



## ESTUDO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM UM FERRAMENTAL DE SOLDAGEM DE PLÁSTICOS POR ULTRASSOM

### VIBRATION ANALYSIS STUDY IN AN ULTRASOUND PLASTIC WELDING TOOL

Allan Querubim dos Santos<sup>1, i</sup>  
Leandro Cardoso da Silva<sup>2, ii</sup>

Data de submissão: (dia/mês/ano) Data de aprovação: (dia/mês/ano)

**RESUMO** A tecnologia de soldagem de plásticos por ultrassom está presente em diversos setores da indústria em geral, entre eles; automobilístico, alimentício, embalagens, utilidades e tão importante quanto esses já mencionados, o setor médico-hospitalar, que atualmente se destaca pelo uso da tecnologia de soldagem por ultrassom, principalmente no processo de fabricação de máscaras cirúrgicas, sendo essas, utilizadas no combate a pandemia do COVID-19. Nesse cenário de pandemia, devido à necessidade e a obrigatoriedade do uso de máscaras como forma de proteção contra o coronavírus, algumas empresas aderiram a fabricação de máscaras cirúrgicas como meio de renda e outras como responsabilidade social, tornando o processo de soldagem por ultrassom ainda mais conhecido. No processo de soldagem por ultrassom, os componentes que atuam diretamente em contato com o produto a ser processado, tem a função de transmitir vibrações mecânicas na frequência de 20.000Hz geradas pelo efeito piezoelétrico, com a finalidade de unir as partes do mesmo através de fusão por fricção de calor ocasionada pelas vibrações transmitidas. Para tal efeito os componentes transdutor, Transformador Acústico e Sonotrodo, denominados conjunto acústico, devem ser capazes de suportar, na maioria dos casos, elevadas cargas de produção. Esta pesquisa tem o objetivo de apresentar um estudo para avaliar os componentes que integram o ferramental de solda por ultrassom (Transdutor, Transformador acústico e Sonotrodo) por meio de

---

<sup>1</sup> Pós-graduado em projetos de mecânica industrial na Faculdade SENAI de Tecnologia. E-mail: allanquer@yahoo.com.br,

<sup>2</sup> Docente e Dr. em Engenharia Mecânica da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. E-mail: leandro.cardoso@sp.senai.br,

análise de frequência, realizada pelo Método Dos Elementos Finitos com finalidade de detectar as frequências naturais do modelo, os modos de vibração de sua estrutura, evitando que o conjunto entre em ressonância quando submetido à frequência de vibração de 20.000Hz. Como proposta para essa pesquisa, foi realizada a análise de frequência na geometria tridimensional do ferramental, a fim de validar sua geometria para que o mesmo trabalhe em conformidade com a frequência de vibração de 20.000Hz utilizada no processo, eliminando ou reduzindo a possibilidade de falha mecânica proveniente de ressonância.

**Palavras-chave:** análise modal; soldagem por ultrassom; sonotrodo; Elementos Finitos.

**ABSTRACT** *The technology for welding plastics by ultrasound is present in several sectors of the industry in general, among them; automotive, food, packaging, utilities and as important as those already mentioned, the medical-hospital sector, which currently stands out for the use of ultrasound welding technology, mainly in the manufacturing process of surgical masks, which are used to combat COVID-19 pandemic. In this pandemic scenario, due to the need and mandatory use of masks as a form of protection against the coronavirus, some companies joined the manufacture of surgical masks as a means of income and others as a social responsibility, making the process of ultrasonic welding even better known. In the ultrasonic welding process, the components that act directly in contact with the product to be processed, have the function of transmitting mechanical vibrations at a frequency of 20,000Hz generated by the piezoelectric effect, in order to unite the parts of the product through fusion. by heat friction caused by transmitted vibrations. For this purpose, the transducer, Acoustic Transformer and Sonotrode components, called acoustic set, must be able to withstand, in most cases, high production loads. This research aims to present a study to evaluate the components that make up the ultrasonic welding tooling (Transducer, Acoustic Transformer and Sonotrode) through frequency analysis, performed by the Finite Element Method in order to detect the natural frequencies of the model, the vibration modes of its structure, preventing the set from entering into resonance when subjected to the vibration frequency of 20,000Hz. As a proposal for this research, a frequency analysis was performed on the three-dimensional geometry of the tooling,*



*in order to validate its geometry so that it works in accordance with the vibration frequency of 20,000Hz used in the process, eliminating or reducing the possibility of failure. mechanics from resonance.*

*Keywords: manalysis; ultrasonic welding; sonotrode; Finite Elements.*

## 1 INTRODUÇÃO

Em um mercado cada vez mais competitivo, onde a necessidade de reduzir o tempo de fabricação e garantir que o produto esteja de acordo com os padrões de qualidade exigidos pelo consumidor final, fazem com que a indústria em geral busque alternativas e processos que venham a contribuir com tais melhorias.

A indústria do setor de transformação de plásticos destaca-se pelo fato de estar presente no cotidiano das pessoas com produtos de grande variedade.

Nesse cenário competitivo, a tecnologia de soldagem de plásticos por ultrassom destaca-se por proporcionar velocidade e qualidade quando se trata de união de peças plásticas, resultando em um produto de excelente qualidade tanto em aspecto visual quanto em estrutural.

Entre os componentes do processo de solda por ultrassom, o ferramental que é constituído por transdutor, transformador acústico e sonotrodo, é parte fundamental no processo, uma vez que o mesmo é responsável por transferir vibrações mecânicas para o produto a ser processado.

Para a eficiência do ferramental, é preciso ser considerados fatores que possam melhorar o desempenho do mesmo, sendo assim a etapa de projeto é fundamental para que um ferramental seja desenvolvido de acordo com a aplicação em ambiente produtivo. Com a diversidade de softwares de análise pelo método dos elementos finitos (FEA) oferecidos no mercado, é possível reduzir ou mesmo eliminar falhas ainda em fase preliminar de projeto, tendo assim uma assertiva considerável antes da fase de produção.

Esta pesquisa tem como objetivo, apresentar um ferramental para soldagem de plásticos por ultrassom submetido à análises modal pelo método dos elementos finitos com finalidade de validar a geometria proposta, considerando que a mesma não

contenha frequências naturais, igual ou próximas da faixa de frequência de 20.000Hz que o equipamento trabalha, com tolerância de  $\pm 0,25\%$ .

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

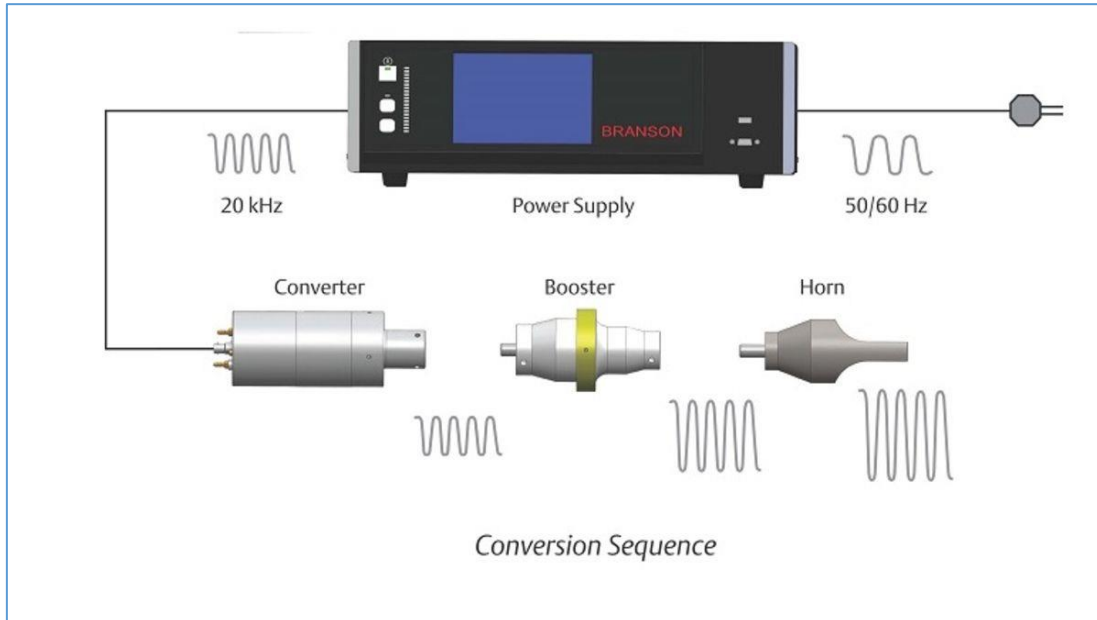
Para a elaboração deste estudo, buscou-se compreender o processo de soldagem por ultrassom, seu princípio de funcionamento, seus componentes e suas respectivas funções no processo. Também se fez necessário ter uma base de conhecimentos em análise pelo método dos elementos finitos com ênfase na análise de vibrações e software dedicado.

### **2.1 Processo de soldagem por ultrassom**

A Segundo Souza (2005) o processo de soldagem por ultrassom é realizado utilizando-se um transformador eletroacústico(transdutor), que transforma uma corrente alternada em oscilações longitudinais mecânicas com frequência entre 15 e 40KHz, atingindo amplitudes de onda de 20 a 100  $\mu\text{m}$ . O componente denominado sonotrodo é o agente que transmite as vibrações a junta a ser soldada.

Basicamente, os equipamentos utilizados no processo de soldagem por ultrassom são compostos por gerador (responsável por gerar a energia elétrica na frequência de operação, o que nesse estudo será de 20Khz.), transformador acústico ou conversor ( que converte a energia elétrica de alta frequência em vibrações mecânicas), amplificador ou booster (que aumenta ou reduz a amplitude da vibração utilizada) e o sonotrodo ou Horn, este como elemento que entra em contato com a peça e responsável por transmitir a vibração mecânica para as peças a serem unidas. A figura 1 mostra a sequência de funcionamento de um equipamento de soldagem por ultrassom.

Figura 1 - Sequência de funcionamento de equipamento de soldagem por ultrassom



Fonte: Branson (2022)

## 2.2 Componentes

Em geral, vários setores utilizam-se do processo de soldagem por ultrassom, entre esses, o setor de produção de máscaras cirúrgicas, que atualmente se tornou necessário no combate ao Covid-19. Nesse processo, o ultrassom é responsável pela soldagem de todo o contorno da máscara unindo as camadas de tecido sintético produzido através da matéria prima polipropileno. A figura 2 mostra uma máscara cirúrgica soldada por ultrassom.

Figura 2 – Máscara cirúrgica soldada por ultrassom



Fonte: Autor (2022)



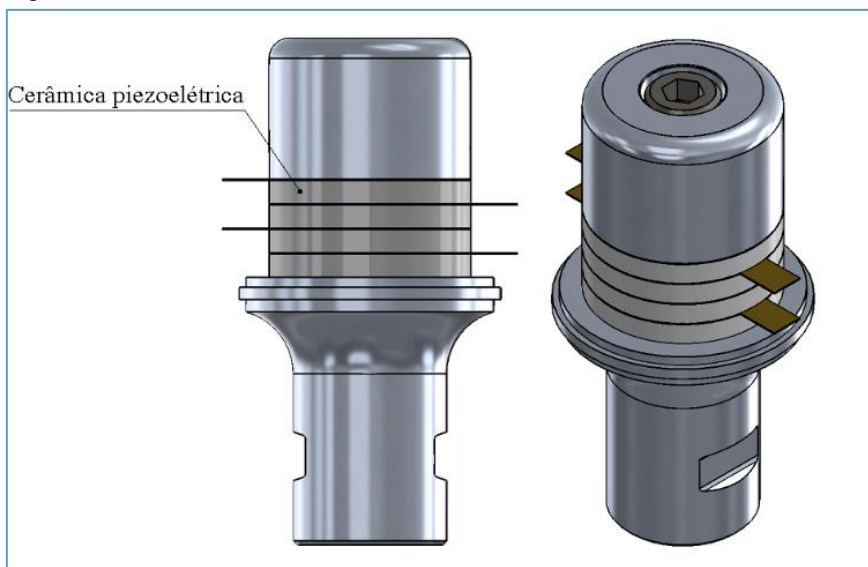
### 2.3 Gerador

Segundo Sonitron (1988) os geradores de ultrassom produzem a alta tensão e energia necessárias para o processo de soldagem e mantêm a amplitude constante. A tecnologia de controle preciso no gerador garante resultados de soldagem reproduzíveis.

### 2.4 Conversor ou transdutor

De acordo com Sonitron (1988) transdutor em geral é o nome de certos dispositivos que possuem a qualidade de transformar determinada grandeza em outra, com características completamente diferentes, o transdutor utilizado em ultrassom, tem como propriedade, modificar para vibrações mecânicas o sinal elétrico aplicado sobre ele. Para isto, o referido transdutor é composto por cristais cerâmicos piezoelétricos montados numa base com configuração adequada. Quando os cristais são submetidos a um campo eletrostático, se estabelecem tensões mecânicas ao longo de certo eixo. Reciprocamente, se estes cristais são sujeitos a esforços mecânicos sobre sua superfície, aparecem cargas elétricas, este fenômeno em física é conhecido como piezoeletricidade e foi descoberto em meados de 1880 pelo casal Curie. A figura 2 mostra um tipo de transdutor usado em soldagem de plásticos por ultrassom.

Figura 2 - Conversor ou transdutor

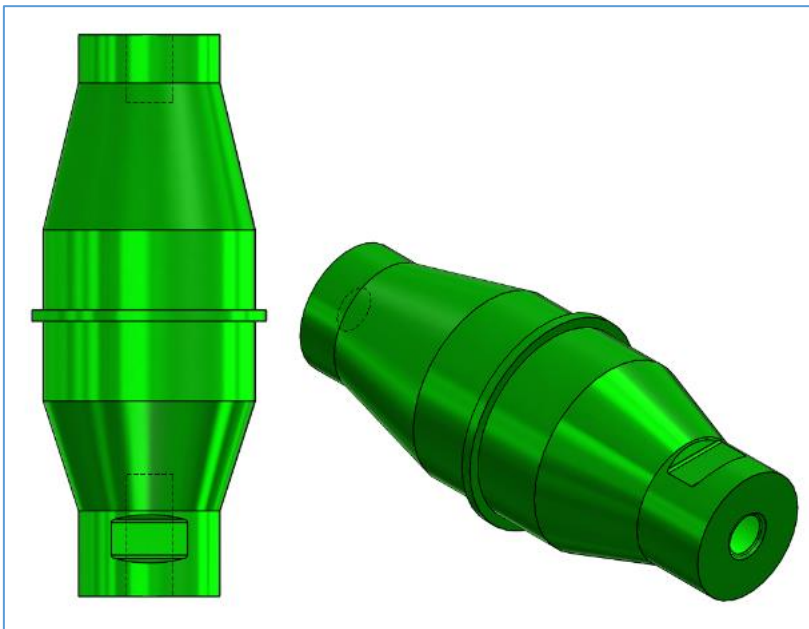


Fonte: Autor (2022)

## 2.5 Transformador acústico ou booster

De acordo com Laredo Junior (1988) o sucesso do processamento de termoplásticos por ultrassom depende sempre da amplitude da vibração na face do sonotrodo. Quando variamos essa amplitude, variamos também a velocidade e dessa forma podemos gerar maior ou menor quantidade de calor na junta da soldagem. O transformador acústico, também chamado de booster, é acoplado no transdutor controlando os ganhos ou reduções da amplitude de vibração fornecida ao sonotrodo, ou seja, manipula-se a distância que o sonotrodo vibra verticalmente na ordem de micrômetros. Esse controle do ganho ou redução de amplitude é constituído através da forma geométrica de cada TA. O mais comum é o TA verde, mostrado na Figura 3, visto que ele apenas conecta o transdutor no sonotrodo, tendo uma relação geométrica de 1:1, ou seja, não fornece ampliação e nem redução de amplitude.

Figura 3 - Transformador acústico ou Booster



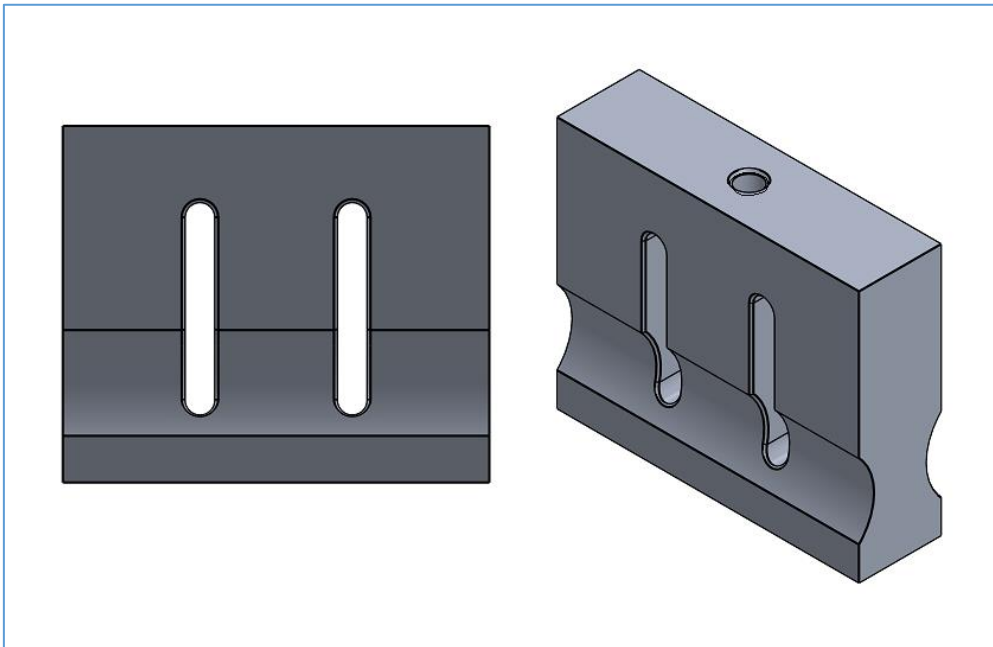
Fonte: Autor (2022)

## 2.6 Sonotrodo

De acordo com Kiyono (2008) sonotrodos são elementos utilizados em várias aplicações de potência onde eles geralmente operam como uma ferramenta agindo diretamente na superfície de trabalho ou transmitindo energia para outros dispositivos. É o componente do ferramental para solda por ultrassom que deve ser levado em consideração no quesito desenvolvimento e fabricação, isso porque é ele que tem a função de transmitir as vibrações mecânicas ao produto a ser soldado. Este componente pode ter sua geometria de acordo com produto a ser soldado.

Um sonotrodo, feito de duralumínio, aço ou titânio, dependendo da aplicação, vibrando livremente no ar requer pouquíssima energia, porém quando aplicamos uma carga mecânica ao sonotrodo, uma carga elétrica proporcional é aplicada na fonte geradora. O formato geométrico dos sonotrodos varia conforme a potência exigida para soldar o termoplástico. A Figura 4 mostra a geometria de um sonotrodo utilizado na soldagem de máscaras cirúrgicas de combate ao COVID-19.

Figura 4- Sonotrodo 20KHz utilizado para soldagem de plásticos



Fonte: Autor (2022)

### 3 METODOLOGIA

Para atingir os resultados propostos, realizou-se um estudo cuja a metodologia utilizada para tal será apresentada nessa seção, compreendendo os fatores iniciais que objetivaram esse estudo e o desenvolvimento da proposta frente a situação atual. Considerando que o equipamento gerador de ultrassom fornece uma corrente elétrica na frequência de 20.000 Hz e que esse sinal elétrico é transformado em oscilações mecânicas pelo efeito piezoelétrico das cerâmicas originando em vibrações mecânicas com frequência de 20.000Hz, a geometria do ferramental deverá atender a frequência em questão ou seja, 20.000Hz.

Diante da premissa de que o ferramental desenvolvido deverá atender a frequência de vibração de 20.000Hz, sua geometria foi submetida à análise computacional.

O método adotado neste estudo para analisar a geometria foi por meio de Análise por Elementos Finitos, por meio de análise modal, para detectar as frequências naturais do modelo e seus respectivos modos de vibração a fim de avaliar e detectar se há alguma frequência natural na mesma faixa de frequência de trabalho do equipamento (20.000Hz).

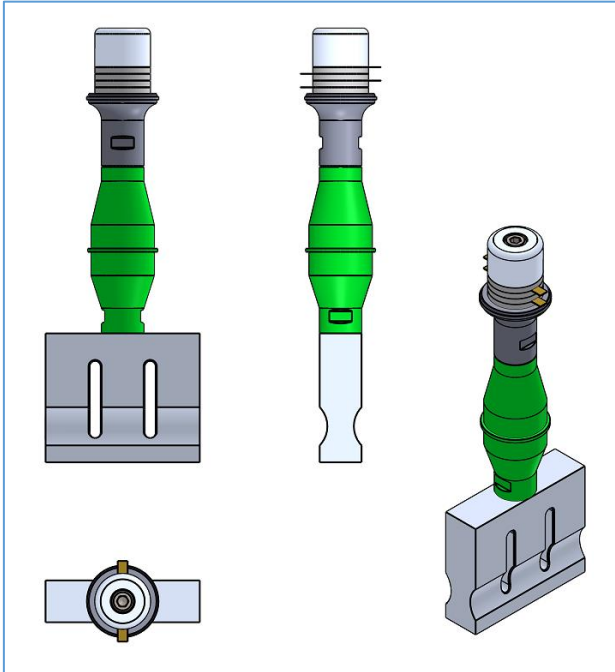
Foram calculadas e analisadas 12 formas modais mais próximas da frequência que o ferramental trabalha, ou seja, 20.000Hz

O software utilizado neste estudo para modelagem tridimensional dos componentes do ferramental de solda por ultrassom e simulação por elementos finitos foi o Solidworks.

O material dos componentes do conjunto acústico (transdutor, transformador acústico e sonotrodo) submetido a análise, foi a liga de alumínio da série 7000, especificamente a liga 7050 T7651.

Foram excluídos da análise, porém não da geometria, os elementos de fixação e as cerâmicas piezoelétricas pelo motivo de serem itens padronizados, e analisados em conjunto os itens construídos de alumínio, tais como, transdutor, transformador acústico e sonotrodo, estes, com total liberdade para posterior usinagem de alteração de geometria se for necessário. A Figura 5 mostra a geometria do ferramental a ser validado pela análise por elementos finitos.

Figura 5 - Geometria do ferramental para soldagem de plásticos por ultrassom



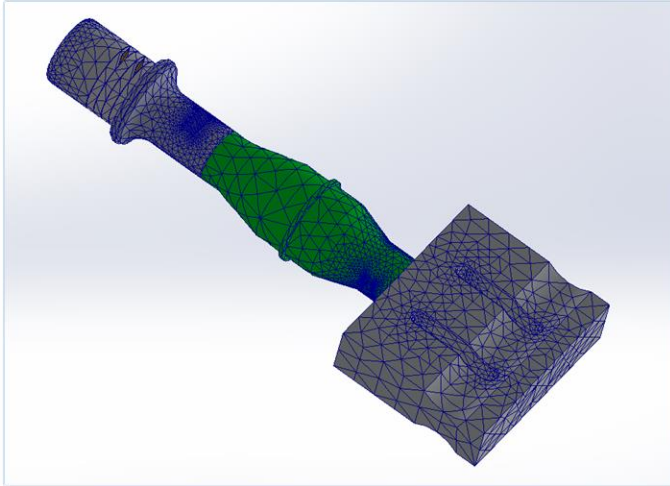
Fonte: autor (2022)

Na simulação por elementos finitos os parâmetros de malha utilizados para o modelo do ferramental para soldagem por ultrassom foram:

- Software: Solidworks;
- Tipo: Tetraédrica;
- Tamanho do elemento máximo: 5;
- Tamanho do elemento mínimo: 1;
- Pontos Jacobianos: 16

A Figura 6 mostra o modelo tridimensional do ferramental com a malha aplicada para análise.

Figura 6 - Modelo tridimensional com malha aplicada para análise modal



Fonte: Autor (2022)

A análise modal aplicada nesse estudo tem o objetivo de detectar no modelo tridimensional do ferramental, seus modos de vibração e suas respectivas frequências naturais, a fim de investigar se não existem frequências naturais na faixa de vibração de 20.000Hz, ou seja faixa de vibração que o equipamento trabalha em conjunto com o ferramental, com tolerância de  $\pm 0,25\%$  ou 19.050Hz a 20.050Hz, validando a geometria e garantindo que a mesma não entre em ressonância quando exposta as condições de trabalho.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Diante do proposto nesse estudo, foi possível detectar os modos de vibração e suas respectivas frequências naturais do modelo tridimensional do ferramental de solda por ultrassom por meio de análise modal. Para a realização desta simulação por elementos finitos, analisou-se 12 frequências naturais próximas da frequência de 20.000Hz. Os resultados obtidos na análise estão representados na Tab.1 a seguir.

Tabela 1- Lista de frequências ressonantes detectadas por análise modal

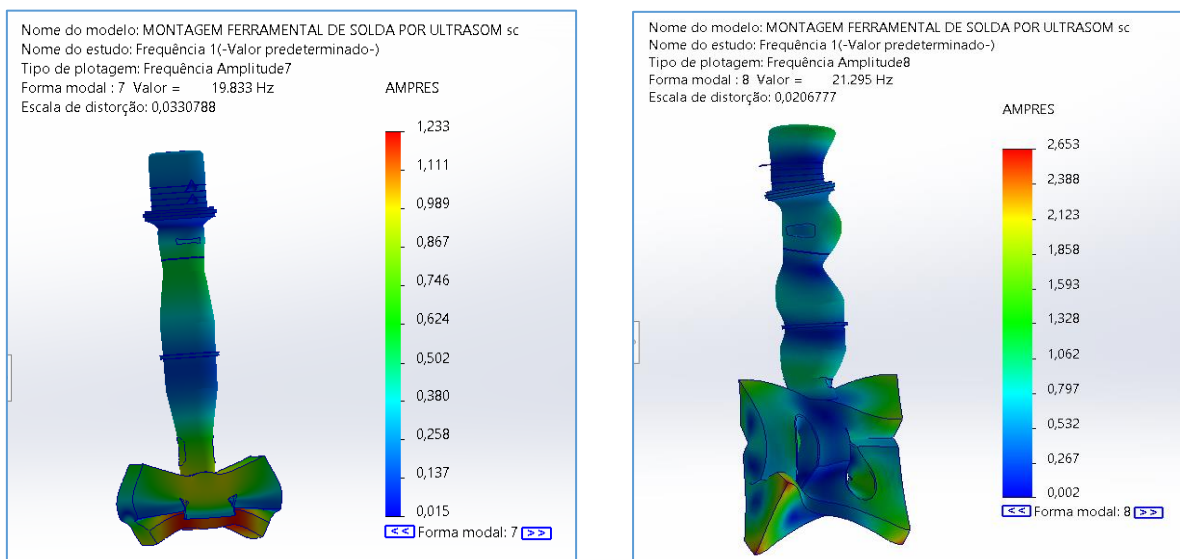
LISTA DE FREQUÊNCIAS RESSONANTES		
Nº do modo	Frequência(Rad/s)	Frequência(Hertz)
1	1,04E+05	16522
2	1,06E+05	16790
3	1,14E+05	18174
4	1,19E+05	18894
5	1,19E+05	18902
6	1,23E+05	19622
7	1,25E+05	19833
8	1,34E+05	21295
9	1,34E+05	21300
10	1,34E+05	21385
11	1,37E+05	21809
12	1,40E+05	22258

Fonte: Autor (2022)

Como observado na tabela 1, foram analisados 12 modos de vibração e suas respectivas frequências naturais, atentando-se para os modos 4 e 5, modos estes que contêm frequências naturais ou ressonantes com valores de 19.833Hz e 21.295Hz respectivamente, próximas à frequência de trabalho do ferramental na faixa de vibração de 20.000Hz.

Os modos 7 e 8 estão entre os modos de vibração que contem frequências naturais próximas à frequência de vibração do processo, desta forma, buscou-se avaliar se o mesmo está de acordo com os valores de tolerância sobre a frequência indicada pelo processo, ou seja,  $\pm 0,25\%$  sobre a frequência de 20.000Hz. A Figura 7, mostra especificamente, os resultados dos modos 4 e 5 simulados pelo método dos elementos finitos.

Figura 7 - Modos de vibração 7 e 8 obtidos na análise modal



Fonte: Autor (2022)

## 5 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos na análise modal pelo método dos elementos finitos feita em um modelo tridimensional de um ferramental de solda por ultrassom, foi possível detectar os modos de vibração e as frequências naturais do modelo para fins de validação do mesmo.

A geometria do ferramental para soldagem por ultrassom foi validada através de análise pelo método dos elementos finitos, tendo como critério de validação de que, os valores de frequências naturais não coincidam com a frequência de trabalho de 20.000Hz do processo, aderindo uma tolerância de afastamento  $\pm 0,25\%$  da frequência de trabalho em questão.

Portanto, a análise realizada neste estudo mostrou-se eficiente, devendo ser levada em consideração quanto à possibilidade de o ferramental ser eficiente durante sua operação normal de utilização e isento de falha mecânica causada por ressonância.

## REFERÊNCIAS

BRANSON, Disponível em: <https://www.emerson.com/pt-br/automation/welding-assembly-cleaning/ultrasonic-plastic-welding/branson-2000x-series>. Acesso em: 24 mar.2022.

JÚNIOR, E.R.L. **Solda Termoplástica através de Ultrassom**, 2012. Itatiba.São Paulo, Brasil, 31 p.

KIYONO, Y.C. 2008. **Método de Otimização Topológica Aplicado ao Projeto de Sonotrodos para Transdutores Piezelétricos**. Sao Paulo, Brasil, 22 p.

SOLIDWORKS 2016 version student.

SONITRON, 1998. **Manual de instruções gerador sonoweld**. Sao Paulo, Brasil, pp. 19- 20.

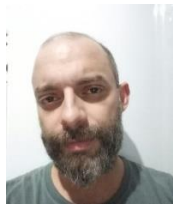
SOUZA, J.M, 2005. **Estudo e avaliação mecânica das juntas soldadas por ultrassom de policarbonato e poli (Metacrilato de metila)**. São Paulo, Brasil, 5 p.

**SOBRE O(S)AUTOR(ES)**

**Sobre os autores:**

---

**i ALLAN QUERUBIM DOS SANTOS**



Possui graduação em Gestão Financeira pela Faculdade Senac SP (2019), cursando atualmente a Pós-Graduação em Projetos de mecânica industrial pela Faculdade SENAI de Tecnologia (2022). Tem experiência na área de Automação Industrial com aplicações em soldagem de plásticos por ultrassom, projetos de Máquinas, desenvolvimento de produtos e pesquisas. É pesquisador, desenvolvedor e responsável pela usinagem de novas aplicações em soldagem por ultrassom.

**ii LEANDRO CARDOSO DA SILVA**



Graduação em Engenharia de Produção Mecânica pelo Centro Universitário Nove de Julho, Mestrado em Engenharia dos Materiais pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e Doutorando em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo. Tem experiência industrial e acadêmica nas áreas de engenharia industrial, mecânica automobilística, manufatura aditiva, materiais metálicos, materiais poliméricos, gestão da qualidade, tratamento de resíduos sólidos e líquidos, cadeia de suprimentos, logística, planejamento e controle da produção e gestão organizacional. Na indústria trabalhou por 14 anos em empresas multinacionais no setor automotivo na área de desenvolvimento do produto e processo. Atua na área acadêmica desde 2011 como Gestor Educacional e Professor em cursos de graduação de Engenharia e em cursos de Pós-Graduação. Atualmente é Professor de Educação Tecnológica na Faculdade do Senai.