por fim, acompanhou-se o desempenho da peça no equipamento, avaliando tanto o material utilizado, quanto a tecnologia de impressão 3D.

O trabalho se trata de uma pesquisa ação, e devido às limitações financeiras da indústria em questão, foram selecionadas quatro peças para impressão 3D e posterior análise, de forma que a tecnologia e materiais de impressão fossem avaliados. Utilizou-se o método AHP para a priorização das peças selecionadas de acordo com os critérios que a equipe julgou ter maior interferência na escolha da peça ideal para teste. Os critérios foram definidos pela equipe por terem grande influência, direta ou indiretamente, na produção da indústria. São eles *i) Perda de produção, ii) Lead time de aquisição, iii) Tecnologia obsoleta e iv) Custo da peça original.*

Tal método mostrou-se eficaz não só na demonstração da prioridade das peças de manutenção para impressão, mas principalmente quanto à clarificação do nível de importância dos critérios avaliados que por se tratar de critérios genéricos, podem ser aplicados a qualquer indústria em que se queira testar outros métodos de fabricação para peças de manutenção, pois se obteve a definição de uma metodologia consistente.

Na fase de análise e avaliação das peças constatou-se que as tecnologias de impressão 3D nacionais ainda tem grande tolerância nas dimensões de impressão, que apesar de ser insignificante para tantos usos, como artigos para demonstração, para peças de manutenção

ainda são tolerâncias que excedem à capacidade da máquina, visto que a mesma exige peças bem ajustadas.

Por meio das análises das impressões e os resultados dos testes, observa-se que apenas 12,5% das peças impressas realmente funcionaram de forma adequada, ainda assim, essa peça precisou de ajustes para ser instalada no equipamento. A seleção e impressão de apenas algumas peças limitou a visão sobre a impressão 3D aos resultados de poucos testes. Além disso, o Noroeste do Paraná não possui grandes prestadores de serviço de impressão 3D, o que atrasou os conhecimentos sobre a tecnologia adquiridos a partir de visitas técnicas.

Observou-se também que existem diversos materiais disponíveis no mercado e que podem atender a várias necessidades, no entanto para cada aplicação utilizam-se materiais diferentes e suas características devem ser estudadas antes da impressão para que a peça tenha um bom desempenho e não seja danificada durante o seu funcionamento. Ainda, diversos materiais são desenvolvidos tanto internacionalmente como no Brasil, ou seja, futuramente haverá materiais para aplicação em situações específicas, como em peças aeroespaciais, por exemplo.

Existem também várias tecnologias de impressão, desde impressoras que podem ser utilizadas em casa a impressoras industriais, porém todas elas têm uma tolerância, nenhuma delas oferece exatidão nas dimensões da impressão, que na maioria dos casos das peças para manutenção, é um item essencial e a falta de exatidão nas dimensões impede o uso da peça impressa. Dessa forma, o uso de peças de manutenção impressas em 3D ainda é limitado, pois se tratam de peças que precisam atender a diversas características para seu bom funcionamento, além de precisão e exatidão nas suas dimensões, itens que não são encontrados nas tecnologias nacionais de impressão 3D.

No entanto, a impressão 3D é uma tecnologia de qualidade avançada em países desenvolvidos, e que a cada dia se torna melhor, que possibilita a substituição de meios de produção convencionais com a mesma qualidade e menor custo. Dessa forma, é viável o estudo das novas tecnologias e materiais de impressão 3D para peças de manutenção quando a impressão se tornar mais acessível, tanto quanto ao custo de aquisição da impressora ou do serviço de impressão, quanto quando o acesso a diferentes tecnologias se tornarem mais fácil, de forma que os testes possam ser realizados com diferentes materiais e tecnologias para avaliação da melhor opção.

O estudo colaborou na aquisição de conhecimento sobre impressão 3D e que essa pode trazer diversos benefícios à manufatura como personalização dos itens, flexibilidade da produção sem depender de diferentes ferramentas, eliminação do desperdício de material por

se tratar de uma tecnologia aditiva, e ainda torna viável a produção em baixa escala e que é possível a utilização dessa tecnologia na indústria, mesmo que ainda restrita quando se trata de impressão para peças de manutenção, essa tecnologia atende perfeitamente quando se trata de prototipagem para visualização de modelos.

Assim como em países desenvolvidos, acredita-se que em pouco tempo a tecnologia de impressão 3D que satisfaça às necessidades de setores industriais também chegará ao Brasil, tornando essa opção mais viável em relação a custo e confiabilidade de materiais e atendimento das dimensões do desenho em CAD.

Para a indústria de fios o conhecimento adquirido foi essencial para encontrar uma nova alternativa na aquisição de peças a ser novamente estudada em pouco tempo. Já a criterização utilizada com o método AHP, pode ser utilizada em qualquer indústria que queira selecionar peças para testar novos meios de produzir suas peças de manutenção, o que contribui para estudos de qualquer empresa.

Referências

BASKERVILLE, R. L.; STAGE, J. **Controlling Prototype Development through Risk Analysis**. MIS Quarterly, Vol. 20, No. 4, p 481-504, 1996.

BERMAN, B. **3-D printing: The new industrial revolution**. Business Horizons, No. 55, p 155-162, 2012.

D'AVENI, R. **The 3D Printing revolution**. Harvard Business Review, 93 (3), p 41-48, 2015.

ELWANY, A. H. GEBRAEEL, N. **Sensor-driven Prognostic Models for Equipment Replacement and Spare Parts Inventory**. IIE Transactions, 40:7, 629 – 639, 2008.

ESPÍNDOLA, D. et al. (2012). **Integrating intelligent maintenance systems and spare parts supply chains**. IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Bucharest. Elsevier, p. 1017-1022, 2012.

FILIPPINI, R.; SALMASO, L.; TESSAROLO, P. **Product Development Time Performance: Investigating the Effect of Interactions between Drivers**. Journal of Product Innovation Management . Review 21: 199-214, 2004.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, p 42, 2002.

HUA, Z. S.; ZHANG, B.; YANG, J.; TAN, D. S. **A New Approach of Forecasting Intermittent Demand for Spare Parts Inventories in the Process Industries**. Journal of the Operational Research Society, v. 58, p. 52-61, 2007.

- KOKSAL, M. H. **The differences between successful and unsuccessful new manufacturing products in international markets.** Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics, Vol 26 p 21-38, 2014.
- LIM, J. S.; SHARKEY, T. W.; HEINRICHS, J. H. **Strategic impact of new product development on export involvement.** European Journal of Marketing, Vol 40, p 44-60, 2006.
- LIPSON, H. **The Shape of Things to Come: Frontiers in Additive Manufacturing.** Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering. Symposium, 2011.
- LYONS, B. **Additive Manufacturing in Aerospace: Examples and Research Outlook.** Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering. Symposium, 2011.
- MARITNS, F. G.; COELHO, L. S. **Aplicação do método de análise hierárquica do processo para o planejamento de ordens de manutenção em dutovias.** GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Ano 7, n°1, jan-mar, p. 65-80, 2012.
- MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B.; XAVIER, A. F.; CAMPOS, D. F. **Pesquisa-ação na engenharia de produção: proposta de estruturação para sua condução.** Revista Produção, v.22, n1, p. 1-13, 2012.
- NAKAJIMA, S.; SHINYA, M.; YUASA, T.; SHIRAIISHI, M. **An Optimal Model Subdivision Method for 3D FDM Printers.** ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol. 3, p 40 – 46, 2015.
- ÖZCEYLAN, E.; ÇETINKAYA, C.; DEMIREL, N.; SABIRLIOGLU, O. **Impacts of Additive Manufacturing on Supply Chain Flow: A Simulation Approach in Healthcare Industry.** Logistics, doi:10.3390/logistics2010001, 2017.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico.** 2. Ed. Rio Grande do Sul: Universidade Feevale, 2013.
- ROZENFELD, H. et al. **Desenvolvimento de Produto: uma referência para melhoria do processo de projeto.** São Paulo: Editora Saraiva, 2006.
- SAATY, T. L. **How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process.** European Journal of Operational Research, 48, p. 9-26, 1990.
- SAATY, T. L. **Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks.** Pittsburgh: RWS Publications, 2005.
- SHAHZAD, K.; DECKERS, J.; KRUTH, J. P.; VLEUGELS, J. **Additive manufacturing of alumina parts by indirect selective laser sintering and post processing.** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, p 1484 – 1494, 2013.

SILVA, F. **Comparando Impressão 3D SLA – Laser vs DLP**. 2017. Disponível em <<https://www.astroscience3d.com/single-post/2017/07/10/Comparando-Impress%C3%A3o-3D-SLA---Laser-vs-DLP>>. Acesso em: 06/05/2018.

Stratasys. **Moldando Corações Jovens**. Disponível em <<http://www.stratasys.com/br/resources/case-studies/medical/nicklaus-childrens-hospital>> - Acessado em 04/10/2018.

STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Technology Introduction and Business Implications**. Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering. Symposium, 2011.

TAKAGAKI, L. K. **Tecnologia de Impressão 3D**. Revista Inovação Tecnológica, São Paulo, v.2 n 2, p.28-40, 2012.

TI Inside Online Services. **Centro de Manutenção Ferroviária da Siemens Usará Peças Impressas em 3D**. Disponível em < <http://tiinside.com.br/tiinside/services/24/09/2018> > - Acessado em 04/10/2018.

UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. **The rapid prototyping technologies**. *Assembly Automation*, Vol. 23, p 318 – 330, 2003.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. **Product Design and Development**. 5. Ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

VARGAS, R. V. **Utilizando a Programação Multicritério (Analytic Hierarchy Process – AHP) para Selecionar e Priorizar Projetos na Gestão de Portifólio**. PMI Global Congress, 2010.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. 1. Ed. São Paulo: Editora Blücher, 2007.

WHEELWRIGHT, S. C.; CLARK, K. B. **Accelerating the Design-build-test Cycle for Effective Product Development**. *International Marketing Review*, Vol. 11, p.32-46, 1994.

WOHLERS, T.; GORNET, T. **History of Additive Manufacturing**. Wohlers Report, 2014.

WOLLMANN, D.; STEINER, M. T. A.; VIEIRA, G. E.; STEINER, P. A. **Utilização da técnica AHP para análise da concorrência entre operadoras de planos de saúde**. GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Ano 6, nº4, out-dez, p. 111-124, 2011.

YEH, T. M.; PAI, F. Y.; YANG, C. C. **Performance improvement in new product development with effective tools and techniques adoption for high-tech industries**. *Quality and Quantity*, 2008

YEH, C. C.; CHEN, Y.F. **Critical success factors for adoption of 3D printing.** Department of Business Administration, National Taipei University of Business, No. 321, 2017.