



ISSN: 2447-5580

Disponível em: <http://periodicos.ufes.br/BJPE/index>



ARTIGO ORIGINAL

OPEN ACCESS

FMEA, CFD e FEA PARA OTIMIZAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS COM PROTOTIPAGEM 3D EM PEÇA MECÂNICA AUTOMOTIVA AFTERMARKET - Parte A: FMEA

FMEA, CFD and FEA TO OPTIMIZE THE DEVELOPMENT OF PRODUCTS WITH 3D PROTOTYPING IN AUTOMOTIVE MECHANICAL PART AFTERMARKET - Part A: FMEA

André Luís de Oliveira Cavaignac¹, Luan Henrique Varão Silva², Rúben Sousa Júnior^{3*}, Edilson Morais Lima e Silva⁴, & Ricardo Jorge Cruz Lima⁵

¹4 Universidade Ceuma. ¹⁵ Universidade Federal do Maranhão. ² Universidade da Beira Interior. ³ Universidade Federal do Tocantins. ⁴ Universidade Federal do Pará. ¹*andreluiscavaignac@gmail.com ² varao.silva@ubi.pt ³ engruben@gmail.com ⁴ edilson060145@ceuma.com.br ⁵ ricardo.lima.ufma@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido em: 12.05.2020

Aprovado em: 05.08.2020

Disponibilizado em: 10.08.2020

PALAVRAS-CHAVE:

Prototipagem 3d; FMEA; FEA; CFD

KEYWORDS:

3d prototyping; FMEA; FEA; CFD

*Autor Correspondente: Cavaignac, A. L. de O.

RESUMO

A área de manufatura aditiva surge como ferramenta poderosa para o uso em projetos de desenvolvimento de produtos – PDP, e em processos fabris de pequena escala e alta especificidade. Contudo, fatores como longo tempo de impressão, necessidade de retrabalho em lay-out de protótipos e a necessidade de novas impressões mostram que o processo de PDP com prototipagem 3d ainda tem pontos a serem melhorados. Neste trabalho foi proposto o uso do *failure modes and effects analysis* (FMEA) integrado com o *occupational safety* FMEA (OS-FMEA), em conjunto com aplicação de *computational fluid dynamics* (CFD) e *finite elements analysis* (FEA), para otimizar o processo de desenvolvimento de uma peça mecânica automotiva para o mercado aftermarket, fabricada através de impressão 3d. Para tal, o presente trabalho usou como peça-teste uma flange adaptadora para substituição de carburadores em automóveis de coleção. A partir da aplicação de ferramentas iniciais de PDP foi concebido um conceito inicial do produto e a elaboração do primeiro modelo em ambiente CAD (*computer-aided design*). Este modelo inicial serviu para a aplicação do FMEA/OS-FMEA para a identificação e correção de possíveis falhas no modelo. Após as melhorias aplicadas e a redução de todos os *risk priority*

numbers (RPN) obtidos, foi realizada a impressão em manufatura aditiva do modelo definido. A partir do uso da metodologia FMEA+CFD+FEA foi possível obter uma peça viável em apenas uma impressão, mostrando a eficiência do método em otimizar a prototipagem.

ABSTRACT

The additive manufacturing area emerges as a powerful tool for use in product development projects - PDP, and in small scale and high specificity manufacturing processes. However, factors such as long printing time, the need to rework prototype layouts and the need for new prints show that the PDP process with 3D prototyping still has points to be improved. In this work it was proposed to use failure modes and effects analysis (FMEA) integrated with occupational safety FMEA (OS-FMEA), together with the application of computational fluid dynamics (CFD) and finite elements analysis (FEA), to optimize the process development of an automotive mechanical part for the aftermarket market, manufactured using 3d printing. To this end, the present work used as a test piece an adapter flange to replace carburetors in collection automobiles. From the application of initial PDP tools an initial product concept was conceived and the first model was developed in a CAD (computer-aided design) environment. This initial model served for the application of FMEA / OS-FMEA for the identification and correction of possible flaws in the model. After the improvements applied and the reduction of all risk priority numbers (RPN) obtained, printing was carried out on additive manufacturing of the defined model. Using the FMEA+CFD+FEA methodology, it was possible to obtain a viable part in just one print, showing the efficiency of the method in optimizing prototyping.



1 INTRODUÇÃO

O mercado de peças e acessórios automotivos brasileiro tinha em 2017 um faturamento de 67 bilhões de reais (MENDES, 2019). Contudo, tem sofrido reduções consecutivas de faturamento desde então, principalmente devido à redução das vendas para montadoras de automóveis (10,4%) e exportação (em reais, 11,3%; em dólares 22%) e se encontra com o uso da capacidade instalada em 69%. Na contramão da tendência de queda, o nicho de peças para reposição cresceu 2,9% no mesmo período (Sindipeças, 2020). A capacidade de inovação do setor é definitiva para a capacidade competitivas das empresas, onde o desenvolvimento de novos produtos de forma rápida e eficiente é fundamental para atender um catálogo de reposição de peças sempre com novos modelos de automóveis.

1.1 A PROTOTIPAGEM 3D

A possibilidade de manipular uma peça desenhada em um ambiente computacional do tipo CAD (*computer-aided designs*), permite a análise completa do desenho do projeto, a implementação de aperfeiçoamentos necessários e a identificação de interferências funcionais, incluindo a possibilidade de movimentação de peças para observar sua montagem ou mesmo o funcionamento do mecanismo projetado (Gomes, & Wiltgen, 2020). Entretanto, foi a partir da idéia de unir os projetos desenhados em CAD com as máquinas de fabricação mecânica capazes de executar a construção/usinagem de peças com informações vindas de desenhos/ modelos e/ou códigos computacionais que o caminho para a fabricação de protótipos começou a se tornar mais viável e rápida (Wiltgen, 2019).

A impressão 3D está se tornando uma técnica bastante utilizada na fase do desenvolvimento do projeto, em que os produtos são produzidos diretamente através de um modelo computacional, o que elimina o uso de ferramentas, diminui o tempo e os custos da produção (Ferreira et al., 2016). A necessidade de aumentar a velocidade de criação e implementação de produtos tem feito da manufatura aditiva um aliado no desenvolvimento de novos produtos e sua utilização na indústria, os quais vêm crescendo gradualmente nos últimos anos e gerando inovações (Langefeld, 2017; Thomas; Venkat, 2016; Briantais, 2017).

A manufatura aditiva (MA) surgiu na década de 80 (Calignano, et al., 2017; Wiltgen, 2019) impulsionada pelo CAD, que permitiu o projeto e a modelagem de peças mecânicas de forma mais eficiente e rápida (Huang, et al., 2013), sendo que estas podem ser produzidos em pequena escala (Pipes, 2010). Esta tecnologia ainda está focada em indústrias e processos com baixo volume produtivo e de distribuição, mas demonstra grande potencial de expansão e igualmente elevada capacidade para modificar profundamente todo o ciclo da cadeia de produção e fornecimento de produtos (Mendes, 2017).

Takagaki (2012) comenta que com o uso da tecnologia de impressão 3D é possível criar protótipos praticamente em tempo real e com custos aceitáveis, possibilitando a realização de testes em relação à forma, ergonomia e aplicação física do protótipo físico de forma prática e eficiente. A prototipagem rápida permite a elaboração de métodos de desenvolvimento de produtos, sendo este realizado em etapas, permitindo a interação de diversas áreas como:



planejamento, desenvolvimento e execução, tendo como principal foco o desenvolvimento de componentes funcionais, protótipos e formas de objetos em um curto período de tempo, e respeitando as especificações exigidas para o produto final (Volpato, 2017).

De acordo com Seguin (2011), as impressoras 3D apresentam algumas desvantagens na sua aplicação, como: (i) manutenção das mesmas; (ii) falta de mão-de-obra especializada no serviço; (iii) limitação de materiais utilizáveis; (iv) acabamento inferior quando comparado com outros métodos fabris e (v) altos custos de produção. Uma das principais limitações é a escassez de opções para o uso de materiais metálicos, pois existem sete tipos de processo de manufatura aditiva, mas apenas quatro são aplicadas a metais (Astm, 2019).

Com isso, observa-se que os entre os desafios para o futuro ainda estão à redução de custos, a diminuição de estoques, ou seja, as peças devem ser produzidas na medida em que surge a demanda para as mesmas; e a produção de peças no material requerido, com as especificações necessárias e com as mesmas características mecânicas das peças originais (Ferreira, et al., 2016).

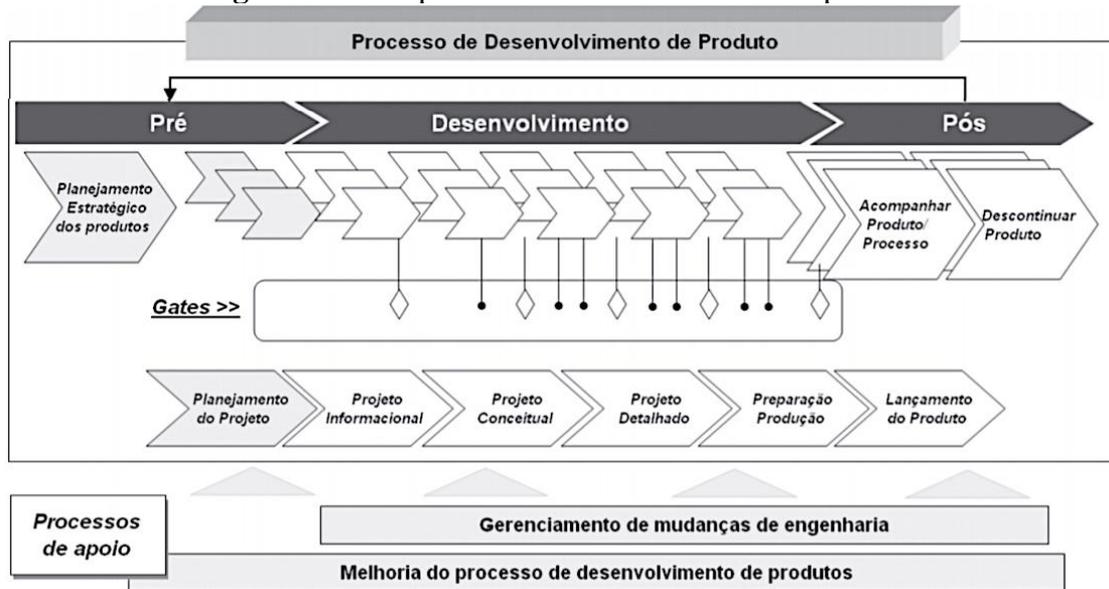
1.2 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

O processo de desenvolvimento de produto (PDP) é composto por etapas que evoluem no tempo e que integram ferramentas, métodos e tecnologias capazes de auxiliar na redução do tempo e dos custos de desenvolvimento. O design for manufacture and assembly (DFMA), o quality function deployment (QFD) são exemplos de ferramentas utilizadas no PDP. O computer aided design (CAD), o computer aided manufacture (CAM), a prototipagem virtual (PV) e a prototipagem física (PF) também podem ser citados como exemplos de tecnologias utilizadas no PDP. (Da Silva, & Kaminski, 2011)

De acordo com o modelo de referência de Rozenfeld, et al., (2006) o processo de desenvolvimento de produtos é composto por três macro fases denominadas de pré-desenvolvimento; desenvolvimento e pós-desenvolvimento. As três macro fases estão subdivididas nas seguintes etapas: (i) planejamento estratégico dos produtos; (ii) planejamento do projeto; (iii) projeto informacional; (iv) projeto conceitual; (v) projeto detalhado; (vi) preparação para produção; (vii) lançamento do produto; (viii) acompanhamento do produto/processo; (ix) descontinuar o produto. Na figura 1 é possível associar as etapas de desenvolvimento com as três macro fases do PDP.



Figura 1. As etapas de desenvolvimento de um produto



Fonte: Rozenfeld, et al., 2006. Adaptado.

Nas etapas iniciais do PDP onde se tem diferentes concepções, formas, análise ergonômica e outras variáveis, vários tipos de representações tridimensionais do produto são utilizadas como, por exemplo, maquetes, modelos volumétricos, mock-ups, modelos de apresentação entre outros (Volpato, 2017). Com a evolução do desenvolvimento do produto se faz necessário o uso de diferentes protótipos físicos, que evoluem juntamente com o desenvolvimento do produto (Da Silva, & Kaminski, 2011). Nesse sentido, a prototipagem assistida com a manufatura aditiva pode reduzir o custo e o tempo de desenvolvimento de produtos, tornando as empresas que adotarem este processo mais competitivas no mercado (RELVAS et al., 2012).

1.3 FMEA COMO FERRAMENTA DE PDP

Um dos métodos comumente utilizados na análise de falhas é o FMEA (*failure mode and effect analysis*), que é amplamente descrito na literatura (Helman, & Andery, 1995). Ford (2011) descreve o FMEA como um grupo sistematizado de atividades que tem a intenção de: (i) reconhecer e avaliar falhas em potencial de um produto ou serviço e os seus efeitos; (ii) Identificar ações que podem eliminar ou reduzir as chances da ocorrência da falha em potencial e (iii) documentar o processo. Seu objetivo básico é identificar os modos de falha, suas causas básicas, seus efeitos, e qual o impacto desses efeitos no produto final. Uma vez estabelecida a relação entre a falha, suas causas e seus efeitos, são determinados índices que avaliam a probabilidade de ocorrência da falha, a gravidade de seus efeitos e a capacidade de detectar-se a falha e bloqueá-la antes do seu efeito ser percebido pelo cliente (Vanni, et al., 1998).

A partir de 1960, conceitos do FMEA foram introduzido pela “*National Aeronautics and Space Administration*” (NASA) e foi certificado para uso nos programas Viking, Voyager, Magella e Galileo, focado a análise de itens de hardware para determinar falhas que contribuem para a falta de confiabilidade do sistema e problemas de segurança da tripulação



de suas missões. Em 1967 O FMEA foi adotado pela “*Society for Automotive Engineers*” (SAE) que foi amplamente utilizado na aviação civil. A partir de 1970 o FMEA começou a ser amplamente usado nas mais diversas indústrias no setor de engenharia (Banghart, et al., 2018). O seu maior destaque se deu na indústria automobilista, sendo introduzida pela *Ford Motor Company* como processo de melhoria contínua para identificação e minimização das falhas em potenciais no seu sistema de produção.

Segundo Stamatis (2003), existem três tipos principais de FMEA: a) FMEA de sistema; b) FMEA de produto; e c) FMEA de processo. FMEA de sistema (ou conceito) é utilizado para avaliar as falhas em sistemas nos estágios iniciais de conceituação e projeto. Enfoca as falhas do sistema em relação às suas funcionalidades e no atendimento das expectativas dos clientes, ou seja, está diretamente ligado à percepção do cliente em relação ao sistema. FMEA de produto é utilizado para avaliar possíveis falhas no projeto do produto antes da sua liberação para a manufatura. (Fernandes, & Rebelato, 2006)

O FMEA permite uma hierarquia de riscos, priorizando os modos de falha de acordo com um coeficiente chamado número de prioridade de risco ou RPN. Este número é um resultado da multiplicação de três índices independentes - severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D) - e variam de 1 a 10, da melhor realidade para a pior (Stamatis, 2003).

Severidade é a classificação que indica a gravidade de uma consequência possível no modo potencial de uma falha. Classificando a gravidade da falha de 1 a 10, partindo de uma consequência sem danos até danos catastróficos ou irreparáveis. A tabela 1 mostra os índices FMEA para severidade (S) de 1 a 10, relacionados com uma escala qualitativa e com a descrição de “potenciais consequências da falha” (Stamatis, 2003).

Tabela 1. Escala de severidade para processos ou serviços.

| Índice | Escala Qualitativa | Potenciais Consequências da Falha |
|--------|--------------------|-------------------------------------|
| 1 | Menor/Secundária | Falha não tem impacto real |
| 2 e 3 | Baixa | Falha quase insignificante |
| 4 e 6 | Moderada | Falha apresenta algum incômodo |
| 7 e 8 | Elevada | Falha tem efeito direto na operação |
| 9 e 10 | Crítica | Falha com impacto real na segurança |

Fonte: Stamatis (2003, adaptado).

A ocorrência no FMEA é a estimativa da frequência ou probabilidade de ocorrência do modo de falha. O melhor método para determinar o seu valor é através do uso de dados reais do processo, no entanto, no caso onde não há dados anteriores para avaliação podem ser atribuídos escalas qualitativas baseado na experiência dos operadores (Mcdermott, et al., 2009). A tabela 2 contém os índices FMEA propostos por Stamatis, (2003), e *Ford Company*, (2011), relacionados com uma escala qualitativa e uma escala estatística de frequência – que pode ser usada quando o processo de desenvolvimento de produto utiliza de repetições de amostragens suficientes para tal.



Tabela 2. Índice de ocorrência.

| Índice | Escala qualitativa | Frequência | |
|--------|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| 1 | Muito baixa | <= 1 em 1.000.000 | 0 - 0,0001% |
| 2 | Baixa | > 1 em 1.000.000 e <= 1 em 20.000 | 0,0001% - 0,005% |
| 3 | Baixa | > 1 em 20.000 e <= 1 em 4.000 | 0,005% - 0,025% |
| 4 | Moderada | > 1 em 4.000 e <= 1 em 1.000 | 0,025% - 0,1% |
| 5 | Moderada | > 1 em 1.000 e <= 1 em 150 | 0,1% - 0,675% |
| 6 | Moderada | > 1 em 150 e <= 1 em 80 | 0,675% - 1,25% |
| 7 | Alta | > 1 em 80 e <= 1 em 40 | 1,25% - 2,5% |
| 8 | Alta | > 1 em 40 e <= 1 em 20 | 2,5% - 5% |
| 9 | Alta | > 1 em 20 e <= 1 em 10 | 5% - 10% |
| 10 | Muito alta | > 1 em 10 | >10% |

Fonte: Stamatis (2003, adaptado). Ford 2011. Adaptado

Detecção é a dificuldade de fazer com que a falha seja detectada antes que ocorra o modo de falha. Para a área de manutenção, conceitua-se a probabilidade de detecção entre muito baixo e muito alto, relacionando os conceitos de 1 a 10 com a probabilidade de o defeito ser detectado (Stamatis, 2003; Mcdermott, et al., 2009). A tabela 3 contém os índices FMEA para detecção (D) relacionados com uma escala quantitativa e a descrição da relação entre medidas de controle e probabilidade de detecção da falha antes que ela aconteça.

Tabela 3. Índice de detecção.

| Índice | Escala Qualitativa | Detecção |
|--------|--------------------|---|
| 1 | Muito elevada | É quase certo que as medidas de controle irão detectar a existência da falha |
| 2 a 5 | Elevada | As medidas de controle têm uma grande probabilidade de detectar a existência da falha |
| 6 a 8 | Moderada | As medidas de controle poderão detectar a existência da falha |
| 9 | Baixa | As medidas de controle têm uma baixa probabilidade de detectar a existência da falha |
| 10 | Muito baixa | É quase certo que as medidas de controle não irão detectar a existência da falha |

Fonte: Stamatis (2003).

Com a obtenção do valor numérico para a severidade, ocorrência e detecção é determinado então o “*Risk Priority Number*” (RPN) que é composto pelo produto dos três fatores do FMEA (MACDERMOTT et al., 2009) :

$$RPN = S \times O \times D$$

Este valor é o responsável por dar uma classificação numérica aos modos de riscos, assim é possível criar uma lista de priorização dos riscos, para então serem determinadas novas medidas de controle e serem aplicadas ações corretivas. A tabela 4 mostra a relação entre as magnitudes de RPN obtidos e o grau de urgência das medidas de controle (Stamatis, 2003).



Tabela 4. Valorização de riscos pelo RPN.

| Definição do Grau de Risco/Criticidade | | Grau de Urgência das Medidas |
|--|------------------|--|
| RPN < 40 | Menor/Secundário | Devem ser tomadas medidas de melhoria sem caráter de urgência |
| 40 <= RPN <= 100 | Moderado | Devem ser tomadas medidas logo que possível para se diminuir a probabilidade de ocorrer maior degradação |
| 100 <= RPN < 200 | Elevado | Devem ser tomadas medidas urgentes para se eliminar as causas |
| RPN >= 200 | Crítico | Requer ação imediata para se eliminarem as causas |

Fonte: Stamatis (2003, adaptado).

Através da tabela 4 é então possível determinar o grau de risco, que pode ser desde menor/secundário até o nível crítico. STAMATIS (2003), ainda sugere que para uma confiança acima de 95%, o valor máximo do RPN deve ser menor que 50, logo que 50 representa 95% do maior valor possível de ser obtido pelo RPN ($S \times O \times D = 10 \times 10 \times 10 = 1000$).

Por consequência, o FMEA faz parte de um sistema de qualidade compreensivo. Por mais que possa ser efetivamente aplicado sem a necessidade de outros métodos, seus resultados somente podem ser maximizados com sistemas para conduzir, suportar e implementar melhorias que resultam do FMEA. Sem estes sistemas para prover informações, o FMEA tende a tornar-se baseado em opiniões em contrapartida dos fatos (Macdermott, et al., 2009).

Em trabalhos recentes, o FMEA é usado para a identificação e priorização de risco ao usuário do processo ou sistema. Estudos mais recentes implantaram o FMEA para segurança ocupacional com a utilização da tabela de referência de índices S, O e D, proposta por Cavaignac & Uchoa (2018), e pontuaram o mínimo na adversidade de escolha dos índices se tornou menos subjetiva (Santos, et al., 2019; Dias Júnior, & Cavaignac, 2019; Jorge, et al., 2019, Mota, & Cavaignac, 2019; Pacheco, et al., 2019)

A tabela 5 é proposta por Cavaignac & Uchoa, (2018), como ferramenta de referência rápida aos profissionais que elaboram, executam e pesquisam sobre o tema de segurança do trabalho, com o intuito de diminuir a dificuldade da utilização do FMEA relatado por Laurenti, et al., (2012).

Tabela 5. Tabela de referência de índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D)

| Severidade (S) | | Ocorrência (O) | | Detecção (D) | |
|----------------|---|----------------|---------------------------------|--------------|--|
| Índice | Natureza da severidade | Índice | Natureza da ocorrência (O) | Índice | Método de detecção |
| 1 | Sem impacto real | 6 | Impacto sofrido | 1 | Inspeção Visual |
| 2 | Trauma irrelevante | 5 | Queda com diferença de nível | 2 | Aplicação de checklist/sequência de testes antes da tarefa |
| 3 | Trauma que requer primeiros socorros | 5 | Impacto contra | 3 | |
| 4 | Incapacidade temporária sem afastamento | 5 | Esforço excessivo ou inadequado | 4 | |
| 5 | Incapacidade temporária com afastamento curto | 5 | Prensagem ou aprisionamento | 5 | |
| 6 | Incapacidade temporária com afastamento longo | 5 | Queda em mesmo nível | 6 | |
| 7 | Incapacidade permanente parcial | 4 | Exposição ao ruído | 7 | |



Citação (APA): Cavaignac, A. L. de O., Silva, L. H. V., Sousa Júnior, R., Silva, E. M. L. e, & Lima, R. J. C. (2020). FMEA, CFD e FEA para otimização do desenvolvimento de produtos com prototipagem 3d em peça mecânica automotiva *aftermarket* - Parte A: FMEA. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 6(5), 74-97.

| | | | | | |
|----|-------------------------------------|---|---------------------------------|----|--|
| 8 | Incapacidade permanente total | 4 | Contato com substância nociva | 8 | Inspeção instrumental/testes mecânicos |
| 9 | Óbito de envolvidos no processo | 4 | Choque elétrico | 9 | |
| 10 | Óbito de não envolvidos no processo | 3 | Atrito ou abrasão | 10 | Ausência de métodos efetivos |
| | | 3 | Contato com temperatura extrema | | |

Fonte: Cavaignac, & Uchoa, 2018. Adaptado.

O *Occupational Safety Failure Modes Effects Analysis* (OS-FMEA) tem sido desenvolvido em trabalhos recentes com o intuito de facilitar a aplicação da ferramenta pelos profissionais da área de gerenciamento de risco (Lima, et al., 2019). O OS-FMEA tem sido aplicado ultimamente em processos de construção civil, como execução de trabalhos em altura (Jorge, et al., 2019; Mota, & Cavaignac, 2019), execução de serviços de manutenção em redes elétricas (Dias Júnior, & Cavaignac, 2019), serviços de carpintaria (Jorge, et al., 2019), trabalhos de escavações e instalações sanitárias (Mota, & Cavaignac, 2019; Cavaignac, et al., 2019), serviços de demolições (Santos, et al., 2019) e tem iniciado a aplicação em processos industriais, como em processos envolvidos na indústria metalúrgica (Pacheco et al., 2019) e em processos de solda e usinagem de pequeno porte (Lima, et al., 2019). Essas duas últimas aplicações corroboram a aplicação da metodologia OS-FMEA no projeto de desenvolvimento de produtos na área de peças mecânicas – uso este não encontrado em literatura anterior.

Neste sentido, este trabalho se propõe a desenvolver uma peça mecânica automotiva com a prototipagem 3d, através de impressoras de deposição de materiais fundidos (manufatura aditiva). Da concepção inicial à peça final, serão utilizadas ferramentas estabelecidas de gestão de desenvolvimento de produto. Este trabalho utilizará com maior ênfase a análise de modo de falha e efeito – FMEA, principalmente nas etapas de prototipagem 3d em CAD (*computer-aided design*) e prototipagem física com impressora 3d. A utilização do FMEA tem como objetivo identificar possíveis falhas da peça ainda na etapa de desenvolvimento em CAD, a fim de evitar retrabalhos e desperdício de tempo e materiais com a diminuição da quantidade de impressões totais até o desenvolvimento final da peça.

2 METODOLOGIA

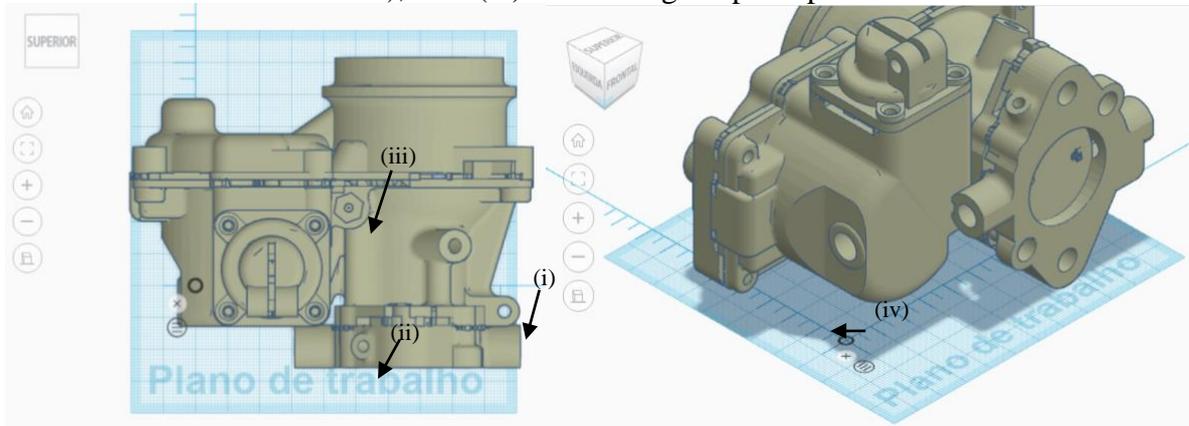
Este trabalho usará como modelo de desenvolvimento uma peça mecânica automotiva conceituada com flange. Por conceito, uma flange é uma peça de tubulação responsável por realizar a vinculação de duas partes de uma tubulação de transporte de fluido, sendo responsável pela qualidade do fluxo e resistência mecânica desta vinculação. A flange pode opcionalmente ser responsável por adaptar tubulações de características diferentes, como tipos de vinculação (ex. rosqueada/colada, por contato/parafusada), diâmetros diferentes ou materiais.

A escolha do carburador a ser adaptado foi o modelo SOLEX H32, da marca Brosol. Este carburador foi escolhido devido ser um carburador já amplamente usado em carros com motores refrigerados a ar, de fácil obtenção no mercado de peças de reposição e que possui



uma vazão de admissão maior do que o original – seção transversal da borboleta cerca de 13% maior, além de ter o corpo-borboleta e venturi principal intercambiáveis – oferecendo uma ampla possibilidade de regulagem. Outro fator foi a possibilidade de acesso facilitado às principais peças de regulagem do funcionamento do carburador, que graças ao seu lay-out, estão dispostas em apenas um lado do carburador, facilitando a experiência do usuário durante a regulagem. A figura 2 mostra com detalhes o lay-out do carburador e suas regulagens, gentilmente cedido pela empresa Scalla3D, via site *thingiverse*. Os modelos foram desenhados no software *FREECAD*, e as imagens produzidas no *Autodesk Tinkercad*, ambos softwares de licença livre.

Figura 2. Modelo CAD do carburador SOLEX H32 (lado esquerdo) utilizado na adaptação em vista superior (à esq.), mostrando as seguintes posições de peças de regulagem (i) parafuso da borboleta em marcha-lenta, (ii) agulha de mistura de ar; e (iii) giclê de ar; e ortogonal (à dir.), com (iv) acesso ao giclê principal.



Fonte: Scalla3d, 2020. Adaptado.

A flange em questão servirá para permitir o intercâmbio de carburadores de diferentes capacidades e formatos na tubulação de admissão de um motor de um carro antigo de coleção – um Volkswagen Fusca. A opção por esta problemática vem do crescimento deste mercado e da crescente necessidade de peças de reposição para este tipo de usuário. Vale ressaltar que o mercado de peças de reposição para fins específicos como antigomobilismo e automobilismo (preparações mecânicas para competições) possui pouca demanda comparado ao mercado rotineiro, não interessando a indústria tradicional e abrindo um potencial nicho para a manufatura aditiva.

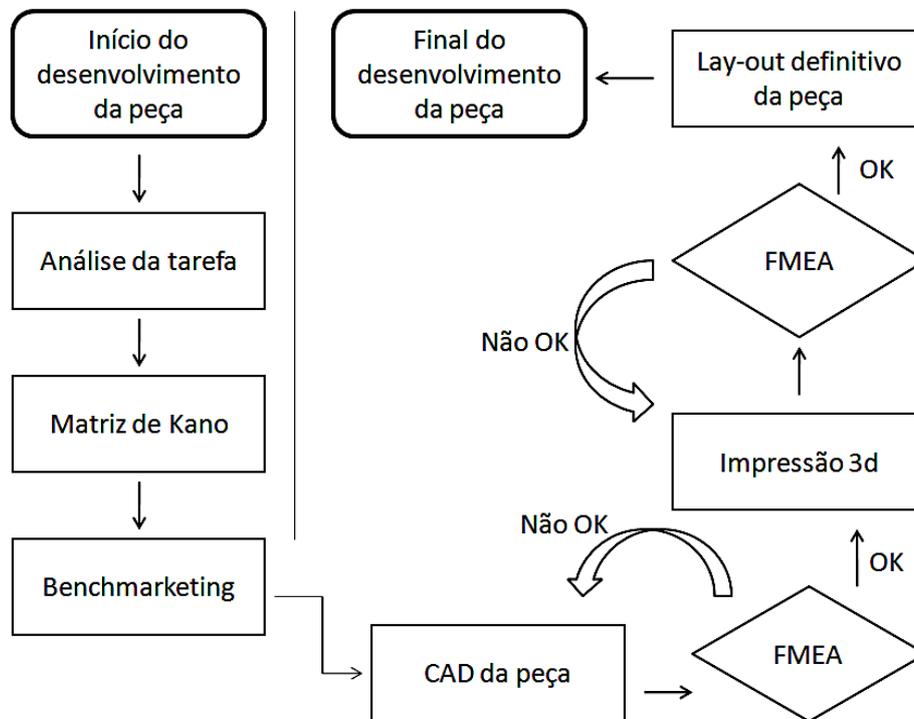
Vale ressaltar que a capacidade de desenvolvimento de novos produtos e a menor limitação de lay-out da peça no aspecto de *design for manufacturing and assembly* (DFMA) são pontos fortes da manufatura aditiva das impressoras 3d (VOLPATO, 2017). Contudo, é necessário observar o design e parâmetros de impressão para respeitar o DfAM (*design for additive manufacturing*), evitando problemas e otimizando resistência mecânica e durabilidade da peça (Gao, et al., 2015; Li, et al., 2019). Para a disseminação deste tipo de processo fabril é essencial criar métodos que melhorem a eficiência e diminuam o tempo de desenvolvimento do produto. Neste cenário, o FMEA atrelado a prototipagem digital via CAD surgem como poderosas ferramentas para otimizar o processo de desenvolvimento do produto final. Devido à natureza do produto – flange para uma tubulação de transporte de fluido – será utilizado



ainda simulação do comportamento do fluido na peça - através de *computational fluid dynamics* (CFD) – e o comportamento mecânico da peça em si – através de *finite elements analysis* (FEA). Devido à natureza extensa dos tópicos acerca de CFD e FEA, será necessário expor a discussão sobre essas técnicas em um documento a parte subsequente.

O presente trabalho utilizou ferramentas amplamente difundidas na gestão de desenvolvimento de produtos - como análise de tarefa, matriz de kano e benchmarking - para a concepção do conceito inicial da peça. A partir de então foi realizado um esboço primário em ambiente CAD e a partir daí a aplicação do FMEA no protótipo digital para mitigar possíveis modos de falha antes da realização da primeira impressão do protótipo físico. Caso haja necessidade, há uma nova aplicação do FMEA para identificar e corrigir possíveis erros não detectados na fase de prototipagem digital. A figura 3 mostra o fluxograma do processo de desenvolvimento de flange automotiva.

Figura 3. fluxograma do processo de desenvolvimento de flange automotiva.



Fonte: autores, 2020.

A aplicação do FMEA se dá com duas ênfases: (i) o correto funcionamento do sistema, e (ii) a segurança do usuário – com a aplicação do OS-FMEA. Neste trabalho foi utilizado o modelo de FMEA adaptado de Mota & Cavaignac, (2019) em segurança do trabalho, em sinergia com o modelo proposto por Fernandes & Rebelato, (2006), para desenvolvimento do produto. Vale ressaltar que este FMEA foi aplicado em uma situação possível de se aplicar correções, logo foi adicionado ao final uma nova geração de RPN para as correções aplicadas. A tabela 6 abaixo mostra o cabeçalho proposto, com a primeira parte dedicada à segurança do sistema, e a segunda parte dedicada à segurança do usuário.



Tabela 6. Modelo FMEA para aplicação no desenvolvimento de peça automotiva

| Aplicação com foco na segurança do sistema | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|-----------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|---------------------|-------------|-------------|-------|------------------|-----|-----|-----|-----------|
| Tipo da Falha | Modo de Falha | Causa Básica da Falha | Ocorrência (O) | Consequências da Falha ao sistema | Severidade (S) | Medidas de Controle | Deteção (D) | RPN (SxOxD) | RISCO | Ações Corretivas | O | S | D | RPN FINAL |
| 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° | 8° | 9° | 10° | 11° | 12° | 13° | 14° | 15° |
| Aplicação com foco na segurança do usuário | | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo da Falha | Modo de Falha | Causa Básica da Falha | Ocorrência (O) | Consequências da Falha ao Usuário | Severidade (S) | Medidas de Controle | Deteção (D) | RPN (SxOxD) | RISCO | Ações Corretivas | O | S | D | RPN FINAL |

Fonte: autores, 2020.

O FMEA pode ser usado em sinergia com o QFD (*quality function deployment*) (Fernandes, & Rebelato, 2006; Miguel, et al., 2008; Shaker, et al., 2019). A utilização do QFD pode alimentar o FMEA com ponderação de cada modo de falha a partir da interpretação da “voz do cliente” (Fernandes, & Rebelato, 2006). Contudo, neste trabalho foi utilizado o FMEA sem esses pesos, a fim de facilitar a aplicação e otimizar o tempo necessário para aplicação da ferramenta – haja visto o objetivo principal é criar um fluxograma de desenvolvimento que evite retrabalho e otimize o processo de desenvolvimento de novos produtos e produtos customizados.

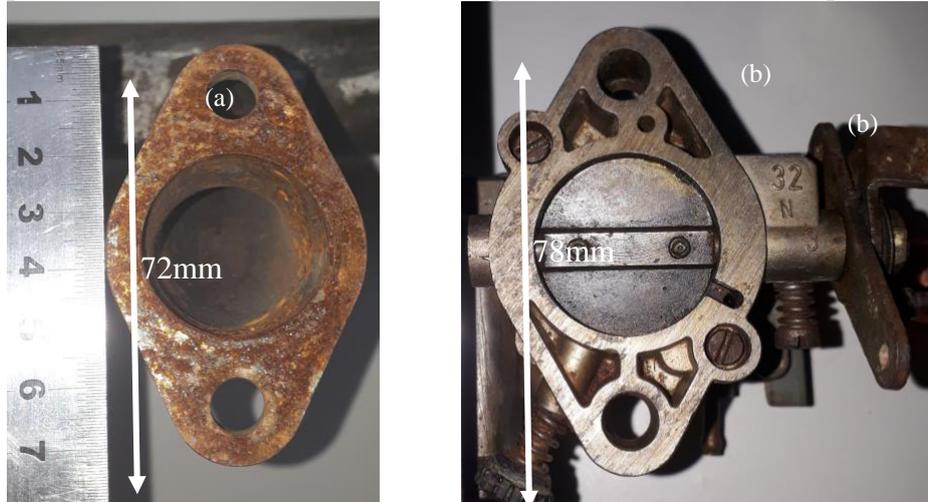
3 DESENVOLVIMENTO INICIAL

3.1 ANÁLISE DE TAREFA

A análise da tarefa explora as interações entre o produto e seu usuário, através de observações e análises. Os resultados dessas análises são usados para gerar conceitos de novos produtos (Baxter, 1998). Para a análise de tarefa foi realizada a observação *in loco* do sistema, para o entendimento da sua função, as partes portadoras de cada tarefa e possíveis observações necessárias. A figura 4 mostra o sistema admissão/carburador e a tabela 7 mostra o resultado da análise de tarefa a partir da situação observada.



Figura 4. sistema admissão/carburador mostrando (a) admissão original – 72mm de comprimento, e (b) o carburador a ser adaptado, com 78mm de comprimento



Fonte: autores, 2020.

Tabela 7. Aplicação da análise de tarefa à flange de adaptação de carburador

| Atividade | Observações | Portador do efeito/atividade |
|--|---|---|
| Fixar o carburador novo à admissão original do carro, permitindo o bom funcionamento do sistema de admissão | É necessário assegurar a compatibilidade das vinculações (medidas dos parafusos e porcas) e layout | <ul style="list-style-type: none">• Dimensões e layout da peça• Material de fabricação• Parafusos e roscas |
| Não oferecer entradas de ar falsas nas áreas de contato admissão/flange e flange/carburador | É necessária atenção extra às superfícies de contato, para permitir o correto assentamento das peças e juntas maleáveis | <ul style="list-style-type: none">• Superfícies de contato• Material de fabricação• Parâmetros de impressão |
| Assegurar a compatibilidade entre os sistemas mecânicos ao redor da admissão (ex. alternador, capela de refrigeração, distribuidor) | É necessário assegurar que as dimensões da flange permitam o posicionamento correto do novo carburador ao sistema | <ul style="list-style-type: none">• Dimensões e layout da peça |
| Resistir ao estresse térmico, químico e mecânico da função | É necessária a escolha correta de materiais, layout da peça e parâmetros de impressão | <ul style="list-style-type: none">• Material de fabricação• Layout da peça• Parâmetros de impressão |

Fonte: Autores, 2020.

É percebido que a peça tem basicamente quatro funções: (i) fixar o carburador novo à admissão original do carro, oferecendo o mínimo de restrição possível; (ii) não oferecer entradas de ar falsas nas áreas de contato admissão/flange e flange/carburador; (iii) assegurar a compatibilidade entre os sistemas mecânicos ao redor da admissão - ex. alternador, capela de refrigeração, distribuidor; e (iv) resistir ao estresse térmico, químico e mecânico da função. Para isso, foi observado que os responsáveis por cumprir as tarefas do produto são: (i) dimensões e lay-out da peça; e (ii) Material de fabricação; e (iii) parâmetros de impressão da peça - sendo importante ressaltar que os parâmetros de impressão da peça estão ligados a execução de uma boa impressão 3d, respeitando as medidas projetadas no protótipo digital.



3.2 APLICAÇÃO DO MODELO DE KANO

O Modelo de Kano está diretamente relacionado com a satisfação e necessidade dos clientes, assim pode-se julgar os requisitos básicos (atributos essenciais), esperados e atrativos do produto (Baxter, 1998). A Tabela 8 mostra a aplicação do modelo de Kano para a determinação de atributos básicos, esperados e atrativos da peça a ser desenvolvida.

Tabela 8. Modelo de Kano para definir os requisitos da peça

| Básicos | Esperados | Atrativos |
|--|--|---|
| Vincular corretamente o carburador novo à admissão original. | Resistência mecânica/térmico/químico Durabilidade | Baixo custo de compra da peça Facilidade de instalação |

Fonte: autores, 2020.

3.3 BENCHMARKING

Através de uma rápida pesquisa em ferramentas de busca de compra na internet, foi possível realizar um estudo de mercado, com foco nas opções disponíveis para a adaptação de carburadores em admissões diferentes. Através deste *benchmarking* foi percebido que como padrão este problema é solucionado com peças em formato de flange, parafusadas, onde ficam entre a tubulação de admissão do motor e o carburador a ser adaptado. As flanges disponíveis possuem dois lados faceados opostos, sendo um com lay-out para o encaixe na tubulação original de admissão, e o outro para o encaixe no carburador a ser adaptado. As opções encontradas têm sua fabricação baseada em dois tipos: (i) peças metálicas fabricadas por usinagem e soldagem; (ii) peças de polímero conformadas por injeção plástica.

3.4 CONCEITO INICIAL DA PEÇA

Através da aplicação inicial das ferramentas anteriormente citadas, foi possível elaborar um conceito inicial da peça.

“A peça tem como função principal vincular à entrada da tubulação de admissão um carburador com vinculação previamente incompatível. Precisa ser executada em material resistente à ataque químico (gasolina, álcool, vapores de óleo), ataque térmico (energia térmica proveniente do motor, por convecção ou irradiação; ou proveniente da tubulação de admissão, por condução), além de ter características mecânicas adequadas, como alta dureza superficial, baixa deformação mecânica e resistência a esforços cíclicos (fadiga).”

Os autores, 2020.

A partir de então, foi dado início à etapa de prototipagem 3d, primeiramente digital através de software CAD, e na sequência em meio físico, com o uso de manufatura aditiva, em impressora 3d do tipo *fused deposition modeling* (FDM)

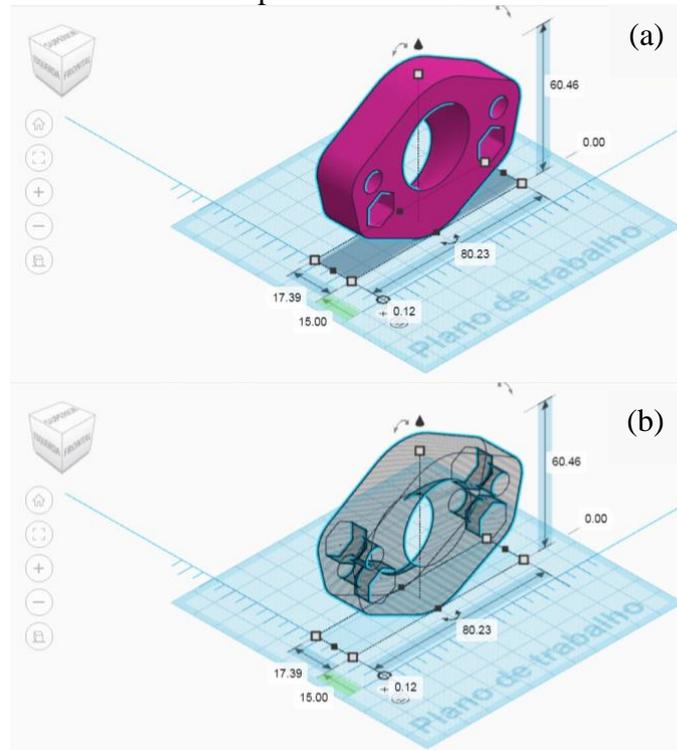
4 PROTOTIPAGEM 3D, FMEA e CFD

Com o conceito inicial da peça, foi possível esboçar um layout que cumprisse os requisitos de projeto. A figura 5 mostra o desenho inicial do protótipo e a figura 6 mostra a posição sugerida de instalação no carburador.



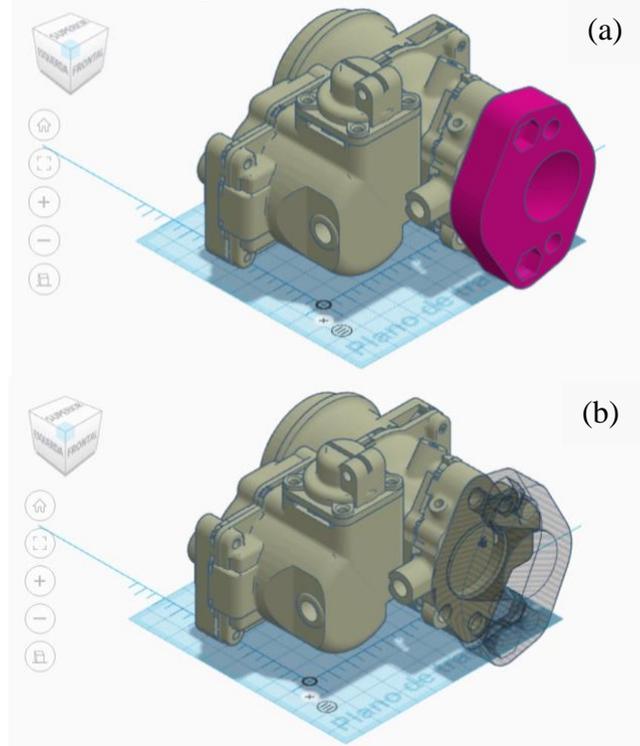
Citação (APA): Cavaignac, A. L. de O., Silva, L. H. V., Sousa Júnior, R., Silva, E. M. L. e, & Lima, R. J. C. (2020). FMEA, CFD e FEA para otimização do desenvolvimento de produtos com prototipagem 3d em peça mecânica automotiva *aftermarket* - Parte A: FMEA. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 6(5), 74-97.

Figura 5. Layout inicial do protótipo em cortes ortogonais (a) peça sólida, (b) peça transparente, onde se observa as faces de contato, o conduto principal e os encaixes dos parafusos M8.



Fonte: autores, 2020.

Figura 6. Posicionamento da flange adaptadora no carburador em vista ortogonal (a) sólida e (b) transparente - onde é possível observar os alinhamentos principais.



Fonte: Autores, 2020.



A partir da prototipagem 3d inicial, foi possível a visualização da peça e a percepção de possíveis conflitos iniciais no projeto. Elencar estas inadequações pode ser algo bastante intuitivo e resolvido de forma objetiva na prática. Contudo, segundo o *handbook* da Ford Company, (2011), a aplicação do FMEA nesta etapa tem a capacidade de documentar os problemas identificados e sistematizar a resolução dos mesmos principalmente mostrando a redução no potencial de risco após a aplicação de medidas corretivas.

4.1 APLICAÇÃO DO FMEA E OS-FMEA NO DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

Para a aplicação do FMEA no desenvolvimento da flange, foi atribuído um índice de ocorrência inicial igual a 5 para todos os modos de falha, devido a natureza única da amostra. O índice de ocorrência para o RPN pós melhorias então funciona de forma comparativa ao índice da situação inicial. A tabela 9 contém a aplicação do FMEA com foco na segurança do sistema – (i) entradas falsas de ar; (ii) incompatibilidade de sistemas; (iii) vazamento de combustível; e (iv) restrição do fluxo ar/combustível - e do usuário – (v) vazamento de combustível; e (vi) ferimentos durante a instalação/manuseio.

Tabela 9. Aplicação do FMEA no protótipo de flange adaptadora de carburador

| Aplicação com foco na segurança do sistema | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|---|----------------|-------------------------------------|----------------|--|-------------|-------------|----------|---|---|---|---|-----------|
| Tipo da Falha | Modo de Falha | Causa Básica da Falha | Ocorrência (O) | Consequências da Falha ao sistema | Severidade (S) | Medidas de Controle | Deteção (D) | RPN (\$OXD) | RISCO | Ações Corretivas | O | S | D | RPN FINAL |
| Falha de Design/layout | Entradas falsas de ar | Superfícies de contato irregulares | 5 | Falha tem efeito direto na operação | 8 | As medidas de controle tem grande probabilidade de detectar | 5 | 200 | Critico | Assegurar que as superfícies estão regulares/conferir parâmetros de impressão | 2 | 2 | 5 | 20 |
| | Incompatibilidade de sistemas | Mal dimensionamento da peça | 5 | Falha tem efeito direto na operação | 8 | É quase certo que as medidas de controle irão detectar | 1 | 40 | Moderado | Assegurar o correto dimensionamento da peça/conferir parâmetros de impressão | 2 | 1 | 1 | 2 |
| | Vazamento de combustível | Superfícies de contato irregulares | 5 | Falha tem efeito direto na operação | 10 | As medidas de controle tem grande probabilidade de detectar | 2 | 100 | Elevado | Redesenho das superfícies/correção dos parâmetros de impressão | 2 | 1 | 2 | 4 |
| | Restrição do fluxo ar/combustível | Má escolha do design do conduto principal | 5 | Falha tem efeito direto na operação | 9 | As medidas de controle tem uma baixa probabilidade de detectar | 9 | 225 | Critico | Correção do conduto principal através de técnicas de simulação - CFD | 5 | 1 | 2 | 10 |



Citação (APA): Cavaignac, A. L. de O., Silva, L. H. V., Sousa Júnior, R., Silva, E. M. L. e, & Lima, R. J. C. (2020). FMEA, CFD e FEA para otimização do desenvolvimento de produtos com prototipagem 3d em peça mecânica automotiva *aftermarket* - Parte A: FMEA. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 6(5), 74-97.

| Aplicação com foco na segurança do usuário | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|------------------------------------|----------------|--|----------------|---|-------------|-------------|----------|--|---|---|---|-----------|
| Tipo da Falha | Modo de Falha | Causa Básica da Falha | Ocorrência (O) | Consequências da Falha ao usuário | Severidade (S) | Medidas de Controle | Deteção (D) | RPN (SxOxD) | RISCO | Ações Corretivas | O | S | D | RPN FINAL |
| Risco ao usuário | Vazamento de combustível | Superfícies de contato irregulares | 5 | Incapacidade temporária sem afastamento | 4 | As medidas de controle tem grande probabilidade de detectar | 2 | 40 | Moderado | Redesenho das superfícies/correção dos parâmetros de impressão | 2 | 1 | 2 | 4 |
| | Ferimentos durante a instalação/manuseio | Cantos vivos/mal acabamento | 5 | Trauma que necessita de primeiros socorros | 3 | As medidas de controle tem grande probabilidade de detectar | 5 | 75 | Moderado | Controle de qualidade no processo de acabamento da peça | 2 | 1 | 3 | 6 |

Fonte: Autores, 2020.

O Modo de falha de entradas falsas de ar surge quando as superfícies Admissão/flange ou Flange/carburador não estão totalmente planas. A severidade deste modo de falha é alto, 8, devido a grande interferência disto no funcionamento do motor. A detecção pode ser realizada pelos métodos disponíveis, contudo é necessário um conhecimento prévio de mecânica automotiva por parte do usuário, tornando o índice um pouco mais elevado que os outros, 5. Após as correções, não há mais interferência no sistema, (Severidade igual a 2), e a probabilidade de ocorrência é reduzida, 2. Contudo possíveis falhas ainda podem acontecer e continuam precisando de conhecimento prévio do usuário – detecção igual a 5 – totalizando novo RPN de 20.

A incompatibilidade de sistemas se dá quando algum conjunto se choca fisicamente com outro sistema já previamente disposto, não permitindo assim o total encaixe da flange ou do carburador. Durante a observação inicial percebeu-se a possibilidade de o carburador encostar no sistema alternador e na capela de refrigeração, sendo importante a flange garantir a posição e distância necessária para a correta montagem do carburador. Deve-se destacar a necessidade do carburador solex h32 ser encaixado de forma defasada em 90° (como mostra a Figura 6). A Figura 7 mostra a área disponível para o encaixe do carburador em questão

Figura 7. Área disponível para a montagem do [1] carburador original na [2] entrada da tubulação de admissão original do carro. (a) visão frontal, e (b) visão lateral.



Fonte: Autores, 2020.



O modo de falha de vazamento de combustível, em relação a severidade da falha, o vazamento de combustível – devido à posição do carburador ser acima do sistema de ignição - oferece a possibilidade de iniciar um incêndio no cofre do motor, podendo provocar danos graves no sistema em questão e em outros sistemas que compõem o veículo. Neste sentido, foi atribuído à severidade índice 10, com impacto real na segurança do sistema como um todo. O índice de detecção é baixo, 2, mas a multiplicação SxOxD ocasiona um RPN total de 100 – elevado. Após as correções de design e parâmetros de impressão, o RPN foi reduzido para 4 – a probabilidade de ocorrência diminui (2) e a severidade passa a ser mínima, sem danos ao usuário.

Quanto a falha de restrição de fluxo ar/combustível, a severidade é alta, 9, pois tem efeito direto na operação – reduzindo o desempenho do carro e frustrando a expectativa de qualidade do cliente. A detecção deste modo de falha é complicada, devido ao portador do efeito (conduto principal) não ser acessível depois de montada a flange. Este modo de falha merece atenção especial, pois a restrição de fluxo ar/combustível só seria detectada pelos meios de controle comuns (observação visual, uso do carro) se fosse significativamente grande. Porém, restrições menores não impediriam o funcionamento do carro, mas reduziriam qualquer melhoria provocada pela troca do carburador, tornando a flange ineficaz e desnecessária. Este modo de falha em particular necessita de técnicas auxiliares e motivou a execução de um estudo de simulação em CFD, que será apresentado adiante. Como resultado das correções, a severidade passou para 1 – sem efeitos no sistema, e as novas medidas de controle identificarão quaisquer problemas no design corrigido, obtendo novo RPN de 10.

Quanto à aplicação do FMEA com foco na segurança do usuário, foi observado o modo de falha de vazamento de combustível, onde foi adotado índice de ocorrência 5. Em relação a severidade da falha, o vazamento de combustível – devido à posição do carburador ser acima do sistema de ignição - oferece a possibilidade de iniciar um incêndio no cofre do motor, podendo causar queimaduras no usuário ao tentar apagar o mesmo. Neste sentido, foi atribuído à severidade índice 4, que corresponde à incapacidade temporária sem afastamento. Contudo, o índice de detecção é baixo, 2, ocasionando um RPN total de 40 – moderado. Após as correções de design e parâmetros de impressão, o RPN foi reduzido para 4 – a probabilidade de ocorrência diminui (2) e a severidade passa a ser mínima, sem danos ao usuário.

Outra falha que pode atingir a segurança do usuário é a possibilidade de cortes ou arranhões no manuseio da flange, devido a existência de cantos-vivos ou mal-acabados. Este modo de falha pode causar traumas que necessitam de primeiros socorros, 3, e possui uma dificuldade de detecção mediana, 5 – RPN total igual a 75, moderado. Como correção, é proposta a implantação de parâmetros de controle de qualidade na parte final da manufatura, diminuindo o RPN para 6.

4.2 APLICAÇÃO DE CFD e FEA

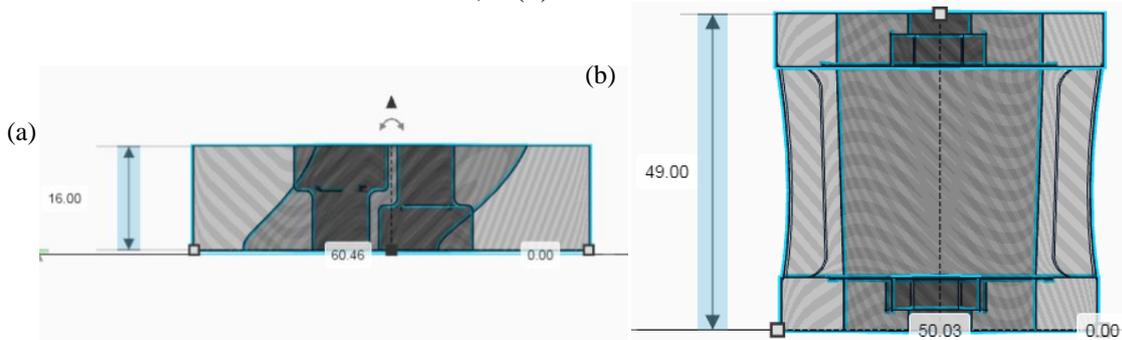
A aplicação do CFD foi motivada pela dificuldade de detecção pelas medidas de controle tradicionais no modo de falha de restrição de fluxo de ar/combustível. O modelo inicial com concebido com conduto principal inclinado reto, e após as simulações foi proposto um



modelo levemente curvo, a fim de atenuar a perda de carga sofrida pelo fluxo ao passar na flange. O modelo de flange com as entradas concêntricas foi sugerido em *brainstorming* inicial, contudo necessita de uma grande dimensão “Z”, ou vertical, para garantir a compatibilidade entre os demais sistemas no cofre do motor.

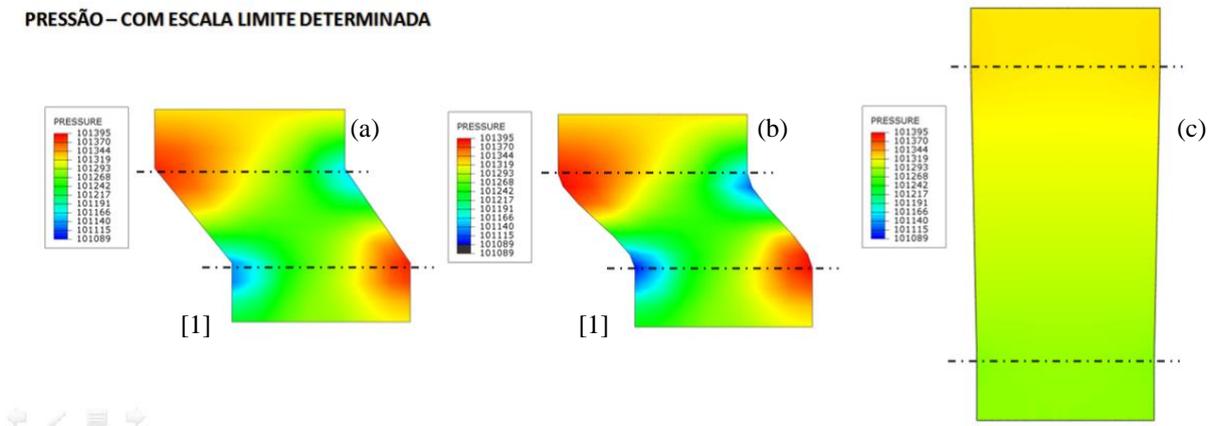
Como citado anteriormente, a troca do carburador oferece uma melhora no processo de admissão de mistura ar/gasolina. Contudo, essa vantagem seria anulada caso o layout da flange fosse demasiadamente restritivo. De acordo com a aplicação do FMEA na fase de prototipagem 3d em CAD, foi identificada a dificuldade de controle deste modo de falha e pontuada a necessidade de técnicas auxiliares de identificação. Neste caso foi proposta a utilização de simulação baseada em CFD, para quantificar o quão restritivo era o layout inicial. Foram testados três modelos: (i) inclinado reto, (ii) inclinado curvo, e (iii) concêntrico. A figura 8 mostra os novos modelos sugeridos, com ênfase na visualização do conduto principal – ao centro das imagens. A figura 9 mostra o resultado da simulação CFD para os três modelos.

Figura 8. Visão em corte dos modelos testados em opção ao modelo inicial: (a) duto inclinado curvo, e (b) duto vertical concêntrico.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 9. Resultado do teste em CFD dos modelos: (a) inclinado reto, (b) inclinado curvo, e (c) concêntrico. Nota-se a presença de [1] vórtices (em azul) em (a) e (b), e a ausência em (iii).



Fonte: Autores, 2020

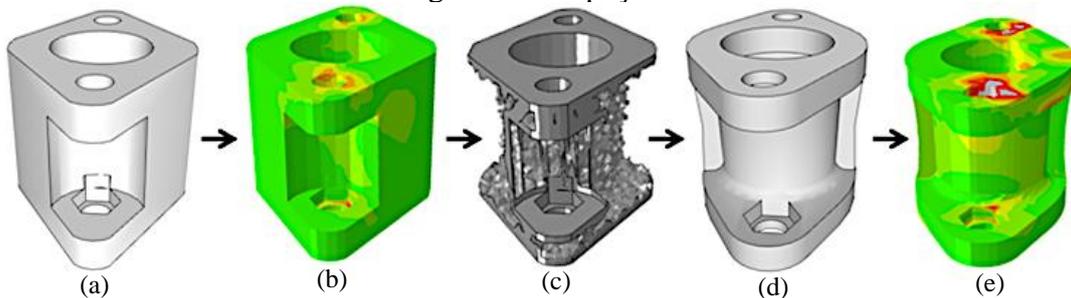


Na figura 9 é possível observar que, devido ao layout inclinado do conduto principal das peças (a) e (b) há a geração de vórtices nos pontos destacados em azul. Os vórtices são regiões de turbulência com grande perda de carga, que para a função da peça é fortemente indesejável. Mesmo com o retrabalho do duto, adotando um formato abaulado, houve pouca melhora nos resultados. Desta forma, foi tomada a decisão de trabalhar um novo conceito de conduto: o concêntrico. Devido a sua grande dimensão em “Z” vertical, este modelo demanda grande volume de impressão – e consequentemente, tempo de impressão.

A partir da utilização de FEA foi possível chegar a um layout final da peça com menos volume de material, reduzindo o tempo de impressão e o consumo de filamento polimérico. A Figura 10 mostra o resultado da simulação FEA com redução de massa por otimização topológica. A figura 11 mostra o modelo final após as análises CFD e FEA.

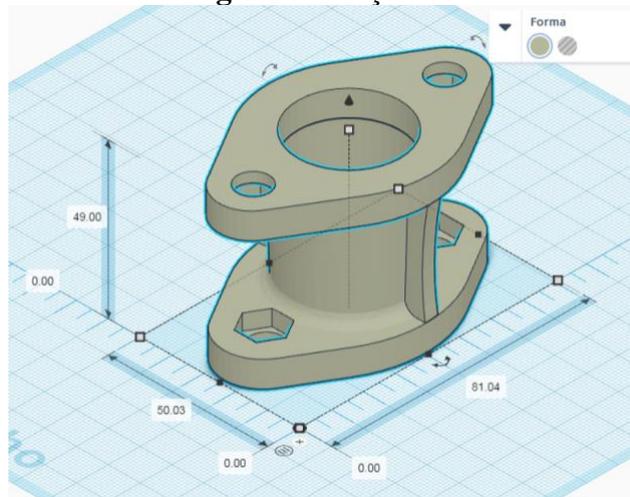
A otimização topológica (OT) é um campo de pesquisa da engenharia que tem o objetivo de projetar a topologia ótima de estruturas segundo determinado conjunto de critérios de projeto, podendo ser a procura do menor peso da estrutura, ou a restrição a um dado valor limite de tensão, deslocamento ou de frequência do projeto (Simonetti, et al., 2018).

Figura 10. Resultado do simulação FEA no modelo concêntrico com redução de massa por otimização topológica: (a) peça inicial, (b) Resultado de FEA após hipótese de carregamento, (c) Otimização Topológica após hipótese de carregamento – Redução de massa, (d) Peça final com adoçamentos e colocação de pregas (e), Resultado de FEA após hipótese de carregamento na peça final.



Fonte: Autores, 2020

Figura 11. Peça final



Fonte: Autores, 2020



Vale ressaltar a opção por usar conjuntamente o CFD e o FEA para reduzir o tempo de desenvolvimento e produção. Comparativamente, uma situação onde apenas o CFD fosse utilizado poderia provocar uma realidade de retrabalho em torno de um conceito de peça que não possibilitaria melhora substancial – condutos inclinados. A utilização subsequente do FEA possibilitou usar o conceito do conduto concêntrico – a melhor opção sob o ponto de vista da dinâmica dos fluidos – solucionando o principal ponto negativo do mesmo – grandes dimensões para impressão 3d.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho usou o FMEA+CFD+FEA para otimizar o processo de desenvolvimento de uma peça mecânica automotiva para o mercado *aftermarket*, fabricada através de impressão 3d. Para tal, o presente trabalho usou como peça-teste uma flange adaptadora para substituição de carburadores em automóveis de coleção. A partir do uso da metodologia integrada FMEA+CFD+FEA foi possível obter uma peça viável em apenas uma impressão, mostrando a eficiência do método em otimizar a prototipagem.

A partir da aplicação do FMEA/OS-FMEA no modelo inicial da peça em ambiente CAD foram enumerados 6 modos de falha, sendo 4 relacionados a segurança do sistema e 2 relacionados a segurança do usuário. A possibilidade de aplicação do FMEA/OS-FMEA resultou na diminuição dos RPNs obtidos a partir da aplicação de ações corretivas ainda no ambiente CAD, deste modo evitando possíveis impressões ineficazes e otimizando o processo em relação a tempo despendido e evitando desperdício de materiais e insumos. A tabela 10 mostra os modos de falha com os RPNs iniciais respectivos, as ações corretivas tomadas e consequentemente os novos RPNs obtidos pós-melhorias.

Tabela 10. redução de RPN pós-melhorias para cada modo de falha identificado

| Aplicação com foco na segurança do sistema | | | | | | | | |
|--|--|---|-------------|----------|---|-----------|------------|------------------|
| Tipo da Falha | Modo de Falha | Causa Básica da Falha | RPN (SxOxD) | Risco | Ações Corretivas | RPN Final | Risco | % Redução do RPN |
| Falha de Design/Layout | Entradas falsas de ar | Superfícies de contato irregulares | 200 | Crítico | Assegurar que as superfícies estão regulares/conferir parâmetros de impressão | 20 | Secundário | 90% |
| | Incompatibilidade de sistemas | Mal dimensionamento da peça | 40 | Moderado | Assegurar o correto dimensionamento da peça/conferir parâmetros de impressão | 2 | Secundário | 95% |
| | Vazamento de combustível | Superfícies de contato irregulares | 100 | Elevado | Redesenho das superfícies/correção dos parâmetros de impressão | 4 | Secundário | 96% |
| | Restrição do fluxo ar/combustível | Má escolha do design do conduto principal | 225 | Crítico | Correção do conduto principal através de técnicas de simulação - CFD | 10 | Secundário | 95,5% |
| Aplicação com foco na segurança do usuário | | | | | | | | |
| Tipo da Falha | Modo de Falha | Causa Básica da Falha | RPN (SxOxD) | Risco | Ações Corretivas | RPN Final | Risco | % Redução do RPN |
| Risco ao usuário | Vazamento de combustível | Superfícies de contato irregulares | 40 | Moderado | Redesenho das superfícies/correção dos parâmetros de impressão | 4 | Secundário | 90% |
| | Ferimentos durante a instalação/manuseio | Cantos vivos/mal acabamento | 75 | Moderado | Controle de qualidade no processo de acabamento da peça | 6 | Secundário | 92% |



A partir da tabela 10 é possível observar que os modos de falha, inicialmente, possuíam risco moderado, elevado ou crítico. Sendo necessário destacar que os modos de falha de restrição de fluxo ar/combustível e entradas de ar obtiveram os maiores RPN – 225 e 200, respectivamente, sendo classificados como críticos. Estes modos de falha possuem grande interferência da função principal da peça - que é adaptar um novo carburador à admissão permitindo o bom funcionamento do sistema. Os mesmos também possuem grande dificuldade de detecção da falha – o modo de falha de restrição de fluxo, por exemplo, necessitou do uso do CFD para definir um novo conduto principal.

A partir da aplicação do CFD foi possível escolher o melhor layout entre três sugeridos. O modelo (i) e (ii) obtiveram pouca mudança em melhoria de fluxo, então foi percebido que o layout inclinado, mesmo após muito tempo despendido em correções, teria pouca evolução. A partir desta afirmativa, foi adotado o layout concêntrico e utilizado o FEA para melhoria e otimização do design da peça, obtendo uma peça final com resistência mecânica adequada e tempo de impressão parecido com as peças menores. A tabela 11 mostra os tempos de impressão simulados obtidos para cada layout – obtidos com o software livre *3DSlicer*.

Tabela 11. Comparativo entre os tempos de impressão

| Modelo | Layout do conduto | Tempo de impressão (h) |
|----------|-------------------------------|------------------------|
| 1 | Inclinado reto | 2,00 |
| 2 | Inclinado curvo | 2,25 |
| 3 | Concêntrico (preliminar) | 6,50 |
| 4 | Concêntrico (após FEA) | 2,75 |

Fonte: Autores, 2020.

A determinação da forma ótima da flange utilizando simulação FEA, sobre hipótese de tensão real majorada, foi feita usando a análise de elementos finitos e direção principal das forças, objetivando a redução de volume em regiões de tensão muito baixa, aproveitando melhor a resistência do material nas zonas de carregamento. Dessa forma em tensão real majorada a otimização topológica mostrou-se capaz de ser aplicada em problemas de engenharia com peças mecânicas. No entanto é de suma importância observar que o refinamento da malha vai influenciar de forma significativa no resultado final.

A grande vantagem das simulações computacionais – CFD e FEA - é a possibilidade de testar possíveis correções do layout, especificamente do design do conduto principal da flange, em ambiente virtual. Deste modo, o CFD+FEA possibilita economia de tempo – evita impressões 3d de protótipos desnecessários, que são relativamente demoradas – e material - filamentos poliméricos, insumos de acabamento, eletricidade.

A partir da aplicação das ações corretivas todos os modos de falha atingiram o patamar de risco secundário – menor que 40. Todos os modos de falha atingiram 90% ou mais de redução do RPN. Contudo, vale ressaltar que o modo de falha de entradas falsas de ar obteve um RPN pós-melhorias de 20 – o mais alto de todos, devido à dificuldade residual de detecção da falha mesmo após as melhorias. Neste caso, as entradas falsas de ar necessitam de atenção especial em processos de controle de fabricação e instruções de instalação do produto, sendo uma orientação que segue aos processos seguintes de desenvolvimento de produto.



REFERÊNCIAS

- ASTM. ASTM F42/ISO TC 261 Develops Additive Manufacturing Standards. [S. l.:s. d.]. Disponível em: https://www.astm.org/COMMIT/F42_AMStandardsStructureAndPrimer.pdf. Acesso em: 03 mai 2020.
- Baxter, M. (1998). Projeto de Produto: guia para o desenvolvimento de novos produtos. São Paulo: Edgard Blücher.
- Briantais, L. Metal additive manufacturing: process, conception and post-treatments. 2017. 117f. Dissertação (Màster Universitarien Enginyeria d'Automoció), Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona, 2017.
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Lombardi, M., Atzeni, E., & Fino, P. (2017). Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE*, 105(4), 593-612.
- Cavaignac, A., & Uchoa, J. (2018). Obtaining FMEA's indices for occupational safety in civil construction: a theoretical contribution. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 15(4), 558-565. <https://doi.org/https://doi.org/10.14488/BJOPM.2018.v15.n4.a9>
- Cavaignac, A. L. De, Uchoa, J., & Dos Santos, H. (2020). Risk analysis and prioritization in water supply network maintenance works through the failure modes and effects analysis: occupational safety fmea application. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 17(1), 1-7. <https://doi.org/https://doi.org/10.14488/BJOPM.2020.006>
- Dias Júnior, E.B., & Cavaignac, A.L DE O. (2019). Avaliação de riscos e falhas utilizando a ferramenta FMEA priorizando a NR-10 de serviços elétricos de baixa, média e alta tensão. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(3): 214-225.
- Da Silva, G. C. (2011). Integração da prototipagem física no processo de desenvolvimento de produtos automotivos. *Revista Tecnologia*, 32(1), 105-115.
- Fernandes, J. M. R., & Rebelato, M. G. (2006). Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA. *Gestão & Produção*, 13(2), 245-259.
- Ford, M. C. (2011), *Failure Mode and Effects Analysis: FMEA Handbook*, 4.2 ed. Available from: <https://fsp.portal.covisint.com/documents/106025/14555722/FMEA+Handbook+v4.2/4c14da5c-0842-4e60-a88b-75c18e143cf7?version=1.0>. Acesso em: 03 mai 2020
- Mendes, C. J. (2019). Potenciais impactos da impressão 3d na distribuição de peças e acessórios de uma montadora de automóveis brasileira: Estudo de caso. *Projetos e Dissertações em Sistemas de Informação e Gestão do Conhecimento*, 6(2).
- Da Cruz Ferreira, G., Krüger, T. R., & Dos Santos, C. B. (2016). Utilização da impressão 3d na manufatura para a otimização de processos: um estudo de caso em indústrias automobilísticas. *Memorial TCC Caderno da Graduação*, 2(1), 276-289.
- Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., CHEN Y., Williams C.B., Wang C.C.L., Shin Y.C., Zhang S., Zavattieri P.D., The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Comput. Des.* 69 (2015) 65–89, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- Gomes, J. F. B., & Wiltgen, F. (2020). Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. *Revista Tecnologia*, 41(1).



Citação (APA): Cavaignac, A. L. de O., Silva, L. H. V., Sousa Júnior, R., Silva, E. M. L. e, & Lima, R. J. C. (2020). FMEA, CFD e FEA para otimização do desenvolvimento de produtos com prototipagem 3d em peça mecânica automotiva *aftermarket* - Parte A: FMEA. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 6(5), 74-97.

Helman, H., Andery, P.R.P. (1995). *Análise de falhas:(aplicação dos métodos de FMEA e FTA)*. UFMG, Escola de Engenharia. 156p.

Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1191-1203.

Jorge, G.P. Do N., Sousa, M.J.A. De, & Cavaignac, A.L. De O. (2019). Priorização de risco em obra de médio porte por meio da utilização do FMEA: uma ferramenta de melhoria para segurança do trabalho em altura. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(3): 35-53.

Laurenti, R., Villari, B. D., & Rozenfeld, H. (2012). Problemas e melhorias do método FMEA: uma revisão sistemática da literatura. *Pesquisa & Desenvolvimento Engenharia de Produção*, 10(1), 59-70.

Langefeld, B. et al. *Advancements in metal 3D printing*. [S. l.]: Roland Berger, 2018. Disponível em: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/Roland_Berger_Additive_Manufacturing.pdf. Acesso em: 03 mai 2020.

Li, L., Liu, J., MA, Y., Ahmad, R., & Qureshi, A. (2019). Multi-view feature modeling for design-for-additive manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, 39, 144–156. doi:10.1016/j.aei.2018.12.004

Lima, R., Ribeiro, R.K.P., Santos, I.J.A., Martins, V.P., & Cavaignac, A.L. de O. (2019). A aplicação da análise de modo de falha e efeito (FMEA) como ferramentas de prevenção de acidentes em pequenas serralherias. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(6), Edição Especial "Avanços em segurança do Trabalho", 123-135.

Lira, J. C. (2017). Análise de um coletor de admissão para motor veicular 1.0 pelo método de dinâmica dos fluidos computacional. *Acta Mechanica et Mobilitatem*, 1(2), 48-53.

Miguel, P. A. C., & Segismundo, A. (2008). O papel do FMEA no processo de tomada de decisão em desenvolvimento de novos produtos: estudo em uma empresa automotiva. *Produto & Produção*, 9(2).

Mota, C. P. A., & De Oliveira Cavaignac, A. L. (2019). Avaliação de risco ocupacional em obras de pequeno porte de unidades unifamiliares com aplicação do FMEA: uma investigação sobre trabalho em altura e escavações. *Brazilian Journal of Production Engineering-BJPE*, 5(4), 25-35.

Pacheco, Y. C. K. G., Ribeiro, R. K. P., & Cavaignac, A. L. de O. (2019). Utilização da análise de modos de falhas e efeitos (FMEA) como ferramenta de prevenção de acidentes em operações com usos de pontes rolantes. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(4), 10-24.

Pipes, A. *Desenho para designers*. São Paulo: Blucher, 2010.

Volpato, N. (2017). *Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D*. Editora Blucher.

Santos, A.G.S., Nascimento Jorge, G.P. Do, & Cavaignac, A.L. DE O. (2019). FMEA como ferramenta de identificação dos riscos ao trabalhador da construção civil. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(3), 19-34.



Citação (APA): Cavaignac, A. L. de O., Silva, L. H. V., Sousa Júnior, R., Silva, E. M. L. e, & Lima, R. J. C. (2020). FMEA, CFD e FEA para otimização do desenvolvimento de produtos com prototipagem 3d em peça mecânica automotiva *aftermarket* - Parte A: FMEA. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 6(5), 74-97.

Scalla3d. (2020). Carburador de Fusca Brosol Solex 32 VW Beetle Carburetor. Documento de site. Disponível em : <https://www.thingiverse.com/thing:4304481>, acesso em: 05/04/2020.

Seguin, L. (2011). Trabalho explicativo a respeito das impressoras 3D, e seus desenvolvimentos. Curso de Curso Técnico em Instrumentação, Curso Nacional de Aprendizagem Industrial-SENAI, Santos.

Shaker, F., Shahin, A., & Jahanyan, S. (2019). Developing a two-phase QFD for improving FMEA: an integrative approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*.

Simonetti, H. L., Almeida, V. S., & das Neves, F. D. A. (2018). Smoothing evolutionary structural optimization for structures with displacement or natural frequency constraints. *Engineering Structures*, 163, 1-10.

Sindipecas. (2020). Relatório da Pesquisa Conjuntural. Março de 2020. Sindipecas, São Paulo – SP. Documento de site. Acessado em 01/05/2020. Disponível em: <https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2020/PCABR2020.pdf>

Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis - FMEA from Theory to Execution* (2nd ed.), Milwaukee, USA: ASQ Quality Press.

Takagaki, L. K. (2012). Tecnologia de Impressão 3D. *Revista Inovação Tecnológica*, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 2840, jul./dez.

Thomas, D.; Venkat, R. 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine*, [S. l.], v. 49, n. 29, p. 103- 110, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316325496>. Acesso em: 06 mai. 2020.

Relvas, C., Ramos, A., Completo, A., & Simões, J. A. (2012). A systematic approach for an accuracy level using rapid prototyping technologies. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(12), 2023-2034.

Wiltgen, F. (2019). Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento científico e tecnológico. In: *Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação*, 10., COBEF, 10., São Carlos, 5-7 ago., 2019. Anais [...]. São Carlos: UFSCar.

