

ANÁLISE DE VIABILIDADE ESTRUTURAL E FINANCEIRA PARA A TROCA DE PEÇAS USINADAS POR IMPRESSAS EM UM DISPOSITIVO DE RETROVISÃO

Matheus Costa Pereira^a, Thiago Tadeu Barbosa^b, Pedro José Papandréa^{c*}

^a Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá - MG

^b Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL, Alfenas - MG

^c Centro Universitário UNA (UNA), Pouso Alegre - MG

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar as diferenças entre os processos de usinagem e impressão 3D na fabricação de peças utilizadas no suporte de espelhos retrovisores. A justificativa para o desenvolvimento desse estudo reside na evolução tecnológica e na possibilidade de redução significativa de custos. A área de estudo concentra-se na análise de vibrações, utilizando recursos de manufatura aditiva, usinagem e o método de elementos finitos. O objetivo principal é avaliar a viabilidade e compreender os possíveis benefícios decorrentes da alteração do processo de fabricação, por meio de uma série de testes envolvendo simulações. Em parceria com uma empresa líder no desenvolvimento e mercado de retrovisores, e com embasamento teórico através de referências bibliográficas, tornou-se possível realizar o estudo e avaliar a implementação da impressão 3D na produção de peças de custo elevado. Estima-se um ganho mínimo de 50,00% em termos de viabilidade econômica, além de uma variação dimensional controlada, evitando deslocamentos significativos.

PALAVRAS-CHAVE:

Impressão 3D;
Processos de Usinagem;
Prototipagem;
Testes Vibracionais.

INTRODUÇÃO

A prototipagem rápida, também conhecida como manufatura aditiva ou impressão 3D, permite a criação de modelos complexos e detalhados, utilizando uma variedade de materiais. Esse processo se tornou mais acessível e popular nos últimos anos. O objetivo deste projeto é explorar a possibilidade de substituir a usinagem convencional ou pelo controle numérico computadorizado (CNC) pelo processo de impressão 3D em estruturas metálicas de pequeno porte.

A análise do mercado atual revela um enfoque na redução de custos e na avaliação das características vibracionais das estruturas. Estudos realizados por Komorski (2005), Seaman (2007) e Kenney (2013) destacam os benefícios econômicos proporcionados pela manufatura aditiva. Nesse sentido, é válido realizar pesquisas em estruturas com suporte, utilizando softwares de modelagem e simulação para análises dimensionais e vibracionais.

O desenvolvimento deste trabalho é de grande relevância tecnológica, pois a redução de custos é significativa, apesar da demanda de tempo e dos testes necessários para a aprovação do cliente. O objetivo principal é avaliar a viabilidade da substituição de peças usinadas por peças produzidas por manufatura aditiva, além de explorar os benefícios adicionais, como o avanço tecnológico, a redução de custos e a agilidade na produção.

Serão apresentadas informações técnicas sobre os equipamentos e materiais utilizados para alcançar os objetivos propostos. Os resultados encontrados na literatura relatam um progresso significativo nessa área. A otimização da orientação da prototipagem rápida tem o potencial de aumentar a eficiência do processo e reduzir os custos (LI et al., 2010).

Este projeto contribui para o avanço da pesquisa acadêmica nesse campo, com foco nas atividades de modelagem e prototipagem 3D. A fabricação por impressão 3D é baseada no depósito de materiais em camadas para criar uma peça tridimensional final (SCHUBERT; VAN LANGEVELD; DONOSO, 2014). O objetivo é construir e viabilizar peças produzidas com manufatura aditiva, garantindo a mesma resistência das peças fabricadas por processos subtrativos, porém com um custo significativamente menor. A Figura 1 ilustra um exemplo de uma impressora 3D.

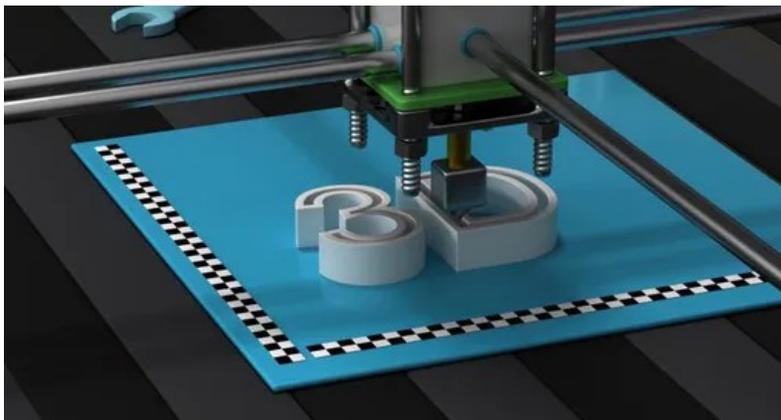


Figura 1 – Impressão 3D (Canal Tech, 2019)

Na Figura 2, é apresentada a geometria do suporte mockup, identificada como área azul ("A"), e sua base, identificada como área cinza ("B"). Vale ressaltar que as cores e identificações utilizadas são meramente ilustrativas.

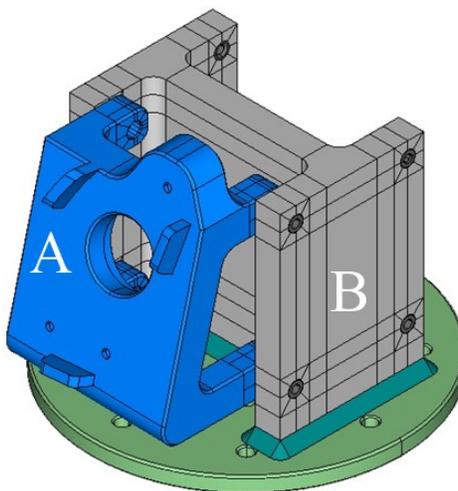


Figura 2 – Adaptador e base

MATERIAIS E MÉTODOS

Diante da problemática apresentada, foram realizadas análises utilizando dispositivos de medição de vibrações e softwares da Vibration Research (VR), que são programas desenvolvidos para análise e controle de vibrações em sistemas. A partir dessas análises, surgiram discussões sobre a possibilidade de substituir o suporte do espelho retrovisor, que era fabricado por usinagem, por uma peça impressa em 3D. Para isso, foram conduzidos testes utilizando filamento de carbono como material de impressão. O filamento de carbono é conhecido por sua estabilidade química e nanoestrutura multivalente, o que o torna adequado para diversas aplicações (FU et al., 2017).

O processo de usinagem é caracterizado pelo desgaste mecânico da matéria-prima para criar uma peça com um formato pré-determinado. Os principais processos de usinagem incluem aplainamento, brochamento, fresamento, furação, retificação e

torneamento. Por outro lado, o processo de impressão 3D é baseado na adição de material e tem a capacidade de produzir objetos em uma ampla variedade de formas.

Existem diferenças significativas entre os dois processos, usinagem CNC e impressão 3D. A usinagem CNC, que é um processo de fabricação subtrativa, resulta em maior desperdício de material, pois uma quantidade maior é removida para produzir a peça desejada. Por outro lado, na impressão 3D, a quantidade de material necessária é consideravelmente menor para produzir a mesma peça. Segundo Gardner et al. (2016), a utilização de fibra de carbono na manufatura aditiva é benéfica devido à sua versatilidade e aplicabilidade. A Figura 3 ilustra essa diferença entre os processos.

Há uma ampla pesquisa em andamento para avanços tecnológicos visando melhorias de desempenho e comparações entre as técnicas de fabricação, tanto para manufatura aditiva quanto subtrativa (BEAMAN et al., 2004).

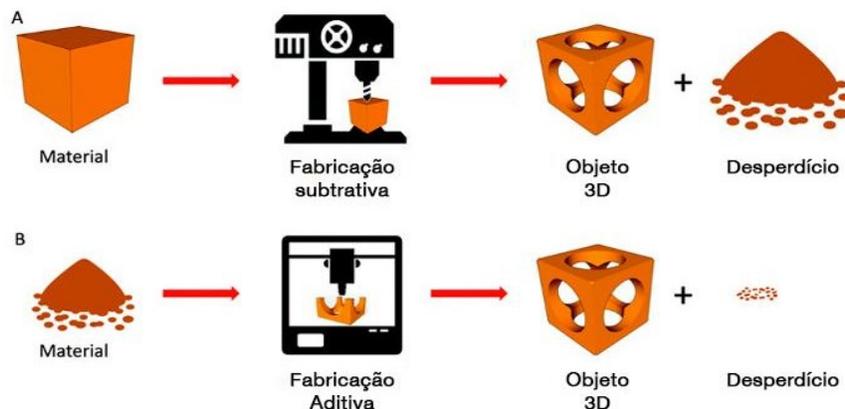


Figura 3 – Exemplificação entre a diferença de fabricação (Fit Tecnologia, 2021)

A diferença entre os processos de impressão 3D e usinagem pode ser evidenciada por meio de fluxogramas. Na Figura 4, é ilustrado o fluxograma do processo atual, que envolve a fabricação subtrativa por meio da usinagem. Já na Figura 5, é apresentado o fluxograma da fabricação aditiva, que é utilizado na impressão 3D. “O Terceiro Setor surgiu a partir da própria sociedade civil na tentativa de sanar suas necessidades em decorrência da incapacidade por parte do Estado em atender às necessidades sociais da população” (Alves et al., 2020). As organizações pertencentes a esse setor têm como finalidade principal gerar mudanças sociais e, apesar de não ter como objetivo primordial o lucro, ele é necessário para preservar a continuação das suas atividades (Olak; Nascimento, 2010).

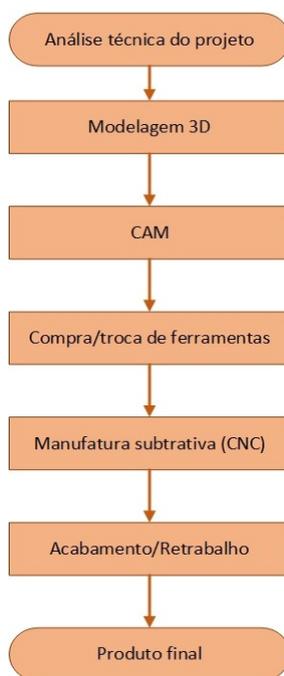


Figura 4 – Fluxograma de Usinagem

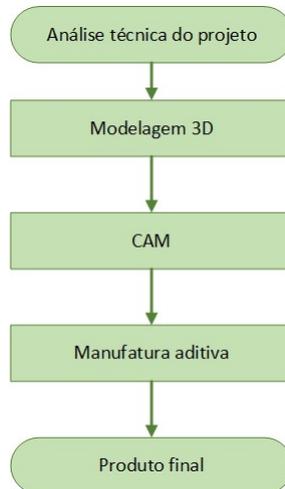


Figura 5 – Fluxograma da impressão 3D

Para realizar as impressões, foi utilizada a impressora 3D PicoCreat G5 FGF. A tecnologia Fused Granular Fabrication (FGF) utilizada por essa impressora é conhecida por fundir granulados, o que possibilita uma ampla variedade de opções de extrusão. Um diferencial dessa impressora é a capacidade de realizar impressões com polímeros de carbono. A FGF também é conhecida como Fused Particle Fabrication (FPF) e permite fabricações granulares de baixo custo (WOERN; PEARCE, 2018). Com o uso do FGF/FPF, é possível utilizar polímeros reciclados com um mínimo de pós-processamento e sem grandes alterações nas propriedades dos materiais (WOERN et al., 2018).

A configuração da impressora no software utilizado para impressão é simples e intuitiva. O modelo é importado e, em seguida, é feito o fatiamento, processo que pode ser visualizado gradualmente. Após o fatiamento completo, é feita a exportação. A configuração do ventilador do bico permite definir o material de impressão e a escala, determinando quais partículas são utilizadas.

A dimensão de impressão do produto é de 500 mm por 500 mm por 500 mm, com uma velocidade de impressão de 100 mm/s e potência nominal de 1400 W. As transferências de arquivos podem ser feitas por meio de USB ou cartão de memória. Além disso, a impressora apresenta outros pontos positivos, tais como:

- Seleção flexível de bocais para impressões rápidas e estáveis;
- Pausa automática em casos de queda de energia, com reinício no ponto em que foi pausada;
- Possibilidade de realizar chanfros nas fatias;
- Impressão em alta variedade de cores;
- Elevada força de extrusão;
- Aquecimento rápido do berço;
- Nivelamento automático do dispositivo.

Com o uso da impressora 3D PicoCreat G5 FGF, é possível realizar impressões rápidas, de baixo custo, com a possibilidade de utilizar diversos materiais e com eficácia (PIOCREAT, 2021). A Figura 6 ilustra a impressora utilizada no processo.



Figura 6 – Exemplificação entre a diferença de fabricação (Creatwit, 2022)

O estudo e a análise do comportamento do adaptador conectado a uma base de vibração universal são realizados utilizando materiais metálicos e poliméricos. É importante fazer uma comparação entre o comportamento teórico e real, para isso, são realizados estudos com base em referências bibliográficas, análise de materiais, simulações Computer Aided Engineering (CAE) e testes com protótipos físicos, a fim de validar as alterações realizadas. Os avanços e ganhos obtidos são documentados em um relatório.

O estudo vibracional em laboratório tem como objetivo verificar a durabilidade do produto (retrovisor), sujeitando-o a frequências e forças específicas. Analisa-se o ponto de ressonância máxima que a peça atinge e o tempo que ela suporta o teste. Esses testes têm como finalidade atender às especificações dos clientes e do processo interno.

As diferentes respostas vibracionais são principalmente influenciadas pelas variações nas propriedades dos materiais e nas temperaturas (IBACH; BRUCHMANN; WAGNER, 1982). O cálculo é utilizado para determinar as constantes de força, as distribuições de energia potencial e os deslocamentos em estudos vibracionais (QUILLARD et al., 1994).

O grupo de softwares utilizados permite realizar quatro tipos de testes vibracionais, conforme descrito pela VR (2022):

- Sine: Realização de testes de onda senoidal para avaliar aceleração, velocidade e deslocamento.
- Random: Testes de espectro rápido com detecção fácil de ressonâncias por meio de uma distribuição gaussiana.
- Shock: Realização de pulsos de choque.
- Field data replication: Reprodução de dados medidos em campo utilizando um agitador.

O tipo de estudo realizado foi o field data replication. É importante ressaltar a importância do estudo das vibrações em sistemas mecânicos para a resolução de diversos problemas técnicos (ŚWIDER; MICHALSKI; WSZOLEK, 2005). Para a análise dos componentes, utiliza-se a combinação do Finite Element Analysis (FEA) com a análise vibracional, conforme descrito por SINHA (2015).

Para a confecção da base, das buchas do dispositivo e do dispositivo, foi utilizado o Alumínio 6061-T6. Esse material possui as propriedades descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do Alumínio 6061-T6

Dado	Valor	Unidade
Módulo de Young	68.947,60	MPa
Limite de Escoamento	276,00	MPa
Coefficiente de Poisson	0,33	-
Densidade	$2,71 \cdot 10^{-9}$	T/mm ³

Importante ressaltar que o tipo de cordão de solda, o processo de soldagem e o material possuem uma influência direta na simulação e nos testes do produto. Nesse sentido, utilizou-se o cordão de solda TIG-ER4943, com um diâmetro máximo de 4 mm. As propriedades desse cordão podem ser observadas na Tabela 2. Vale destacar que Muneer et al. (2022) mencionam análises

comparativas de estudos de microestruturas utilizando o cordão ER4943.

Tabela 2 – Propriedades do TIG-ER4943 (Adaptado de Haselhuhn et al., 2016)

Dado	Valor	Unidade
Módulo de Young	70.400,00	MPa
Limite de Escoamento	85,00	MPa
Coefficiente de Poisson	0,34	-
Densidade	$2,69 \cdot 10^{-9}$	T/mm ³

As simulações dos adaptadores foram realizadas utilizando três materiais distintos. O primeiro material foi o Alumínio 6061-T6, cujas propriedades foram descritas anteriormente. Os outros dois materiais utilizados foram o PA6, um material ortotrópico 3D com 20,00% de fibra de carbono, e o ePA6 25CF, também ortotrópico, porém com 25,00% de fibra de carbono.

Estudos sobre as propriedades, efeitos e resultados das impressões 3D utilizando esses materiais são relatados por Li e Xia (2010), Liang et al. (2014) e He et al. (2020). As propriedades desses materiais com fibra de carbono utilizados para a Impressão 3D estão descritas na Tabela 3 e na Tabela 4.

Tabela 3 – Propriedades do PA6 com 20,00% de fibra de carbono (Sauer, 2018)

Dado	Valor	Unidade	Valor	Unidade
Direções	x e y		z	
Módulo de Young	1.731,28	Mpa	7.594,18	MPa
Coefficiente de Poisson	0,39	-	0,39	-
Densidade	$1,24 \cdot 10^{-9}$	T/mm ³	$1,24 \cdot 10^{-9}$	T/mm ³

Tabela 4 – Propriedades do ePA6 com 25,00% de fibra de carbono (Sauer, 2018)

Dado	Valor	Unidade	Valor	Unidade
Direções	x e y		z	
Módulo de Young	9.904,60	Mpa	1.842,39	MPa
Coefficiente de Poisson	0,39	-	0,39	-
Densidade	$1,24 \cdot 10^{-9}$	T/mm ³	$1,24 \cdot 10^{-9}$	T/mm ³

Com a análise das malhas, o modelo gerado possui um total de 225.950 elementos e 344.368 nós, sendo que o tamanho dos elementos foi de 0,225 (10 mm). É importante ressaltar o número de elementos hexa, que foi de 12.832, e de elementos tetra, que totalizaram 112.378. A utilização do FEA permite a realização de análises estruturais, avaliação de tensões, vibrações e efeitos térmicos que surgem durante o projeto, visando obter resultados precisos (RAMU; MOHANTY, 2012).

A utilização de malhas não estruturadas facilita a definição dos limites da geometria e possibilita um refinamento maior das malhas, utilizando técnicas como o posicionamento de grafos, que auxilia na resolução de problemas de grande escala (LIAN et al., 2006). Na Figura 7, é possível observar a geometria com as malhas já geradas. Vale ressaltar que o modelo gerado foi ideal para a análise realizada, não havendo necessidade de ajustes adicionais na malha.

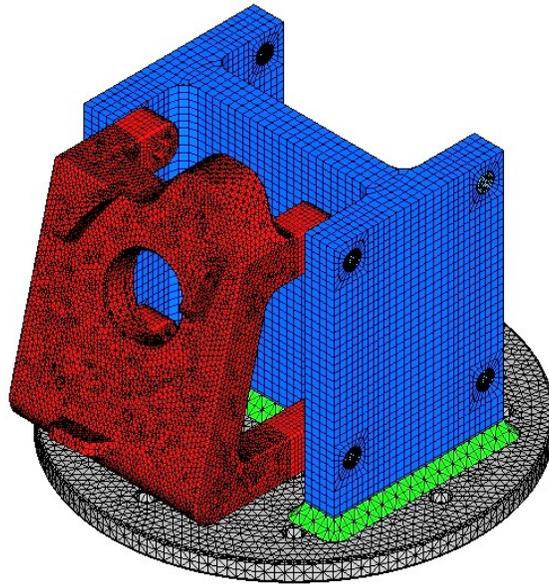


Figura 7 – Modelo com malhas

Para considerar a influência dos parafusos na estrutura, foram adicionados 18 elementos rígidos, conhecidos como Spiders, como ilustrado na Figura 8. A fim de garantir uma análise precisa do contato entre a base e o dispositivo, foram utilizados 11.639 elementos de GAP, como mostrado na Figura 9. Esses elementos de Geometrical and Material Nonlinearities with Arbitrary Path (GAP) são importantes para representar a folga ou espaço entre as superfícies, permitindo uma análise mais realista das condições de contato.

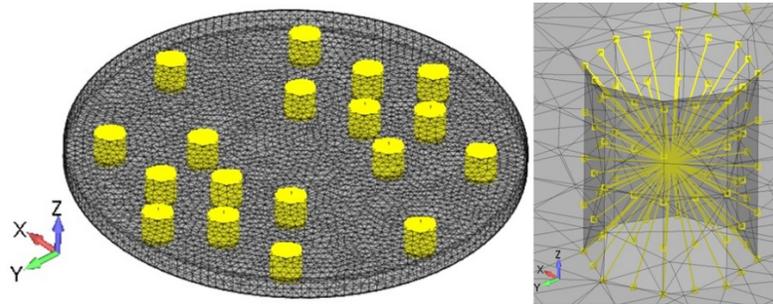


Figura 8 – Elementos rígidos



Figura 9 – Elementos de GAP

O dispositivo é fixado nos nós centrais dos elementos rígidos mencionados anteriormente, permitindo uma liberdade de rotação do parafuso em torno de R_z . Para simular a face do Shaker, são utilizados os elementos de GAP mencionados anteriormente. Em

situações que envolvem cola ou solda, são simulados elementos específicos para representar essa configuração de fixação. Nos nós centrais dos elementos fixos, é aplicada uma aceleração de $9,81 \text{ mm/s}^2$ no eixo z.

A análise modal foi realizada para obter os 10 primeiros modos de vibração do dispositivo, considerando frequência, amortecimento e formas modais. Esse tipo de análise é uma forma econômica e rápida de obter informações sobre os modos vibracionais de uma estrutura ou máquina. Vibrações em compósitos reforçados com carbono também são abordadas por Formica, Lacarbona e Alessi (2010).

Após estudos preliminares, foi definido um ponto central a partir do qual os resultados serão analisados. Esse ponto central foi selecionado por ser mais suscetível a deslocamentos e acelerações. Na Figura 10, é mostrada a demarcação desse ponto central em preto, embora ele não esteja presente fisicamente na geometria e tenha sido marcado apenas para fins de compreensão.

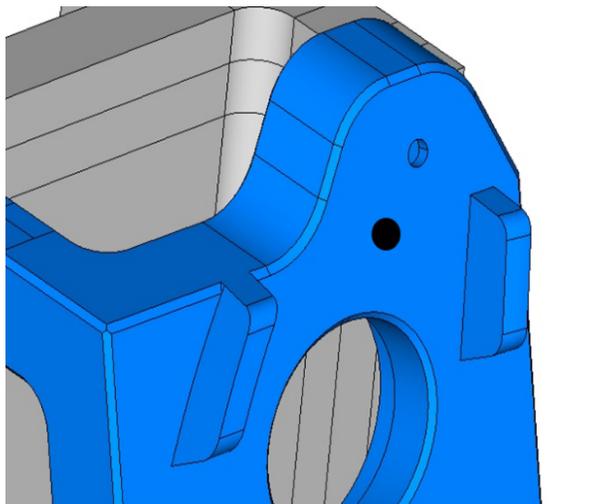


Figura 10 – Ponto Central

O número de camadas de impressão é de 1.136, resultando em um consumo de filamento de aproximadamente 421.083 mm. O tempo de impressão estimado para cada dispositivo é de 76 horas e 17 minutos. Utilizou-se o tipo de aderência "jangada" e definiu-se a qualidade de impressão em 0,15 mm. A velocidade de impressão adotada foi de 60,00 mm/s, com uma densidade de enchimento de 30,00%. O peso resultante da estrutura é de 265,00 kg. Na Figura 11, são apresentadas algumas das configurações utilizadas no software Cura para a impressão, ressaltando que esses dados são válidos para ambos os dispositivos.

Velocidade e Qualidade	Estruturas	Extrusão	G-Codes	Avançado
Preenchimento				
Espessura exterior:	<input type="text" value="5"/>			[mm]
Espessura Superior/Inferior:	<input type="text" value="5"/>			[mm]
Sobrepôr enchimento:	<input type="text" value="100"/>			[%]
Padrão de enchimento:	<input type="text" value="Grades"/>			
<input checked="" type="checkbox"/> Enchimento superior sólido	<input checked="" type="checkbox"/> Enchimento inferior sólido			
Suporte				
Padrão do suporte:	<input type="text" value="Linhas"/>			
Ângulo da saliência:	<input type="text" value="60"/>			[°]
Quantidade de enchimento:	<input type="text" value="15"/>			[%]
Distância X Y:	<input type="text" value="0.8"/>			[mm]
Distância Z:	<input type="text" value="0.3"/>			[mm]
Saia e Aba				
Número de linhas da saia:	<input type="text" value="1"/>			
Distância da saia:	<input type="text" value="3"/>			[mm]

Figura 11 – Dados do CuraEngine

O custo do material ePA6 25% é mais elevado em comparação ao PA6 20%, sendo aproximadamente R\$ 1,95 por metro, enquanto o PA6 20% custa R\$ 1,15 por metro. Além disso, é importante considerar outros custos envolvidos na produção, como hora-máquina, hora-homem, modelagem e variáveis, que podem influenciar no valor final do projeto.

O presente trabalho consistiu em um estudo de caso realizado em uma empresa líder de mercado, com o objetivo de avaliar a viabilidade da substituição de peças usinadas por peças impressas para reduzir os custos operacionais. A abordagem utilizada foi a de estudo de caso, que é uma estratégia de pesquisa eficaz (GOG, 2015).

Através da coleta de dados existentes sobre a produção utilizando usinagem, foram realizadas análises detalhadas dos resultados obtidos por meio de simulações numéricas, testes de ressonância, testes estruturais e outras operações relevantes. Além disso, o custo total da operação também foi calculado.

Em seguida, o mesmo processo foi realizado utilizando a manufatura aditiva, permitindo a comparação direta dos resultados antes e depois da implementação dessa tecnologia. Vale ressaltar que, na última etapa, foi realizada uma análise econômica para avaliar a viabilidade da proposta.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este estágio do trabalho foi dividido em quatro partes distintas. A primeira parte consistiu em um estudo realizado com o uso do Alumínio 6061-T6. Na segunda parte, foi realizado um estudo com o PA6 contendo 20,00% de Fibra de Carbono. Já na terceira parte, o estudo foi realizado com o ePA6 contendo 25,00% de Fibra de Carbono. Por fim, serão apresentados os resultados gerais dos modelos avaliados, os quais referem-se ao retrovisor do lado esquerdo. É importante ressaltar que a Análise 2 e a Análise 3 foram realizadas com o material impresso, enquanto a Análise 1 foi realizada com o material usinado.

Com a análise modal do modelo, foi identificado um deslocamento total máximo de 30,715 mm. A seguir, são apresentados os modos de vibração encontrados:

1º: 1.104,95 Hz;	6º: 2.641,10 Hz;
2º: 1.250,08 Hz;	7º: 2.846,05 Hz;
3º: 1.853,13 Hz;	8º: 3.976,71 Hz;
4º: 2.159,56 Hz;	9º: 4.547,63 Hz;
5º: 2.596,94 Hz;	10º: 4.564,68 Hz.

Na Figura 12, é apresentado o primeiro modo de vibração. No entanto, é importante ressaltar que a análise de vibração proporciona uma melhor compreensão com o uso de animação, que permite visualizar os principais pontos de acordo com o movimento do modelo. No Gráfico 1, é exibido o gráfico de vibração forçada no eixo z, no qual o pico de interesse é de 4,15 Gmm/s² em 941,66 Hz. O primeiro modo natural analisado apresenta uma amplitude de 2,12 Gmm/s² em 1104,95 Hz.

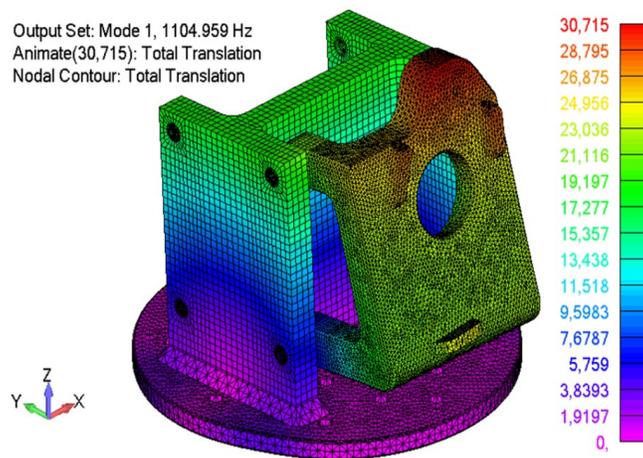


Figura 12 – Deslocamento do 1º modo de vibração (Alumínio)

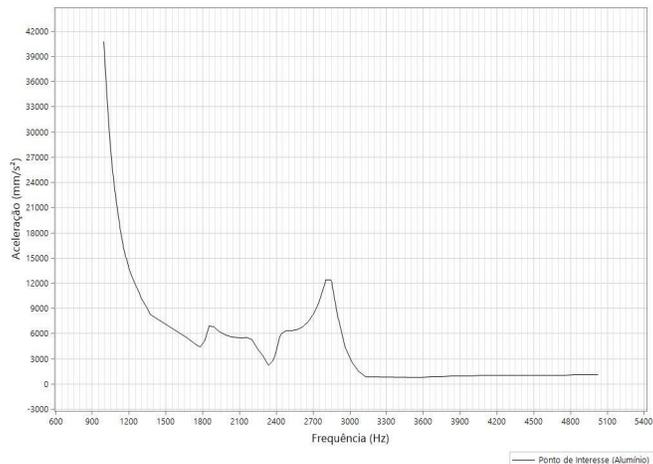


Figura 13 – Vibração forçada no eixo z (Alumínio)

A partir da análise 2, foram utilizados materiais com a utilização da fabricação aditiva. O material escolhido foi o PA6 com 20,00% de fibra de carbono, o qual possui características que variam de acordo com sua direção e orientação de impressão.

Neste estudo, o primeiro modo de vibração apresenta um deslocamento de 65,98 mm. Os modos de vibração encontrados são listados abaixo:

- | | |
|------------------|-------------------|
| 1º: 827,08 Hz; | 6º: 1.993,37 Hz; |
| 2º: 1.160,87 Hz; | 7º: 2.166,23 Hz; |
| 3º: 1.378,45 Hz; | 8º: 2.311,92 Hz; |
| 4º: 1.509,32 Hz; | 9º: 2.673,00 Hz; |
| 5º: 1.876,77 Hz; | 10º: 3.001,93 Hz. |

É importante ressaltar a densidade do material utilizado, pois ela terá influência nos resultados da confecção do produto. Na Figura 13, é mostrado o primeiro modo de vibração, e no Gráfico 2, a vibração forçada ao longo do eixo z. Destaca-se que o pico do ponto de interesse nesse caso é de 9,00 Gmm/s² em 1.160,87 Hz.

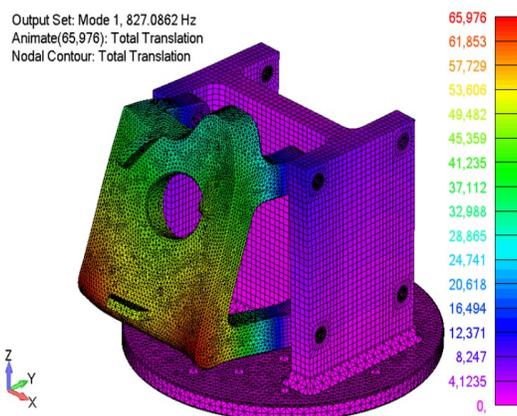


Figura 14 – Deslocamento do 1º modo de vibração (PA6 – 20,00% carbono)

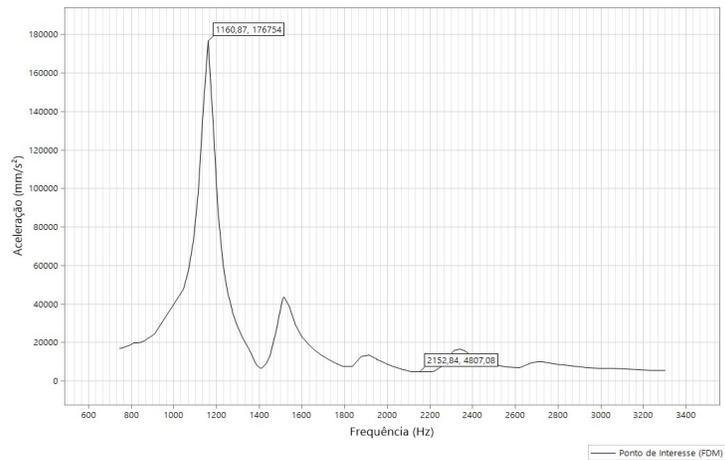


Figura 15 – Vibração forçada no eixo z (PA6 – 20,00% carbono)

Na Figura 15, é possível observar o pico de aceleração após a inversão de fase, que alcança valores de 29,39 Gmm/s² a 712,20 Hz. Já na Figura 16, a inversão é mais brusca, com valores de 3,09 Gmm/s² a 894,60 Hz. Esses resultados indicam os níveis de vibração experimentados nos testes e são importantes para a avaliação do desempenho e comportamento das peças.

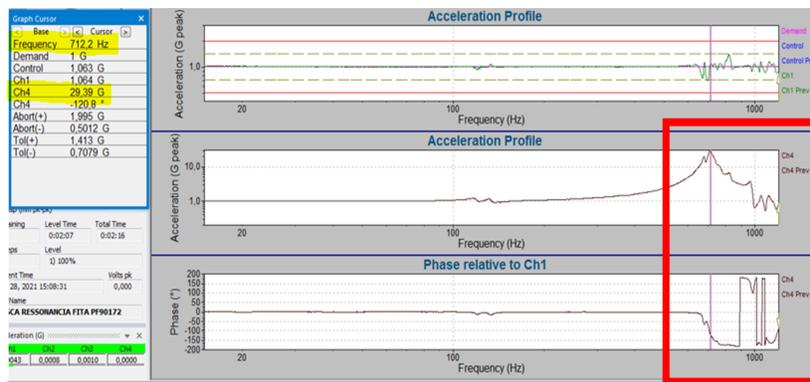


Figura 16 – Vibração forçada 1 (PA6 – 20,00% carbono)

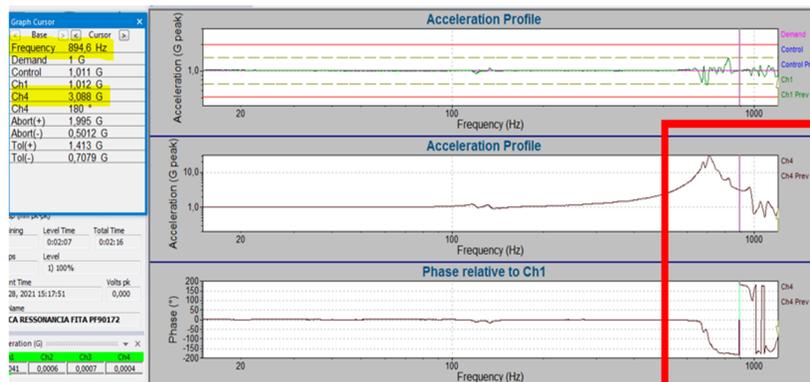


Figura 17 – Vibração forçada 2 (PA6 – 20,00% carbono)

A confecção do protótipo físico foi realizada como segunda etapa, após os testes computacionais. Na Figura 18, é mostrada a impressão do adaptador juntamente com o Shaker. O teste 2 se destaca nas duas análises impressas, pois foi realizado um protótipo físico específico para esse teste, permitindo um diagnóstico mais preciso.

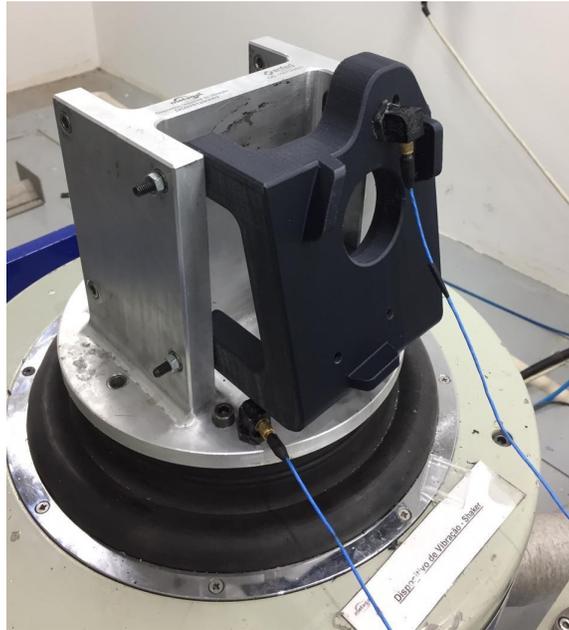


Figura 18 – Adaptador impresso e shaker

A Análise 3 segue o mesmo princípio da Análise 2, utilizando o material ePA6 com 25,00% de carbono, que também apresenta características de alteração com a modificação de direção e sentido. O primeiro modo de vibração na Análise 3 apresenta um deslocamento de 62,06 mm e os modos de vibração são descritos abaixo:

- | | |
|------------------|-------------------|
| 1º: 879,10 Hz; | 6º: 1.948,32 Hz; |
| 2º: 1.130,01 Hz; | 7º: 2.220,20 Hz; |
| 3º: 1.461,80 Hz; | 8º: 2.304,98 Hz; |
| 4º: 1.485,98 Hz; | 9º: 2.414,77 Hz; |
| 5º: 1.835,11 Hz; | 10º: 2.840,57 Hz. |

Na Figura 19, é mostrado o primeiro modo de vibração, enquanto no Gráfico 3 é apresentada a vibração forçada no eixo z. Neste caso, o valor mais alto do ponto de interesse é de 22,81 G, que corresponde a 879,10 Hz.

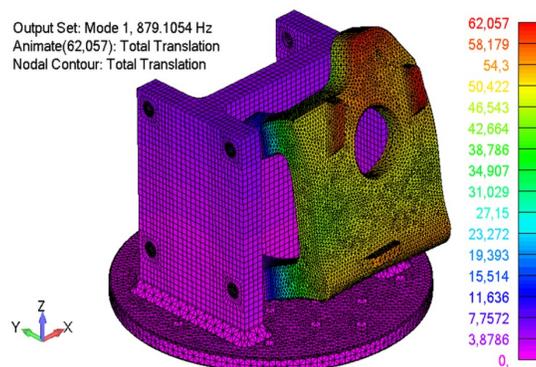


Figura 19 – Deslocamento do 1º modo de vibração (ePA6 – 25,00% carbono)

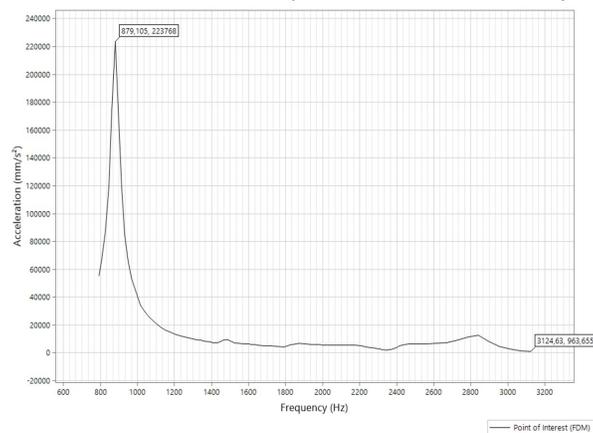


Figura 20 – Vibração forçada no eixo z (ePA6 – 25,00% carbono)

Diante das três análises, é possível comparar os valores obtidos anteriormente e compreender as diferenças entre elas. Há 2 tipos de Pico Z, o primeiro é a frequência para maior aceleração e o segundo a frequência para mudança abrupta de fase. A Tabela 5 apresenta uma comparação dos adaptadores estudados.

Tabela 5 – Comparativo entre adaptadores

Dado/Material	Alumínio 6061-T6	PA6 – 20% CF	ePA6 – 25% CF
1º Modo (CAE)	1.104,95 Hz	827,08 Hz	879,10 Hz
Pico Z (CAE)	994,46 Hz	1.160,87 Hz	879,10 Hz
Pico Z1 (Shaker)	N/A	712,20 Hz	N/A
Pico Z2 (Shaker)	N/A	894,60 Hz	N/A

Com base nos dados obtidos e nas simulações realizadas pelo FEA, é possível avaliar a viabilidade do projeto em termos de sua estrutura. No entanto, um fator de extrema importância é a viabilidade econômica.

Atualmente, o custo de usinagem para a fabricação do adaptador de Alumínio 6061-T6 é de aproximadamente R\$ 5.000,00. Por outro lado, o custo total para a fabricação do adaptador com o material PA6 20% FC é de R\$ 330,86, e para o ePA6 25% FC é de R\$ 556,03. Esses custos totais incluem o custo do material e o custo da máquina (impressora 3D). Além disso, destaca-se que também há o custo do projetista, que recebe R\$ 166,00 por dia.

Com base nessas avaliações, a Análise 2 representa uma economia de 93,38%, e a Análise 3 de 88,88%. Vale ressaltar que o estudo inicial buscava uma redução de 50,00% nos custos, porém, os valores encontrados foram muito superiores com ambos os materiais para a fabricação aditiva.

O diferencial e os parâmetros encontrados com o estudo CAE apresentam uma qualidade e confiabilidade elevadas, sendo que, no caso do material PA6 20% FC impresso, obteve-se um resultado superior em relação ao material usinado. A Figura 18 apresenta o dispositivo fabricado com o uso da fabricação aditiva.



Figura 21 – Dispositivo impresso (ePA6 – 25,00% carbono)

CONCLUSÕES

Após avaliar ambos os materiais impressos, o mais adequado para a usabilidade é o utilizado na Análise 2, pois, apesar da proximidade dos resultados com a Análise 3, possui um custo inferior. Em uma comparação breve, para a fabricação de 1.000 adaptadores usinados, o custo total é de R\$5.000.000,00. Por outro lado, utilizando o PA6 20% FC, o gasto para produzir a mesma quantidade de adaptadores é de R\$330.860,00. Existem diferenças significativas no tempo de fabricação, que também são consideradas para o cálculo do custo total. Diversos fatores são levados em conta, como modelamento, material, hora-máquina, hora-homem e variáveis. Para obter o custo total de usinagem, utiliza-se a equação (1), resultando no valor mencionado anteriormente. Por sua vez, para calcular o custo da impressão 3D, utiliza-se a equação (2).

$$Kp_u = Kp_{mt} + H_p + V_m \quad (1)$$

$$Kp_{3D} = Kp_{mi} + H_p + V_m \quad (2)$$

Na qual:

Kp_u : Custo de Usinagem (R\$)

Kp_{3D} : Custo da Impressão 3D (R\$)

Kp_{mt} : Custo máquina (Ferramenta + máquina)

Kp_{mi} : Custo máquina (Impressora)

H_p : Hora projetista

V_m : Valor do material

O deslocamento entre os dois materiais impressos foi semelhante, sendo de aproximadamente 62,00 mm para um e 66,00 mm para o outro. Embora esses valores sejam maiores do que o deslocamento de 31,00 mm do Alumínio 6061-T6, não foram observadas diferenças ou riscos significativos. É importante ressaltar que o primeiro modo de vibração deve ser superior a 1.000 Hz, e ambas as análises com o material impresso apresentaram valores inferiores ao requisitado. Diante dessa questão, será necessário realizar estudos futuros visando aumentar pouco mais de 12,00% (Análise 2) ou 17,00% (Análise 3) no valor solicitado, a fim de obter um modo de vibração maior do que o requisitado.

Apesar da excelente viabilidade econômica e dos resultados satisfatórios obtidos, é fundamental considerar os critérios de qualidade exigidos pelo cliente. Portanto, será necessário submeter o projeto a um procedimento de inspeção e aceitação por parte do cliente para que a modificação seja aprovada.

REFERÊNCIAS

AVITABILE, Peter. Experimental modal analysis. **Sound and vibration**, v. 35, n. 1, p. 20-31, 2001.

BEAMAN, Joseph J. et al. Additive/subtractive manufacturing research and development in Europe. World Technology Evaluation Center Inc Baltimore MD, 2004.

CREATWIT 3D. **Piocreat FGF Pellet 3D Printer G5**, 2022. Disponível em: <https://www.creatwit3d.com/product-detail/fgf-particle-3d-printer-g5>. Acesso em: 03 nov. 2022.

FORMICA, Giovanni; LACARBONARA, Walter; ALESSI, Roberto. Vibrations of carbon nanotube-reinforced composites. **Journal of sound and vibration**, v. 329, n. 10, p. 1875-1889, 2010.

GARDNER, John M. et al. 3-D printing of multifunctional carbon nanotube yarn reinforced components. **Additive Manufacturing**, v. 12, p. 38-44, 2016.

GOG, Martina. Case study research. **International Journal of Sales, Retailing & Marketing**, v. 4, n. 9, p. 33-41, 2015.

HASELHUHN, Amberlee S. et al. Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing. **Materials Science and Engineering: A**, v. 673, p. 511-523, 2016.

HE, Qinghao et al. 3D printed continuous CF/PA6 composites: Effect of microscopic voids on mechanical performance. **Composites science and technology**, v. 191, 2020.

IBACH, H.; BRUCHMANN, H. D.; WAGNER, H. Vibrational study of the initial stages of the oxidation of Si (111) and Si (100) surfaces. **Applied Physics A**, v. 29, n. 3, p. 113-124, 1982.

KENNEY, Michael E. Cost Reduction through the Use of Additive Manufacturing (3D Printing) and Collaborative Product Lifecycle Management Technologies to Enhance the Navy's Maintenance Programs. **Naval Postgraduate School Monterey CA Graduate School of Operational and Information Sciences**, 2013.

FU, Kun et al. Progress in 3D printing of carbon materials for energy-related applications. **Advanced materials**, v. 29, n. 9, p. 1603486, 2017.

LI, Aijun et al. Optimization method to fabrication orientation of parts in fused deposition modeling rapid prototyping. In: **2010 International conference on mechanic automation and control engineering**. IEEE, 2010. p. 416-419.

LI, J.; XIA, Y. C. The friction and wear properties of thermoplastic PA6 composites filled with carbon fiber. **Journal of thermoplastic composite materials**, v. 23, n. 3, p. 337-349, 2010.

LIAN, Y.-Y. et al. Parallel adaptive mesh-refining scheme on a three-dimensional unstructured tetrahedral mesh and its applications. **Computer Physics Communications**, v. 175, n. 11-12, p. 721-737, 2006.

LIANG, Jicai et al. Mechanical properties, crystallization and melting behaviors of carbon fiber-reinforced PA6 composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 115, n. 1, p. 209-218, 2014.

KOMOROSKI, Christine L. Reducing Cycle Time and Increasing Value through the Application of KVA Methodology to the US Navy Shipyard Planning Process. **Acquisition Research Program**, 2005.

MUNEER, Waqas et al. Comparative study of microstructure and mechanical properties using a novel filler rod ER 4943 and autogenously butt welded joint during laser welding of AA 6061-T6 in 1G position. **Modern Physics Letters B**, 2022.

PIOCREAT. **G5 Industrial FGF Pellets 3D Printer, Granular 3D Printer – Piocreat**, 2021. Disponível em: <https://www.piocreat3d.com/product-18.html>. Acesso em: 30 out. 2022.

RAMU, I.; MOHANTY, S. C. Study on free vibration analysis of rectangular plate structures using finite element method. **Procedia engineering**, v. 38, p. 2758-2766, 2012.

SAUER, Max James. Evaluation of the mechanical properties of 3D printed carbon fiber composites. South Dakota State University, 2018.

SCHUBERT, Carl; VAN LANGEVELD, Mark C.; DONOSO, Larry A. Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to organs. **British Journal of Ophthalmology**, v. 98, n. 2, p. 159-161, 2014.

SCHWARZ, Brian J.; RICHARDSON, Mark H. Experimental modal analysis. **CSI Reliability week**, v. 35, n. 1, p. 1-12, 1999.

SEAMAN, Nathan. The use of collaborative and three dimensional imaging technology to increase value in the SHIPMAIN environment of the Fleet Modernization Plan. **Acquisition Research Program**, 2007.

SINHA, Jyoti Kumar. **Vibration analysis, instruments, and signal processing**. Boca Raton: CRC press, 2015.

ŚWIDER, J.; MICHALSKI, P.; WSZOLEK, G. Physical and geometrical data acquiring system for vibration analysis software. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 164, p. 1444-1451, 2005.

QUILLARD, S. et al. Vibrational analysis of polyaniline: A comparative study of leucoemeraldine, emeraldine, and pernigraniline bases. **Physical Review B**, v. 50, n. 17, p. 12496, 1994.

VIBRATION RESEARCH. **The Basics of Setting Up A Vibration Test E-book**, 2022. Disponível em: <https://vibrationresearch.com/vibration-testing-setup-ebook/>. Acesso em: 04 nov. 2022.

WOERN, Aubrey L. et al. Fused particle fabrication 3-D printing: Recycled materials' optimization and mechanical properties. **Materials**, v. 11, n. 8, p. 1413, 2018.

WOERN, Aubrey L.; PEARCE, Joshua M. 3-D printable polymer pelletizer chopper for fused granular fabrication-based additive manufacturing. **Inventions**, v. 3, n. 4, p. 78, 2018.