



Análise de viabilidade para a troca de peças confeccionadas por usinagem para o processo de manufatura aditiva - impressão 3D

Lucas Antonio Gonçalves

aglucas10@gmail.com

Thiago Tadeu Barbosa

thiago.tadeu.barbosa@gmail.com

Orientador: Prof. Me. Francisco Reginaldo da Rosa

Coordenação de curso de Engenharia Mecânica

Resumo

O trabalho desenvolvido busca compreender as diferenças entre a usinagem e a impressão 3D para a confecção de peças usadas no apoio de espelhos retrovisores. A evolução tecnológica e a possibilidade da redução drástica do custo são as principais justificativas para tal desenvolvimento. A área de estudo do projeto é baseada na análise das vibrações, com o uso de recursos de manufatura aditiva, usinagem e o método de elementos finitos. Objetiva-se avaliar a viabilidade e compreender os possíveis ganhos gerados com a alteração do processo de fabricação, por meio, de diversos testes envolvendo simulação. Com o auxílio da Metagal, empresa líder de desenvolvimento e no mercado de retrovisão e com apoios bibliográficos para corroborar com o estudo de campo, tornou-se factível o estudo e a avaliação da implementação da impressão para produzir peças de custo elevado, avalia-se um possível ganho de no mínimo 50% em relação a viabilidade econômica, além de, em seu dimensional, não ocorrer alta variação de deslocamento.

Palavras-chave: Impressão 3D. Processos de Usinagem. Prototipagem. Testes Vibracionais.

1. Introdução

A prototipagem rápida ou manufatura aditiva é denominada impressão tridimensional ou impressão 3D, ao qual, permite o desenvolvimento de modelos complexos e ricos em detalhes, com a possibilidade de utilizar materiais com diferentes características para a sua construção, além de ser um processo de fácil acesso.

O projeto tem o propósito de expor a possibilidade de substituição do processo de usinagem convencional ou CNC, em estruturas metálicas de pequeno porte, para o processo de impressão 3D.

Com a análise do mercado atual, o foco do trabalho é apresentar a viabilidade focada na redução de custos e a avaliação vibracional da estrutura. Komorski (2005), Seaman (2007) e Kenney (2013), ressaltam os benefícios econômicos

proporcionados pelo uso da manufatura aditiva. Desta forma, é plausível a realização de estudos em estruturas com suporte. Com o uso de softwares de modelagem virtual e simulação, torna-se possível realizar as análises dimensionais e vibracionais de materiais. Diante disso, há possibilidade de verificar a validade do estudo em questão.

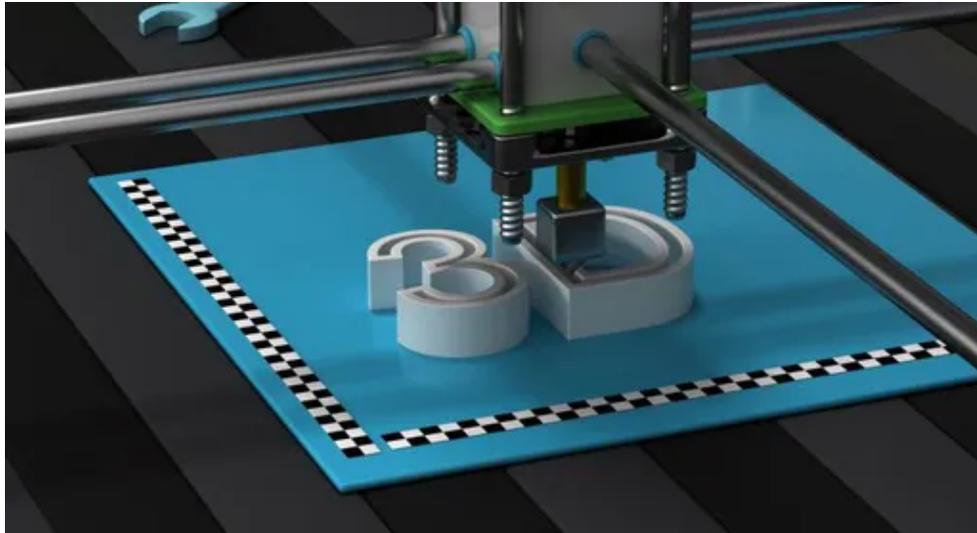
O desenvolvimento do trabalho justifica-se como algo de enorme relevância tecnológica, a redução do custo neste desenvolvimento é algo exorbitante, no qual, apesar de uma alta demanda de tempo, a realização de diversos testes e as aprovações do cliente, o possível resultado obtido é relevante.

O objetivo geral é avaliar se é viável ou não a troca da peça usinada por uma peça produzida com a manufatura aditiva, enquanto isso, os objetivos específicos são os outros ganhos secundários, tais como, a evolução tecnológica, a redução de custos e a agilidade na produção.

Com o intuito de concretizar as informações citadas no trabalho serão informadas as características técnicas sobre os equipamentos e materiais utilizados para atingir o objetivo proposto. Os resultados encontrados nos referenciais bibliográficos mostram um avanço significativo do tema abordado. A otimização da orientação da prototipagem rápida pode ter a finalidade de aumentar a eficácia do processamento e reduzir o custo (LI et. al, 2010).

Este projeto tem como propósito contribuir com o avanço das pesquisas acadêmicas neste ramo, pretende-se aprofundar nas atividades de modelagem e prototipagem 3D. A forma de fabricação utilizada para impressões 3D é baseada no depósito de materiais em camadas para que se produza um material final tridimensional (SCHUBERT; VAN LANGEVELD; DONOSO, 2014). Busca-se a construção e a viabilização de peças produzidas com fabricação aditiva que possam garantir a mesma resistência de peças feitas com fabricação subtrativa e com um custo significativamente inferior. Na Figura 1 é mostrado um exemplo de impressora 3D.

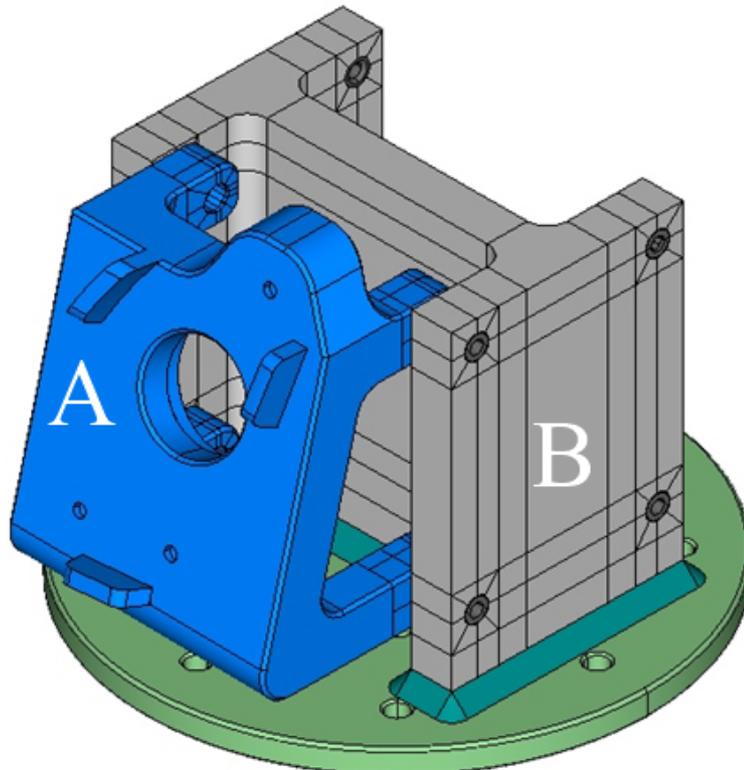
Figura 1: Impressão 3D



Fonte: Canal Tech (2019).

Na Figura 2 é representada a geometria do suporte mockup (área azul com identificação “A”) e de sua base (área cinza com identificação “B”), com as cores e as identificações meramente, ambas meramente ilustrativas.

Figura 2: Adaptador e base



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

2. Desenvolvimento

Diante da problemática apresentada, com auxílio de dispositivos que medem as vibrações, e com as análises feitas com os softwares da Vibration Research (VR), ao qual, são programas desenvolvidos para análises do controle de vibrações de sistemas, foi possível iniciar discussões com o propósito de avaliar que o dispositivo utilizado para suportar o espelho retrovisor também poderia ser impresso, ao invés de usinado. Diante disso, foram iniciados testes com o propósito de fazer esta troca por uma peça impressa com filamento de carbono, que pelo fato de possuir estabilidade química ideal e uma nanoestrutura multivalente, pode ser utilizada para múltiplas aplicações (FU et. al, 2017).

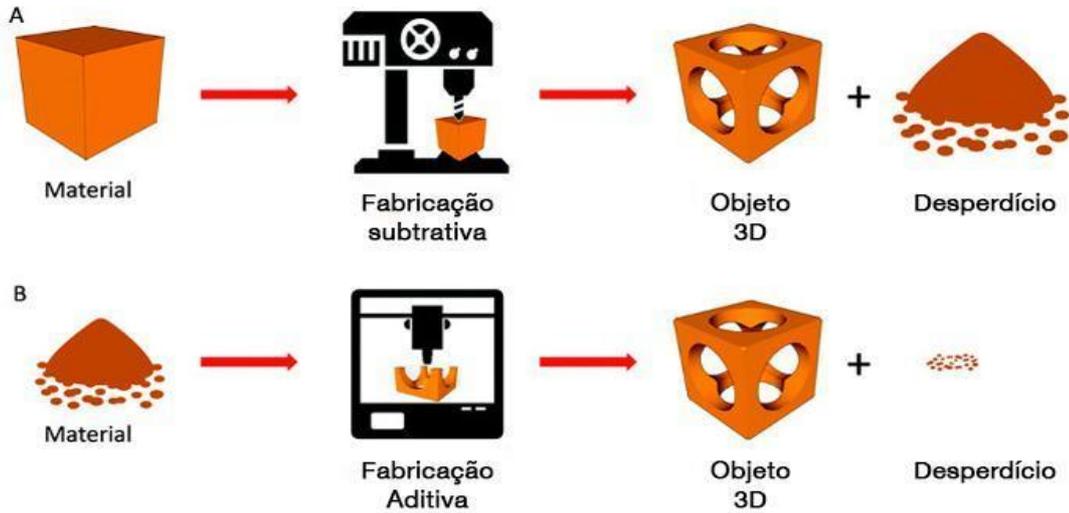
2.1 Usinagem CNC x Impressão 3D

O processo de usinagem é descrito por desgastar de forma mecânica a matéria-prima, para que se origine uma peça com um formato pré-determinado. Os principais processos de usinagem são: aplainamento; brochamento; fresamento; furação; retificação e torneamento. Enquanto isso, o processo de impressão tem como base a adição de material, além de também ter a capacidade de produzir objetos de inúmeros formatos.

Há uma grande distinção entre os dois processos, usinagem CNC e impressão 3D, o primeiro descrito como fabricação subtrativa possui uma maior quantidade de desperdício, conseqüentemente usa uma porção maior de material, enquanto no segundo, há uma quantia bem menor de material para que se produza a mesma peça. Gardner et. al (2016) afirmam que para a manufatura aditiva, o uso da fibra de carbono é excelente pelo fato de sua aplicada e multifuncionalidade. A Figura 3 mostra tal diferença.

Evidencia-se diversas pesquisas em avanços tecnológicos para melhorias de desempenho e comparações das fabricações técnicas, tanto para manufaturas aditivas, quanto subtrativas (BEAMAN, et al., 2004).

Figura 3: Exemplificação entre a diferença de fabricação



Fonte: Fit Tecnologia (2021).

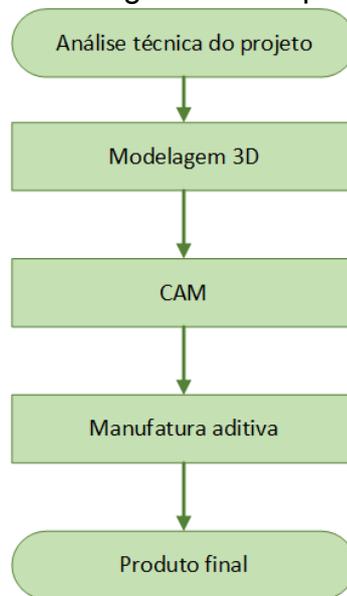
Evidencia-se a diferença dos processos de impressão e de usinagem com o auxílio de fluxogramas. Com isso, na Figura 4 é demonstrado o fluxograma do processo atual, ao qual, utiliza-se a fabricação subtrativa e na Figura 5 é relatado o fluxograma da fabricação aditiva.

Figura 4: Fluxograma da usinagem



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Figura 5: Fluxograma da impressão 3D



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

2.2 Impressora utilizada

Para realizar as impressões foi utilizada a impressora Piocreat 3D G5 FGF. FGF (*Fused Granular Fabrication*) é uma tecnologia que utiliza a fusão de granulados, nos quais, possibilitam uma ampla diversidade de cabeçotes de extrusão, devido a este fato, é proporcionada uma maior variabilidade de impressão. Outro diferencial da impressora é a sua capacidade de realizar impressões de polímeros de carbono. A FGF, também é conhecida como *Fused Particle Fabrication* (FPF) e gera fabricações granulares de baixo custo (WOERN; PEARCE, 2018). Com o uso do FGF/FPF, é possível utilizar polímeros reciclados com uma mínima aplicação 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. Importa-se o modelo e logo em seguida é feito o fatiamento, tal progresso pode ser visto de forma gradual. Após o término de todas as fatias, é feita a exportação. A configuração do ventilador de bico servirá para definir o material de impressão, de acordo com a escala, será possível definir quais partículas são utilizadas.

A dimensão de impressão do produto é de 500 mm x 500 mm x 500 mm, com uma velocidade de impressão de 100 mm/s e potência nominal de 1400 W. As transferências de arquivos podem ser feitas pelo *universal serial bus* (USB) ou pelo

cartão de memória. Além disso, alguns outros pontos positivos podem ser destacados, tais como:

- Seleção flexível de bocais com o intuito de gerar impressões rápidas e estáveis;
- Em quedas de energia, a impressora é pausada automaticamente e após a volta, ela reinicia no ponto em que foi pausada;
- Possibilidade de realizar chanfros nas fatias;
- Impressão em uma alta variabilidade de cores;
- Elevada força de extrusão;
- Aquecimento rápido do berço;
- Dispositivo com nivelamento automático.

Com o uso da impressora 3D pellet FGF, torna-se possível realizar uma impressão rápida, com baixo custo, com a possibilidade de utilizar diversos materiais e com enorme eficácia (PIOCREAT, 2021). Na Figura 6, é demonstrada a impressora utilizada no processo.

Figura 6: Exemplificação da impressora 3D



Fonte: Creatwit (2022).

2.3 Estudo vibracional

O estudo e a análise do comportamento do adaptador conectado em uma base de vibração universal, proeminente da Metagal. As avaliações serão feitas com materiais metálicos e poliméricos. É importante fazer o comparativo entre o teórico e o real, com isso, foram feitos estudos por meio de referenciais bibliográficos, estudo de materiais, simulações CAE e simulações com o protótipo físico, para que a alteração pudesse ser validada. Com isso, avalia-se por intermédio de um relatório os avanços e os ganhos gerados.

O estudo vibracional em laboratório busca verificar a durabilidade do produto (retrovisor), ao qual é inserida a frequência e a força, deste modo, analisa-se o ponto de ressonância máximo em que a peça atinge e o tempo que irá resistir ao teste. Objetiva-se com tal teste, atender as especificações dos clientes e do processo interno.

Os diferentes resultados vibracionais são gerados principalmente pelas variações das propriedades dos materiais e das temperaturas (IBACH; BRUCHMANN; WAGNER, 1982). Com o uso do cálculo para estudos vibracionais são determinados constantes de força, distribuições de energia potencial e deslocamentos (QUILLARD et al., 1994).

O grupo de softwares utilizados permitem que sejam realizados quatro tipos de testes vibracionais, descritos pela Vibration Research (2022), aos quais são:

- *Sine*: Realização de testes de onda senoidal para avaliação de aceleração, velocidade e deslocamento;
- *Random*: Testagem de espectro rápido com fácil detecção de ressonância, verificado pela distribuição Gaussiana.
- *Shock*: Execução de pulsos de choque;
- *Field data replication*: Reprodução de dados medidos em campo, com o uso do shaker.

O tipo de estudo realizado foi o *field data replictaion*. Ressalta-se a importância do estudo das vibrações em sistemas mecânicos para a resolução de diversos problemas técnicos (ŚWIDER; MICHALSKI; WSZOLEK, 2005). Para análise dos itens, utiliza-se a mesclagem do Método dos Elementos Finitos (FEA) com a análise vibracional, tal como descrito por SINHA (2015).

2.4 Materiais e suas propriedades

Para a confecção da base, das buchas do dispositivo e também do dispositivo, utilizou-se o Alumínio 6061-T6, ao qual possui as propriedades descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades do Alumínio 6061-T6

Aluminum 6061-T6		
Módulo de Young	68947,6	MPa
Limite de Escoamento	276	MPa
Coefficiente de Poisson	0,33	-
Densidade	$2,713 \cdot 10^{-9}$	T/mm ³

Fonte: Adaptada de Metagal (2022).

Importante ressaltar que o tipo de cordão de solda, o processo de soldagem e o material possuem direta influência na simulação e na realização dos testes do produto. Diante disso, foi utilizado o TIG-ER4943, com uma dimensão máxima de 4 mm, observa-se suas propriedades na Tabela 2. Muneer et al. (2022) cita análises comparativas de estudos de microestruturas com a utilização da ER4943.

Tabela 2: Propriedades do TIG-ER4943

Weld Material TIG-ER4943		
Módulo de Young	70400	MPa
Limite de Escoamento	85	MPa
Coefficiente de Poisson	0,34	-
Densidade	$2,6849 \cdot 10^{-9}$	T/mm ³

Fonte: Adaptado de Haselhuhn et al. (2016).

As simulações dos adaptadores foram feitas com três materiais. O primeiro foi o Alumínio 6061-T6, no qual, suas propriedades foram descritas anteriormente. Os outros dois materiais utilizados foram o PA6, material ortotrópico 3D com 20% de fibra de carbono e com o PA6 25CF, também ortotrópico com 25% de fibra de carbono.

Estudos sobre propriedades, efeitos e resultados de impressões 3D que são provenientes deste material são relatadas por Li e Xia (2010), Liang et al. (2014) e

He et al. (2020). Na Tabela 3 e na Tabela 4 são descritas as propriedades dos materiais com fibra de carbono utilizados para a Impressão 3D.

Tabela 3: Propriedades do PA6 com 20% de fibra de carbono

PA6 – 20% CF (Ortotrópico 3D)				
Direções	X e Y		Z	
Módulo de Young	1731,28	MPa	7594,18	MPa
Coefficiente de Poisson	0,39	-	0,39	-
Densidade	$1,24 \cdot 10^{-9}$		T/mm ³	

Fonte: Adaptado de Sauer (2018).

Tabela 4: Propriedades do PA6 com 25% de fibra de carbono

PA6 – 25% CF (Ortotrópico 3D)				
Direções	X e Y		Z	
Módulo de Young	9904,60	MPa	1842,39	MPa
Coefficiente de Poisson	0,39	-	0,39	-
Densidade	$1,24 \cdot 10^{-9}$		T/mm ³	

Fonte: Adaptado de Sauer (2018).

2.5 Análise do Método de Elementos Finitos

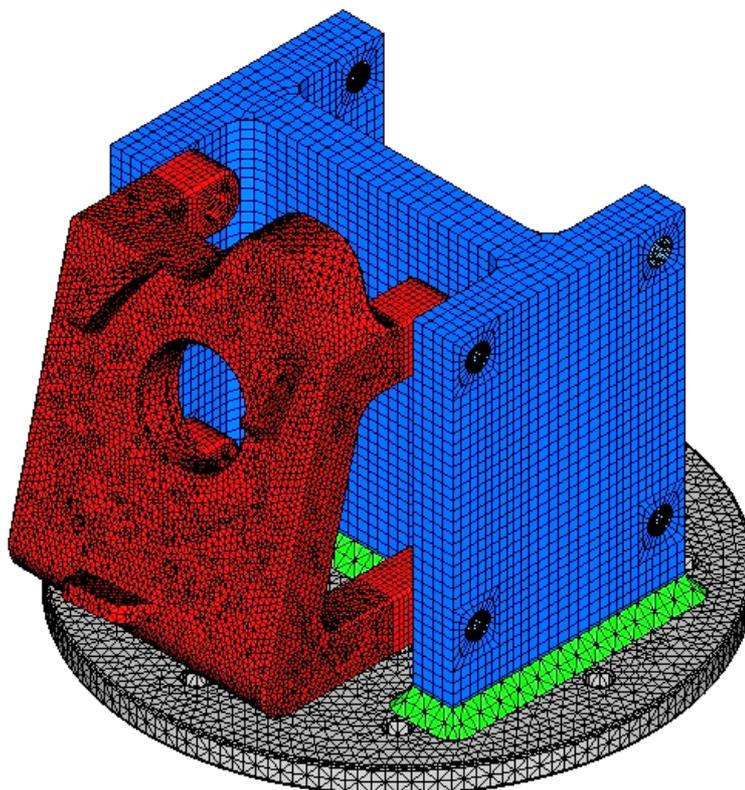
Com a análise das malhas, o modelo gerado possui 225.950 elementos, 344.368 nós e o tamanho dos elementos foi de 0,225 (10 mm). Outro fator a se ressaltar é o número de elementos hexa, que foi de 12.832 e de tetra com 112.378.

O FEA permite a análise estrutural, a avaliação de tensões, vibrações e efeitos térmicos que surgem durante o projeto, com o intuito de aferir os resultados obtidos (RAMU; MOHANTY, 2012).

Malhas não estruturadas facilitam a definição de limites da geometria e possibilitam um maior refino das malhas, com o uso da técnica de posicionamento de grafos, que auxilia na resolução de problemas de larga escala (LIAN, 2006).

Na Figura 7, observa-se a geometria com as malhas já geradas. Destaca-se que o modelo gerado foi ideal para a análise, com isso, não se modificou o refino das malhas.

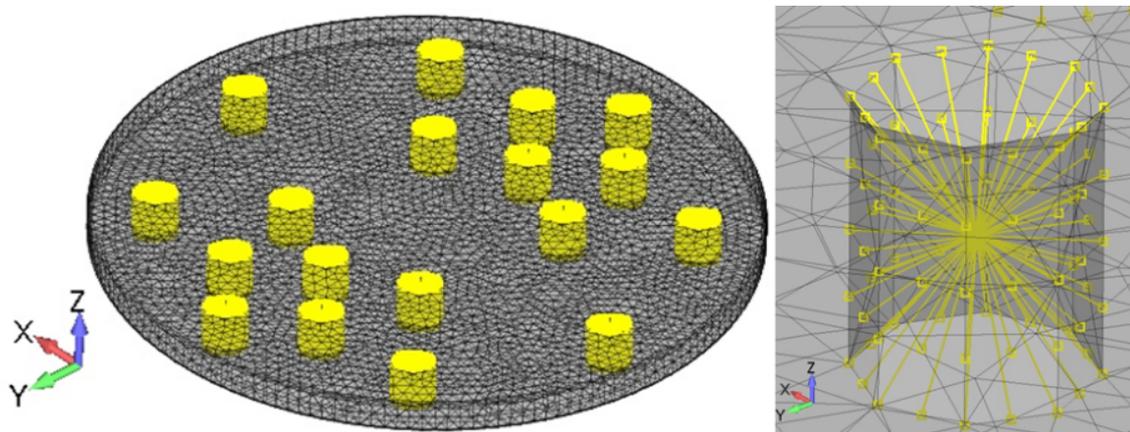
Figura 7: Modelo com malhas



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Para que fosse considerada a ação dos parafusos na estrutura, utilizou-se 18 elementos rígidos, denominados *Spiders*, conforme a Figura 8 demonstra. A fim de garantir que a análise seja feita de forma correta em relação ao contato da base com o dispositivo, utilizou-se uma quantidade alta de GAP, 11.639 elementos, de acordo com a Figura 9.

Figura 8: Elementos rígidos



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Figura 9: Elementos de GAP



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

O dispositivo é fixado nos nós centrais dos elementos rígidos citados anteriormente e há uma liberdade de rotação do parafuso em R_z . Para que seja possível simular a face do *Shaker*, são utilizados os elementos de GAP, descritos acima. Elementos com cola ou solda, são simulados para qualquer situação sendo soldados, com isso, há uma configuração diferente de itens parafusados. Nos nós centrais dos elementos fixos, há uma aceleração de 9.810 mm/s^2 no eixo z.

A análise modal coletou os 10 primeiros modos da vibração do dispositivo e a análise de frequência dos 110 resultados gerados em relação ao resultado, à aceleração e ao deslocamento.

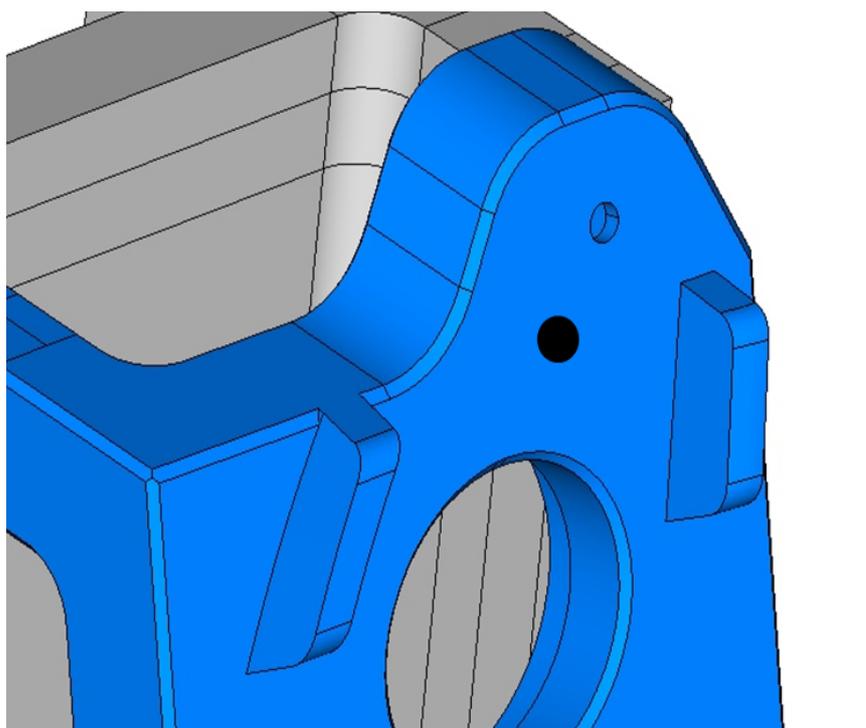
Entende-se análise modal pelo processo de descrição e avaliação da estrutura em suas propriedades dinâmicas, tais como, frequência, amortecimento e formas de “modo” (AVITABILE, 2001).

A análise modal é uma forma economicamente viável, além de ser um modo rápido de se obter os modos vibracionais de uma estrutura ou uma máquina

(SCHWARZ; RICHARDSON, 1999). Vibrações em compósitos reforçados com carbono é citado por Formica, Lacarbona e Alessi (2010)

Após estudos preliminares, foi definido um ponto central, ao qual, os resultados obtidos serão retirados a partir deste, pelo fato de possuir uma maior suscetibilidade para deslocamento e aceleração, este ponto é mostrado na Figura 10. Enfatiza-se que não há este ponto na geometria, sua demarcação (ponto preto) foi feita apenas para fins de compreensão do local utilizado.

Figura 10: Ponto Central



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

2.6 Configuração da impressão

O número de camadas da impressão é de 1136 e resulta em uma quantidade de 421083 mm de filamento, ademais, o tempo de impressão estimado é de 76 horas e 17 minutos, com o tipo de aderência jangada e a qualidade de 0,15 mm. A velocidade de impressão é rápida, de 60 mm/s, com uma densidade de 30% de enchimento. O peso resultante da estrutura é e 265 kg. Na Figura 11 é descrita algumas das configurações do software Cura para impressão, salienta-se que estes dados são para os dois dispositivos.

Figura 11: Dados do CuraEngine

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]
Sobrepor 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]

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

O custo do PA6 25% é mais elevado em relação ao outro material impresso, custa cerca de R\$ 1,95 o metro, enquanto o PA6 20% é R\$ 1,15 o metro. Outros gastos devem ser levados em consideração para a construção do valor final, aos quais são: hora-máquina, hora-homem, modelamento, modelamento e variáveis.

3. Metodologia

O presente trabalho foi um Estudo de Caso da empresa Metagal, ao qual foram desenvolvidos diversos estudos estruturais com o propósito de avaliar a viabilidade da inserção de peças impressas para a substituição de itens usinadas para reduzir os custos operacionais. A abordagem e o modo de pesquisa possuem o

foco em casos, é denominado estudo de caso, ao qual, é uma boa ferramenta e estratégia para pesquisas (GOG, 2015).

A partir da obtenção de dados existentes sobre a produção com o uso da usinagem, avaliam-se criteriosamente os resultados obtidos pelas simulações numéricas, testes de ressonâncias, testes estruturais e outras diversas operações. Após os valores encontrados, também é calculado o gasto total da operação.

Foi feita a mesma operação com o uso da manufatura aditiva, diante disso, tornou-se possível comparar os resultados obtidos e equiparar o antes e o depois. Lembra-se que na última etapa, realizou-se uma análise para avaliar a proposta de modo econômico, com o desígnio de conferir sua viabilidade.

4. Resultados e Discussões

Este estágio foi dividido em quatro partes, a primeira é o estudo feito com o Alumínio 6061-T6, a segunda com o PA6 com 20% de Fibra de Carbono e a terceira com o PA6 com 25% de Fibra de Carbono. Por fim, serão apresentados os resultados gerais dos modelos avaliados, aos quais são do retrovisor do lado esquerdo. Importante informar que a Análise 2 e a Análise 3 são as propostas com o material impresso, enquanto a Análise 1 é feita com o material usinado.

4.1 Análise 1

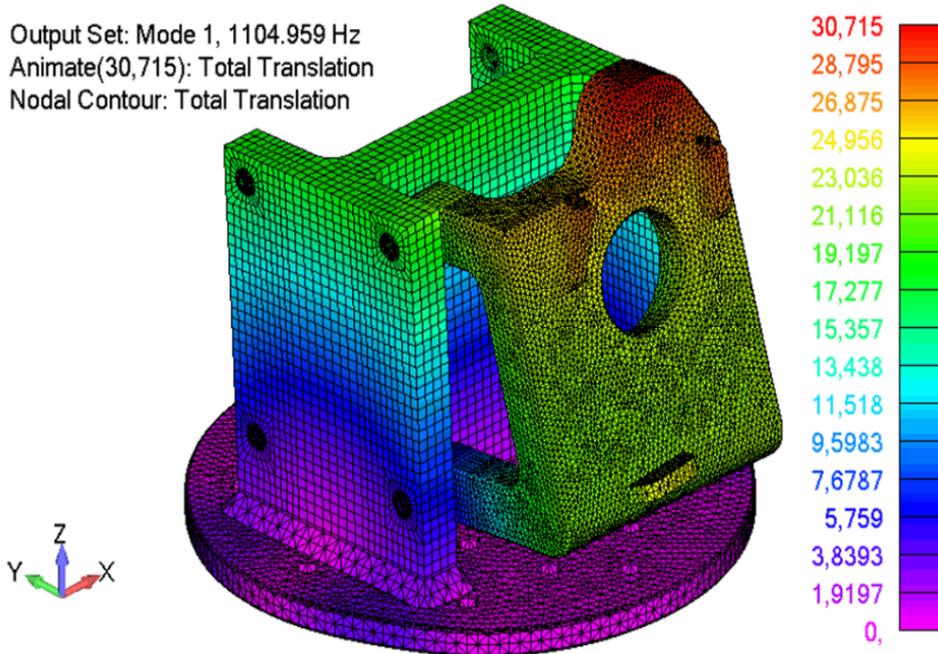
Com a análise modal do modelo, encontra-se um deslocamento total máximo de 30,715 mm e os modos de vibração são citados abaixo:

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| ● 1º modo de vibração: 1104,95 Hz; | ● 6º modo de vibração: 2641,10 Hz; |
| ● 2º modo de vibração: 1250,08 Hz; | ● 7º modo de vibração: 2846,05 Hz; |
| ● 3º modo de vibração: 1853,13 Hz; | ● 8º modo de vibração: 3976,71 Hz; |
| ● 4º modo de vibração: 2159,56 Hz; | ● 9º modo de vibração: 4547,63 Hz; |
| ● 5º modo de vibração: 2596,94 Hz; | ● 10º modo de vibração: 4564,68 Hz. |

Na Figura 12 é demonstrado o primeiro modo de vibração, todavia, é importante ressaltar que a análise de vibração possui uma melhor visibilidade com o uso da animação, com ela, torna-se possível conferir os principais pontos, de acordo com a movimentação do modelo.

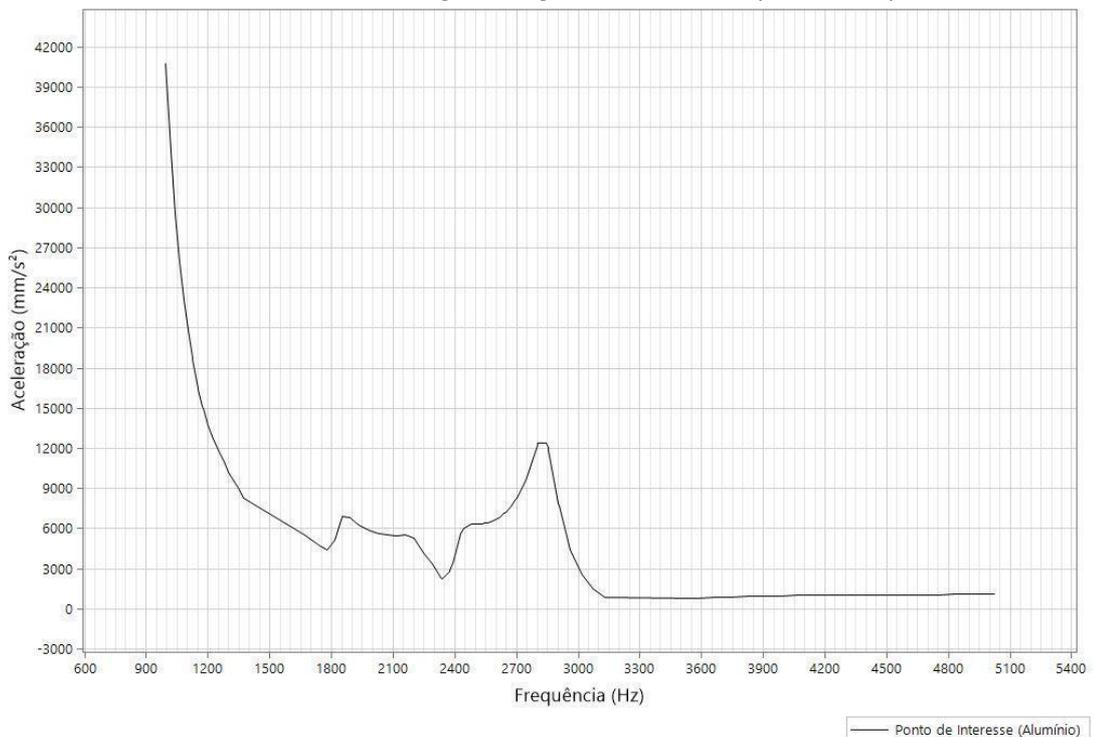
No Gráfico 1 é exibido o gráfico de vibração forçada no eixo z, no qual, o ponto mais alto é de 4,15 Gmm/s² em 941,66 Hz, denominado pico de interesse. O 1º modo do natural analisado e descrito resulta 2,12 Gmm/s² em 1104,95 Hz.

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



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Gráfico 1: Vibração forçada no eixo z (Alumínio)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

4.2 Análise 2

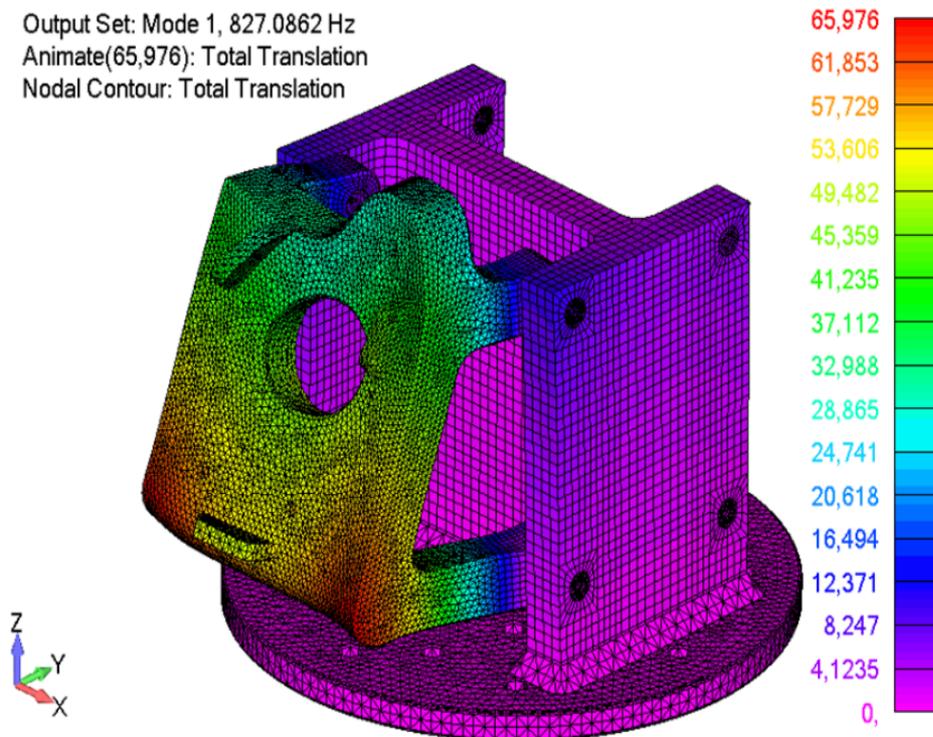
A partir da análise 2 foram utilizados os materiais com usos da fabricação aditiva. O material PA6 com 20% de carbono será utilizado para a fabricação, esse tipo de material possui características que se alteram de acordo com a sua direção e o seu sentido de impressão.

Neste estudo o primeiro módulo de vibração possui 65,976 mm de deslocamento e os modos de vibração são citados abaixo:

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| • 1º modo de vibração: 827,08 Hz; | • 6º modo de vibração: 1993,37 Hz; |
| • 2º modo de vibração: 1160,87 Hz; | • 7º modo de vibração: 2166,23 Hz; |
| • 3º modo de vibração: 1378,45 Hz; | • 8º modo de vibração: 2311,92 Hz; |
| • 4º modo de vibração: 1509,32 Hz; | • 9º modo de vibração: 2673,00 Hz; |
| • 5º modo de vibração: 1876,77 Hz; | • 10º modo de vibração: 3001,93 Hz. |

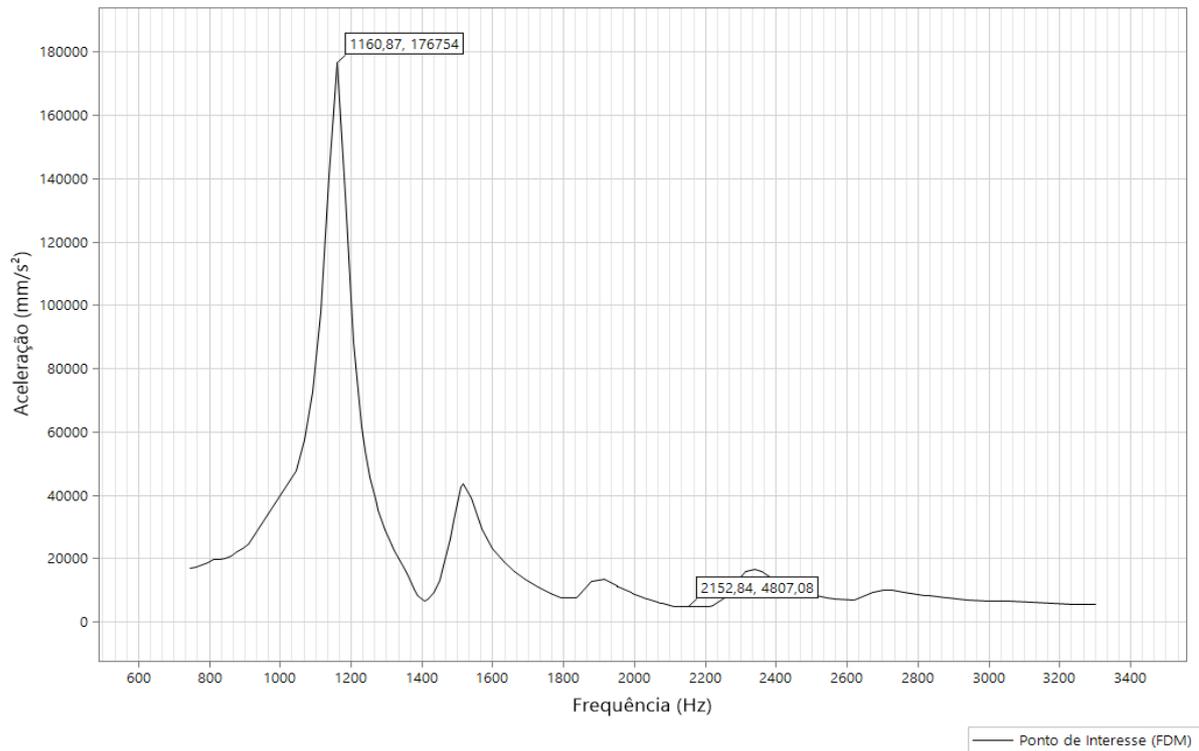
Atenta-se em relação a densidade do material utilizado, pois influenciará no resultado da confecção do produto. Na Figura 13 é demonstrado o primeiro modo de vibração e no Gráfico 2 a vibração forçada no eixo z. Cita-se que o pico do ponto de interesse neste caso é 9,00 Gmm/s² em 1160,87 Hz.

Figura 13: Deslocamento do 1º modo de vibração (PA6 – 20% carbono)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

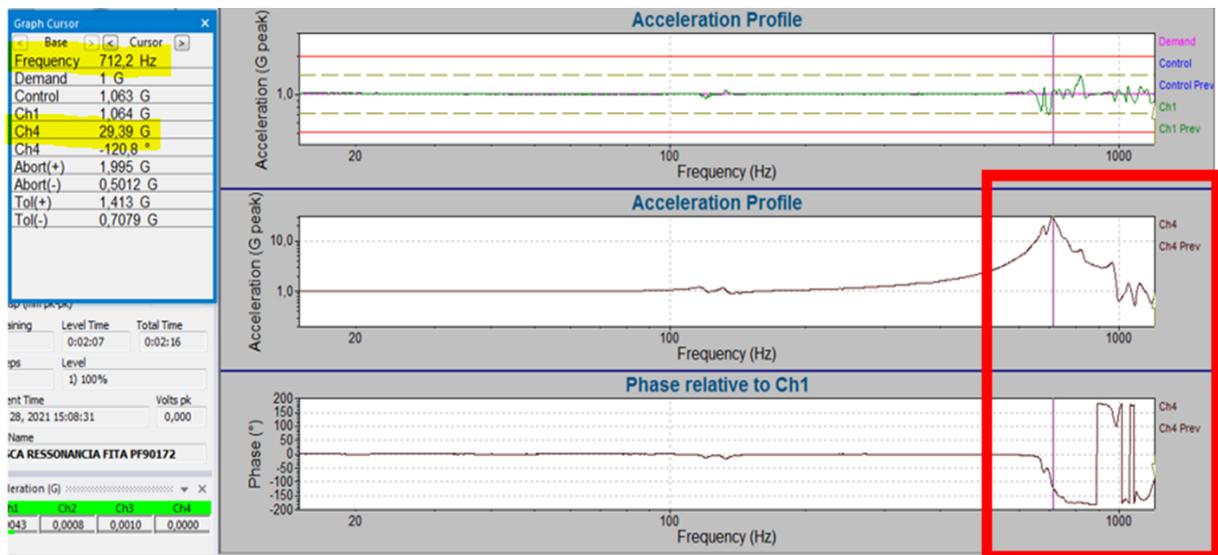
Gráfico 2: Vibração forçada no eixo z (PA6 – 20% carbono)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

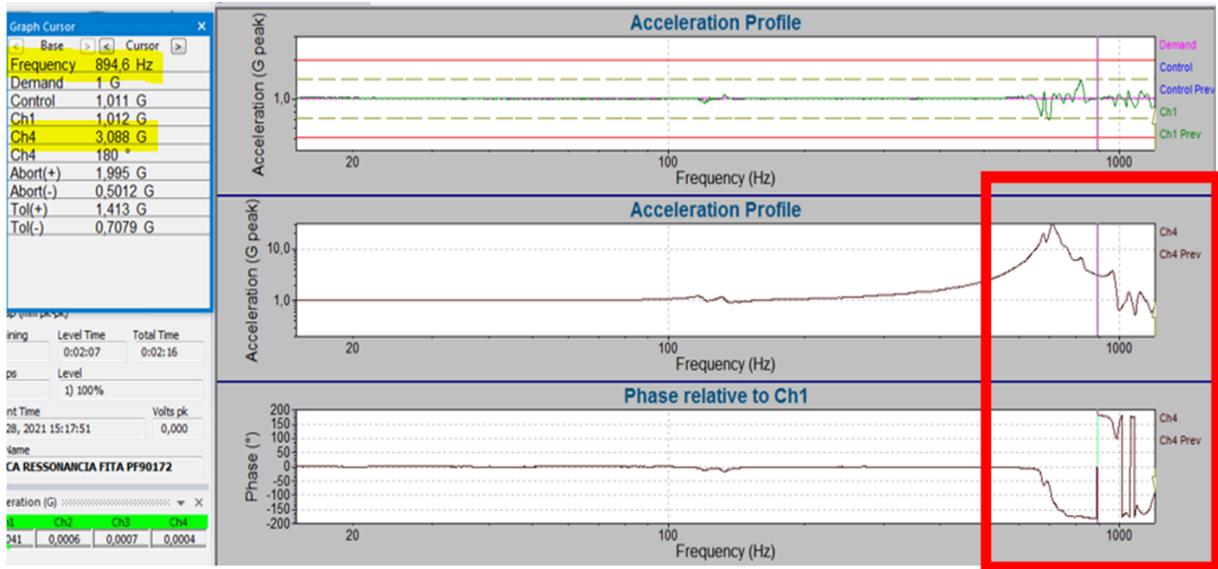
Além disso, foram feitos novos testes de vibração forçada, ao qual, é relatada na Figura 14, nestes itens compreende-se que o pico da aceleração após a sua inversão de fase possui valores de 29,39 Gmm/s² e 712,2 Hz. Enquanto na Figura 15 a inversão é muito mais brusca, com valores de 3,088 Gmm/s² e 894,6 Hz.

Figura 14: Vibração forçada 1 (PA6 – 20% carbono)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

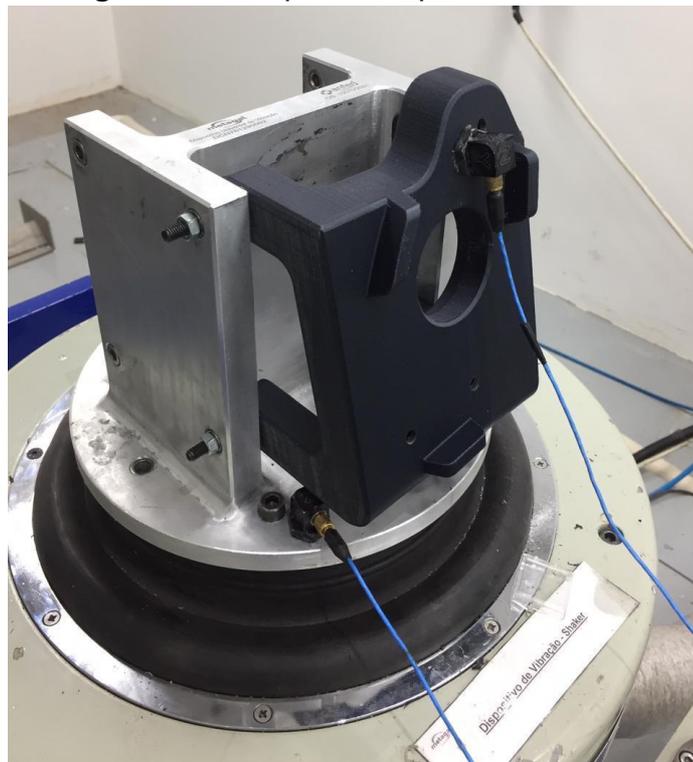
Figura 15: Vibração forçada 2 (PA6 – 20% carbono)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Com os testes computacionais realizados e a obtenção de resultado satisfatório, a segunda etapa foi a confecção do protótipo físico. Na Figura 16 é demonstrada a impressão do adaptador juntamente com o Shaker Metagal. O teste 2 é um diferencial entre as 2 análises impressas, pois possui um protótipo físico para diagnosticá-lo.

Figura 16: Adaptador impresso e shaker



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

4.3 Análise 3

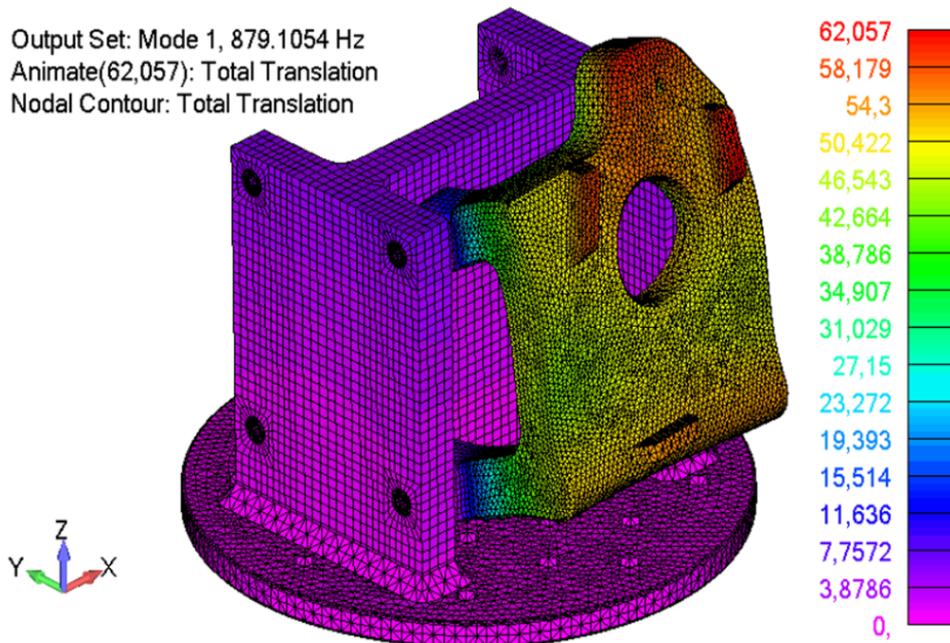
A análise 3 segue o mesmo princípio da Análise 2. O material é o PA6 com 25% de carbono e também possui a característica de se alterar com a modificação de direção e sentido.

O módulo de vibração do primeiro estudo na análise 3 tem um deslocamento de 62,0577 mm e seus modos de vibração são descritos abaixo:

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| • 1º modo de vibração: 879,10 Hz; | • 6º modo de vibração: 1948,32 Hz; |
| • 2º modo de vibração: 1130,01 Hz; | • 7º modo de vibração: 2220,20 Hz; |
| • 3º modo de vibração: 1461,80 Hz; | • 8º modo de vibração: 2304,98 Hz; |
| • 4º modo de vibração: 1485,98 Hz; | • 9º modo de vibração: 2414,77 Hz; |
| • 5º modo de vibração: 1835,11 Hz; | • 10º modo de vibração: 2840,57 Hz. |

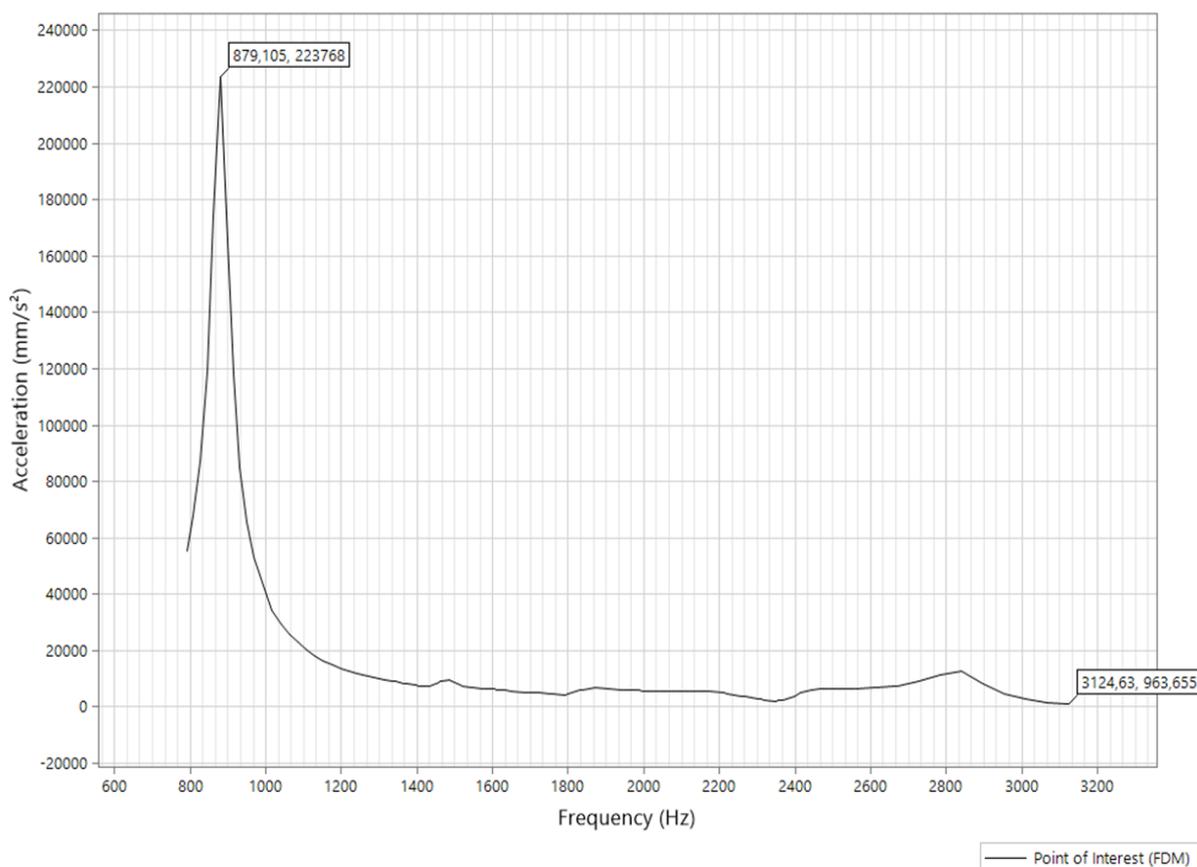
Na Figura 17 é demonstrado o primeiro modo de vibração e no Gráfico 3 a vibração forçada no eixo z. Neste caso o valor mais alto do ponto de interesse é de 22,81 G que representa 879,10 Hz.

Figura 17: Deslocamento do 1º modo de vibração (PA6 – 25% carbono)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Gráfico 3: Vibração forçada no eixo z (PA6 – 25% carbono)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

4.4 Resultados gerais

Diante das três análises, torna-se exequível comparar os valores obtidos anteriormente e compreender as diferenças entre elas. Na Tabela 5 é exibido uma comparação dos adaptadores estudados.

Tabela 5: Comparativo entre adaptadores

	Alumínio 6061-T6	PA6 – 20%CF	PA6 – 25%CF
1º Modo (CAE)	1104,95 Hz	827,08 Hz	879,10 Hz
Pico Z (CAE)	994,46 Hz	1160,87 Hz	879,10 Hz
Pico Z (Shaker) Freq. para maior aceleração	N/A	712,20 Hz	N/A
Pico Z (Shaker) Freq. para mudança abrupta de Fase	N/A	894,60 Hz	N/A

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Com o estudo dos dados obtidos, das simulações pelo Método de Elementos Finitos (MEF), avalia-se a viabilidade do projeto de acordo com seus meios estruturais, entretanto, um fator de suma importância é a viabilidade econômica.

Atualmente há um custo para a produção de um dispositivo com a utilização da usinagem que é de aproximadamente R\$ 6.250,00 para a confecção do adaptador de Alumínio 6061-T6. Enquanto isso, para o material PA6 20% FC há um custo total de R\$ 490,86 e para o PA6 25% FC de R\$ 722,03, os custos totais destes dos últimos testes são referentes ao custo do material, custo máquina (impressora 3D) e o custo com o projetista.

Diante de tais avaliações, a Análise 2 representa uma economia de 92,15% e a Análise 3 de 88,45%. Salienta-se que com a avaliação inicial, o estudo buscava a redução de 50% em relação aos custos, entretanto, tal valor encontrado foi muito superior com ambos os materiais para a fabricação aditiva.

O diferencial e os parâmetros encontrados com o estudo CAE possuem uma qualidade e confiabilidade alta, inclusive, no material impresso PA6 20% FC, um resultado maior do que o usinado. Na Figura 18 é apresentado o dispositivo fabricado com o uso da fabricação aditiva.

Figura 18: Dispositivo impresso (PA6 – 25% carbono)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Conclusão

Com a avaliação de ambos os materiais impressos, o ideal para tal usabilidade é o da Análise 2, pois, apesar da proximidade dos resultados do da Análise 3, possui um custo inferior. Em uma breve comparação, para a confecção de um par de adaptadores usinados, o custo total é de R\$ 12.500,00, enquanto isso,

com o uso do PA6 20% FC, o gasto para a produção da mesma quantidade de adaptadores é de R\$ 981,72. Há diferenças também no tempo de fabricação que são consideradas para o cálculo do custo total, no qual, diversos custos são levados em conta, tais como: modelamento, material, hora-máquina, hora-homem e variáveis. Para encontrar o resultado do custo total de usinagem, utiliza-se a Equação 1, que resulta no valor citado anteriormente. Enquanto isso, para obter o resultado do custo da impressão 3D, utiliza-se a Equação 2.

$$\text{Custo de Usinagem (R\$)} = \text{Custo máquina (Ferramenta + máquina)} + \text{Hora do projetista} + \text{Valor material} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{Custo da Impressão 3D (R\$)} = \text{Custo máquina (Impressora)} + \text{Hora do projetista} + \text{Valor material} \quad (\text{Eq. 2})$$

O deslocamento entre os dois materiais impressos foi próximo, ao qual, um foi de aproximadamente 62 mm e o outro de aproximadamente 66 mm, apesar de valores superiores ao do Alumínio 6061-T6 com o deslocamento de 31 mm, não ocorreu diferença ou riscos significativos. O 1º modo de vibração deve ser superior ao requisitado de 1000 Hz. Com isso, as duas análises com o material impresso, possuem o valor inferior ao citado, diante de tal problemática, tornam-se necessários novos estudos futuros para que aumente pouco mais que 12% (Análise 2) ou 17% (Análise 3) no valor solicitado para que se obtenha um modo de vibração maior do que a quantia requisitada.

Apesar da excelente viabilidade econômica e de resultados satisfatórios, há critérios de qualidade do cliente que devem ser cumpridos, diante disso, é necessário passar por um procedimento de inspeção e aceitação do cliente para que a modificação seja aprovada.

Referências Bibliográficas

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.

METAGAL. **Análise do dispositivo de vibração do projeto BR2 – Hyunday**. Rev. 02, p. 37, 2022.

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.; WSZOŁEK, 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.

DECLARAÇÃO/AUTORIZAÇÃO DA EMPRESA



PEDIDO DE AUTORIZAÇÃO

Eu, Francisco Reginaldo da Rosa, Professor e Orientador do Componente Curricular de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), no Curso de Engenharia Mecânica, na Faculdade Una de Pouso Alegre/MG venho por meio desta, pedir autorização para que os (as) aluno (as) Luces Antônio Gonçalves e Tiago Toledo Barbosa, matriculados (as) regularmente nesta instituição, utilize o nome dessa empresa, "Melagal Indústria e comércio", bem como dados e imagens a serem inseridos na pesquisa científica, intitulada "Análise de viabilidade para a troca de peças usinadas - por Impressos", para a realização de seu trabalho final, que constitui uma etapa que deve ser vencida, como requisito para conclusão do curso de graduação.

Conto com sua atenção e me coloco a disposição para quaisquer esclarecimentos.

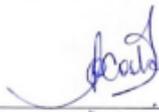
Assim sendo, pede deferimento.

Atenciosamente.



Francisco Reginaldo da Rosa
Professor – Engenharia Mecânica
Faculdade Una de Pouso Alegre

Para ciência e autorização da Empresa:


Nome e Carimbo Responsável pela Empresa | Ger. Recursos Humanos.
(Cargo/Ocupação)

Pouso Alegre, 27 de outubro de 2022