



ÍTALO RIBEIRO LEMES
GABRIEL SILVEIRA LIMA

**PROJETO ESTRUTURAL DE UMA CAFETEIRA FABRICADA
POR MANUFATURA ADITIVA, BASEADO EM
METODOLOGIA *DESIGN FOR SIX SIGMA***

LAVRAS – MG

2021

**ÍTALO RIBEIRO LEMES
GABRIEL SILVEIRA LIMA**

**PROJETO ESTRUTURAL DE UMA CAFETEIRA FABRICADA POR MANUFATURA
ADITIVA, BASEADO EM METODOLOGIA *DESIGN FOR SIX SIGMA***

Concepção básica apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Francisco Scinocca
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaríamos de agradecer a Deus, por ter nos dado força e saúde para superar todas as dificuldades encontradas.

Agradecemos as nossas famílias, que nos apoiou de todas as formas possíveis para que conseguíssemos realizar este trabalho, crendo que tudo isso é o começo de muitas das minhas futuras realizações. Sendo também base fundamental, com apoio sentimental, moral e financeiro.

Ao nosso orientador Dr. Francisco Scinocca, que nos guiou ao decorrer desse projeto, sempre contribuindo com nosso crescimento profissional e pessoal, demonstrando-se ser um grande ser humano e acima de tudo um grande amigo.

Aos amigos de república e faculdade, em especial as Repúblicas Arapuça e Arame Farpado, que ao fim, se tornaram grandes irmãos para a vida.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo o desenvolvimento estrutural de uma Cafeteira Inteligente através do *Design For Six Sigma* (DFSS). Para a execução deste projeto, foi feito previamente uma análise bibliográfica, onde foi possível entender como executar a metodologia DFSS e aplicar suas ferramentas. Tendo este conhecimento, foram realizados estudos que buscassem encontrar modelos de referência e outros *key points* do produto que, após definidos, foram aplicados para a construção do Modelo de Referência do produto final, em um *software* CAD, chamado TopSolid. Neste mesmo software foram realizados posteriormente, refinamentos e diversas otimizações até se obter o modelo final, estas otimizações foram levantadas durante a aplicação de ferramentas como a Pesquisas Mercadológicas, a análise FMEA, Análise de *Design for Assembly*, *Design for Manufacturability* e outras ferramentas de qualidade. Em sequência, foram realizadas análises através do método computacional, no *Software Ansys*, utilizando Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de realizar uma validação virtual do produto. Para realizar o MEF, primeiro foram definidos os parâmetros do material do sólido, que neste caso foi utilizado um artigo de referência que tratava sobre o comportamento do material PLA frente as condições de impressão. Escolheu-se os valores no qual o PLA estaria mais propenso a falhar com uma menor tensão aplicada, sendo esta decisão a favor da segurança do projeto. Após selecionado o material, fez-se o refinamento de malha, através do Método de Convergência de Malha, para cada peça, até chegar na quantidade de elementos que garantiria acurácia nos resultados das simulações. Definido o número de elementos, empregou-se as condições de contorno e carregamentos, e dessa forma cada componente foi submetido a três análises: Análise Linear Estática, Flambagem e Modal. As análises Lineares Estáticas apresentaram altos coeficientes de segurança, permitindo concluir que não há regiões com fragilidade potencial e conseqüentemente, sem risco de falhas por carregamento estático. Para as Análises de Flambagem, notou-se que Autovalores, além de serem todos maiores que 1, os valores são bastante elevados, ou seja, os componentes não irão falhar por flambagem. Caso ocorra uma falha decorrente da solicitação imposta, esta ocorreria por compressão. Como resultado das Análises Modais, foi detectada, dentre todos os resultados dos componentes, uma frequência natural mínima de 261 Hz, que poderia resultar em uma falha por ressonância, porém se considerar as condições de operação do mecanismo interno, muito dificilmente este valor será atingido. Por fim, na Análise de Fadiga, que foi realizada nos componentes frontal e na bandeja, obtendo-se um resultado muito satisfatório para ambos, garantindo ao menos 1 milhão de ciclos para fadiga. Passadas todas estas etapas, pode-se definir uma estrutura a qual tem um grande potencial competitivo no mercado, pois esta apresenta um design moderno, atrativo e resistente as aplicações estipuladas (robusto), e ainda assim não deixa de apresentar baixo custo de execução. Concluindo então, que o presente trabalho conseguiu atingir os objetivos esperados.

Palavras-chave: Cafeteira, Análise de Mercado, *Design*, Método dos Elementos Finitos, *Design For Six Sigma*.

ABSTRACT

This Course Completion Paper aims at the structural development of a Smart Coffee Maker through Design For Six Sigma (DFSS). For the execution of this project, a bibliographic analysis was previously carried out, where it was possible to understand how to perform the methodology DFSS and apply its tools. Having this knowledge, studies were carried out to find reference models and other key points of the product that, after being defined, were applied to build the Reference Model of the final product, in CAD software, called TopSolid. In this same software were carried out later, refinements and several optimizations until obtaining the final model, these optimizations were raised during the application of tools such as Market Research, FMEA analysis, Design for Assembly Analysis, Design for Manufacturability and other quality tools. Subsequently, analyzes were performed using the computational method, in the Software Ansys, using Finite Element Method (FEM), in order to perform a virtual validation of the product. To perform the MEF, the parameters of the material of the solid were first defined, in which case a reference article was used that dealt with the behavior of the material. PLA front printing conditions. We chose the values in which the PLA would be more prone to fail with a lower voltage applied, this decision being in favor of the safety of the project. After selecting the material, the mesh refinement was performed using the Method of Mesh convergence, for each piece, until reaching the amount of elements that would guarantee accuracy in the simulation results. Once the number of elements was defined, the boundary conditions and loadings, and thus each component was subjected to three analyses: Static Linear Analysis, Buckling and Modal. Static Linear analyzes presented high safety coefficients, allowing the conclusion that there are no fragile regions potential and therefore no risk of failure due to static loading. For Buckling Analysis, it was noted that Eigenvalues, in addition to being all greater than 1, the values are quite high, meaning the components will not fail due to buckling. If it occurs a failure arising from the imposed request, this would occur by compression. As a result of the Modal Analyzes, it was detected, among all the results of the components, a frequency minimum natural 261 Hz, which could result in a resonance fault, however if considering the operating conditions of the internal mechanism, this value is very unlikely to be hit. Finally, in the Fatigue Analysis, which was performed on the front components and on the tray, obtaining a very satisfactory result for both, guaranteeing at least 1 million cycles for fatigue. After all these steps, a structure can be defined which has a great competitive potential in the market, as it has a modern, attractive and resistant design the stipulated applications (robust), and even so, it has a low execution cost. Concluding then, that the present work managed to achieve the expected objectives.

Keywords: Coffee maker, Market Analysis, Design, Finite Element Method, Design for Six Sigma

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Etapas do processo de manufatura aditiva	20
Figura 2.2 – Esquema da FDM	22
Figura 2.3 – Esquema SLS	23
Figura 2.4 – Esquema SLA	24
Figura 2.5 – Processo típico de elementos finitos	29
Figura 3.1 – Fluxograma da Metodologia do Projeto	39
Figura 4.1 – Concepção 1	42
Figura 4.2 – Concepção 2	43
Figura 4.3 – Concepção 3	44
Figura 4.4 – Concepção 4	45
Figura 4.5 – Concepção 5	46
Figura 4.6 – Concepção 6	47
Figura 4.7 – Concepção 7	48
Figura 4.8 – Concepção 8	49
Figura 4.9 – Concepção 9	50
Figura 4.10 – Concepção 10	51
Figura 4.11 – Design de referência detalhado	52
Figura 4.12 – Bandeja com a parte de baixo	53
Figura 4.13 – Orelha entre a peça laranja e verde	54
Figura 4.14 – “Calhas” para garantia de montagem	54
Figura 4.15 – Base encaixada	55
Figura 4.16 – Bandeja, montagem de encaixes com pino	56
Figura 4.17 – Espaços para aplicação de Silicone	57
Figura 4.18 – Bandeja, final	57
Figura 4.19 – Parte frontal, inicial	58
Figura 4.20 – Frontal, montagem lego com pinos	59
Figura 4.21 – Chapa de alumínio	59
Figura 4.22 – Chapa de alumínio fixada	60
Figura 4.23 – Modelo 1, superior	61
Figura 4.24 – Modelo 2, superior	61
Figura 4.25 – Estrutura completa da cafeteira	62

Figura 4.26 – Modelo final, vista frontal	63
Figura 4.27 – Modelo final, vista lateral	64
Figura 5.1 – Representação das camadas e dos parâmetros (a) e (b) orientação de construção	67
Figura 5.2 – Direções de orientação do raster, 0°, 90°, 45°	67
Figura 5.3 – Convergência de malha - Bandeja	69
Figura 5.4 – Convergência de malha - Frontal	69
Figura 5.5 – Convergência de malha - Superior	70
Figura 5.6 – Condições de contorno de restrição 1	71
Figura 5.7 – Condição de contorno de restrição 2	72
Figura 5.8 – Condições de contorno de carregamento	72
Figura 5.9 – Condição de Contorno de Força	73
Figura 5.10 – Condição de contorno de restrição	74
Figura 5.11 – Aplicação da carga na estrutura frontal	74
Figura 5.12 – Restrição do componente superior 1	75
Figura 5.13 – Restrição do componente superior 2	75
Figura 5.14 – Carregamento componente superior	76
Figura 6.1 – Análise de tensão para carregamento estático	78
Figura 6.2 – Análise de tensão para carregamento estático	79
Figura 6.3 – Análise de tensão para carregamento estático	80
Figura 6.4 – Análise de tensão para carregamento estático	81
Figura 6.5 – Gráfico SN de dados de fadiga do material PLA	82
Figura 6.6 – Curva SN do material PLA	82
Figura 6.7 – Vida de fadiga dos componentes	83
Figura 6.8 – Curvas tensão-número de ciclos de materiais termofixos e termoplásticos	84
Figura 6.9 – Coeficiente de segurança - Fadiga	84
Figura 6.10 – Modos de Flambagem	86
Figura 6.11 – Modos de Flambagem	88
Figura 6.12 – Modos de Flambagem	90
Figura 6.13 – Modos de Vibração	92
Figura 6.14 – Modos de Vibração (livre)	94
Figura 6.15 – Modos de Vibração	95

Figura 6.16 – Modos de Vibração (livre)	97
Figura 6.17 – Modos de Vibração	98
Figura 6.18 – Modos de Vibração (livre)	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Análise de Ambiente interno x externo.	37
Tabela 4.1 – Matriz SWOT	65
Tabela 5.1 – Combinações paramétricas para a fabricação das amostras	66
Tabela 5.2 – Resultados obtidos nos ensaios de tração e medição da massa das amostras impressas	66
Tabela 5.3 – Propriedades gerais do PLA	68
Tabela 5.4 – Convergência da malha para cada componente	70
Tabela 6.1 – Valor final da carga crítica para cada modo de flambagem	87
Tabela 6.2 – Valor final da carga crítica para cada modo de flambagem	89
Tabela 6.3 – Valor final da carga crítica para cada modo de flambagem	91
Tabela 6.4 – Conversão das frequências naturais para RPM de cada modo de vibração .	93
Tabela 6.5 – Conversão das frequências naturais para RPM de cada modo de vibração .	96
Tabela 6.6 – Conversão das frequências naturais para RPM de cada modo de vibração .	99
Tabela 1 – Matriz de Tomada de Decisão Para Concepções	109
Tabela 2 – FMEA	110

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivo Geral	13
1.3	Objetivos Específicos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	DFSS Aplicado para Desenvolvimento de Produto	14
2.1.1	DMADV	14
2.2	Ferramentas da Qualidade	15
2.2.1	Value Analysis and Value Engineering (VA/VE)	15
2.2.2	Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)	16
2.2.3	FMEA	17
2.2.3.1	Tipos de FMEA	18
2.3	Manufatura Aditiva	19
2.3.1	Impressora 3D	20
2.3.1.1	Modelagem por fusão e depósito (FDM)	21
2.3.1.2	Sinterização seletiva a laser – SLS	22
2.3.1.3	Estereolitografia (SLA)	23
2.3.2	Filamentos e materiais base	24
2.3.2.1	Material PLA	24
2.3.2.2	Material ABS	25
2.3.2.3	Material PETG (PET, PETT)	26
2.3.2.4	Material Nylon	26
2.3.2.5	Material TPE, TPU, TPC (flexível)	27
2.4	Modelagem Tridimensional em CAD	27
2.5	Método dos Elementos Finitos (MEF)	28
2.5.1	Teoria da falha estática	30
2.5.2	Teoria da falha por fadiga	30
2.5.3	Teoria da falha por flambagem	32
2.5.4	Análise modal	33
2.5.4.1	Frequências naturais	33
2.6	Análise Mercadológica	34

2.6.1	Pesquisa de mercado	34
2.6.2	<i>Benchmarking</i>	35
2.6.3	Matriz de tomada de decisão para concepção de projeto	35
2.6.4	Análise SWOT	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Introdução	38
3.2	Metodologia	38
4	ESCOLHA DA CONCEPÇÃO	42
4.1	Montagens preliminares	42
4.2	Montagem Final	52
4.2.1	Bandeja	53
4.2.2	Frontal	58
4.2.3	Superior	60
4.2.4	Modelo Final	62
5	PARÂMETROS PARA AS ANÁLISES	66
5.1	Material	66
5.2	Malha	68
5.3	Condições de Contorno	71
5.3.1	Condição de contorno da bandeja	71
5.3.1.1	Restrição	71
5.3.1.2	Carregamentos	72
5.3.2	Condição de contorno do componente frontal	73
5.3.2.1	Restrição	73
5.3.2.2	Carregamentos	74
5.3.3	Condições de contorno componente superior	75
5.3.3.1	Restrição	75
5.3.3.2	Carregamentos	76
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES	77
6.1	Análise Estática Linear	77
6.1.1	Bandeja	77
6.1.2	Componente frontal	79
6.1.3	Componente superior	80

6.2	Análise de Fadiga	81
6.3	Análise de Flambagem	85
6.3.1	Análise de Flambagem Bandeja	85
6.3.2	Análise de flambagem componente frontal	87
6.3.3	Análise de flambagem do componente superior	89
6.4	Análise Modal	91
6.4.1	Análise Modal Bandeja	92
6.4.2	Análise modal componente frontal	95
6.4.3	Análise modal componente superior	98
7	CONCLUSÃO	102
	REFERÊNCIAS	104
	ANEXO A – Matriz de Tomada de Decisão Para Concepções	109
	ANEXO B – FMEA	110

1 INTRODUÇÃO

Segundo informações da Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC), durante o século XVIII, quando o café passou a se sobressair de modo considerável na economia do país, com lucros e mais lucros rendidos pelos barões do café, conseqüentemente houve um grande avanço da urbanização, com o surgimento das estradas de ferro, a entrada de imigrantes italianos, espanhóis e alemães, além do deslocamento do centro de poder do Nordeste para o Sudeste. Assim, à medida que o plantio do grão aumentava, o comércio de café foi se tornando cada vez mais crucial para o desenvolvimento econômico e social do Brasil. (ABIC, 2007).

Com o passar dos anos, o Brasil foi se destacando e se tornando um dos maiores produtores e exportadores de café do mundo. De acordo com dados fornecidos pela Embrapa, o Brasil teve, em 2020, sua safra total estimada em 63,07 milhões de sacas de 60kg, número que representa, aproximadamente, 35% da produção mundial, incluindo as espécies arábica e robusta (EMBRAPA, 2021). No entanto, desse total, somente 60% foram exportados, sendo a maior parte exportada em grão cru, ou seja, sem qualquer etapa de industrialização que agregue valor ao produto (COOPERCAM, 2019). Fato que ocorre devido aos altos custos dos recursos tecnológicos que realizam esses processos em grande escala.

Diante disso, a demanda por máquinas que podem torrar ou moer o café em baixa escala de forma automática, como as cafeteiras, têm aumentado no país. Isso porque, além da busca por um sabor melhor da bebida, de acordo com a Organização Internacional do Café (OIC), o Brasil é o segundo maior consumidor mundial, ficando atrás somente dos Estados Unidos, que detém 14% da demanda mundial. (CAFEICULTURA, 2019).

É importante considerar que cafeteiras desta categoria possuem uma grande tecnologia em seu *design*, seja na parte eletrônica que se munem de *gadgets* e uma programação densa, mas também em sua parte funcional, através de caldeiras, moedores, dosadores, etc. Com isso, para que seja atingido um nível de alta qualidade e funcionalidade, faz-se necessário projetar estes componentes mecânicos ou eletrônicos de maneira que operem adequadamente conforme as solicitações previstas. Diante disso, alunos e professores do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Lavras estão desenvolvendo uma cafeteira inteligente de baixo custo, competitiva no mercado e com um *design* robusto. Onde a partir da retroalimentação junto a um sistema de Big Data consiga transmitir informações em tempo real para um centro, sobre sua operação, preferência do consumidor, nível de insumos e a qualidade do café servido, ou seja, operando de forma automatizada e programável.

Logo, o intuito deste trabalho é construir a estrutura da cafeteira através do *software TopSolid*, para futura impressão 3D com uso do material Poliacido Láctico (PLA), sendo uma tecnologia desenvolvida totalmente dentro da Universidade.

Assim, aplicou-se uma metodologia conhecida como *Design for Six Sigma* (DFSS), que conta com a utilização da ferramenta do DMADV - técnica que aperfeiçoa o processo de desenvolvimento e tenta reduzir as chances de falhas, otimizando o tempo, diminuindo a quantidade de retrabalho e, conseqüentemente, os custos e gastos desnecessários. Dessa forma, através de uma Análise Mercadológica para verificar as cafeteiras já existentes no mercado, foram desenvolvidos, a partir do *Software TopSolid*, diferentes *Designs* para a estrutura, até chegar no modelo ideal. Em conjunto a esta metodologia, visando priorizar a organização dos processos, bem como o aumento do nível de qualidade do que se pode oferecer aos clientes, identificando situações adversas no dia a dia que podem impactar negativamente no produto final, acrescentou-se o uso de outras ferramentas da qualidade, como o *Value Analysis and Value Engineering* (VA/VE), *Design for Manufacturing*, *Design for Assembly* e o FMEA.

Em vista disso, com a aplicação de tais ferramentas, objetiva-se, principalmente, a confiabilidade a ser garantida pelo produto. Esta confiabilidade também é determinada por testes realizados durante a fase de *design* do produto, permitindo, assim, uma melhor análise das possíveis falhas estruturais, conforme certas solicitações impostas. Para isto, foi realizada a modelagem de situações possíveis, através do Método dos Elementos Finitos (MEF) pelo *Software Ansys*, a fim de realizar uma validação virtual do produto. (DEGARMO, 1979; KIRSCH, 1981; LEONDES, 1999).

O MEF é amplamente aplicado em projetos de engenharia, visto que não apresenta muitas dificuldades quanto à interpretação do fenômeno físico, tanto no pré-processamento, quanto no pós-processamento. Tal método garante um alto desempenho do produto final em um curto espaço de tempo e, exatamente por isso, ele é aplicado em qualquer categoria de projeto, desde o mais simples até os mais complexos. (SHAMES, 2009; REDDY, 2000).

1.1 Justificativa

É inegável que o Brasil apresenta uma parcela significativa de sua matriz econômica advinda da indústria cafeeira e, além disso, por ser um dos maiores consumidores de café no mundo, sendo sua média de consumo da bebida crescente a cada ano, sua demanda em relação aos tipos de máquinas que preparam o café é promissora.

Visto isso, o presente Trabalho de Conclusão de Curso justifica-se na construção do *design* robusto de uma cafeteira inteligente, através da utilização da manufatura aditiva, que permite a criação de estruturas de baixo custo, podendo ser facilmente ajustadas conforme a necessidade do projeto.

1.2 Objetivo Geral

O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo, o desenvolvimento de uma estrutura robusta de uma cafeteira inteligente para posterior impressão 3D com uso do material PLA, utilizando a metodologia *Design for Six Sigma* (DFSS), junto a outras ferramentas de qualidade e planejamento, com o intuito de minimizar falhas e custos e a satisfação dos clientes.

1.3 Objetivos Específicos

1. Definir estratégias de desenvolvimento do produto utilizando ferramentas do DFSS.
2. Desenvolver um Design Atraivo para o produto, a partir do software de CAD.
3. Utilizar as ferramentas *Design for assembly*, *Design for manufacturability* e *Value Analysis and Value Engineering* (VA/VE), para refinar a estrutura.
4. Realizar simulações virtuais com o uso do Método dos Elementos Finitos, via software de CAE, para validação dos componentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DFSS Aplicado para Desenvolvimento de Produto

Segundo Wang et al.(2016), o *Design For Six Sigma* (DFSS) é um processo iterativo, o qual tenta incorporar a voz do cliente (VOC) no processo e no design final do produto. Esta metodologia é utilizada para agregar qualidade ao produto final, à medida que implementa abordagens preventivas e ferramentas durante o desenvolvimento do produto.

O *Six Sigma* em sua essência, é um gerenciamento que busca diminuir a variação de um processo, especificamente para atingir uma marca de no máximo 3,4 defeitos por milhão. Para se chegar ao resultado, existem dois métodos que podem ser empregados: o DMAIC, que, traduzindo para o português, significa Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar, empregado para a melhoria de um produto, serviço ou de um processo já existente. Já para processos que envolvem desenvolvimento de novos projetos e inovação, utiliza-se o DMADV, que consiste nas fases: Definir, Medir, Analisar, Projetar e Verificar. Este processo é melhor abordado a seguir. (JOHNSON et al., 2006)

2.1.1 DMADV

Segundo Johnson et al., (2006), o DMADV, que significa: Definir, Medir, Analisar, Projetar e Verificar, é o método aplicado quando se pretende desenvolver um novo produto ou inovar em um produto, serviço ou processo já existente. Sendo que as fases dessa ferramenta apresentam as seguintes características:

Definir: o propósito principal dessa fase é definir qual o produto ou processo que será desenvolvido. Ela inicia com a elaboração da justificativa para a construção do projeto. Nesta fase, é preciso criar um cronograma para determinar quanto tempo, aproximadamente, durará o projeto e, ademais, em quanto tempo será possível lançar o produto no mercado (PRATA et al., 2004).

Medir: esta fase consiste em analisar e identificar as reais necessidades dos clientes e transformá-las em uma linguagem de projeto, isto é, nas características técnicas que precisam ser adicionadas no produto (SLEEPER, 2006).

Analisar: é uma etapa que seleciona a melhor alternativa desenvolvida dentre aquelas já propostas. É nesta fase que se inicia a criação do produto a ser construído, a partir de um protótipo ou por meio de uma simulação. Desta forma, é necessário realizar esta análise para

que se consiga criar diferentes opções e variações do produto e buscar qual é a melhor e mais adequada versão do protótipo (SLEEPER, 2006; PRATA et al., 2004; CROWE et al., 2001).

Projetar: o principal objetivo perpassa por criar um protótipo detalhado, realizar os principais testes para seu funcionamento e predeterminar sua produção em pequena e larga escala (PRATA et al., 2004; CROWE et al., 2001).

Verificar: etapa final do projeto, em que é necessário testar e validar a efetividade do projeto em questão, para assim começar a produzi-lo e o lançá-lo no mercado. Vale ressaltar que, depois de o seu lançamento no mercado, devem ser feitas revisões e ajustes, quando possível, para se buscar o aperfeiçoamento do produto (SLEEPER, 2006; PRATA et al., 2004; CROWE et al., 2001).

2.2 Ferramentas da Qualidade

2.2.1 Value Analysis and Value Engineering (VA/VE)

A *Value Analysis* (AV) é um processo sistemático, formal e organizado de análise e avaliação, que se dispõe a solucionar problemas a partir da utilização de um conjunto específico de técnicas e um grupo de pessoas especializadas. É um enfoque criativo e organizado, que tem como principais objetivos a identificação e a remoção de custos desnecessários e a melhora da função de um produto já existente. (MANDELBAUM, 2006; RICH; HOLWEG, 2000).

Como tal, o processo *Value Analysis* (VA) é usado para oferecer um produto existente e um serviço de melhor desempenho ao cliente a um custo reduzido, sendo uma atividade de grupo que envolve o *Brainstorming* de melhorias e alternativas para melhorar o valor da peça, especialmente para o cliente. Esse princípio básico de oferecer valor com o menor custo de produção ideal nunca é comprometido. É o que orienta todas as ações dentro do processo da análise de valor e permite que qualquer ideia de melhoria seja desempenhada em ganhos comerciais para a empresa e para seus clientes. Esta técnica é, de fato, uma das principais características de uma empresa que entende e busca alcançar a Gestão da Qualidade Total (TQM) em tudo o que faz, procurando sempre satisfazer seus clientes.

Desse modo, para novos produtos, a abordagem Análise de Valor opera em um ambiente menos certo e com baixos níveis de informações disponíveis para basear a tomada de decisões. Neste caso, a análise e o procedimento sistemático de revisão para novos produtos é realizada

pela *Value Engineering* (VE), técnica utilizada durante a fase de *Design*, objetivando fornecer um ótimo valor ao novo produto, com o menor custo possível.

Em termos fundamentais, a *Value Engineering* (VE) é uma maneira organizada de pensar ou olhar para um item ou um processo, por meio de uma abordagem funcional. Envolve uma avaliação objetiva das funções executadas por peças, componentes, produtos, equipamentos, procedimentos, serviços, assim por diante. A referida técnica é empregada para eliminar ou modificar qualquer elemento que contribua significativamente para o custo geral, sem adicionar um valor proporcional à função geral.

Portanto, *Value Analysis and Value Engineering* (VA / VE) consiste em um método ordenado e sistêmico que se propõe a aumentar o valor de um item, podendo ser este um produto, um sistema, um processo, um procedimento, um plano, uma máquina, um equipamento, uma ferramenta, um serviço ou um método de trabalho. A análise de funções faz parte do *Value Analysis* (VA), em razão de seu objetivo ser tão somente identificar as funções do produto em comparação com o custo e preço. Já a avaliação de projeto e construção é realizada por meio do *Value Engineering* (VE), com o intuito de eliminar todos aqueles elementos que não contribuam para seu funcionamento. (MANDELBAUM, 2006; RICH; HOLWEG, 2000).

2.2.2 Design for Manufacturing and Assembly (DFMA)

Os conceitos a respeito da metodologia de *Design for Manufacture and Assembly* (DFMA) tiveram início a partir da união entre a ferramenta *Design for Manufacture* (DFM) e a *Design for Assembly* (DFA). Os primeiros relatos apresentados através do DFM se deram no ano de 1788, pelo Francês Le Blanc, que o utilizou com a intenção de compreender as tolerâncias necessárias para a produção em massa de mosquetes, com destino ao governo dos EUA. Em seguida, Eli Whitney, no século XIX, utilizou-a a fim de desenvolver um sistema de manufatura de armas para o governo americano. Um pouco mais tarde, na década de 80, Geoffrey Boothroyd e Peter Dewhurst desenvolveram a técnica de *Design for Assembly* (DFA), a qual tinha o intuito de facilitar e medir a complexidade de qualquer tipo de montagem, tornando essa medição quantitativa e qualitativa para que a montagem analisada servisse como um modelo para melhorar a próxima. (BARBOSA, 2007).

Segundo Boothroyd et al. (2002), o *Design for Manufacture and Assembly* (DFMA) é a junção de *Design for Manufacture* (DFM) e *Design for Assembly* (DFA). Ambos apresentam o mesmo objetivo de elevar a eficiência nos processos de produção em relação à manufatura e

à montagem. Dessa maneira, *Manufacture* pode ser compreendido como a operação de fabricar um componente individual, à medida que *Assembly* é tido como a simples montagem dos componentes que formam o produto final.

Assim sendo, o *Desing for Manufacturing* busca desenvolver um produto que atenda todos os requisitos funcionais, eliminando características indesejáveis que sejam capazes de prejudicar sua manufatura, ou seja, garantindo que as partes individuais para montagem do produto final se tornem mais fáceis de serem produzidas, resultando, tanto em uma redução dos custos de produção, quanto na complexidade das operações de fabricação (BOOTHROYD et al., 2002).

No entanto, o *Design For Assembly* visa simplificar os estágios de produção, através da diminuição do número de peças e da facilidade de montagem, verificando isoladamente a forma, o material e a montagem de cada uma das peças em questão, dessa forma, desenvolvendo um produto simples e funcional.

Contudo, a fim de guiar os grupos de projetos, simplificar a estrutura do produto, reduzir os custos de manufatura e montagem e quantificar as melhorias, torna-se ideal utilizar as duas técnicas sempre em conjunto. A aplicação do *Design for Manufacturing and Assembly* (DFMA) agrega grandes benefícios ao produto final, como por exemplo: melhoria na qualidade, redução do número total de peças, facilitação do processo de montagem e do manuseio do produto, confiabilidade, padronização, redução de custos na manufatura e estímulo ao trabalho em equipes multidisciplinares.(BARBOSA, 2007; BOOTHROYD et al., 2002)

2.2.3 FMEA

A FMEA (*Failure Mode Effects Analysis*) ou análise dos modos e efeitos das falhas, surgiu na década de 60 pela NASA, com o intuito de promover uma maior confiabilidade nos projetos das indústrias aeroespaciais. Posteriormente, apresentou abrangência para demais setores, como, os industriais automotivos, nuclear e aeronáutica (FILHO, 2010). É uma ferramenta indutiva que possibilita examinar para cada componente de um sistema de uma forma sistemática os diversos modos de falha que poderão acontecer, as suas causas raízes e os seus efeitos no funcionamento e segurança do sistema (SOBRAL; ABREU, 2013). Esse método pode ser determinado também como uma técnica de engenharia utilizada para definir, detectar e eliminar falhas conhecidas e/ou potenciais, problemas e erros de um sistema, projeto, processo e/ou serviço, antes que chegue ao seu destino final, o consumidor (STAMATIS, 2003).

Segundo Stamatis (2003), o objetivo do FMEA é detectar ações corretivas básicas para impedir falhas, prevenindo que elas seguem até os clientes, melhorando a confiabilidade, durabilidade e qualidade de um produto ou serviço. Para o autor, um FMEA baseia-se em achar modos de falhas conhecidos e potenciais, constatar as causas e efeitos dessas falhas, dando prioridade as falhas conforme o nível crítico da mesma e promover acompanhamento de problemas e das ações corretivas.

Palady (2004) define o FMEA como uma ferramenta que fornece diferentes funções, (i) é uma técnica para prever problemas, sendo uma ferramenta de baixo risco, no entanto, capaz de identificar e solucionar os problemas, (ii) procedimento que proporciona de uma forma estruturada o estudo para formação de projetos e processos, (iii) é visto como um diário, já que, qualquer mudança, que por ventura seja capaz de impactar em qualidade ou confiabilidade, que ocorrer no período deve ser documentada.

Dessa forma, o objetivo principal do FMEA, é que sua utilização diminui as chances do produto ou processo falhar no decorrer de sua operação, ou seja, aumento da confiabilidade que é a probabilidade de falha do produto/processo. Esta dimensão da qualidade, da confiabilidade, tem se mostrado cada vez mais como um destaque para os consumidores, visto que a falha de um produto, mesmo que prontamente consertado pelo serviço de assistência técnica e totalmente coberta por termos de garantia, fundamenta, no mínimo, uma grande insatisfação do consumidor ao impedi-lo de usar o produto por um determinado período de tempo (OLIVEIRA, 2012).

2.2.3.1 Tipos de FMEA

De acordo com Toledo et. al, (2010), a FMEA pode ser utilizada em duas vertentes, tanto no desenvolvimento do projeto do produto como do processo, onde se diferem somente quanto ao objetivo, cuja definição é a seguinte:

- FMEA de produto: são consideradas as falhas que serão capazes de acontecer com o produto dentro das especificações do projeto, com o intuito de evitar o aparecimento de falhas no produto ou no processo derivado do projeto;
- FMEA de processo: na qual são consideradas as falhas a partir do planejamento até a execução do próprio projeto, ou seja, essa análise visa evitar falhas do processo, baseando-se nas não conformidades do produto, bem como as especificações do projeto.

2.3 Manufatura Aditiva

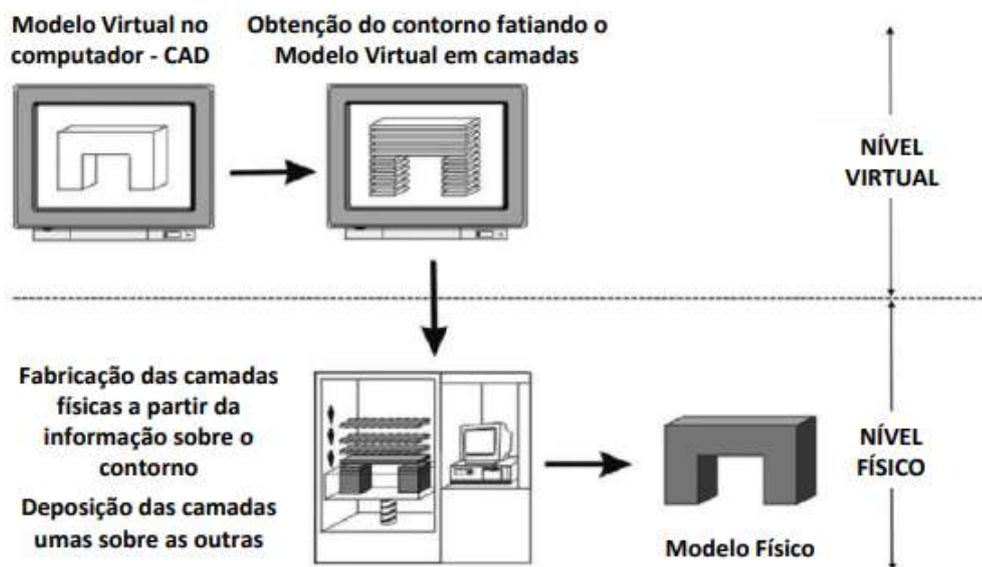
A manufatura aditiva, conhecida como impressão 3D, surgiu no fim da década de 80 em razão das demandas de redução de custos na indústria (JÚNIOR, 2017). Logo, observou-se que a realização de alterações em um produto que já se encontrava na cadeia de produção e comercialização, incorria, normalmente, em custos elevados. Portanto, um maior esforço e atenção foram direcionados para a etapa de desenvolvimento do produto. Desse modo, introduziu-se o conceito de prototipagem rápida, devido aos processos de manufatura aditiva que permitiam a criação de protótipos em poucas horas, o que facilitava na operação de testes, na análise de possíveis falhas, dentre outras vantagens.

Segundo Volpato et al. (2007), a impressão 3D, ou prototipagem rápida, é um processo de fabricação que se dá a partir da adição de material em forma de camadas planas consecutivas, possibilitando a fabricação de componentes físicos tridimensionais (3D), com base nas informações adquiridas diretamente do modelo geométrico produzido pelo sistema CAD, de forma rápida, totalmente flexível e automatizada.

Já Frazier (2014) define a Manufatura Aditiva como um processo de juntar os materiais para gerar objetos, com base nas informações do modelo 3D, normalmente camada após camada, em objeção às metodologias de manufatura subtrativas. Sendo que esta definição de Manufatura Aditiva é adequada a todas as classes de materiais, abrangendo os metais, as cerâmicas, os polímeros, os compósitos e os sistemas biológicos.

Em um processo de Manufatura Aditiva, a primeira etapa se baseia na criação do formato e das dimensões do objeto a ser fabricado, a partir de um software de CAD. Em seguida, na segunda etapa, acontece a conversão do arquivo CAD gerado para o formato específico de STL (*Standard Triangle Language file format*), utilizado em máquinas de Manufatura Aditiva, que serve como base do cálculo e determinação do contorno das camadas a serem fabricadas. Assim, nesta etapa, o software de modelagem tridimensional “fatia” o modelo de sólido em diversas (centenas ou milhares) de camadas horizontais. Cada uma das camadas pode ser analisada como uma seção transversal horizontal do objeto em estudo. Após a geração das camadas, um arquivo é enviado para uma impressora 3D, que efetua, fisicamente, a deposição das diversas camadas, uma sobre a outra, até que o *design* do sólido projetado seja concluído. (GEBHARDT, 2011). Por fim, depois de o resultado final da peça, é fundamental concluir uma limpeza adicional para que a mesma esteja pronta para seu respectivo uso. As etapas do processo são representadas na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Etapas do processo de manufatura aditiva



Fonte: (GEBHARDT, 2011)

O termo Manufatura Aditiva determina, portanto, um conjunto de tecnologias utilizadas para a fabricação de objetos físicos com base nas fontes de dados gerados pelo sistema de projeto auxiliado por computador. Esses métodos são peculiares, visto que agregam e ligam materiais, camada a camada, de forma a construir tridimensionalmente (3D) o objeto que se deseja. Logo, a Manufatura Aditiva, pode oferecer diversas vantagens, como a redução do tempo de fabricação, pelo fato de ser uma tecnologia relativamente rápida, visto que o processo é executado em um único passo. Em face disso, é um processo que consegue obter uma elevada redução de custo, uma vez que propicia a obtenção de protótipos, ainda em fases iniciais, de forma econômica, em razão dos materiais utilizados, além de evitar prejuízos no caso de falhas. Além disso, é capaz de criar peças com geometrias complexas e difíceis para diferentes processos que apresentem melhores resultados em testes e ensaios com prototipagem por impressão tridimensional (GARCIA, 2016).

2.3.1 Impressora 3D

A tecnologia das impressoras 3D, conhecidas como máquinas de Prototipagem Rápida, já vem se desenvolvendo no decorrer do tempo e modificando o modo de fabricação de objetos. Atualmente, é possível encontrar diferentes métodos de impressão, sendo que cada um trabalha de modo distinto e utiliza matérias-primas próprias. Certas impressoras conseguem extrudar plástico derretido em camadas para criar os objetos, ao mesmo tempo em que outras utilizam

laser para endurecer camadas de resina ou pó, de maneira que o produto surja de um banho de matéria-prima. E, ainda, outras constroem objetos a partir de materiais como vidro, aço e concreto (PORTO, 2016).

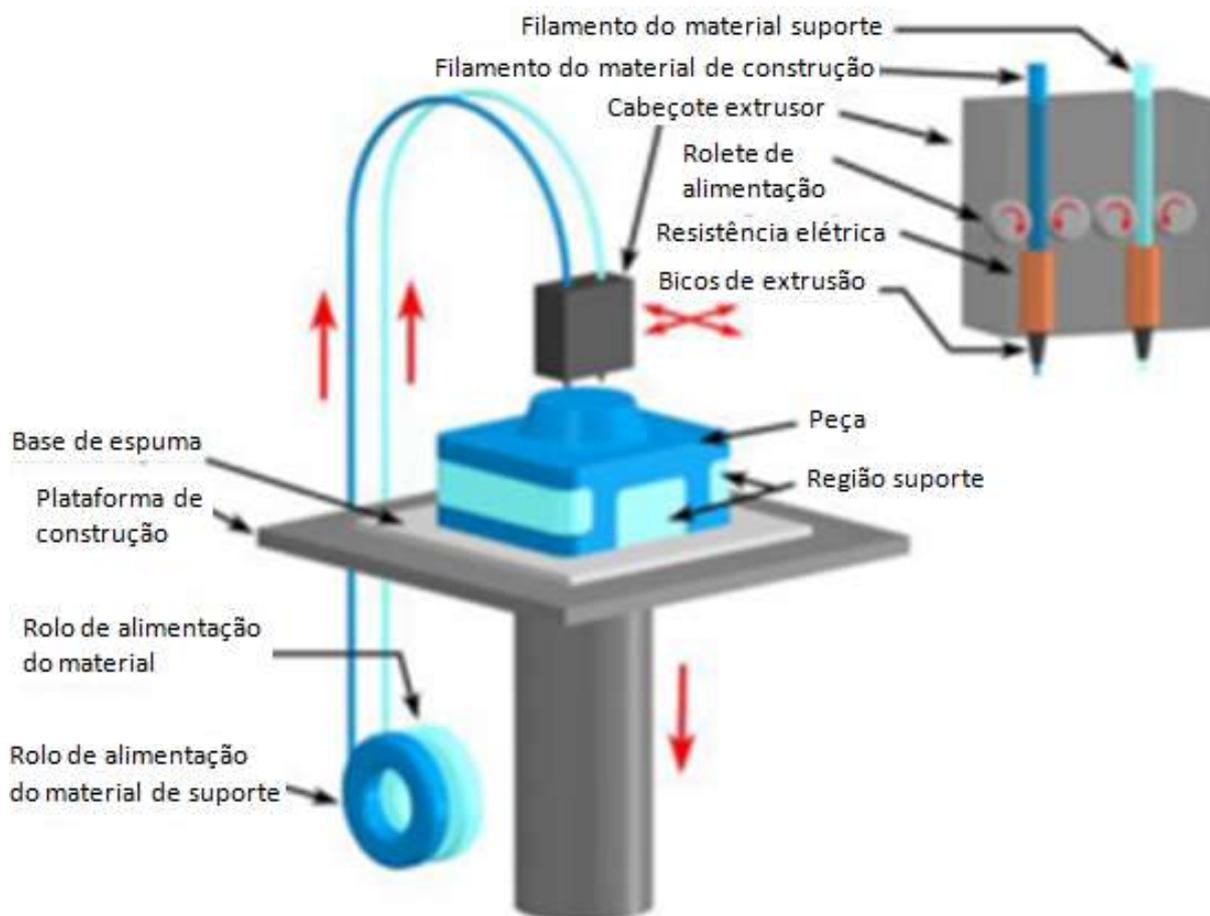
As principais técnicas de impressão utilizadas no mercado nacional são analisadas nos subtópicos a seguir, sendo a Modelagem por Fusão e Deposição, Sinterização Seletiva a Laser, Estereolitografia (PORTO, 2016).

2.3.1.1 Modelagem por fusão e depósito (FDM)

A modelagem por fusão e depósito é uma técnica fundamentada pela extrusão de termoplásticos. A máquina apresenta uma formação de um cabeçote que se move nos eixos x e y, e uma plataforma responsável por transladar verticalmente. O filamento plástico que se encontra enrolado em uma bobina é aquecido pelo injetor de material. O material passa por dois bicos extrusores localizados no cabeçote para que seja depositado na plataforma. Por um bico passa o material que compõe o objeto e no outro o material que vai ser usado como suporte no caso de fabricação de superfícies mais complexas (PORTO, 2016).

Assim que uma camada fica pronta, a plataforma se movimenta para baixo num valor proporcional à espessura da camada nova para que, desta forma, a próxima camada também seja feita. Impressoras deste tipo podem apresentar uma variação no processo, sendo que a base se desloca nos eixos X e Y, enquanto a extrusora se movimenta no eixo Z. São etapas que se repetem até a formação do objeto 3D completo. O esquema é representado na Figura 2.2 (ICHI, 2010).

Figura 2.2 – Esquema da FDM



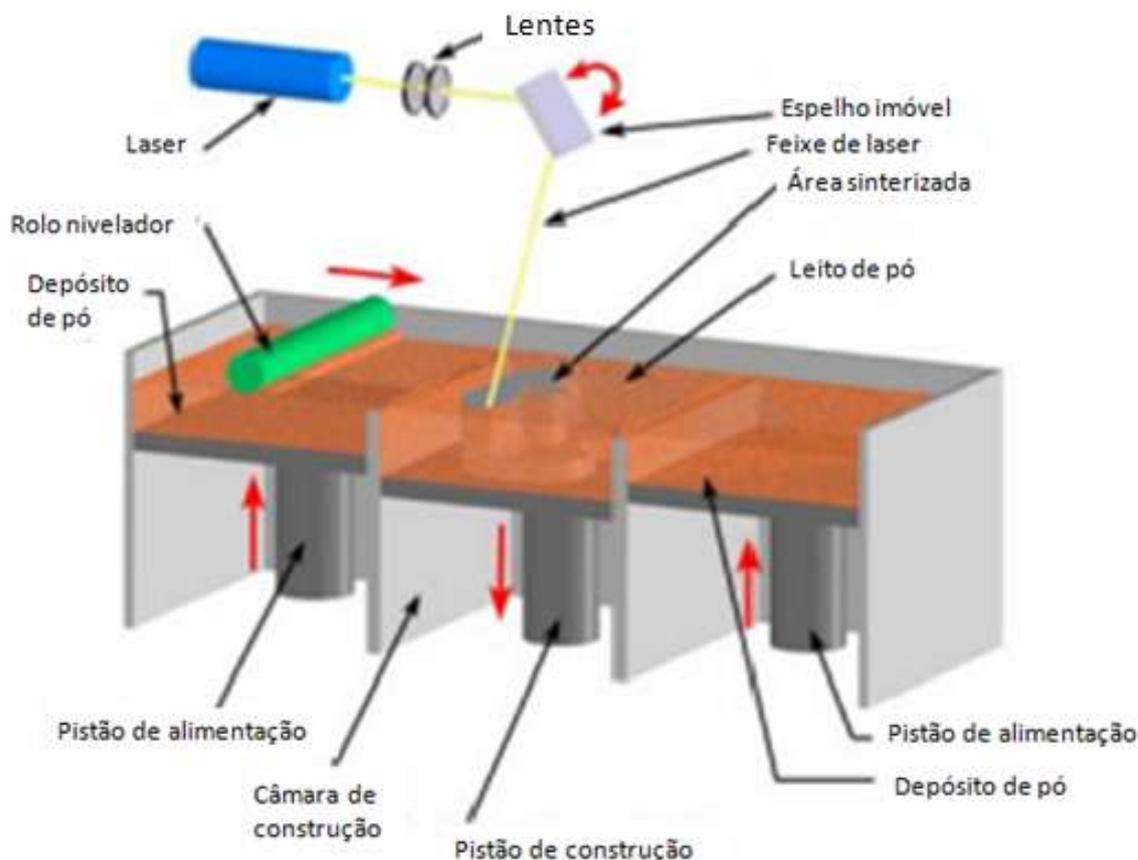
Fonte: (ICHI, 2010, Adaptado)

2.3.1.2 Sinterização seletiva a laser – SLS

A sinterização seletiva a laser (SLS) é um processo que desenvolve objetos em três dimensões, por meio da superposição de camada homogênea de polímeros em pó. É uma tecnologia que usa um equipamento um pouco mais robusto que a Modelagem por Fusão e Depósito, a qual contém uma boa resistência mecânica e térmica. No entanto, apresenta como vantagem a capacidade de utilizar diferentes materiais para fabricação dos objetos, como, por exemplo, poliamidas, elastômeros, cerâmicas e metais com polímeros aglutinantes (GRIMM, 2004).

O processo de fabricação começa com o preenchimento da câmara de impressão com o pó. Na sequência, a máquina nivela o material, enquanto um laser de alta potência é projetado no pó, o que faz com que o material entre em fusão. Depois que ocorre a formação de uma camada, a plataforma central desce e um rolo aquecido passa sobre a superfície de impressão, tampando a camada recém-criada com mais pó. Isto acontece repetitivamente até que o objeto esteja completamente pronto. O esquema é demonstrado na Figura 2.3 (PORTO, 2016).

Figura 2.3 – Esquema SLS



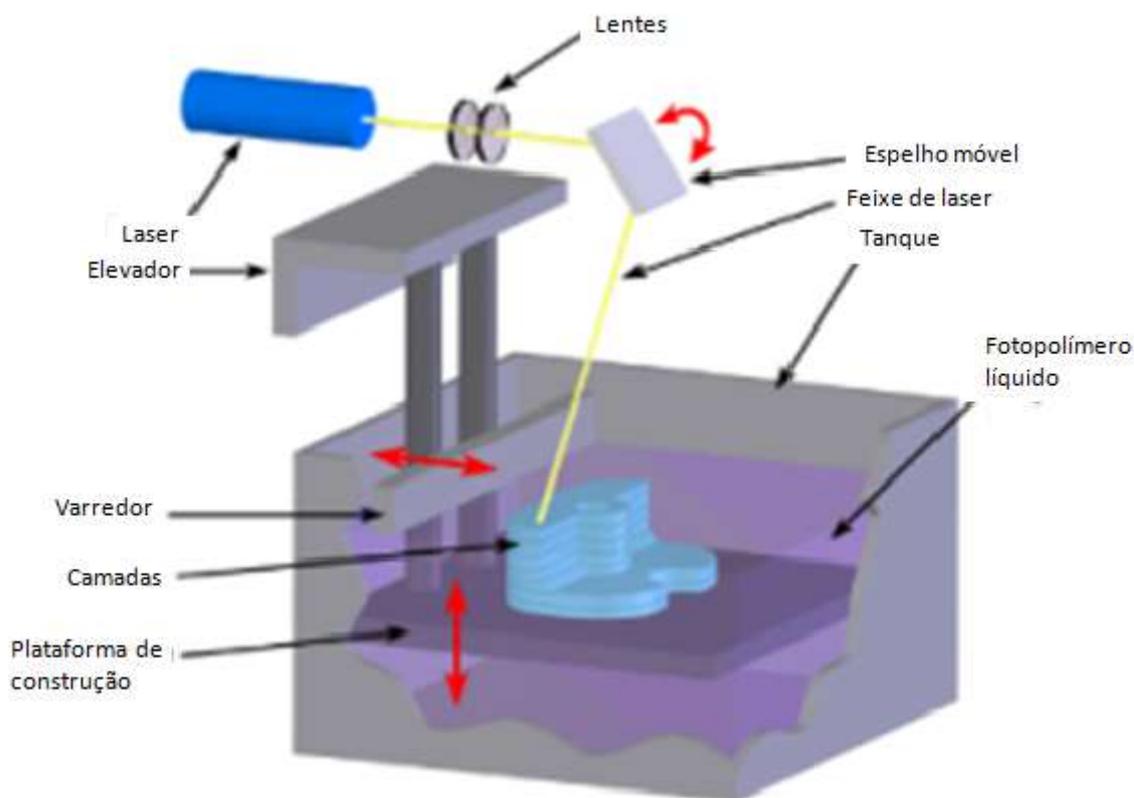
Fonte: (ICHI, 2010, Adaptado)

2.3.1.3 Estereolitografia (SLA)

A Estereolitografia, também tida como uma técnica de impressão 3D, utiliza laser para endurecer as camadas. Contudo, ao invés de as camadas serem elaboradas por polímeros em pó, o objeto é formado pelo endurecimento de resina. Dessa maneira, a tecnologia se fundamenta na polimerização de uma resina (acrílica, vinil ou epóxi) fotossensível composta de monômeros, fotoiniciadores e aditivos, através de um feixe de laser UV (BADOTTI, 2003).

O processo de formação do objeto se inicia com o preenchimento da cuba com a resina, no interior da qual há uma plataforma capaz de se transladar verticalmente. Conforme os comandos do controle numérico, o laser é configurado na superfície do líquido, que se solidifica no local em que o laser foi projetado. Com a camada formada, a plataforma é translada para baixo para imergir na cuba, liberando a criação de uma nova camada e, assim, consecutivamente. É possível analisar o processo a partir da Figura 2.4 (PORTO, 2016).

Figura 2.4 – Esquema SLA



Fonte: (ICHI, 2010, Adaptado)

2.3.2 Filamentos e materiais base

Nos subtópicos que seguem, são analisadas as características dos materiais mais utilizados no mercado nacional para impressoras 3D, sendo os materiais PLA, ABS, PETG (PET, PTT), Nylon e os flexíveis TPE, TPN e TPC.

2.3.2.1 Material PLA

O ácido polilático (PLA) é o filamento mais usado nas impressoras tridimensionais, apresentando uma temperatura de impressão abaixo do acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), motivo pelo qual não é necessária uma mesa aquecida para sua impressão (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

Segundo Brito et al.(2011), o material PLA é um poliéster alifático, termoplástico, semicristalino, bi compatível e biodegradável, sintetizado a partir do ácido lático de fontes renováveis. As fontes renováveis derivadas da origem do PLA são resultantes do amido de milho, da cana-de-açúcar, das raízes de tapioca e do amido de batata.

Por ser um termoplástico biodegradável, acaba se tornando mais ecológico em comparação aos demais filamentos de impressoras 3D, além de não ser tóxico. Quando aquecido para sua extrusão, é possível sentir um leve aroma doce, tendo a capacidade de se degradar em ácido láctico, sendo inofensivo ao organismo humano. Por causa desta propriedade, é utilizado na medicina em suturas e implantes cirúrgicos. Desta forma, pode ser visto como um material mais fácil de trabalhar, conseqüentemente sendo altamente indicado aos iniciantes da impressão 3D.

Devido ao PLA ser quebradiço, evita-se usá-lo em peças que demandem resistência mecânica, além de peças que se exponham a temperaturas em torno de 60°C ou mais. Possui uma maior facilidade em relação aos demais para entupir o bico do extrusor e seu armazenamento necessita de um cuidado maior, pelo fato de o PLA ter mais facilidade em absorver a umidade do ar (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

2.3.2.2 Material ABS

Outro filamento bastante usado em impressão tridimensional é o ABS. Este polímero é um copolímero obtido por meio das reações de três monômeros diferentes, o acrilonitrilo, o butadieno e o estireno, sendo que, para sua impressão, torna-se indispensável uma maior experiência e uma mesa aquecida (FRANCISCO, 2016).

O material ABS é melhor que o material PLA em relação às suas propriedades mecânicas, sendo durável, forte e visto como leve. Além disso, suporta temperaturas elevadas, é um pouco mais flexível e sua grande vantagem, em comparação ao PLA, é de ser um termoplástico mais em conta no mercado.

A desvantagem do ABS é a liberação de uma pequena parcela de fumaça durante o processo de impressão, a qual é avaliada como tóxica, motivando, portanto, que seja necessário operar a impressora 3D em uma área mais ventilada. O ABS é proveniente do petróleo, logo, não é um material biodegradável como o PLA. Para alcançar seu ponto de fusão, é preciso que se chegue a uma temperatura mais elevada, o que pode causar sua deformação durante e após o processo de impressão. Em razão disto, recomenda-se uma mesa de aquecimento e o uso em impressoras fechadas (LOVO; FORTULAN, 2016).

2.3.2.3 Material PETG (PET, PETT)

O material Polietileno Tereftalato (PET) é tido como um dos plásticos mais usados, e o fato de ser utilizado em garrafas de água e de refrigerantes o tornaram, ainda, mais popular. O PET apresenta diversas características positivas relevantes, e segundo Lima (2001), o Polietileno Tereftalato é um poliéster, brilhante, leve, transparente, com bom desempenho de design e facilidade de moldagem, ocasionando uma alta resistência mecânica em relação aos impactos e também possui barreiras para gases e odores.

O PET em seu estado “bruto” não é muito utilizado em impressão 3D, no entanto, apresenta um precedente chamado polietileno tereftalato, modificado com glicol ou PETG. Este é considerado, por diversos autores, como um excelente meio termo do PLA e do ABS, sendo mais flexível e durável que o PLA, é melhor para imprimir do que o ABS (SILVA, 2017).

O PETG é higroscópico, como o PLA. Sendo assim, seu armazenamento tem que ser em um local mais fresco e seco. Outra característica deste material é que, durante o processo de impressão, ele é pegajoso e tem uma maior facilidade de ser arranhado, em comparação ao ABS.

O Politereftalato de trimetileno (PTT) de polietileno também é derivado do PET, porém é um pouco mais rígido e transparente. De forma genérica, o PET, PETG e o PTT são polímeros estáveis, inofensivos, recicláveis e não originam fumaça ou odores ao longo do processo de impressão, no entanto, suas temperaturas variam de 220°C a 250°C e, por isso, é necessária uma mesa aquecida (SILVA, 2017).

2.3.2.4 Material Nylon

O Nylon é um polímero sintético muito versátil e empregado em diversas aplicações industriais. É um plástico mais forte, barato, leve e flexível em relação aos demais filamentos, podendo ser classificado como o “primeiro lugar” quando consideradas suas principais características. Ele faz parte de uma classe de polímeros para aplicações em engenharia por causa da combinação de propriedades, como: boa resistência ao impacto sem entalhe, estabilidade dimensional e uma grande resistência química (BASSANI; PESSAN; JÚNIOR, 2002).

O filamento de Nylon é muito sensível à umidade e, diante disso, exige medidas de secagem ao longo de seu armazenamento e rapidamente antes da impressão. Outra grande característica do Nylon é sua facilidade em absorver a umidade, sendo que, no decorrer de 24 horas, pode atingir até 10% a mais do seu peso.

A faixa da temperatura de impressão de tal material está entre 210°C a 250°C, por isso sua temperatura de fusão é apontada como alta e, quando aquecido, libera uma fumaça considerada tóxica (como o ABS) (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017).

2.3.2.5 Material TPE, TPU, TPC (flexível)

A grande vantagem desses filamentos para a impressão tridimensional é o fato de possuírem grande flexibilidade, porém, ainda apresentam outras vantagens quando comparados a elastômeros convencionais. Estes polímeros, em termos de elastômeros, apresentam uma processabilidade mais confiável, tendo em vista que surgiram através da busca pela menor densidade, pela maior produtividade, pelo menor custo de fabricação e reaproveitamento e pela fácil adição de cor.

O Elastômero Termoplástico (TPE) é uma mistura de polímeros, sendo um composto derivado de um termoplástico rígido (PP, PBT, PA) em junção com um material mais suave de borracha. O Poliuretano Termoplástico (TPU), por sua vez, é um derivado do TPE, no entanto, apresenta uma característica de rigidez mais baixa em comparação a este último.

Além disso, o TPE apresenta outro tipo de variação, o Copoliéster Termoplástico (TPC), que tem como diferencial, em comparação ao TPE, uma maior resistência quando exposto a fatores químicos e UV, além de poder suportar o calor de temperaturas de até 150°C.

A utilização do TPE ou do TPU é adequada para os casos em que os objetos precisam ser dobrados, esticados ou comprimidos, ocasionando assim um desgaste maior. O TPC também é utilizado nas mesmas situações, mas, geralmente, em ambientes um pouco mais severos, como o exterior. Na maior parte dos casos, estes filamentos operam em temperaturas de impressão de 225°C a 235°C, o que acaba dificultando o processo e demandando que o usuário possua uma maior experiência. No entanto, não é fundamental a utilização de uma mesa aquecida

2.4 Modelagem Tridimensional em CAD

A Modelagem Tridimensional diz respeito ao desenvolvimento de uma representação matemática de qualquer superfície tridimensional de um objeto, ou seja, consiste em uma técnica que objetiva a criação de objetos digitais tridimensionais, utilizando, para tal, softwares especializados de Desenho Assistido por Computador (CAD).

Um sistema CAD pode ser entendido como um sistema informatizado que automatiza o processo de projeto de um produto qualquer (peça, modelo, conjunto, etc.). Nesse sentido,

seu desenvolvimento consiste na representação computacional do modelo, permitindo que o desenho detalhado e a documentação do mesmo sejam produzidos, elaborados e apresentados automaticamente.

Ademais, a ferramenta de CAD tem a característica de ser muito versátil, pois além de permitir obter diversas concepções muito mais dinamicamente e com menos custo, estas concepções servem como referência para o desenvolvimento da Matriz de Tomada de Decisão, Análise VAVE, etc. e também serem utilizadas como um parâmetro de entrada geométrico, para realização da Análise de Elementos Finitos.

2.5 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Quando se projeta um componente mecânico, é comum que sejam feitas diversas alterações no mesmo até que o objetivo proposto no projeto seja atingido, em termos de comportamento estrutural, econômicos, entre outros. Porém, para saber se a proposta foi alcançada, faz-se necessária uma validação, por meio de cálculos e testes

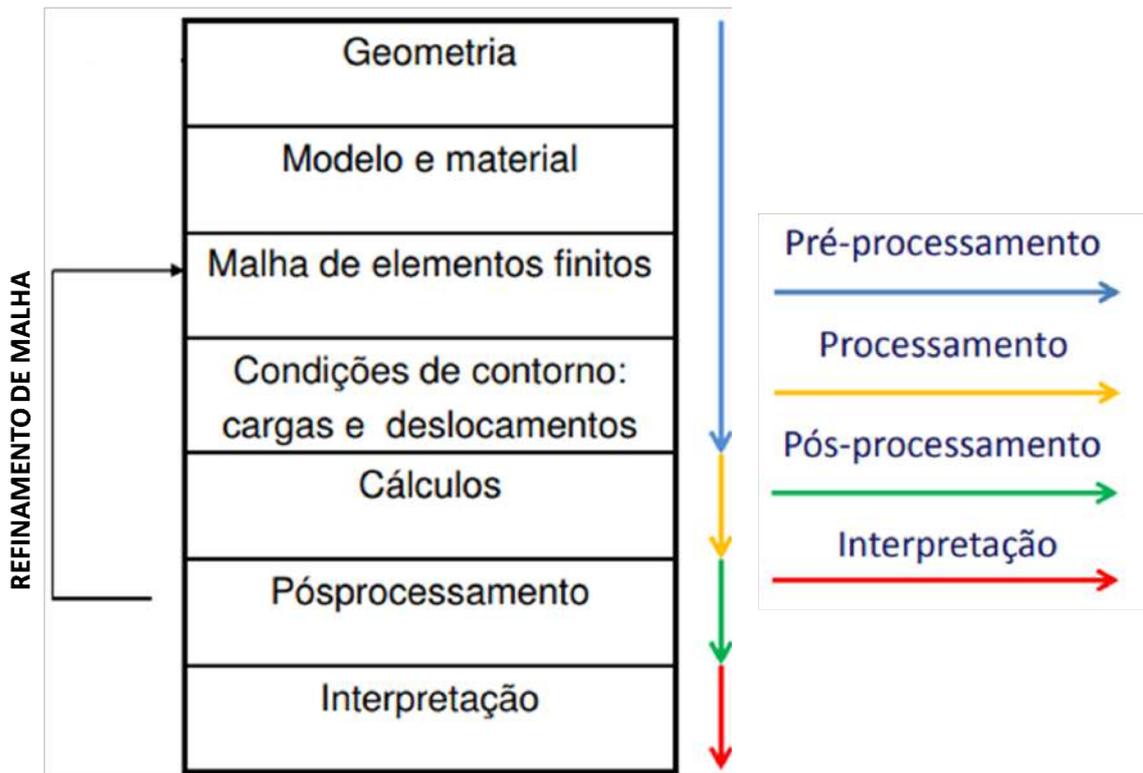
Por se tratar de uma estrutura simples, é possível que sejam aplicados métodos analíticos, em que, através de considerações e formulações matemáticas, consegue-se extrair os dados necessários para a validação. Porém, quando são compreendidas estruturas complexas, como o caso da cafeteira, a validação deve ser feita por meio de testes experimentais ou análises computacionais, sendo esta uma maneira significativamente menos onerosa (RIBEIRO, 2004).

O método dos elementos finitos é uma ferramenta amplamente utilizada em análises estruturais, sendo a estrutura modelada com um número finito de elementos mais simples, que interagem entre si através de seus nós em comum, obtendo uma aproximação do corpo. Assim, torna-se concebível gerar uma formulação que os represente e, através da resolução de equações diferenciais, busca-se determinar estados de tensão e deformação da peça, sujeitas à influência de ações externas relevantes, conhecidas como condições de contorno, que podem ser restrições, forças aplicadas, etc. (AZEVEDO, 2003). Vale ressaltar que o MEF não resulta em uma solução exata e, para que esta se aproxime da real, faz-se necessário discretizar a peça no maior número de elementos possível, aumentando, assim, o custo com recursos computacionais

A modelagem por elementos finitos engloba toda a definição e a manipulação da geometria, o estabelecimento do material e de suas propriedades, a geração da malha de elementos finitos, a determinação das condições de contorno a ser aplicadas ao componente e, por fim, a

realização das análises para a validação. Assim sendo, o processo de Elementos Finitos pode ser representado pela Figura 2.5.

Figura 2.5 – Processo típico de elementos finitos



Fonte: (TSCIPTSCHIN, 2011)

Segundo Tavares (1998), o passo a passo básico deste método é:

1. Subdivisão do domínio do problema em análise dos elementos finitos;
2. Para cada elemento finito m cálculo da matriz de rigidez $[K(m)]$ e, para problemas dinâmicos, da matriz de massa $[M(m)]$ e da matriz de amortecimento dependente da velocidade $[C(m)]$ relativamente a um referencial local conveniente;
3. Determinação para o sistema global da matriz de rigidez $[K]$ e, para problemas dinâmicos, da matriz de massa $[M]$ e da matriz de amortecimento dependente da velocidade $[C]$ por agrupamento das matrizes de cada elemento finito utilizado na modelização expressas relativamente a um mesmo sistema de referência global;
4. Determinação do vector das cargas aplicadas ao sistema global R ;
5. Estabelecimento das equações de movimento para o sistema global $[M]U'' + [C]U' + [K]U = R$;

6. Cálculo das variáveis do problema em questão, tais como: deslocamentos, velocidades, deformações e tensões.

2.5.1 Teoria da falha estática

Classifica-se como carregamento estático, aquele que é aplicado lentamente e que é basicamente constante no tempo (NORTON, 2013). Suas teorias são aplicáveis em dois tipos de materiais, dúcteis e frágeis. Para materiais dúcteis, costuma-se aplicar duas teorias:

- Teoria da Tensão de Cisalhamento Máxima (TCM), a qual relata que a falha ocorre quando a tensão de cisalhamento de algum plano do material atinge o valor da tensão de cisalhamento correspondente ao escoamento.
- Teoria da Energia de Distorção (TED), a qual aborda o fato de que a rede cristalina do material, quando solicitado, se deforma e esta deformação pode atingir um nível além do qual o material poderá reverter.

Para materiais frágeis, geralmente utiliza-se a Teoria de Tensão Normal Máxima (TNM), que diz que quando pelo menos uma das tensões principais atinge o valor limite de ruptura, este está fadado a falhar, seja ele relativo à tração ou à compressão.

No carregamento estático, deve-se levar em consideração o limite de escoamento do material, sendo o coeficiente de segurança retirado através desta tensão.

Os materiais podem ser analisados através da região linear do diagrama de tensão-deformação, em que esta é extinta quando a tensão aplicada atinge a tensão de escoamento. A inclinação desta região é definida pelo módulo de elasticidade do material, também conhecido como módulo de Young (NORTON, 2013).

No item 2.5 foi exposto como é a formulação matemática geral quando se utiliza o MEF, porém, para o caso particular de falhas estáticas, onde o valor da aceleração é igual a zero, a formulação particular se resume em: $[K]U=R$

2.5.2 Teoria da falha por fadiga

Quando se fala em falhas em máquinas, é importante destacar que as suas falhas, na maioria das vezes, ocorrem não por cargas estáticas e sim por cargas que variam com o tempo, essas falhas são denominadas falhas por fadiga e ocorrem muitas vezes com tensões muito

abaixo dos valores de resistência ao escoamento do material. Cerca de 90% das falhas de equipamento são causadas por fadiga.

A fadiga é um dano localizado, pequenas trincas, que podem já existir desde a sua manufatura ou surgir após o início do uso, e que tendem a se expandir pela estrutura quando esta está sujeita a um carregamento cíclico. É considerada um modo de falha probabilístico e também o mais importante para componentes mecânicos com carregamentos da categoria citada.

Muitas vezes estas trincas se iniciam em concentradores de tensão, que se localizam em descontinuidade do material (micro trincas, inclusões, etc.) e em mudanças geométricas da estrutura. Quando essas mudanças são muito abruptas, a quantidade de tensão concentrada se torna maior, por isso recomenda-se de evitar grandes variações da seção transversal da peça e também cantos vivos, suavizando-os com os maiores raios de transições possíveis.

A aparência de uma falha por fadiga é uma superfície plana e perpendicular ao eixo de tensão e ausência de estrição, se assemelhando muito com uma fratura frágil.

A falha é composta por três estágios:

1. Início de uma ou mais trincas, que surgem devido a deformações plásticas cíclicas.
2. Propagação da trinca.
3. Ruptura repentina.

Em se tratando das fases ao longo do tempo, o início da trinca apresenta a menor duração, enquanto a propagação abrange a maior parte da vida do componente, já a ruptura ocorre de maneira instantânea e isto se deve ao crescimento da trinca, que ocorre de maneira instável.

Para prever a falha dessa categoria analiticamente, devem-se levar em consideração as propriedades do material e o tipo de aplicação de carga (Alternada, Repetida ou Pulsante), e assim consegue-se extrair a tensão efetiva aplicada. Possuindo este valor, utiliza-se a curva Tensão-Número de Ciclos (S-N), onde através desta, consegue-se prever quantos ciclos o componente suportará conforme o valor da tensão. A mesma pode ser dividida em regiões de Baixo Ciclo ($N < 10^3$), Alto Ciclo ($N > 10^3$) e ainda pode-se destacar a região de vida infinita ($N > 10^6$). Porém, é válido destacar que a presença de uma componente de tensão média influencia significativamente na falha da peça. Quando esta componente se soma a componente alternada, o material acaba apresentando falhas abaixo da tensão puramente alternada, sendo necessária uma correção antes de se concluir a quantidade de ciclos.

Na literatura é possível encontrar propostas de correções para fadiga, como por exemplo, a correção de Goodman, Gerber e Soderberg. As quais são indicadas para materiais frágeis, dúcteis e projetos mecânicos mais conservadores, respectivamente. Dessa forma, utilizou-se a correção de Goodman para análise de Fadiga nos componentes. (POSSAMAI, 2015) (NORTON, 2013)

2.5.3 Teoria da falha por flambagem

Cook et al. (1989) definem a flambagem como: “A perda de estabilidade de uma configuração de equilíbrio, sem fratura ou separação do material”. Muito comum em elementos esbeltos, esta acontece quando a estrutura se encontra sob um carregamento de compressão e por uma situação de “bifurcação”, que significa que, tanto a configuração de referência da estrutura, quanto uma posição extremamente próxima, são possíveis com a mesma carga (NORTON, 2013). A estrutura possui um limite capaz de absorver a carga, no entanto, após passar por um valor crítico, a mesma começa a apresentar deslocamentos transversais sem necessariamente a força aumentar, neste caso, a tensão pode estar bem abaixo da tensão de escoamento (COTIAN, 2019).

A flambagem ocorre de maneira repentina mesmo em materiais dúcteis, sendo considerada um dos modos de falha mais perigosos. As forças que geram-na são coaxiais e, no início, se encontram apontando para o centróide da área da coluna. Quando a coluna se desloca levemente de seu centro, as forças das extremidades saem da colinearidade com o centróide, criando um braço de momento que gera uma flexão, esta flexão desloca mais ainda o centróide e aumenta o braço de momento, até o colapso.

Como falado no início, este fenômeno ocorre em elementos esbeltos, se o mesmo for muito curto, falhará por compressão, se for média ou longa, por flambagem (COTIAN, 2019). O fator que determina se uma coluna é considerada curta ou longa é o índice de esbeltez, S_r , e o mesmo se define por:

$$S_r = \frac{L}{K} \quad (2.1)$$

Onde L representa o comprimento da coluna e k representa o raio de giração, definido pela raiz da razão entre o momento de inércia (I) de menor valor da área transversal e a área transversal (A) em si:

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2.2)$$

2.5.4 Análise modal

Análise modal é um processo que determina as características dinâmicas ligadas a um sistema, em termos de frequências naturais, fator de amortecimento e formas modais, pretendendo o desenvolvimento de um modelo matemático para seu comportamento dinâmico. Tal modelo é definido como modelo modal do sistema e a informação em relação às características é chamada de dados modais (FU; HE, 2001).

Desta forma, a análise modal é um método para se definir as características dinâmicas de um elemento. Esta análise pode descobrir, por exemplo, as frequências naturais do elemento em questão, como também os modos de vibração do mesmo.

Nesse sentido, os modos de vibração de uma determinada estrutura são as maneiras como a estrutura tende a vibrar quando está em ressonância, relacionada a cada uma de suas frequências naturais (autovalores), ou seja, para cada frequência natural existe um modo de vibração específico, ou um perfil de vibração. Na prática, ao excitar um sistema, a sua resposta dinâmica se baseia em um conjunto de modos de vibração. Sendo assim, há uma mistura de formas de vibração, com várias frequências ressonantes ao mesmo tempo. Por esta razão, uma análise modal permite determinar parâmetros dos modos de vibração de uma determinada faixa de frequências. Portanto, é necessário estabelecer uma faixa de frequências de análise, pois, como as estruturas reais não são sistemas de massa mola, e sim contínuos, há frequências naturais ilimitadas (DOBBRO, 2018).

2.5.4.1 Frequências naturais

As frequências naturais determinam a taxa de oscilação livre da estrutura (quantas oscilações por segundo), após cessar a força que originou seu movimento. Ou seja, indica o quanto a estrutura irá vibrar quando não houver mais força aplicada sobre ela. Pode-se dizer, portanto, que é a função direta da rigidez e inversa da massa da estrutura, sendo representada por um número real positivo e, geralmente, pela unidade Hertz. Uma estrutura apresenta diversas frequências naturais, visto que pode vibrar livremente após ser excitada por uma força, em várias direções (NÓBREGA P.G.B.; HANAI, 2005).

Portanto, a frequência natural é uma característica intrínseca de todo corpo que está diretamente relacionada com sua massa e com sua constante elástica. Podendo ser representada de duas formas pela Equação 2.3, em que, k é a constante elástica (N/m), m é a massa total do sistema (kg); ω (omega) é a frequência angular (rad/s) (RAO, 2007).

$$F_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ ou } F_n = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.3)$$

2.6 Análise Mercadológica

2.6.1 Pesquisa de mercado

Quando se pretende desenvolver um novo produto é extremamente importante estudar o mercado do consumidor, e tentar descobrir qual é o perfil do seu cliente, o que o consumidor busca atualmente, o porquê ele busca aquilo, quais fatores influenciam em sua decisão e como, quando e com que frequência esse cliente realiza compras específicas. (DORNELAS, 2001).

Dessa forma, a pesquisa de mercado busca traduzir essas tendências do consumo, seja por meio de pesquisa direta com o consumidor, análise de produtos de concorrentes ou até mesmo especulações de cunho cultural, o que a faz se tornar uma ferramenta confiável para se obter informações representativas sobre determinado público-alvo. Além de permitir o teste de novas hipóteses, conceitos ou produtos, a pesquisa de mercado ajuda na identificação de problemas e oportunidades auxiliando a projetar perfis de consumidores e mercados específicos. (AAKER, 2012)

Logo, constata-se que uma pesquisa mercadológica bem estruturada pode servir de guia para tomada de decisão nas empresas, juntamente com outras ferramentas, já que a área de marketing caminha em conjunto com a área financeira. Sistemas de inteligência empresarial são alimentados com dados que em seguida serão transformados em informações para que se possa tomar uma decisão. Assim, estratégias conseguem ser elaboradas a partir de informações obtidas pela pesquisa de mercado.

Portanto, percebe-se com essa definição que a Pesquisa de Mercado é uma ferramenta fundamental para garantir a organização informada sobre as variáveis ambientais, variáveis que são essenciais para um ambiente de negócio, seja ele de pequeno, médio ou grande porte, em processo de idealização, implementação ou expansão

2.6.2 *Benchmarking*

O *Benchmarking* é um processo contínuo e sistemático, o qual busca avaliar as empresas que são reconhecidas no cenário que atuam como líderes, para que assim consiga-se mapear e determinar os processos de trabalho que englobam as melhores práticas destas e, assim, definir metas de desempenho lógicas (ROLSTADAS, 2001).

A companhia Xerox Corporation define *benchmarking* como “A busca pelas melhores práticas que levam a uma performance superior”. Neste contexto, as “melhores práticas” significam os métodos utilizados que permitem à empresa se tornar líder no mercado que atua. Porém, vale lembrar que as melhores práticas não são as mesmas para todas as Companhias (WIREMAN, 2014). Anderson e Pettersen (1995) definem esta prática como “Um processo contínuo de medição e melhoria dos processos do negócio que vão de encontro com as empresas que podem ser identificadas como as melhores do mundo”.

Existem três tipos de *benchmarking*: interno, semelhantes/competitivo e melhores práticas.

Existem três tipos de *benchmarking*: interno, semelhantes/competitivos e melhores práticas. O primeiro é normalmente feito entre diferentes departamentos de uma mesma planta e tem uma certa vantagem, pois os dados são facilmente coletados e analisados. O competitivo envolve empresas parceiras que realizam processos semelhantes que estão dispostas a compartilhar informações e, às vezes, também pode envolver empresas concorrentes. Este tipo de abordagem busca formas de indicadores organizacionais. Por fim, o de melhores práticas objetiva encontrar o líder no processo de *Benchmarking*. Ele busca diversos dados, até mesmo setores da indústria e localizações geográficas, o que acaba criando oportunidades de se desenvolver novas estratégias para aquela categoria, pois, nesta abordagem, estuda-se processos que não se limitam ao setor específico e, além disso, procura-se adaptar processos considerados superiores, promovendo grande destaque em relação aos concorrentes (WIREMAN, 2014).

2.6.3 **Matriz de tomada de decisão para concepção de projeto**

Dentro das organizações, quando se pretende tomar uma decisão, é necessário levar em consideração diversos grupos de variáveis ou objetivos que atendam às necessidades que a empresa almeja (PEREIRA et al., 2018).

Um problema de decisão que envolve diversos critérios abrange pelo menos duas opções, as quais permitirão atender diversos objetivos, os quais, muitas vezes, apresentam conflitos entre

si. Assim, faz-se necessário considerar todos os critérios e a concepção de um planejamento realizado para que tais objetivos sejam alcançados (ALMEIDA; FERREIRA; CAVALCANTE, 2015).

Durante o processo de seleção faz-se uma comparação entre diversos projetos e aqueles que se classificarem melhor, são selecionados (ARCHER; GHASEMZADEH, 1999). Os projetos devem ser elencados conforme importância e estratégia da empresa (KERZNER, 2011).

Martin e Coelho (2012) dizem que esse processo foca na construção de opções e a escolha de alternativas que indiquem uma maior probabilidade de sucesso, devido ao elevado número de considerações que se deve analisar, o processo acaba por se tornar bastante complexo.

No âmbito da inovação, Oliveira (2012) diz que o processo de decisão realizado no planejamento da inovação é o responsável por avaliar e selecionar quais produtos serão desenvolvidos. Ele ressalta que como este processo é dependente das informações das propostas daquele produto, quando envolve inovação, esta ação acaba sendo dificultada.

2.6.4 Análise SWOT

A Análise SWOT é uma ferramenta de planejamento estratégico que possibilita um estudo do ambiente interno (Forças e Fraquezas) e externo (Oportunidade e Ameaças) através dos quais a empresa opera, melhorando assim os planos de ação elaborados pela alta gestão. A ferramenta em questão oportuniza a obtenção de resultados úteis para uma gestão eficaz dos recursos e competências da empresa face ao ambiente competitivo do mercado em que opera. Esta informação proporciona, ainda, uma base para a formulação e a seleção de estratégias (PINTO, 2012).

Logo, o ambiente interno é caracterizado como o nível da administração que forma a proposta de valor da empresa. Explorar esse ambiente revela suas vantagens e desvantagens competitivas, sendo possível levar em conta aspectos financeiros, de produção, de gestão, de processos, de pessoal e dentre outros aspectos organizacionais. Assim, nesse quesito, são classificados dois pontos - fracos e fortes - da organização. Os pontos fracos são limitações ativas que deixam a empresa em uma condição de desvantagem em comparação aos concorrentes e, por outro lado, os pontos fortes apresentam características apontadas como vantagens competitivas (ZUÑIGA, 2009).

Já o ambiente externo de uma empresa é aquele que os empreendedores não possuem domínio, o qual é caracterizado por variáveis incontroláveis, sendo elas as oportunidades que podem acarretar circunstâncias favoráveis para as empresas e as ameaças que podem gerar situações desfavoráveis (LEITE; GASPAROTTO, 2018).

A análise SWOT é definida por Martins (2007) como uma das práticas mais comuns nas empresas que visam o pensamento estratégico e o marketing, sendo algo trabalhoso de ser realizado. No entanto, a prática constante pode trazer ao profissional uma visão superior a respeito dos negócios, pelo fato de que os cenários nos quais a empresa atua estão sempre em constante mudança.

De acordo com Andrews (1980), O SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats*), é uma técnica que facilita a elaboração do planejamento estratégico das organizações que teve o início do seu desenvolvimento nos anos 60/70, nas escolas americanas. Sua maior finalidade é focalizar a combinação das forças e fraquezas da organização com as oportunidades e ameaças do mercado.

Segundo Ribeiro e Bliacheriene (2013) análise SWOT analisa a competitividade de uma organização, podendo ser na política, como por exemplo, em um projeto ou um programa governamental, a qual é estruturada dentro de quatro variáveis: *Strengths* (forças), *Weaknesses* (Fraquezas), *Opportunities* (oportunidades) e *Threats* (ameaças). Os mesmos autores aconselham a utilização da análise SWOT como ferramenta de gestão para analisar a relevância de uma estratégia no decorrer da sua fase de implementação e, também, para as estratégias, especialmente na fase de avaliação. Tudo isso para que se consiga obter os últimos dados disponíveis, assegurando que as linhas de orientação estratégica permaneçam relevantes.

Desta forma, considerando-se as explicações acima no que diz respeito à análise SWOT, apresenta-se na Tabela 1, uma matriz elaborada.

Tabela 2.1 – Análise de Ambiente interno x externo.

Ambiente Externo	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
	Variáveis que podem favorecer o negócio	Variáveis que podem prejudicar o negócio
Ambiente Interno	FORÇAS	FRAQUEZAS
	Variáveis que podem favorecer o aproveitamento das oportunidades ou a contenção de ameaças	Variáveis que podem dificultar o aproveitamento das oportunidades ou ampliar as ameaças

Fonte: (FUSCALDI; MARCELINO, 2008, Adaptado)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

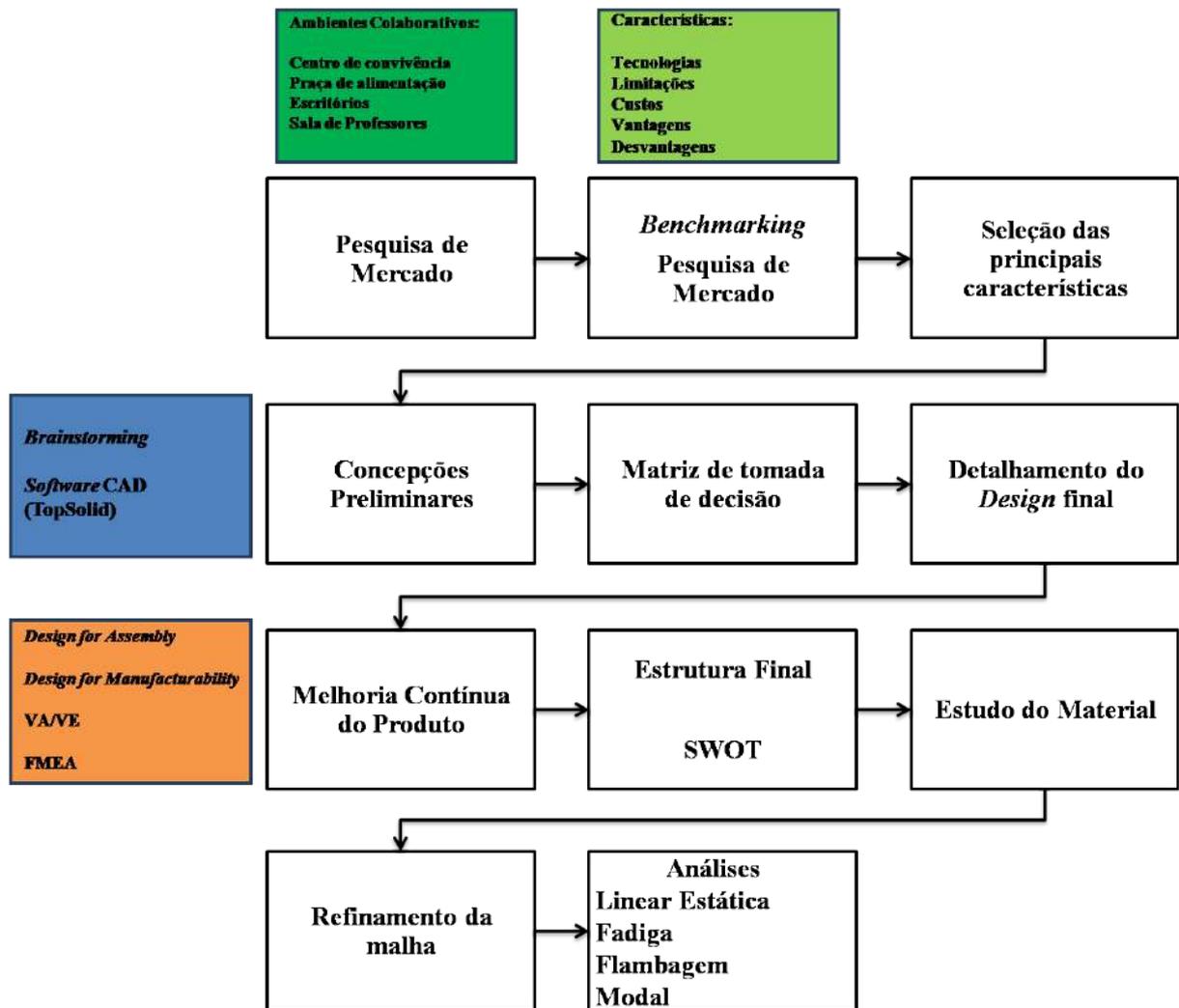
Para o desenvolvimento estrutural da cafeteira foi aplicado a metodologia do *Design For Six Sigma*. Sendo assim, foram abordadas as fases da ferramenta DMADV, sendo elas: *Define* (Definir), *Measure* (Medir), *Analyse* (Analisar), *Design* (Desenhar), *Verify* (Verificação).

Na etapa de definição, foram interpretados e estabelecidos os locais para os quais o produto poderia ser inicialmente fornecido, seguido pela consulta a respeito das características essenciais que formam a estrutura de uma cafeteira. Na fase de medição, foram apurados, através de pesquisas em sites, os *feedbacks* dos consumidores com base em suas compras, avaliando, assim, suas críticas e aprovações. A partir disso, após o exame das necessidades dos clientes, iniciou-se o estágio de análise, no qual foi possível, então, focar em escolher o conceito que melhor se encaixa na ideia do produto entre as alternativas que foram pesquisadas. Com tudo definido, inicia-se a fase do DMADV em que as ideias enfim são traduzidas para a realidade, ou seja, a fase em que o produto passa a ser desenhado e desenvolvido. Além disso, são realizados uma série de testes para se averiguar como o produto se comporta perante as solicitações impostas. Por fim, ocorre a validação dos testes realizados anteriormente.

3.2 Metodologia

Para o desenvolvimento completo da estrutura da cafeteira foi utilizada a metodologia apresentada pelo fluxograma da Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma da Metodologia do Projeto



Fonte: Os autores

Primeiramente, visando conhecer o mercado do produto e coletar informações sobre seus ambientes de uso e, assim, definir ideias iniciais para o referido produto, foi realizada uma Pesquisa de Mercado em relação aos possíveis cenários em que a cafeteira poderia atender. Sendo assim, tendo em vista que, inicialmente, seu local de operação seria a própria Universidade, faria-se necessário um produto que pudesse ser utilizado em ambientes colaborativos, como centros de conveniência, praças de alimentação, escritórios, sala de professores e dentre outros.

Em seguida, após conhecer melhor seus ambientes de atuação, foi realizado o estudo de *Benchmarking*, juntamente a outra Pesquisa de Mercado, para que fosse concebível determinar o que seria indispensável na cafeteira, diante dos desejos do público em questão. Dessa forma, foram totalmente analisados os diversos tipos de cafeteiras encontradas no mercado atual, desde

as mais, até as menos compradas e, a partir disso, foi possível filtrar suas principais características, como por exemplo, suas limitações, os tipos de Design, o tipo de tecnologia, o custo de produção, seus valores de venda, as desvantagens e as vantagens. Além disso, foram observados, a cada pesquisa, todos os *feedbacks* dos compradores, para que, desse modo, fosse possível entender e mensurar as necessidades do público, aplicando-as no projeto.

Com base neste estudo, foram definidas as principais características de uma cafeteria competitiva no mercado e, dessa forma, tornou-se plausível estabelecer uma ideia inicial para a construção da cafeteira, de tal modo que esta visasse, tanto um *Design* atrativo com baixo custo de fabricação, quanto também sua qualidade e inovação em relação às outras encontradas no mercado.

Visto isso, a partir de todos os dados levantados em relação às qualidades importantes para se desenvolver uma estrutura de cafeteira, realizou-se reuniões semanais, aplicando-se a técnica de *Brainstorming*, com o intuito de juntar as informações e as experiências de cada integrante para estimular o surgimento de ideias criativas. A partir disso, por meio do *Software* CAD (TopSolid®), foram criados os primeiros esboços de diferentes tipos de estrutura que pudessem atender à característica de ser atrativa no mercado.

Na sequência, para selecionar a melhor opção dentre as concepções criadas, foram estabelecidas qualidades essenciais para um modelo ideal, a partir da ferramenta da matriz de tomada de decisão. Logo, efetuou-se uma pontuação entre 0 (pior) a 10 (melhor) em particularidade, seguida de um somatório final para a validação da concepção mais viável. Após isso, fez-se a análise SWOT, com o objetivo de averiguar o cenário interno e externo da estrutura, para que, além de apontar suas características fortes e fracas, fosse possível avaliar o cenário que o produto estaria inserido. Por fim, aplicou-se o FMEA para determinar as possíveis falhas, causas e os efeitos derivados desta.

Desta maneira, na etapa seguinte, tendo ciência de todas as possíveis falhas da estrutura, o modelo selecionado pela técnica de *Brainstorming* foi detalhado e melhorado, ou seja, refinado por completo. Posto isso, identificou-se, através da comparação entre as cafeteiras encontradas inicialmente, o quanto a estrutura do produto desenvolvido aqui ficou apresentável para o mercado.

Para a conclusão dos componentes da estrutura, foi então realizada a Melhoria Contínua de cada um, através das ferramentas do VA/VE, Design for assembly e o Design for manufacturability, Com isso, houve uma grande facilidade, desde a montagem até sua fabricação, até chegar ao

modelo final, que atendesse às exigências prescritas inicialmente, apresentando uma fácil montagem e manutenção, mas também, carregando em si as exigências do cliente, exibindo um Design robusto e atrativo de baixo custo.

Finalmente, para validação da estrutura, definiu-se qual material será utilizado em sua impressão. Logo, realizou-se um estudo sobre o mesmo, verificando suas propriedades físicas/mecânicas conforme seu modo de impressão. Adiante, fez-se as análises estruturais a partir do software *Ansys*, em que inicialmente realizou-se a convergência de malha para atingir o número de elementos adequados para as simulações. Definidas a densidade de cada malha, desenvolveu-se eventuais solicitações as quais cada peça pode estar sujeita em seu ambiente de operação, analisando a ocorrência de possíveis falhas por carregamento estático, fadiga, flambagem e/ou vibração.

4 ESCOLHA DA CONCEPÇÃO

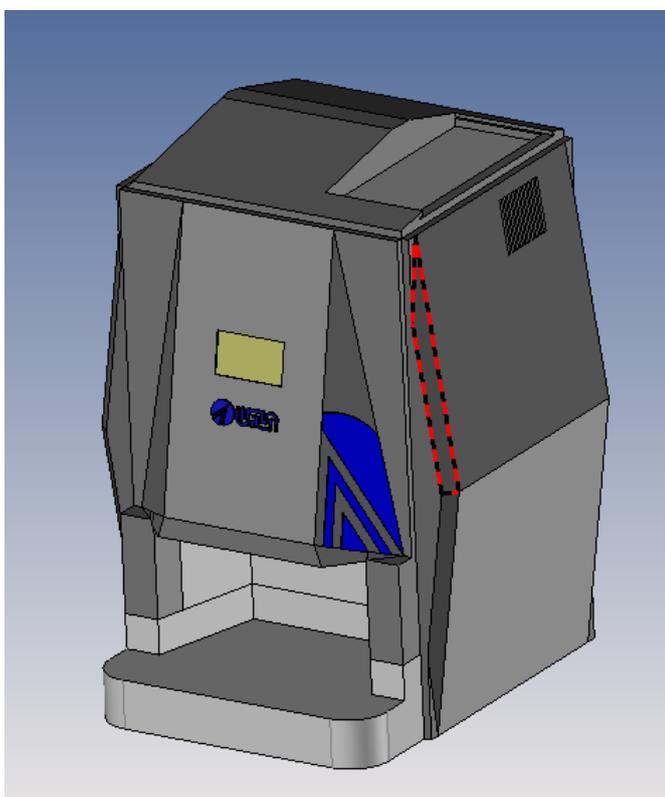
4.1 Montagens preliminares

Como resultados preliminares, apresentamos as primeiras concepções que foram utilizadas para definir o modelo de referência. Como citado, estes modelos foram inspirados em modelos já presentes no mercado, trazendo a tona suas principais características. Neste ponto não se buscou algo ‘belo’, porém um desenho que representasse as principais características a serem levadas para a concepção final.

Concepção 1:

- Tela de comando pequena;
- Tampa superior com abertura de gaveta para o carregamento dos insumos;
- Silhueta com formato triangular.

Figura 4.1 – Concepção 1



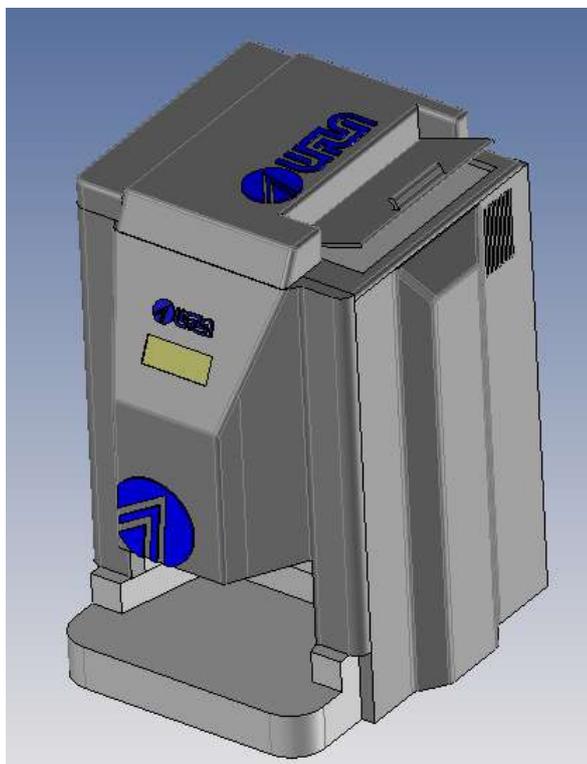
Fonte: Os autores

Concepção 2:

- Tela de comando pequena;

- Tampa superior com abertura de dobradiça para o carregamento dos insumos;
- Silhueta com predominância de formato retangular e pequenos detalhes em ângulo.

Figura 4.2 – Concepção 2

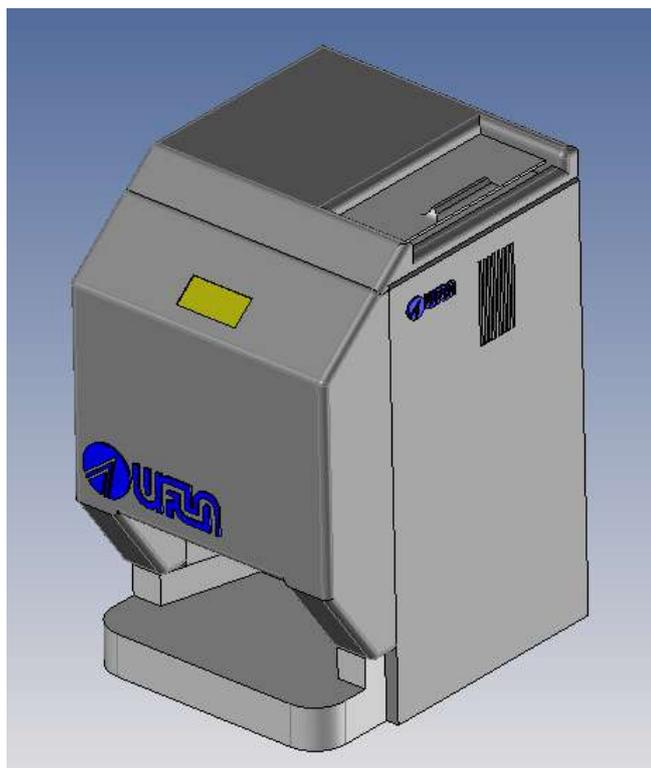


Fonte: Os autores

Concepção 3:

- Tela de comando pequena;
- Tampa superior com abertura de gaveta para o carregamento dos insumos;
- Silhueta simples, com linhas contínuas retas.

Figura 4.3 – Concepção 3



Fonte: Os autores

Concepção 4:

- Tela de comando pequena;
- Tampa superior com abertura de gaveta para o carregamento dos insumos;
- Silhueta com muitos detalhes em ângulo.

Figura 4.4 – Concepção 4

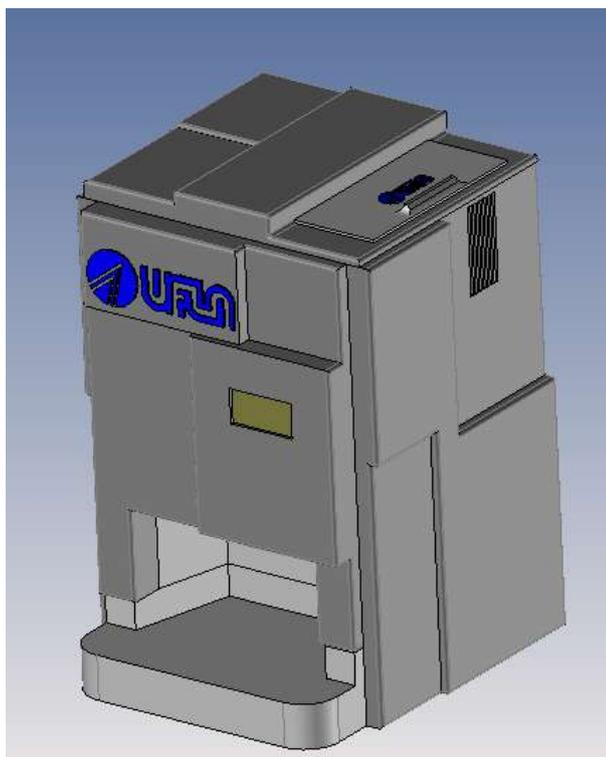


Fonte: Os autores

Concepção 5:

- Tela de comando pequena;
- Tampa Tampa superior com abertura de gaveta para o carregamento dos insumos;
- Silhueta chamativa, com formato de retângulos sobrepostos.

Figura 4.5 – Concepção 5

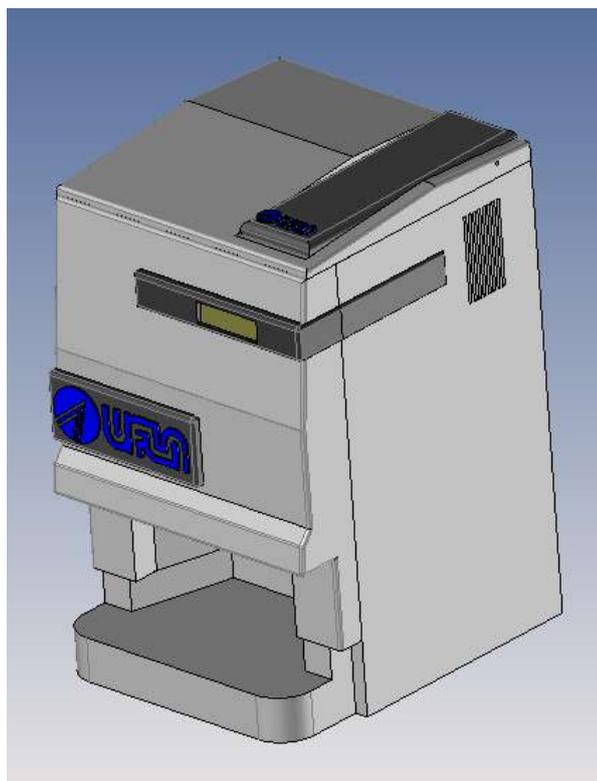


Fonte: Os autores

Concepção 6:

- Tela de comando pequena;
- Tampa Tampa superior com abertura de gaveta para o carregamento dos insumos;
- Silhueta com formato simples;
- Detalhes que remetem uma interligação das peças.

Figura 4.6 – Concepção 6

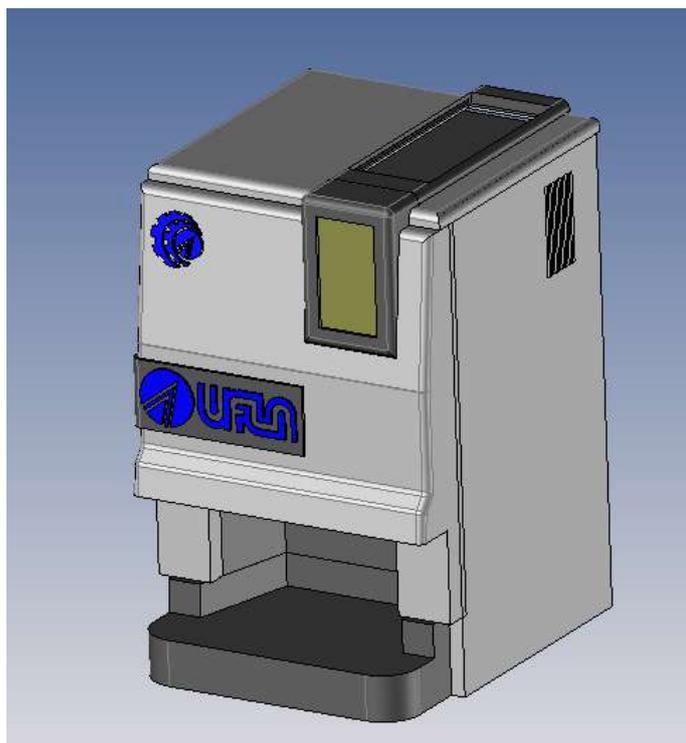


Fonte: Os autores

Concepção 7:

- Tela de comando grande, em posição de retrato, deslocada do centro;
- Tampa superior com abertura de gaveta para o carregamento dos insumos;
- Silhueta com formato simples;
- Detalhes que remetem uma interligação das peças.

Figura 4.7 – Concepção 7



Fonte: Os autores

Concepção 8:

- Tela de comando grande, em posição de retrato, centralizada;
- Tampa superior com abertura de gaveta para o carregamento dos insumos;
- Silhueta com formato simples e pouco arredondada;
- Detalhes que remetem uma interligação das peças.

Figura 4.8 – Concepção 8

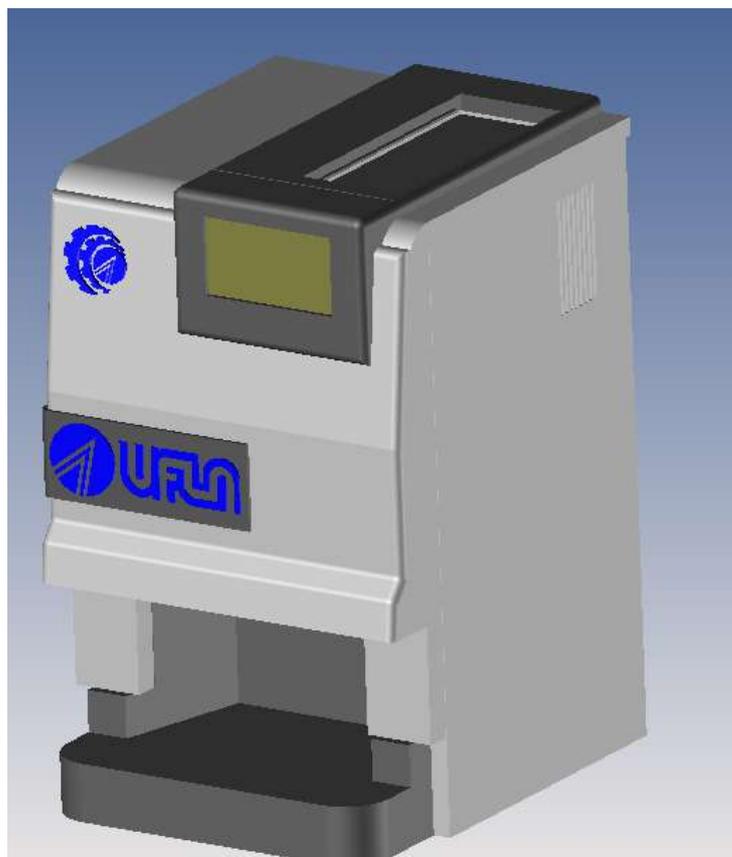


Fonte: Os autores

Concepção 9:

- Tela de comando grande, em posição de paisagem, deslocada do centro;
- Tampa superior com abertura de gaveta para o carregamento dos insumos;
- Silhueta com formato simples;
- Detalhes que remetem uma interligação das peças.

Figura 4.9 – Concepção 9



Fonte: Os autores

Concepção 10:

- Tela de comando grande, em posição de paisagem, centralizada;
- Tampa superior com abertura de gaveta para o carregamento dos insumos;;
- Silhueta com formato simples e pouco arredondada;
- Detalhes que remetem uma interligação das peças.

Figura 4.10 – Concepção 10

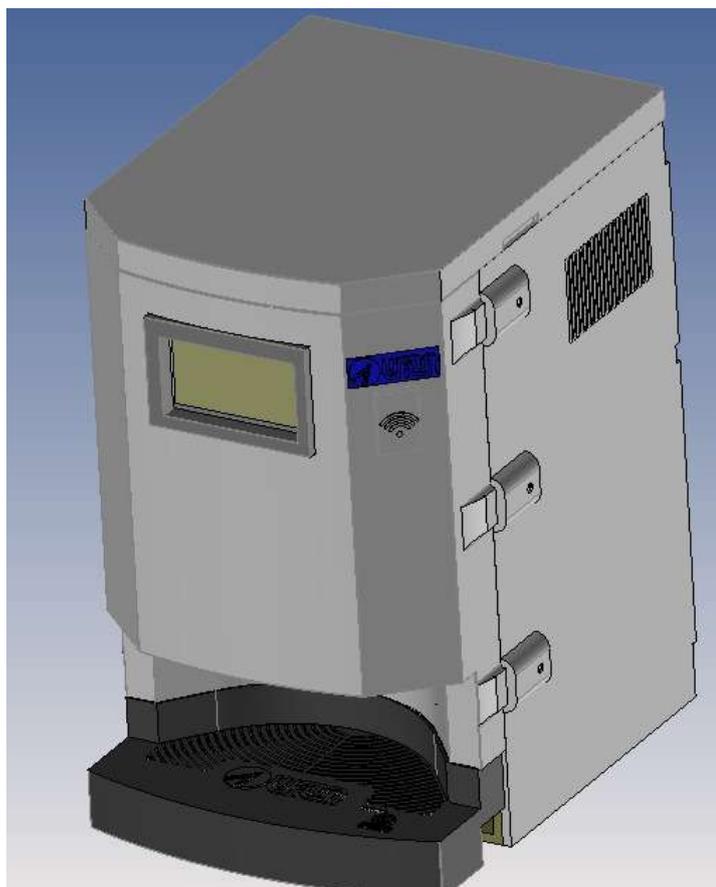


Fonte: Os autores

Dessa forma, com o desenvolvimento de dez concepções diferentes definiu-se qual se encaixa melhor dentre nossas exigências. Para isso, a partir da matriz de tomada de decisão (Anexo A) estabeleceu-se qualidades que são essências para uma estrutura atrativa e robusta. Visto isso, para determinar a pontuação em cada particularidade das concepções, realizou-se reuniões entre os envolvidos do projeto.

Após a pontuação de cada concepção para cada característica, calculou-se a que fez a maior pontuação, sendo o último modelo “Concepção 10”, para seguir o projeto. Assim sendo, fazendo uma breve análise das funcionalidades exigidas e dos equipamentos dispostos para a sua manufatura. Fez-se ainda um novo refino deste modelo, chegando ao modelo de referência final, como apresentado na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Design de referência detalhado



Fonte: Os autores

Na sequência, com o propósito de identificar possíveis modos de falhas nos componentes, utilizou-se a ferramenta de qualidade FMEA, que auxilia a determinar para onde as ações de melhoria devem ser direcionadas a fim de reduzir o risco de erros e garantir uma maior confiabilidade no produto final. Assim, avaliou-se detalhadamente cada aspecto que poderia acarretar uma futura falha na estrutura e criou-se a Tabela FMEA (Anexo B)

4.2 Montagem Final

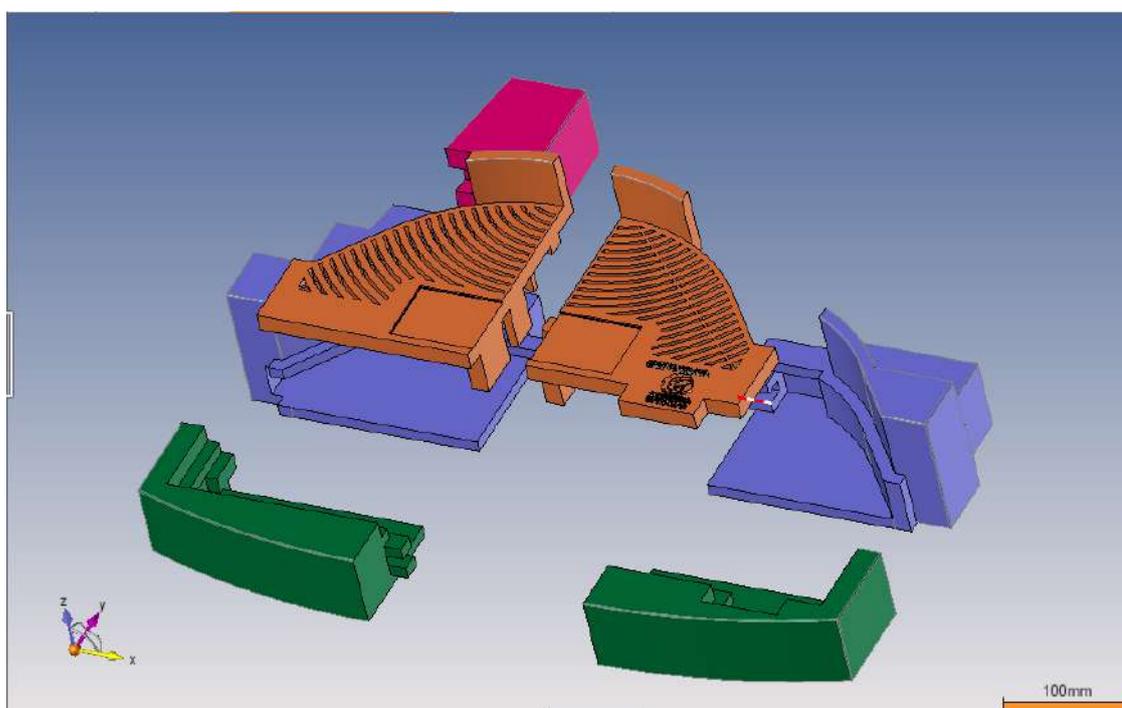
Assim, após a definição do modelo final juntamente a ferramenta do FMEA, prosseguiu-se para a fase de ajustes finais na estrutura. Em que através da metodologia do *Design For Six Sigma* e ferramentas da qualidade, já citadas anteriormente, desenvolveu-se melhorias contínuas em cada peça da estrutura, sendo inicialmente a bandeja, seguidamente da parte frontal e superior.

4.2.1 Bandeja

Com isso, para o desenvolvimento da Bandeja, componente reservado para se colocar os copos, primeiramente elaborou-se a ideia de realizar sua construção em blocos, com faces de colagem para unir cada pedaço. A primeira versão deste componente está representado pela Figura 4.12.

Tendo em vista a otimização do projeto em questão de higiene, fez-se necessário isolar espaços inutilizados que dificultavam a limpeza.

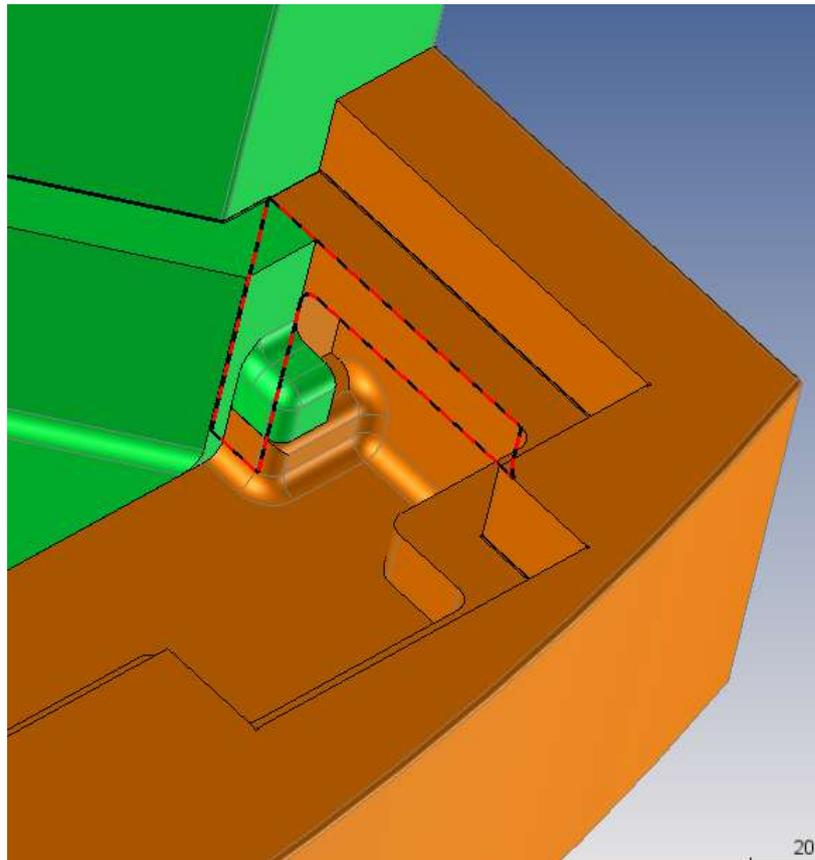
Figura 4.12 – Bandeja com a parte de baixo



Fonte: Os autores

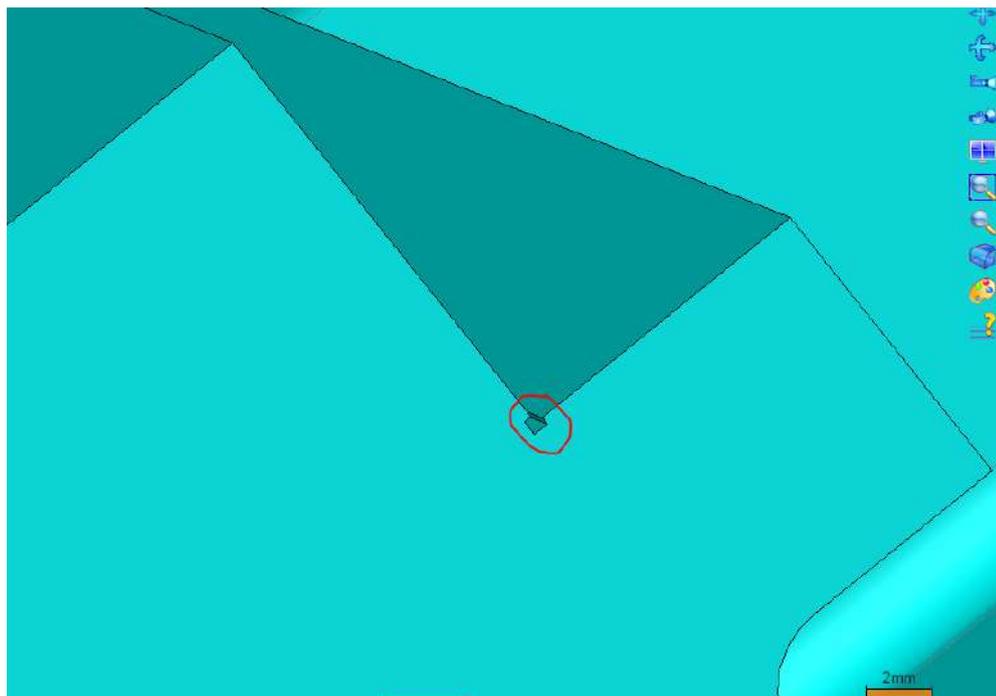
Ainda com o propósito de realizar melhorias, como por exemplo, de aumentar a área de contato entre as peças, criou-se um “orelha” entre a peça laranja e verde, representado na Figura 4.13. E, da mesma forma, em busca de aprimoramento, implementou-se pequenos recortes para garantir o contato entre todas as faces das peças quando encaixadas (esses recortes garantem que as tolerâncias não influenciem na montagem), indicadas na Figura 4.14. Paralelo a isso, para evitar regiões com concentradores de tensão, retirou-se os cantos vivos das peças, podendo ser observado na Figura 4.15.

Figura 4.13 – Orelha entre a peça laranja e verde



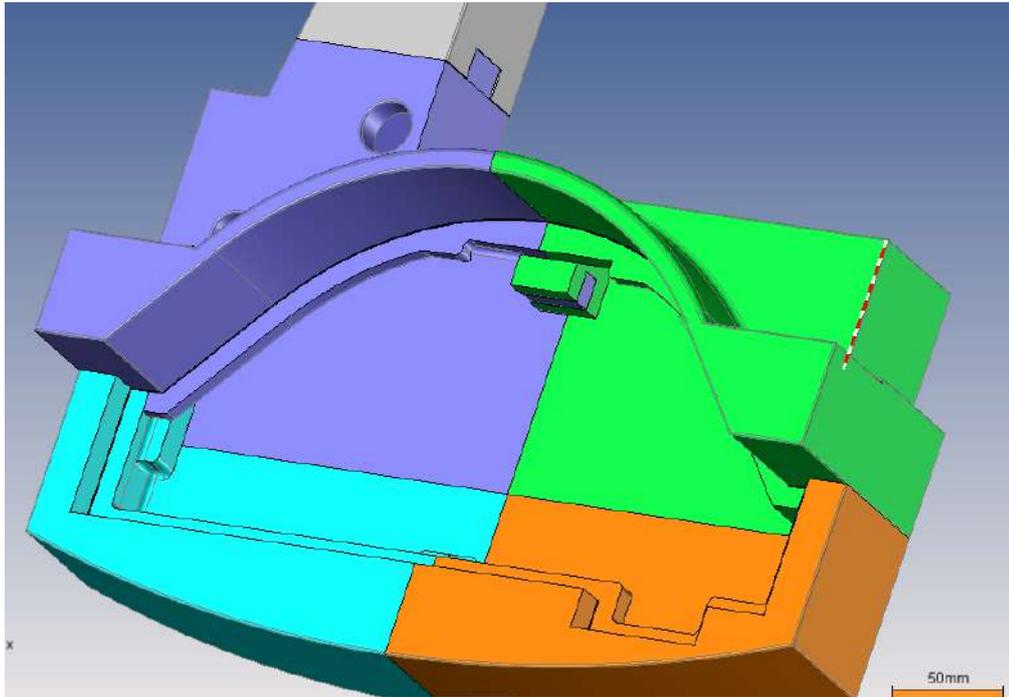
Fonte: Os autores

Figura 4.14 – “Calhas” para garantia de montagem



Fonte: Os autores

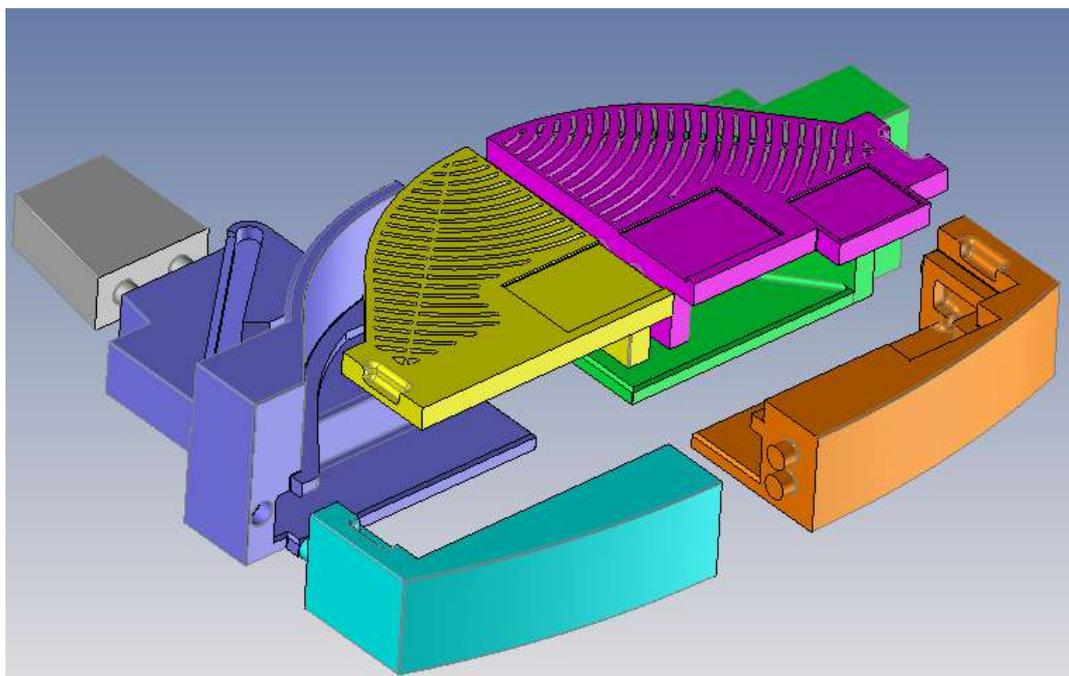
Figura 4.15 – Base encaixada



Fonte: Os autores

Em uma segunda análise da bandeja, com base na ferramenta *Design for Assembly* (facilidade de montagem) dos componentes que compõe a bandeja, fez-se as peças para serem montadas com pinos, garantindo um melhor encaixe, colagem e conseqüentemente evita torções (Figura 4.16).

Figura 4.16 – Bandeja, montagem de encaixes com pino

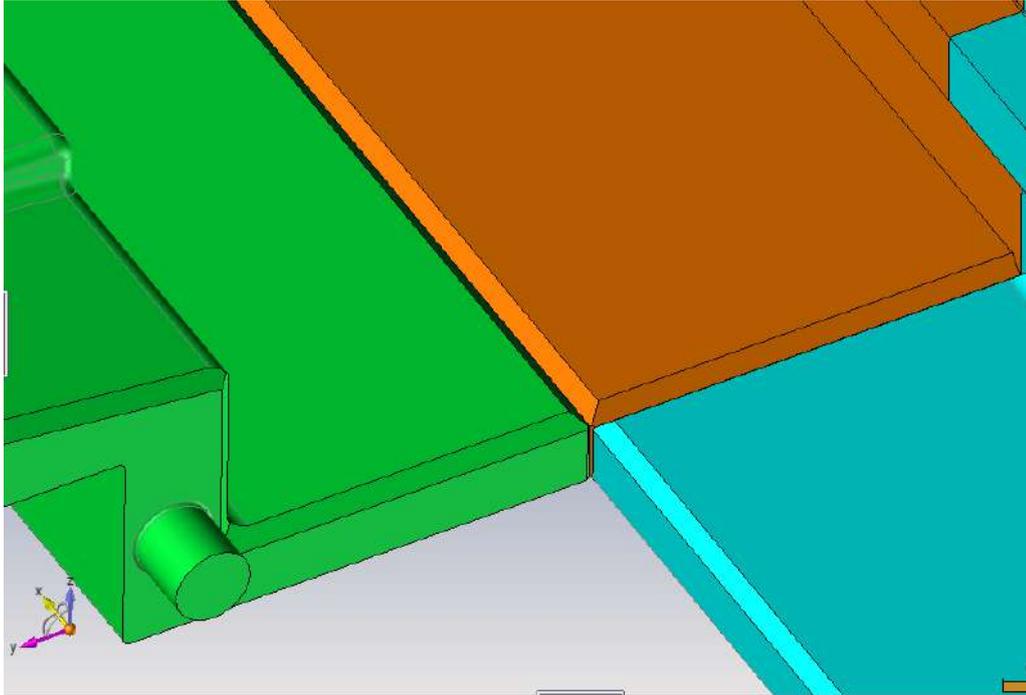


Fonte: Os autores

Para desempenhar futuras limpezas no local onde caem os respingos do pronto, abaixo das grades, desenvolveu-se uma bandeja móvel (estrutura vazada) que fosse fácil de retirar. Visto isso, elaborou-se pequenos sulcos nas laterais da bandeja.

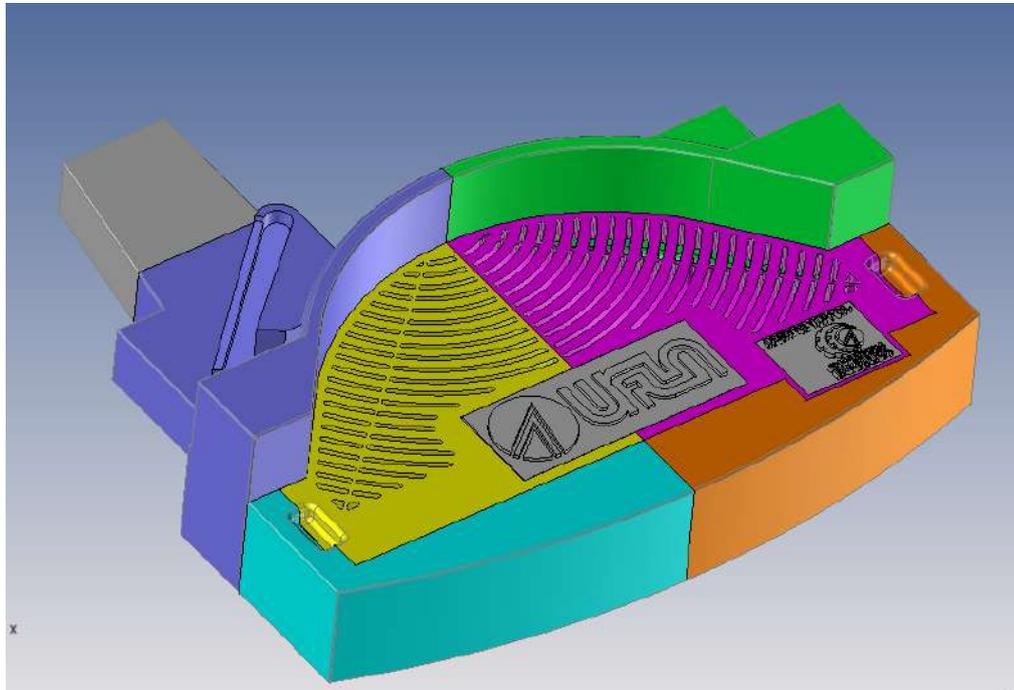
Por fim, sabendo que a vedação da estrutura será feita por silicone, implementou-se espaços nas 4 interfaces das regiões que passarão o silicone (Figura 4.17), com o objetivo de garantir que não vaze café. Para direcionar os respingos internos da máquina, construiu uma canaleta para essa função. Na Figura 4.18, é demonstrado a montagem final.

Figura 4.17 – Espaços para aplicação de Silicone



Fonte: Os autores

Figura 4.18 – Bandeja, final

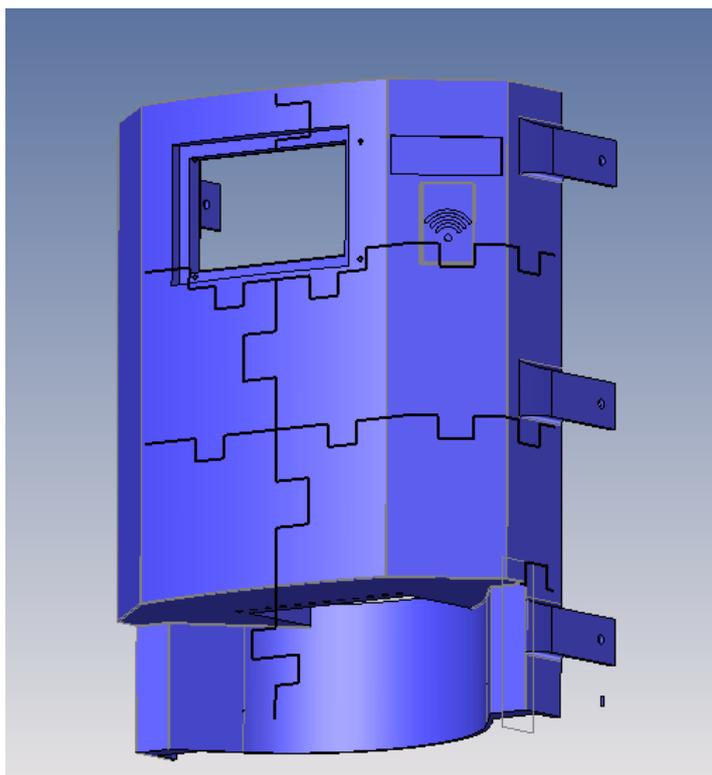


Fonte: Os autores

4.2.2 Frontal

De início, analisando as extremidades da parte frontal observou-se que nessa região, existe uma maior fragilidade, devido à espessura se apresentar relativamente fina, como também, pela maneira do encaixe da montagem das peças (colagem) e como seria fixada no resto da máquina, demonstrado na Figura 4.19.

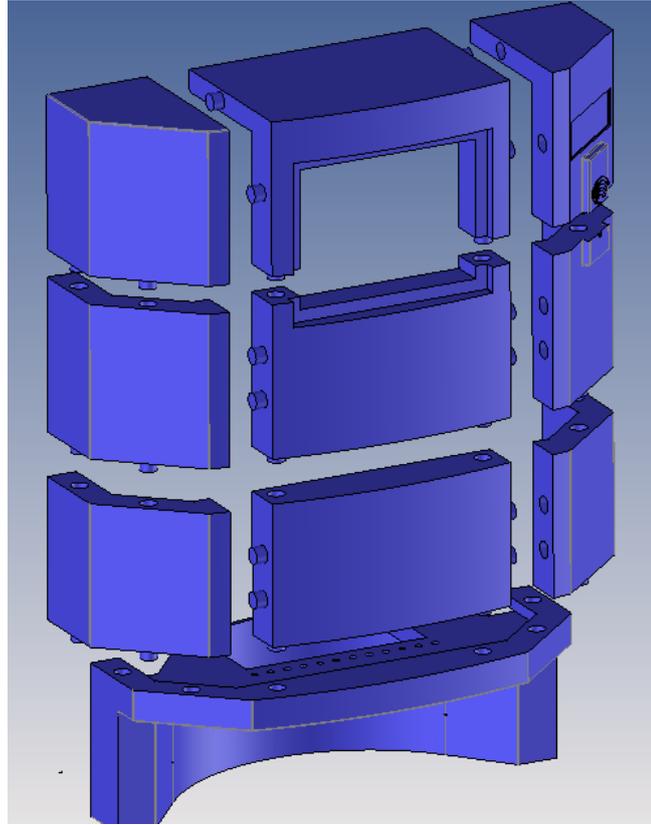
Figura 4.19 – Parte frontal, inicial



Fonte: Os autores

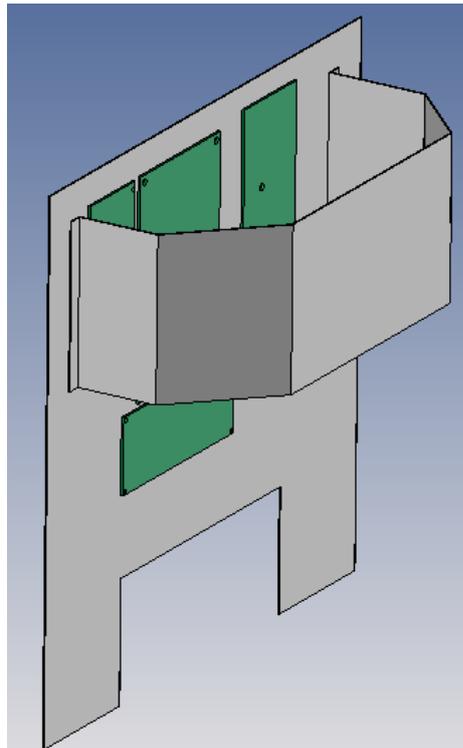
Dessa forma, para a solução desse problema, alterou-se a montagem das peças pela montagem lego com pinos (Figura 4.20) e, a partir disso, aumentou a espessura, juntamente com um reforço de uma chapa e alumínio (Figura 4.21), visando evitar uma futura torção do material e defeitos que poderiam apresentar devido aos choques que ocorrem durante o transporte do maquinário.

Figura 4.20 – Frontal, montagem lego com pinos



Fonte: Os autores

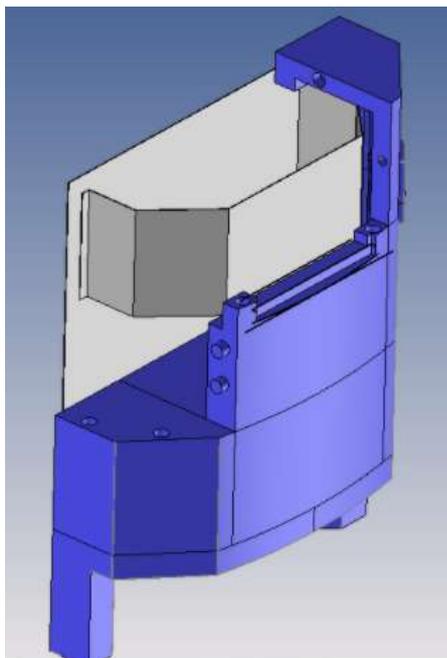
Figura 4.21 – Chapa de alumínio



Fonte: Os autores

Além de ter em vista uma maior resistência na parte frontal da estrutura, planejou-se uma garantia para um isolamento do circuito. Sendo assim, a placa de alumínio é parafusada na dobradiça direto na máquina, para receber o circuito elétrico e ser a parte que fixará a frente impressa. Na Figura 4.22, é possível observar.

Figura 4.22 – Chapa de alumínio fixada



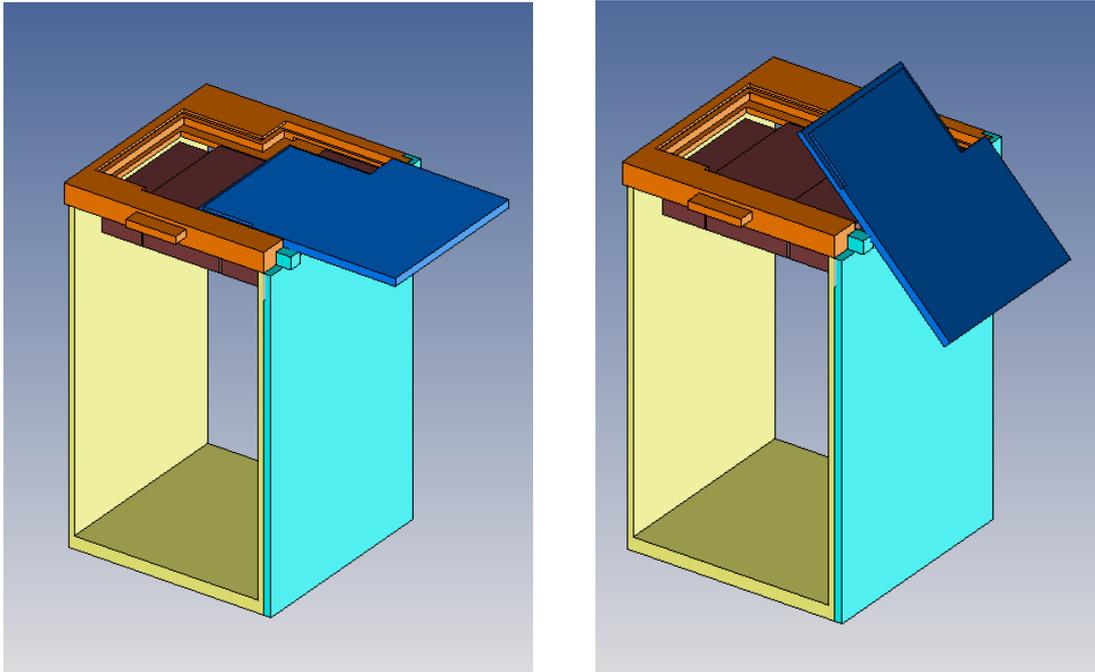
Fonte: Os autores

A placa de alumínio receberá, também, a tela e o leitor de cartão, através de uma dobradura de chapas fixadas na placa principal. Isto garantirá resistência tanto na tela, como também ao toque do usuário. Além disso, assegura-se a fácil retirada da parte impressa, sem a necessidade de retirar fios entre componentes eletrônicos fixados.

4.2.3 Superior

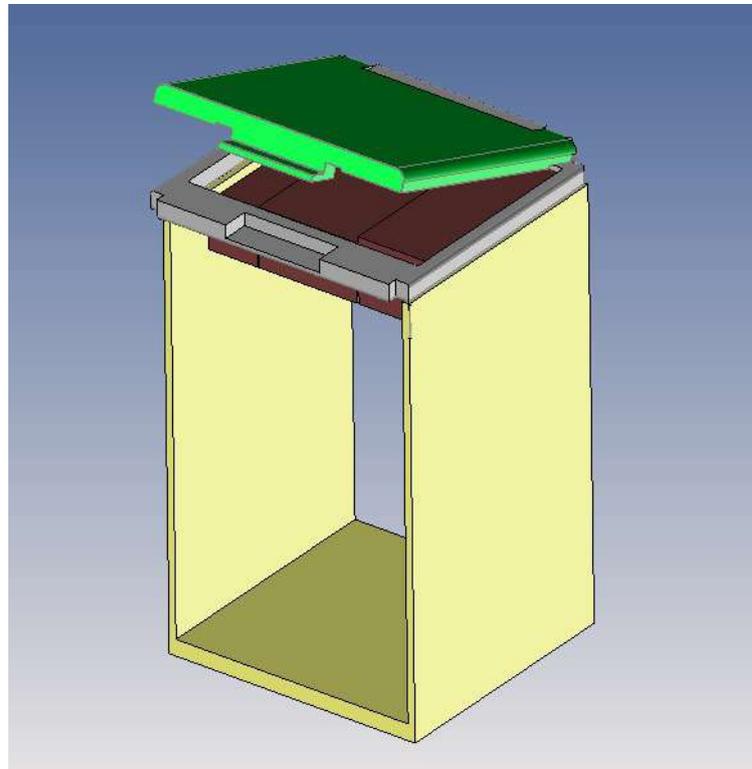
Pensando na facilidade do operador realizar a troca de insumos (café), na limpeza pós uso, na restrição de local para uso e também apresentando um design moderno, gerou-se dois modelos superiores representados nas Figuras 4.23 e 4.24.

Figura 4.23 – Modelo 1, superior



Fonte: Os autores

Figura 4.24 – Modelo 2, superior



Fonte: Os autores

Logo, após a análise dos fatores já mencionados anteriormente, optou-se pelo modelo 2. Percebe-se que o modelo 1 é do tipo gaveta, o que acaba restringindo o seu local de uso,

impedindo que seja colocado em local muito estreito, visto que para a abertura completa da gaveta é necessário um espaçamento em suas laterais. Além disso, vale destacar que a constante abertura da gaveta pode acarretar em um constante desgaste e conseqüentemente falhas futuras.

Portanto, o modelo 2 é, de fato, o escolhido, exatamente por apresentar características opostas ao modelo 1: não apresenta restrição de local e, além disso, sua abertura superior é livre e fácil, como é possível observar na Figura 6. Também, ao se pensar em Design atrativo e vida útil, o modelo 2 se destaca.

4.2.4 Modelo Final

Por fim, após a conclusão de todos os componentes necessários para a estrutura da cafeteira, nota-se pelas Figura 4.25, 4.26 e 4.27 o modelo final, em diferentes vistas.

Figura 4.25 – Estrutura completa da cafeteira



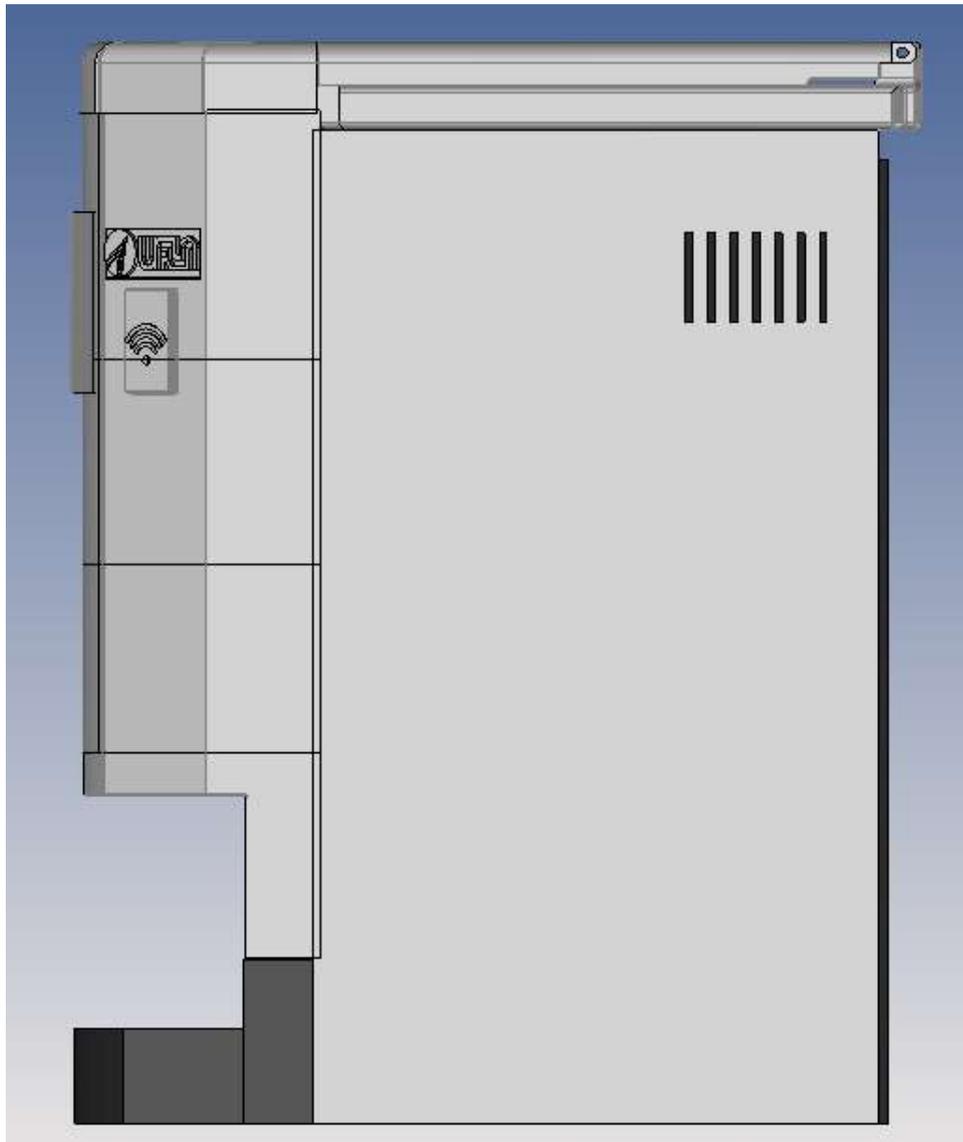
Fonte: Os autores

Figura 4.26 – Modelo final, vista frontal



Fonte: Os autores

Figura 4.27 – Modelo final, vista lateral



Fonte: Os autores

Dessa forma, a fim de fazer um diagnóstico em relação o ambiente interno e externo do produto para realizar uma gestão estratégica do mesmo, fez-se a análise SWOT.

Tabela 4.1 – Matriz SWOT

	FORÇA	FRAQUEZA
AMBIENTE INTERNO	<ul style="list-style-type: none"> • Produto de fácil adaptação e personalização; • Tecnologia Acessível; • Montagem fácil; • Fácil adaptação para produção em larga escala; • Estrutura robusta e leve; • Fácil higienização; • Fácil operação e manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pouca referência de produtos semelhantes; • Pouca referência do comportamento do material para esta aplicação; • Limitação da tecnologia do equipamento de impressão; • Limitação de recursos; • Estrutura exposta em ambientes abertos.
	OPORTUNIDADE	AMEAÇA
AMBIENTE EXTERNO	<ul style="list-style-type: none"> • Apoio da Universidade Federal de Lavras com recursos e matéria-prima; • Apoio e mentoria do corpo docente da Universidade; • Permissão para utilização do espaço da Universidade para futuros testes de consumo/pesquisa e opinião; • Possível benchmark com outros pesquisadores para aprimoramento do projeto; • Possíveis vendas para outras instituições públicas; • Projeto nacional passível de incentivo do governo; • Tecnologia barata; • Baixa concorrência na região; • Exposição do equipamento em redes sociais da Universidade ou dos alunos; • Universidade com grande diversidade de alunos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada de concorrentes mais preparados em relação a recursos e know-how; • Sociedade pós-covid, movimento em espaços públicos menos intensos; • Instabilidade econômica no país; • Aumento inesperado de material para produção; • Baixa capacidade de produção do equipamento atual para possível atendimento de demanda; • Compartilhamento do equipamento com outros projetos, impactando na capacidade de produção.

Fonte: Os Autores

5 PARÂMETROS PARA AS ANÁLISES

5.1 Material

As peças fabricadas através do processo de impressão 3D por extrusão possuem uma mesoestrutura formada por uma densidade de vazios e a existência de ligações “filamento a filamento depositado” entre e dentro as camadas. A mesoestrutura é determinada, tanto pelas trajetórias de deposição dos filamentos, quanto aos parâmetros de processo, influenciando diretamente na anisotropia e na magnitude da resistência mecânica do material, ou seja, dependendo do tipo de orientações paramétricas para construção da peça (Tabela 5.1), suas propriedades mecânicas podem variar, conforme a Tabela 5.2 (SANTANA et al., 2018).

Dessa forma, como a direção em que será feita a impressão dos componentes ainda é desconhecida, pelo fato de a melhor opção para tal somente ser definida no momento da impressão pela própria impressora, optou-se por basear-se em um ensaio de tração já realizado sobre o PLA, no qual foram avaliados filamentos poliméricos de 1,75mm de diâmetro, com temperaturas de injeção de 215°C, em três direções diferentes (Tabela 5.1). Assim, em prol da segurança, considerou-se o material como isotrópico no menor valor das tensões, ou seja, na condição C2 (Tabela 5.2). Determinou-se esta condição para trabalhar com o pior dos casos, ou seja, se for válida, o operador pode trabalhar com qualquer das três condições, sem maiores riscos de falha. (SANTANA et al., 2018).

Tabela 5.1 – Combinações paramétricas para a fabricação das amostras

Condição	Configuração Principal	Parâmetros Auxiliares	
	ÂV(°)	ED (u.a.)	OC (u.a.)
C1	45/-45	Raster	Plano XY
C2	0/90	Raster	Plano XY
C3	Unidirecional (0°)	Concêntrica	Lateral

Fonte: (SANTANA et al., 2018, Adaptado)

Tabela 5.2 – Resultados obtidos nos ensaios de tração e medição da massa das amostras impressas

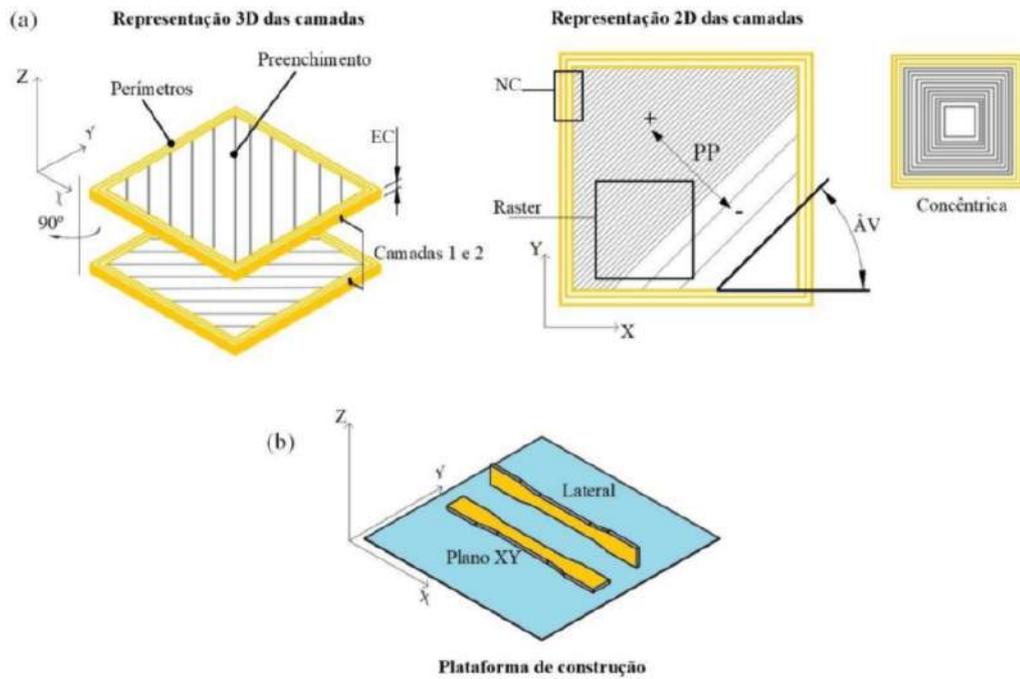
Propriedades	PLA (C1)	PLA(C2)	PLA(C3)
σ_{max} (MPa)	43,50 ± 0,72	36,61 ± 0,80	49,34 ± 1,12
ϵ_{max} (mm/mm)	0,02 ± 2,8E-4	0,01 ± 4,2E-4	0,01 ± 4,1E-4
E (GPa)	3,30 ± 0,12	3,17 ± 0,06	3,59 ± 0,03

Fonte: (SANTANA et al., 2018, Adaptado)

Sendo assim, considerou-se o ângulo de varredura (ÂV) de 0/90, sendo a direção em que os filamentos depositados se encontram em relação ao eixo X da plataforma de construção.

Além disso, a orientação de construção (OC) é pelo plano XY, podendo ser melhor compreendido pela Figura 5.1.

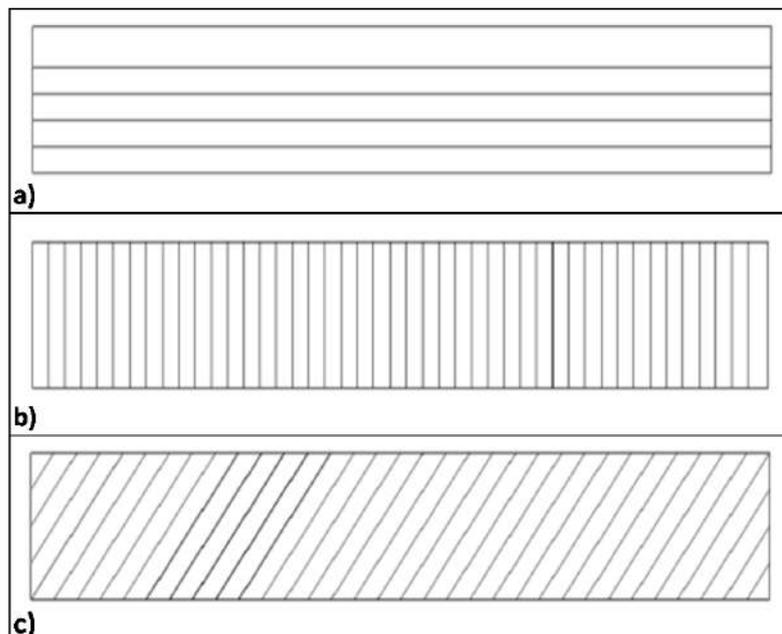
Figura 5.1 – Representação das camadas e dos parâmetros (a) e (b) orientação de construção



Fonte: (SANTANA et al., 2018)

Neste caso, para proporcionar um melhor entendimento a respeito do ângulo de varredura, realizou-se a representação de cada direção, conforme a Figura 5.2.

Figura 5.2 – Direções de orientação do raster, 0°, 90°, 45°



Fonte: Os Autores

Por fim, conforme a Tabela 5.3, além da tensão de escoamento e módulo de elasticidade, a densidade do material PLA é de 1,24 g/cm³ e o coeficiente de Poisson para materiais a maioria dos polímeros frágeis é de aproximadamente 0,3 (CARVALHO et al., 2007).

Tabela 5.3 – Propriedades gerais do PLA

Densidade	1,24 g/cm ³
Razão de Poisson	0,30
Tensão de escoamento	36,61 MPa
Tensão de ruptura	37,5 MPa
Modulo de Elasticidade	3170 MPa

Fonte: (SANTANA et al., 2018, Adaptado)

5.2 Malha

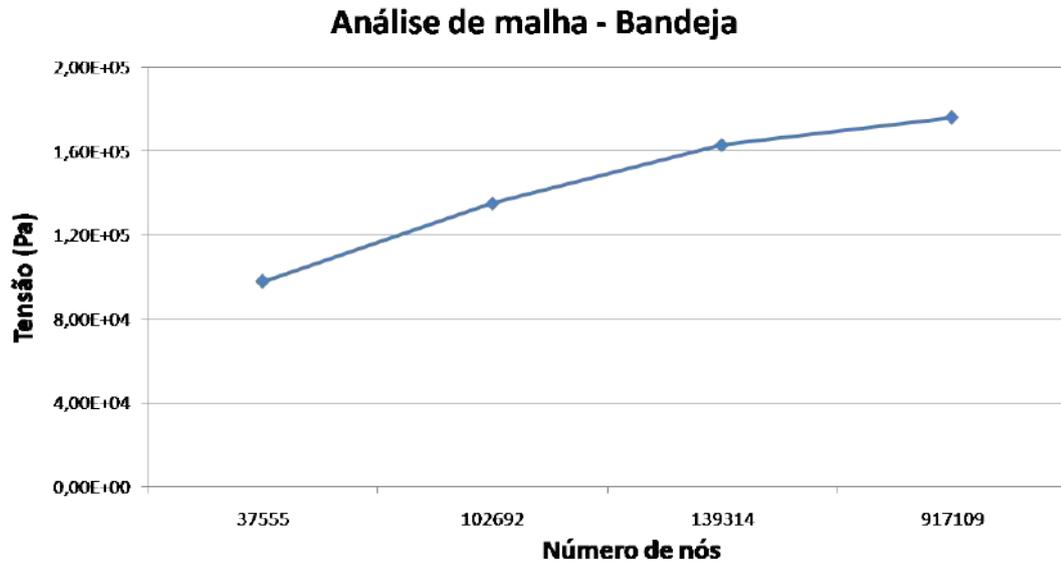
Para a criação de malha no software ANSYS® pode ser gerada automaticamente com o uso de elementos tetraédricos, por demandar menores esforços computacional para a criação. No entanto, por conter muitas imperfeições visualmente na malha, para o presente trabalho utilizou-se a presença de elementos hexaédricos, que apresentaram um melhor refino. Sendo que para a aplicação desta malha, é necessária que seja empregada a ferramenta denominada “*Method*”, pois nela é possível converter os elementos tetraédricos para elementos hexaédricos.

O objetivo de se obter uma malha mais refinada é para que os valores encontrados pelo software de deslocamentos, tensões e deformações, estejam o mais próximo possível dos valores reais, a fim de que, assim, consiga-se validar ou modificar a estrutura, caso necessário, e, ainda, alcance-se uma melhor representação da geometria do corpo analisado.

Um modelo é tido como refinado, para uma análise em elementos finitos, a partir do uso de “n” elementos, no que “n” tende ao infinito. No entanto, observa-se que, a partir de uma determinada quantidade de elementos na malha, as variações significativas dos valores obtidos em cada análise deixam de ocorrer. Dessa forma, percebe-se que continuar refinando a malha se torna desnecessário, no quesito de melhorar a qualidade nos resultados, haja vista que, em um certo ponto, o valor alcançado já será capaz de satisfazer o objetivo almejado.

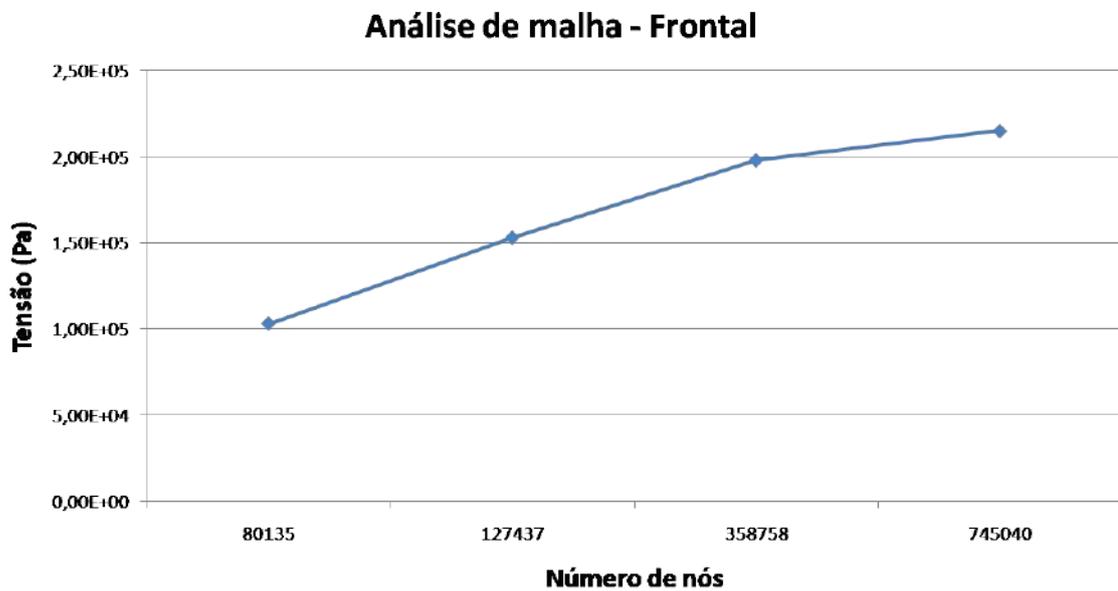
Sendo assim, fez-se a convergência de malha para os três componentes, conforme as Figuras 5.3, 5.4, 5.5.

Figura 5.3 – Convergência de malha - Bandeja



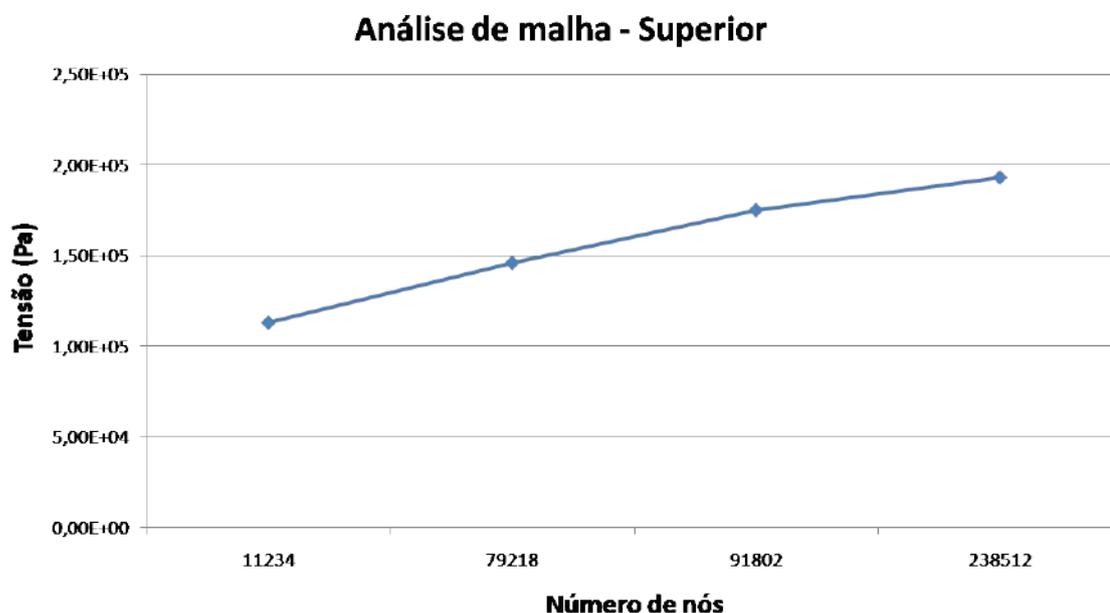
Fonte: Os Autores

Figura 5.4 – Convergência de malha - Frontal



Fonte: Os Autores

Figura 5.5 – Convergência de malha - Superior



Fonte: Os Autores

Em cada peça, trabalhou-se com o limite de número de nós da versão estudantil, verificando-se o momento no qual a adição de mais elementos não teria grande influencia nos resultados. Em uma análise criteriosa, com a finalidade de saber se a análise de malha está convergindo para um valor satisfatório, calculou-se os erros entre os valores de tensão através da Equação 5.1 selecionando um mesmo ponto da peça.

$$\frac{\text{Tensão}_{n+1} - \text{Tensão}_n}{\text{Tensão}_n} \quad (5.1)$$

Realizando os cálculos para cada elemento da estrutura, obteve-se a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Convergência da malha para cada componente

BANDEJA			FRONTAL			SUPERIOR		
Número de nós	Tensão (Pa)	Erro (%)	Número de nós	Tensão (Pa)	Erro (%)	Número de nós	Tensão (Pa)	Erro (%)
37555	9,78E+04		80135	1,03E+05		11234	1,13E+05	
102692	1,35E+05	38%	127437	1,53E+05	48%	79218	1,46E+05	29%
139314	1,63E+05	21%	358758	1,98E+05	29%	91802	1,75E+05	20%
917109	1,76E+05	8%	745040	2,15E+05	9%	238512	1,93E+05	10%

Fonte: Os autores

Com base na Tabela 5.4, a cada refinamento feito, visto a partir da coluna do aumento de número de nós, nota-se a redução do erro entre as tensões. Isso quer dizer que, conforme aja

melhorias na malha, mais os valores de tensões vão se convergir, de modo que o erro entre elas tenda a zero. De fato, pode-se ir além, levando a um erro de 1%, pois quanto maior o número de elementos na malha, mais exato vai ser o resultado. No entanto, como dito, não é necessário em diversos projetos, pelo fato de que além de não ocorrer variações significativas, a memória computacional destinada à altas resoluções é extremamente maior.

5.3 Condições de Contorno

Para realização das análises no Método dos Elementos Finitos a partir do *software Ansys*, necessita-se alimentar o modelo com dados que simulem as possíveis solicitações reais as quais a estrutura estará sujeita durante seu uso. Estes dados são chamados de condições de contorno.

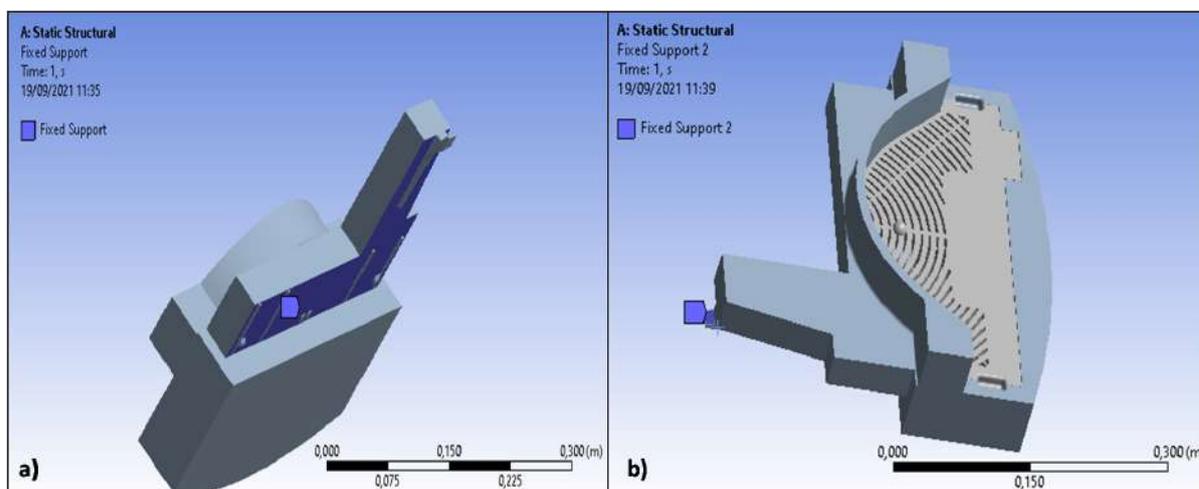
As condições de contorno são divididas em dois grupos, restrições e carregamentos. As restrições indicam quais regiões que a peça ficará engastada, ou seja, locais que restringe o movimento. Já os carregamentos representam as solicitações que a estrutura poderá ser exposta (força, pressão, momentos, carga térmica, etc).

5.3.1 Condição de contorno da bandeja

5.3.1.1 Restrição

Para realizar-se a análise estática na peça efetuaram-se as restrições nos locais em que se encontra engastada na estrutura, tanto quando está em operação ou desligada, como é determinado pelas Figuras 5.6a e 5.6b.

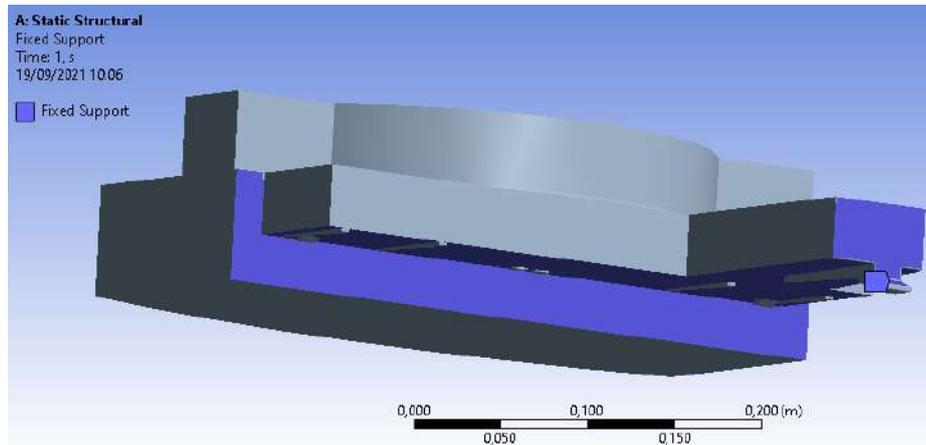
Figura 5.6 – Condições de contorno de restrição 1



Fonte: Os Autores

Contudo, é possível que o mesmo componente apresente falha por flambagem quando solicitado a determinadas cargas. Logo, no intuito de analisar uma possível solicitação de flambagem, aplicaram-se as restrições nas regiões detrás da bandeja, conforme a Figura 5.7.

Figura 5.7 – Condição de contorno de restrição 2

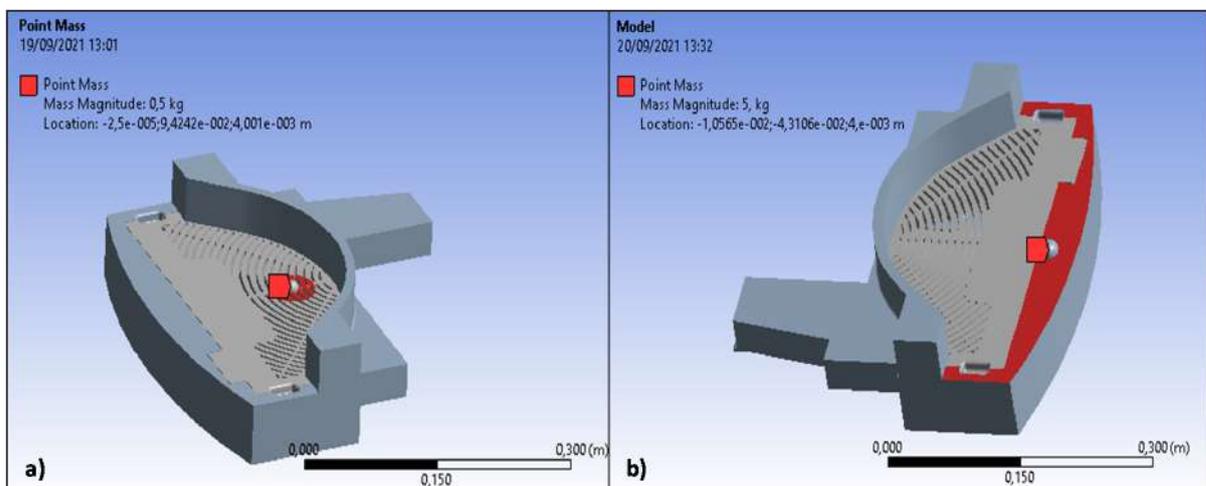


Fonte: Os Autores

5.3.1.2 Carregamentos

Em conjunto com as condições de contorno de restrições para análise estática, aplicaram-se dois tipos de carregamento estático. Inicialmente uma massa de 500 gramas sobre a região da tela, representando um copo de café cheio, conforme a Figura 5.8a. Em seguida, uma de 5000 gramas, atuando como o peso de um braço apoiado na extremidade da cafeteira, Figura 5.8b.

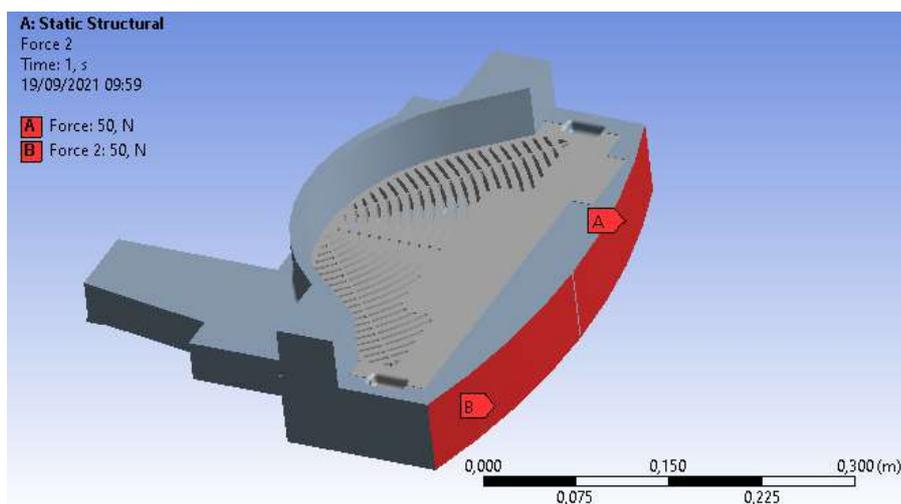
Figura 5.8 – Condições de contorno de carregamento



Fonte: Os Autores

Já para executar a análise de flambagem, aplicou-se uma força resultante de 100N em sua face frontal, como destacado pela Figura 5.9. Tal carregamento possui como objetivo simular um possível esforço frontal, como se um indivíduo tentasse encaixar a bandeja em seu local de uso, o que resultaria em uma compressão do componente.

Figura 5.9 – Condição de Contorno de Força



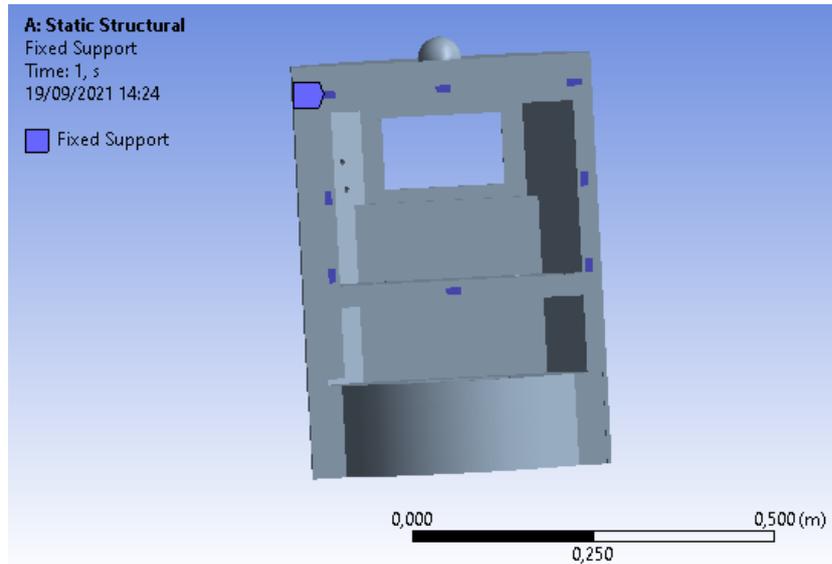
Fonte: Os Autores

5.3.2 Condição de contorno do componente frontal

5.3.2.1 Restrição

A princípio, sabe-se que a estrutura frontal é fixada por encaixes em outra estrutura interna, sendo estes locais que restringem os movimentos do componente. Portanto, as condições de contorno de restrição foram empregadas, conforme a Figura 5.10.

Figura 5.10 – Condição de contorno de restrição

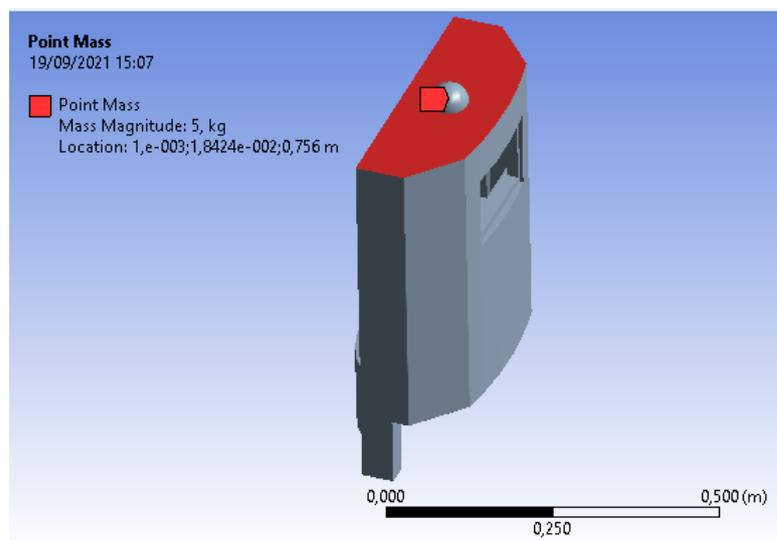


Fonte: Os Autores

5.3.2.2 Carregamentos

Sabendo que a estrutura frontal da cafeteira é um local vulnerável, podendo até mesmo ser usada como “encosto de braço” para algumas pessoas, fez-se necessário considerar o peso de um braço de 5000 gramas apoiado na região que teoricamente recebe o esforço, podendo ser vista pela Figura 5.11.

Figura 5.11 – Aplicação da carga na estrutura frontal



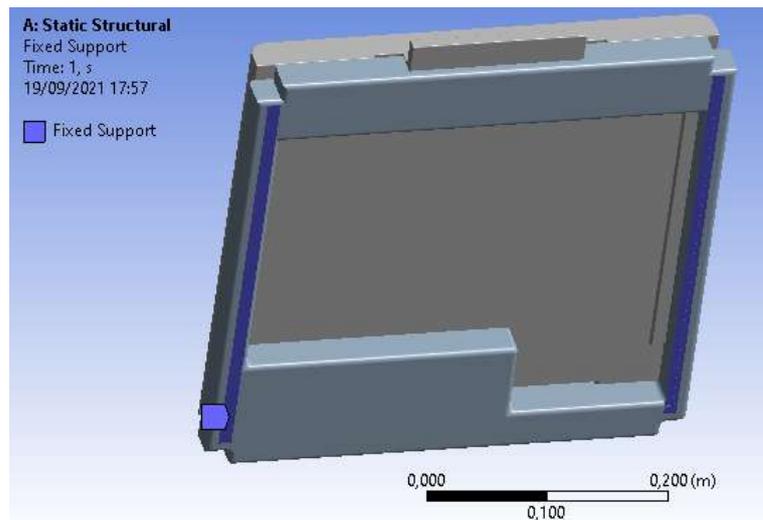
Fonte: Os Autores

5.3.3 Condições de contorno componente superior

5.3.3.1 Restrição

O componente superior da estrutura não possui sua superfície inferior totalmente apoiada na cafeteira, o que ocorre somente nas regiões laterais. Sendo assim, as restrições foram determinadas apenas em dois locais, como é possível constatar na Figura 5.12.

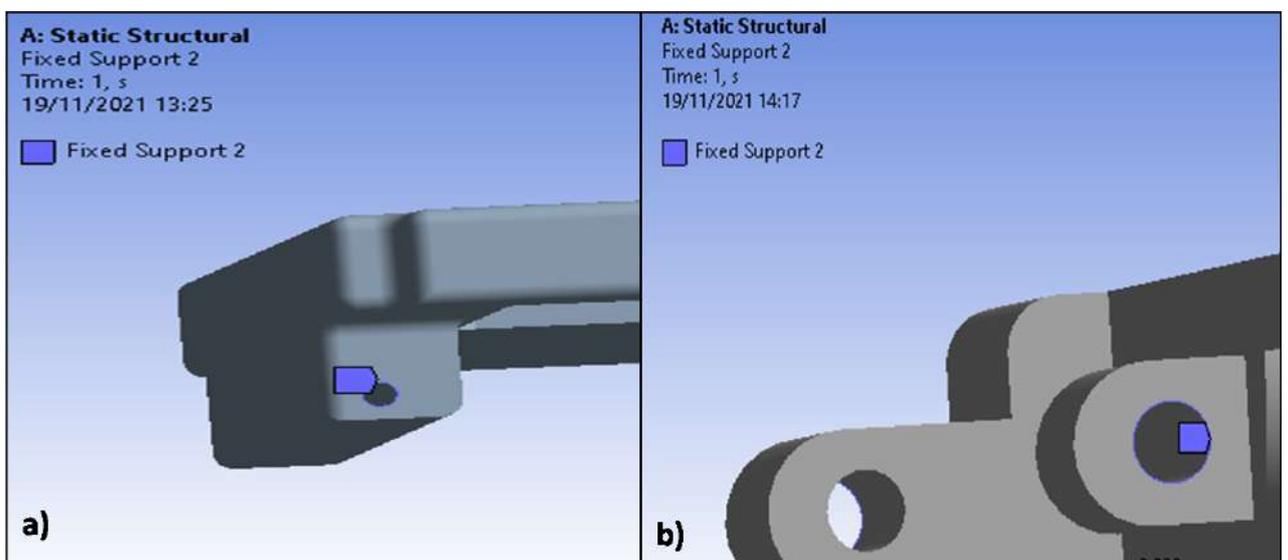
Figura 5.12 – Restrição do componente superior 1



Fonte: Os Autores

Além disso, restringiu-se o local onde terá uma conexão entre corpo e a tampa, como pode-se observar na Figura 5.13.

Figura 5.13 – Restrição do componente superior 2

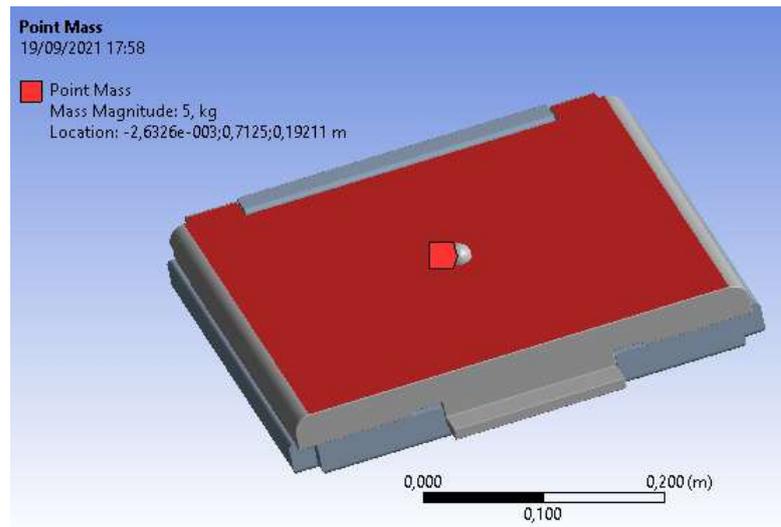


Fonte: Os Autores

5.3.3.2 Carregamentos

A região superior da cafeteira também é um local que pode ser usado como “encosto de braço”, caso não seja colocado em um ambiente fechado. Dessa maneira, com o intuito de analisar como a peça se comporta, definiu-se uma carga de 5000 gramas sobre o componente (representando um braço), conforme a Figura 5.14.

Figura 5.14 – Carregamento componente superior



Fonte: Os Autores

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES

6.1 Análise Estática Linear

Após todas as etapas de criação do modelo, informação das propriedades mecânicas/físicas do material dos componentes da estrutura e as condições de contorno, obteve-se os resultados de carregamento estático. Em uma análise estrutural, um dos fatores de maior relevância a ser analisado é sobre as tensões que o componente receberá a partir das solicitações estabelecidas, pois uma região que aponta uma tensão maior que a tensão de escoamento irá gerar uma deformação.

Dessa forma, a obtenção dos resultados é tida em forma de escala de cores, em que cada cor/tonalidade condiz com um determinado deslocamento ou tensão gerada na estrutura em questão. Com isso, é possível analisar como ocorreu o deslocamento da estrutura, o tipo do movimento realizado, qual região teve maior deslocamento em magnitude, como as tensões se distribuíram sobre a estrutura e a maior tensão na estrutura. Dessa forma, através desses conceitos, é possível calcular seu coeficiente de segurança pela Equação 6.1.

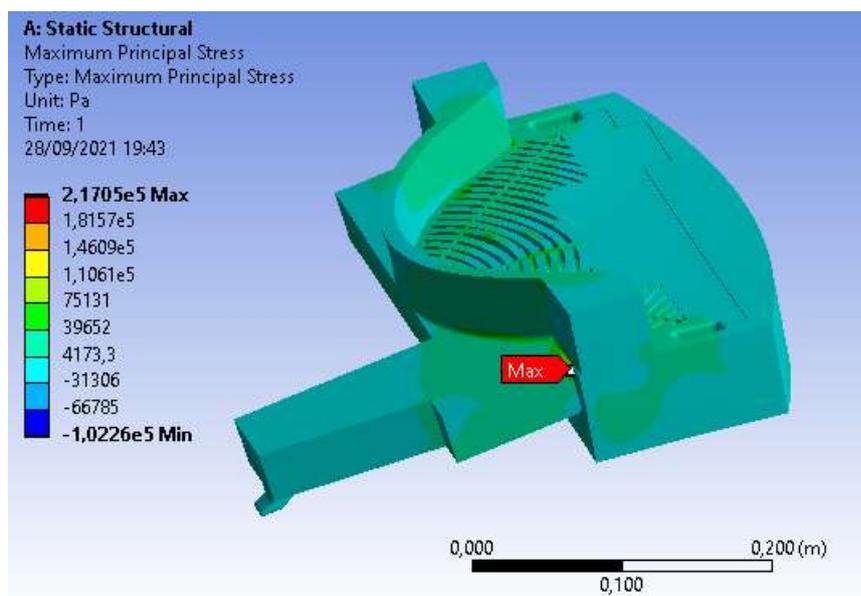
$$C = \frac{\text{Tensão de escoamento}}{\text{Tensão máxima}} \quad (6.1)$$

Diante disso, sabendo que o material de toda a estrutura é frágil (PLA), realizou-se a análise da Tensão Máxima Principal para todos os componentes, ao invés da Tensão de Von Misses que é utilizada para análise de material dúctil.

6.1.1 Bandeja

Conforme as solicitações especificadas anteriormente, realizou-se a simulação de carregamento estático para bandeja, destacado na Figura 6.1 e 6.3.

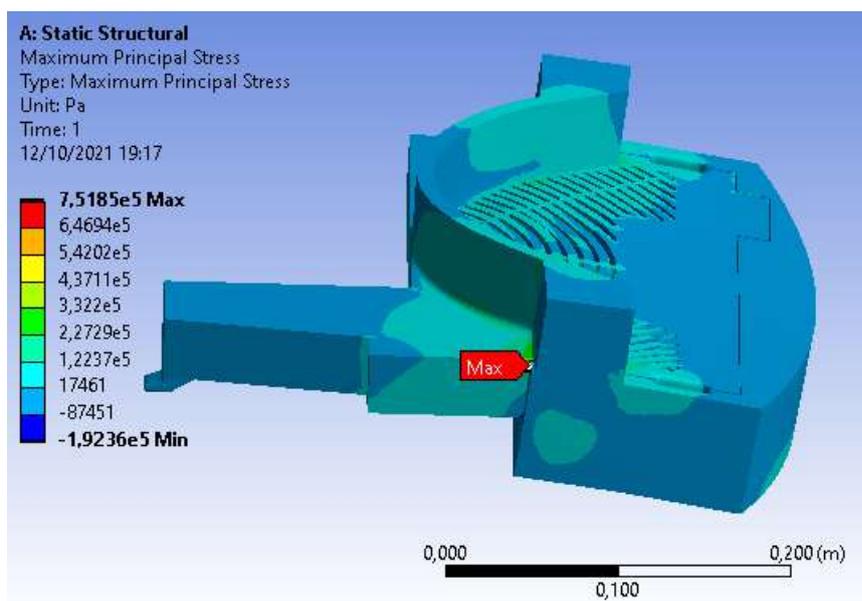
Figura 6.1 – Análise de tensão para carregamento estático



Fonte: Os Autores

A Figura 6.1 demonstra o ensaio realizado utilizando a carga de 500 gramas. Nela, o diagrama de cores apresenta predominância das tensões baixas de aproximadamente 4173,3 Pa a 39652 Pa, resultando em tensões insignificantes perante a tensão de escoamento. Porém, nos locais em que o esforço da bandeja é maior, percebe-se a ocorrência de um aumento nos valores de tensão, como indicado pela Figura 6.1 . Assim, comparando a máxima tensão apresentada com a tensão de escoamento do material, afirma-se que a bandeja não atinge seu regime plástico, ou seja, não deforma plasticamente. Logo, calculando o coeficiente de segurança, através da Equação 6.1, obtém-se um valor aproximado de 168, ou seja, o componente não falha por carregamento estático.

Figura 6.2 – Análise de tensão para carregamento estático



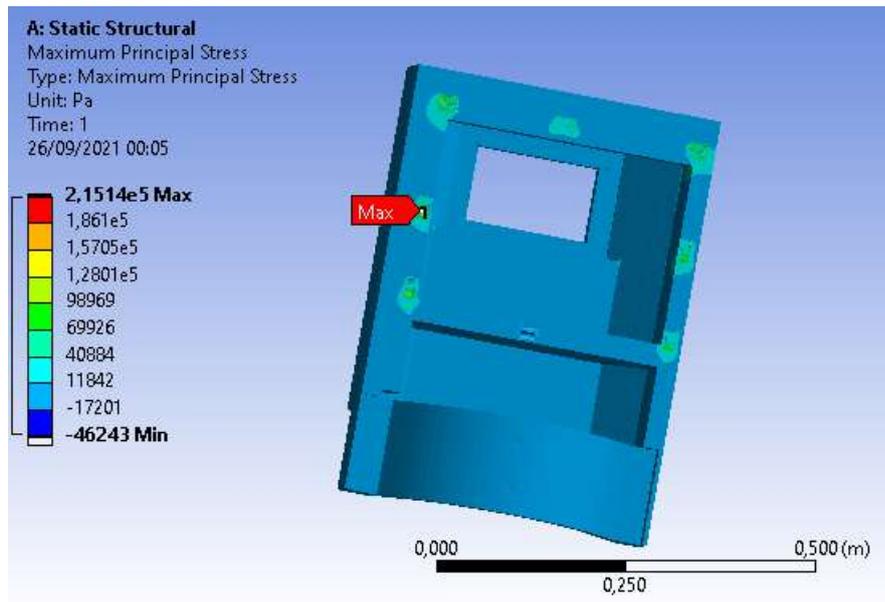
Fonte: Os Autores

Já na Figura 6.2, pode-se observar uma grande diferença nos valores obtidos em comparação da simulação anterior. De fato, era de se esperar uma grande diferença nos resultados, em razão de ser uma carga 10 vezes maior que a anterior. Verifica-se em grande parte da peça a predominância de tensões entre 17461 Pa a 2,2729E+05, contudo, nota-se que o valor máximo de tensão para ambas as análises é encontrado na mesma região, o que faz sentido, por ser o local que tende a romper, conforme a carga a carga aplicada na direção vertical. Assim, para determinar se o componente falha por carregamento estático, necessita-se realizar o cálculo a partir da Equação 6.1. Sabendo disso, o coeficiente de segurança é de 48, ou seja, a bandeja não falha para nenhuma das possíveis solicitações propostas e demonstra um alto nível de robustez em seu *design*.

6.1.2 Componente frontal

Em vista dos parâmetros iniciais estabelecidos, estabeleceu a análise de carregamento estático do componente frontal, apresentada na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Análise de tensão para carregamento estático



Fonte: Os Autores

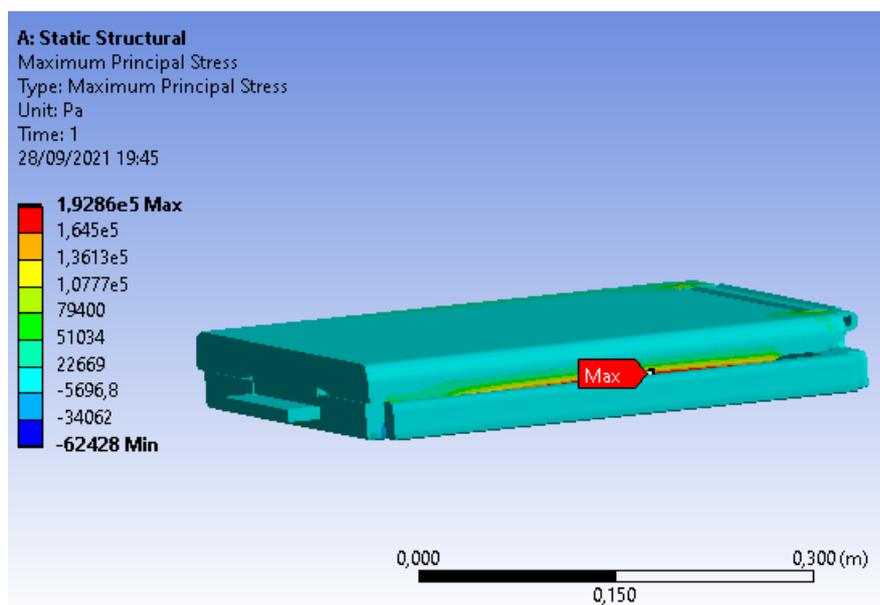
Constata-se que os locais de maiores tensões foram obtidos nos encaixes do componente frontal, pelo fato de estas serem as partes que sustentam e fixam a peça. Em contrapartida, as demais regiões apresentaram tensões baixas, por serem as que recebem menores esforços, conforme a solicitação estabelecida.

Dessa forma, com base na tensão máxima principal ($2,1514E+05$ Pa) destacada na Figura 6.3, afirma-se que a estrutura frontal da cafeteira não deforma plasticamente, pois sua tensão de escoamento é maior do que a tensão máxima principal. Através disso, utilizando ambos os valores de tensões e a Equação 6.1, calcula-se um coeficiente de segurança de 170. Sendo assim, o resultado apenas que não falha por carregamento estático.

6.1.3 Componente superior

De acordo com as solicitações feitas inicialmente para o componente superior, processou-se a análise de carregamento estático, conforme a Figura 6.4.

Figura 6.4 – Análise de tensão para carregamento estático



Fonte: Os Autores

Ao observar-se a Figura 6.4, percebe-se que as regiões que apresentam maiores tensões são coerentes com a realidade, visto que, quando um peso é aplicado sobre o componente superior, esses locais sofrem os primeiros impactos, por não estarem em contato com outro corpo, e, conseqüentemente, os maiores esforços.

A partir do valor da tensão máxima principal apresentada pelo *software*, o material não entra em regime plástico. Portanto, com as condições de contorno aplicadas inicialmente, o componente não deforma plasticamente.

Posto isto, calculou-se o coeficiente de segurança por meio da Equação 6.1 e suas respectivas tensões de escoamento ($36,61E+06$) e máxima principal ($1,9286e+05$), resultando em um coeficiente de segurança de 189.

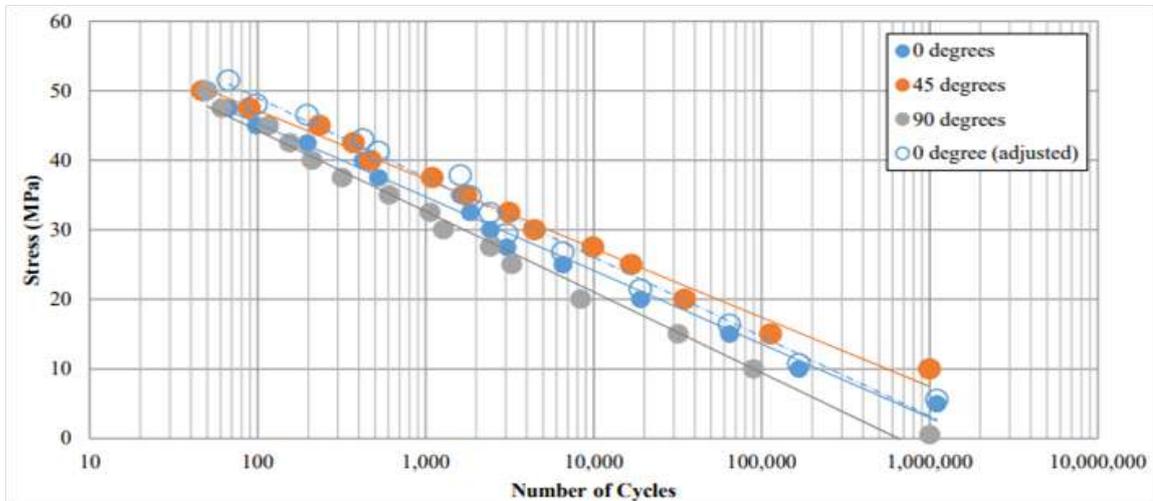
6.2 Análise de Fadiga

A fadiga é um fenômeno responsável pela falha de diversos equipamentos e componentes mecânicos, e é de conhecimento de todos que os cálculos para verificação de fadiga levam certo tempo e trabalho para serem realizados. Assim sendo, uma forma ágil e eficaz de se fazer uma análise de fadiga é a partir do Fatigue Tool do *Ansys*, no qual é possível determinar a vida de fadiga, coeficiente de segurança, dano.

Logo, para se realizar a análise de Fadiga foi-se necessário se basear em um ensaio de fadiga já executado no material, conforme a Figura 6.5, para que desta forma, fosse obtido os

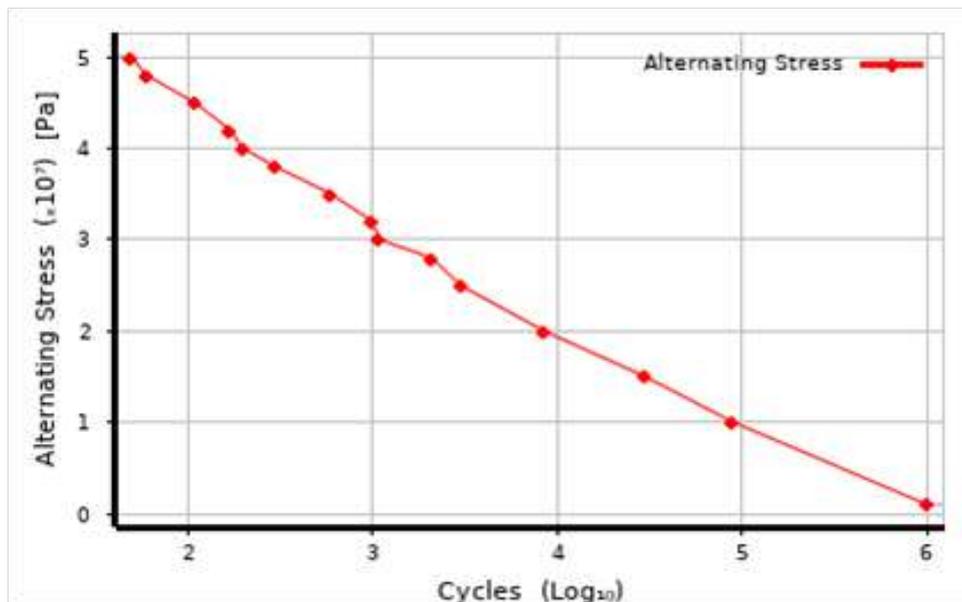
valores adequados dos números de ciclos e tensão e assim se criasse a curva SN do PLA no software Figura 6.6

Figura 6.5 – Gráfico SN de dados de fadiga do material PLA



Fonte: (LETCHER; WAYTASHEK, 2014)

Figura 6.6 – Curva SN do material PLA



Fonte: Os Autores

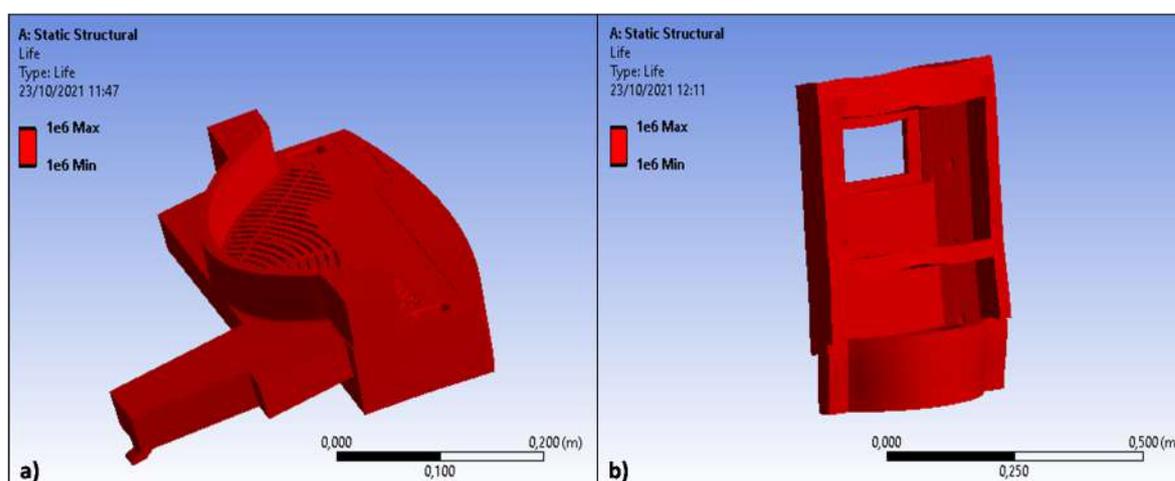
Visto isso, conforme já definido anteriormente sobre qual direção de impressão está sendo analisada para o material, verificou-se os resultados em relação à direção 90° Figura 6.5, por ser a opção que falha em um menor número de ciclo na mesma tensão entre 0° e 90° , ou seja, no intuito de trabalhar-se com um fator de segurança alto optou-se novamente no pior

dos casos, pois dessa maneira, validando o mesmo, pode-se utilizar qualquer outra direção sem risco.

Destaque-se que ambos os artigos são semelhantes nas informações sobre a forma que aconteceu a impressão, uma vez que variações significativas podem modificar as propriedades mecânicas do material e consequentemente influenciar diretamente nos resultados das análises.

Sendo assim, sabendo que a bandeja e o componente frontal podem sofrer um maior número de esforços durante sua vida útil, desenvolveu-se a análise de fadiga em ambos, com um carga de 5000 gramas, como demonstrado na Figura 6.7a e Figura 6.7b, respectivamente.

Figura 6.7 – Vida de fadiga dos componentes

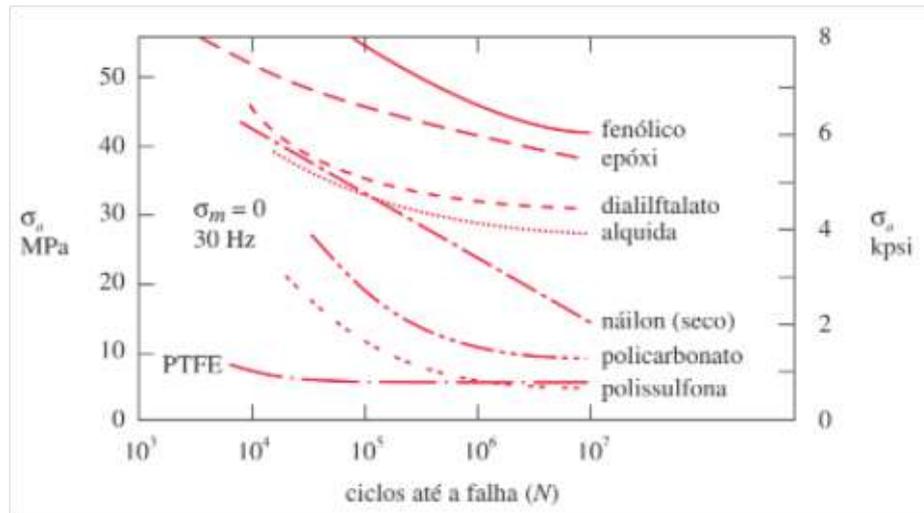


Fonte: Os Autores

Os resultados em vermelho em toda região dos dois componentes, determinam a vida de ao menos 1 milhão de ciclos em relação ao carregamento aplicado. Portanto, por não apresentar fadiga diante da carga, percebe-se que a estrutura condiz com que se propôs inicialmente, de apresentar-se um *Desing* robusto.

O resultado em questão é considerado vida infinita para aços. No entanto, por mais que seja um número alto de ciclos até a falha, não é considerado vida infinita para os polímeros, como é possível observar o comportamento de alguns polímeros na Figura 6.8, que mesmo após 1 milhão de ciclos tendem a falhar. Esse mesmo aspecto no gráfico na Figura 6.5.

Figura 6.8 – Curvas tensão-número de ciclos de materiais termofixos e termoplásticos

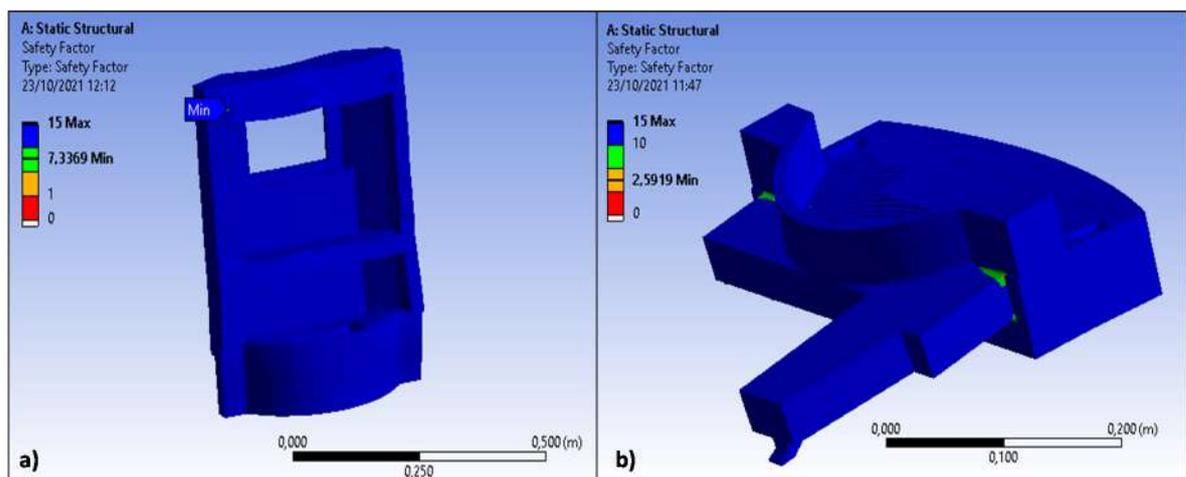


Fonte: (NORTON, 2013)

Além disso, percebe-se que com os valores de tensão máxima apresentados para cada componente na análise estática linear (Figura 6.2 e Figura 6.3) resultariam-se em 1 milhão de ciclos conforme a Figura 6.5, ou seja, pode-se concluir que a análise vida de fadiga está correta.

Em seguida, em analogia a vida de fadiga, para se confirmar que não ocorre risco de falha, fez-se a análise dos coeficientes de segurança, indicados nas Figura 6.9a e Figura 6.9b.

Figura 6.9 – Coeficiente de segurança - Fadiga



Fonte: Os Autores

Os coeficientes de segurança maiores que 1, são regiões que contém vida de 1 milhão de ciclos, ou seja, realmente não há risco de falha. Assim, outra análise importante é a identificação de algumas regiões reduções no coeficientes de segurança, pelo fato de serem locais de maiores tensões.

6.3 Análise de Flambagem

Dessa forma, a partir das condições de contorno impostas nas estruturas, definiu-se a solicitação de seis modos de flambagem para cada componente da estrutura da cafeteira, os quais se diferem pelos seus autovalores (*Load Multiplier*) e seus respectivos deslocamentos. O autovalor corresponde a um fator multiplicador da carga inicialmente aplicada, que resulta no valor da carga crítica que a estrutura pode suportar até sua flambagem, representado pela Equação 6.2.

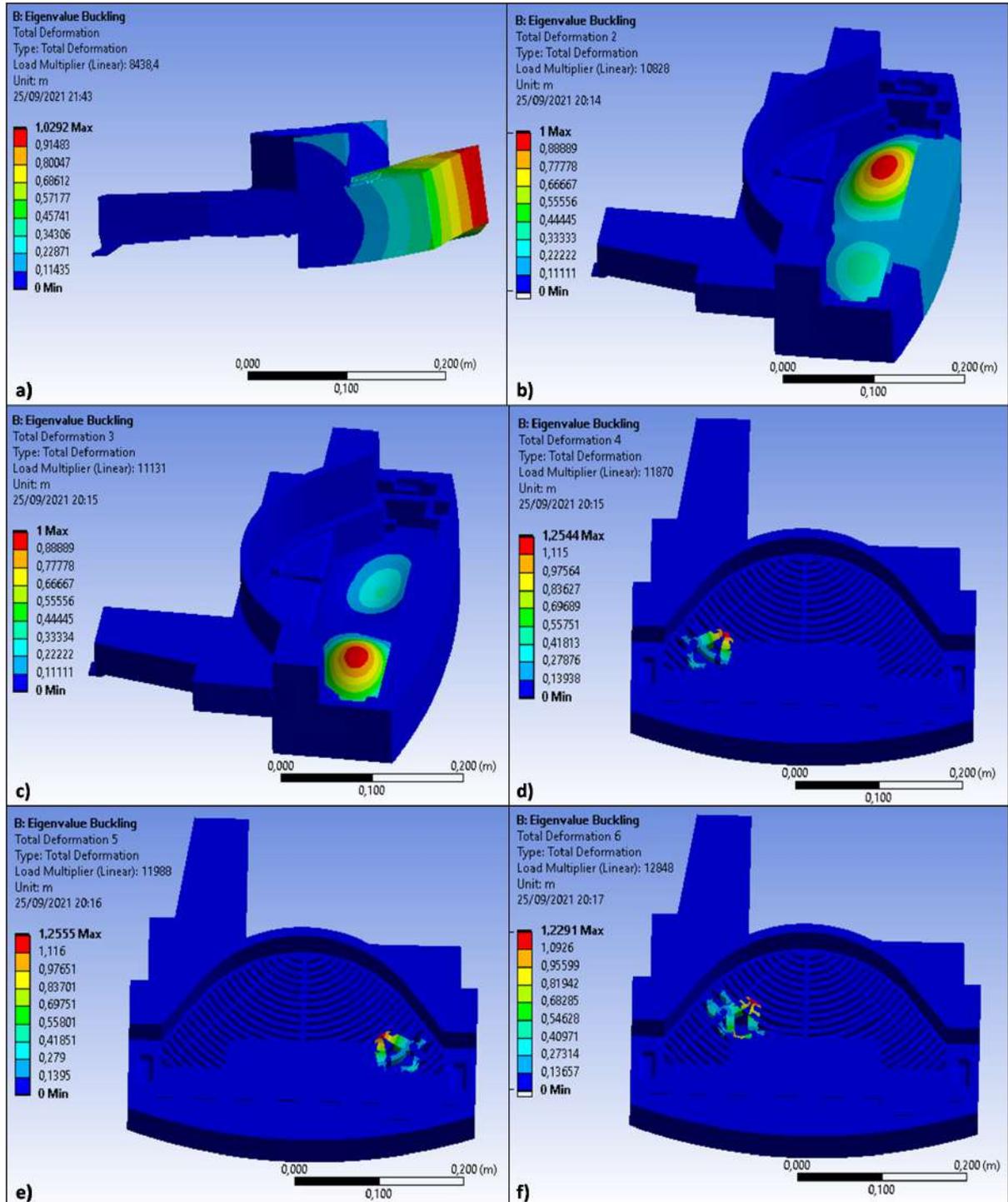
$$C_{\text{argacritica}} = \lambda_{cr} \cdot C_{\text{argaaplicada}} \quad (6.2)$$

Logo, nota-se que autovalores $|\lambda_{cr}| > 1$ resultam em uma carga crítica maior do que a carga aplicada, ou seja, não ocorre falha por flambagem. Contudo, para autovalores $0 \leq \lambda_{cr} < 1$ são geradas cargas críticas menores do que a carga aplicada, isto é, o componente falhará por flambagem a partir da carga inicialmente aplicada. No entanto, pode-se observar que, em alguns casos, são apresentados autovalores que não condiz com a realidade, resultando em cargas críticas sem coerência, ou seja, a peça não falha por flambagem, mas pode falhar por compressão. Isso acontece quando a peça além de possuir um comprimento pequeno, contém uma espessura relativamente alta em relação ao seu comprimento total.

6.3.1 Análise de Flambagem Bandeja

Para a bandeja, como dito anteriormente, foram gerados seis modos de flambagem, como apresentado na Figura 6.10.

Figura 6.10 – Modos de Flambagem



Fonte: Os Autores

Assim sendo, o primeiro modo de flambagem retrata uma flambagem global, ou seja, representa a flambagem da bandeja como um todo, diferentemente dos demais modos de flambagem que demonstram uma flambagem local, isto é, representando o colapso dos elementos que compõe a estrutura.

Com o objetivo de auxiliar na visualização dos valores de cargas críticas para cada modo de flambagem, desenvolveu-se a Tabela 6.1 a partir da Equação 6.2.

Tabela 6.1 – Valor final da carga crítica para cada modo de flambagem

Modos de Flambagem	Autovalores	Carga resultante aplicada (N)	Carga crítica (N)
1	8438,4	100	843.840
2	10828	100	1.082.800
3	11131	100	1.113.100
4	11870	100	1.187.000
5	11988	100	1.198.800
6	12848	100	1.284.800

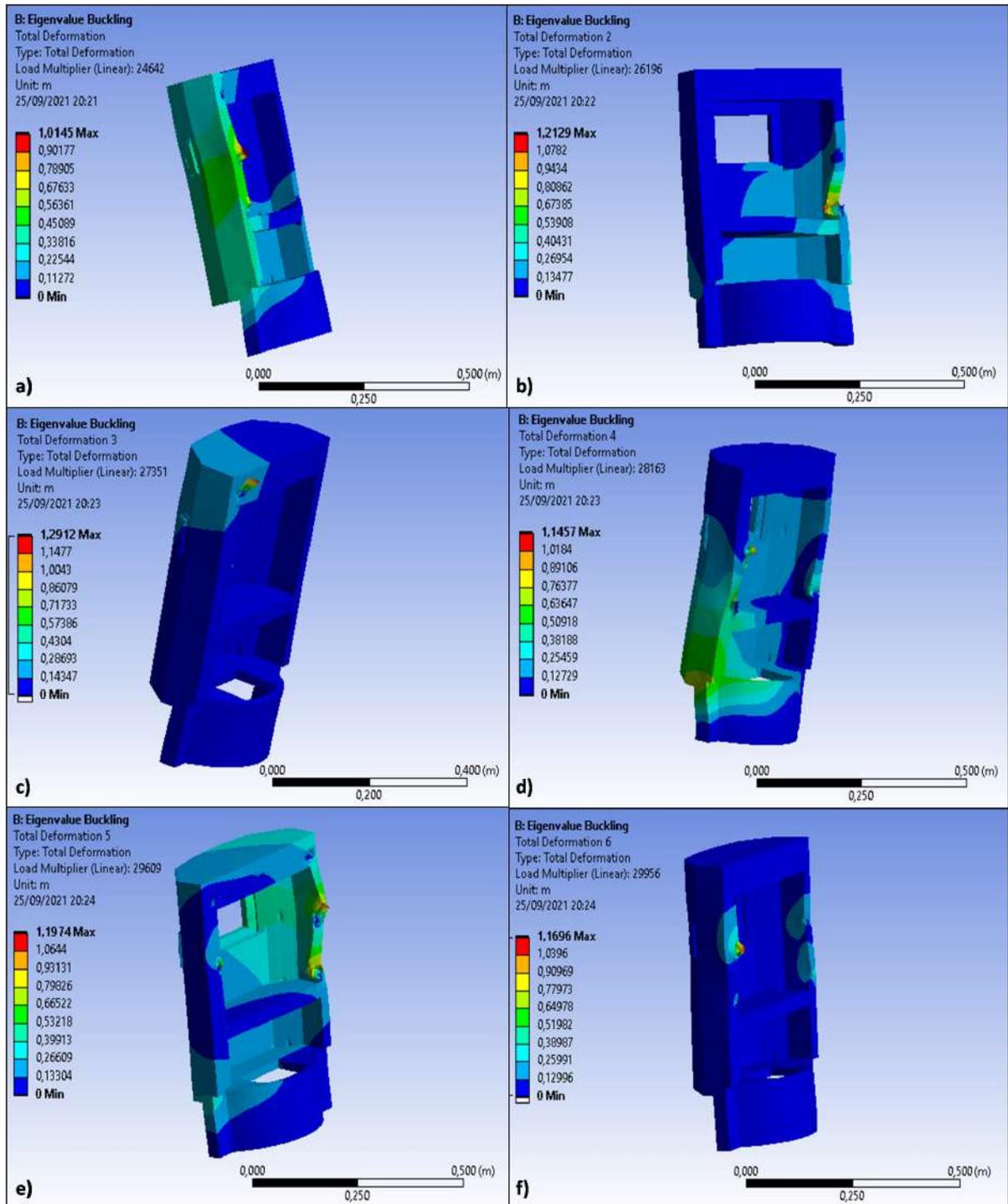
Fonte: Os autores

Portanto, analisando autovalores e as cargas críticas na Tabela 6.1, entende-se que são valores que não condiz com a realidade. Então, conclui-se que a bandeja não falha por flambagem, mas, caso falhe perante a solicitação proposta, será por compressão.

6.3.2 Análise de flambagem componente frontal

Posteriormente, determina-se os modos de flambagem do componente frontal da estrutural, conforme a Figura 6.11.

Figura 6.11 – Modos de Flambagem



Fonte: Os Autores

Em primeiro lugar, diferentemente da bandeja, todos os modos de flambagem gerados são flambagens locais, ou seja, colapso na estrutura, a partir da carga aplicada, irá ocorrer em locais específicos. Como é possível observar através das figuras acima, os locais de encaixe que falham, o que faz sentido, uma vez que estes são os responsáveis por fixar e sustentar o componente. Com base nos autovalores não são necessárias quaisquer preocupações, porém

uma maneira de se precaver, diante de valores de risco, seria aumentar a espessura dos encaixes (aumento da rigidez).

Logo, para analisar os resultados finais de cada carga critica, para cada modo de flambagem, criou-se a Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Valor final da carga critica para cada modo de flambagem

Modos de Flambagem	Autovalores	Carga resultante aplicada (Kg)	Carga critica (Kg)
1	24642	5	123.210
2	26196	5	130.980
3	27351	5	136.755
4	28163	5	140.815
5	29609	5	148.045
6	29956	5	149.780

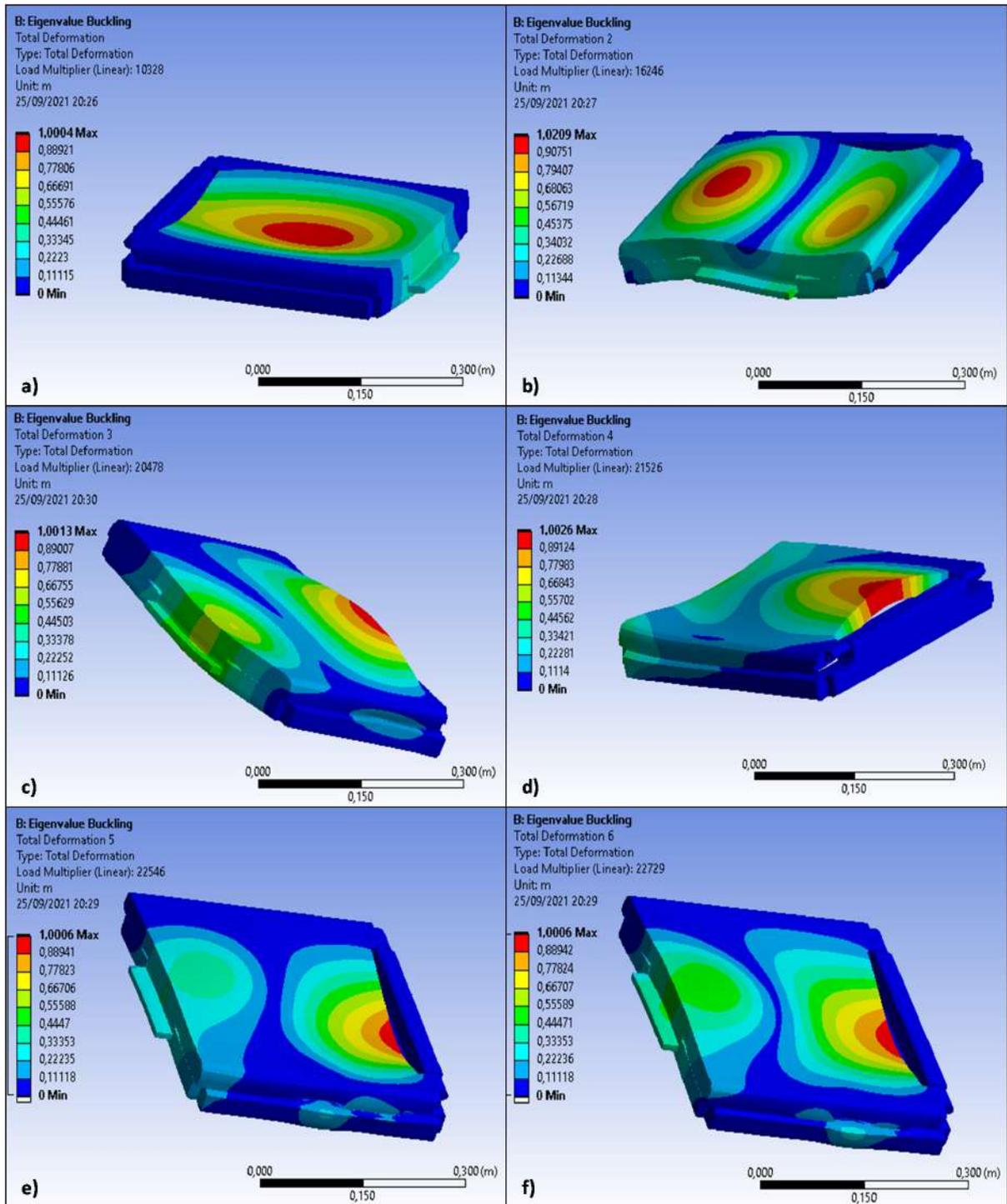
Fonte: Os autores

Assim sendo, observando os resultados dos autovalores e das cargas críticas é, de fato, inconsistente que a peça flambe. Dessa forma, conclui-se que a peça poderia falhar somente por compressão e não por flambagem.

6.3.3 Análise de flambagem do componente superior

Por fim, a partir das condições de contorno, definiu-se os modos de flambagem do componente superior apresentados na Figura 6.12.

Figura 6.12 – Modos de Flambagem



Fonte: Os Autores

Analisando os modos de flambagem da Figura 6.12, destaca-se o primeiro modo de flambagem, por este ser o único do tipo flambagem global. Já nos demais, verifica-se uma flambagem em locais específicos, ou seja, flambagem local. Além disso, observando os autovalores de cada modo de flambagem, constata-se, a partir da Equação 6.2 que o componente não falha

por flambagem. Dessa forma, para uma melhor verificação dos valores, elaborou-se a Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Valor final da carga critica para cada modo de flambagem

Modos de Flambagem	Autovalores	Carga resultante aplicada (Kg)	Carga critica (Kg)
1	10328	5	51.640
2	16246	5	81.230
3	20478	5	102.365
4	21526	5	107.630
5	22546	5	112.730
6	22729	5	113.645

Fonte: Os autores

Em analogia com as análises feitas aos autovalores e cargas críticas das peças anteriores, o componente superior segue a mesma ideia sobre não falhar por flambagem, mas podendo ser por compressão.

6.4 Análise Modal

Após a definição dos parâmetros necessários para a análise modal (condições de contorno, malha, material e etc.), criou-se a partir do *software* seis modos de vibração para cada componente, os quais apresentam diferentes tipos de deformações, definidos em metros, para suas respectivas frequências naturais (Hz). Logo, os autovalores de cada modo de vibração indicam o valor da frequência natural que a estrutura entrará em colapso, devido ao fenômeno de ressonância.

Dessa forma, a análise modal se faz importante para que o projetista possa deslocar as frequências naturais para valores adequados à sua estrutura, evitando, assim, o efeito de ressonância indesejado. É possível modificar essas frequências alterando a massa, a rigidez do sistema e até mesmo a geometria.

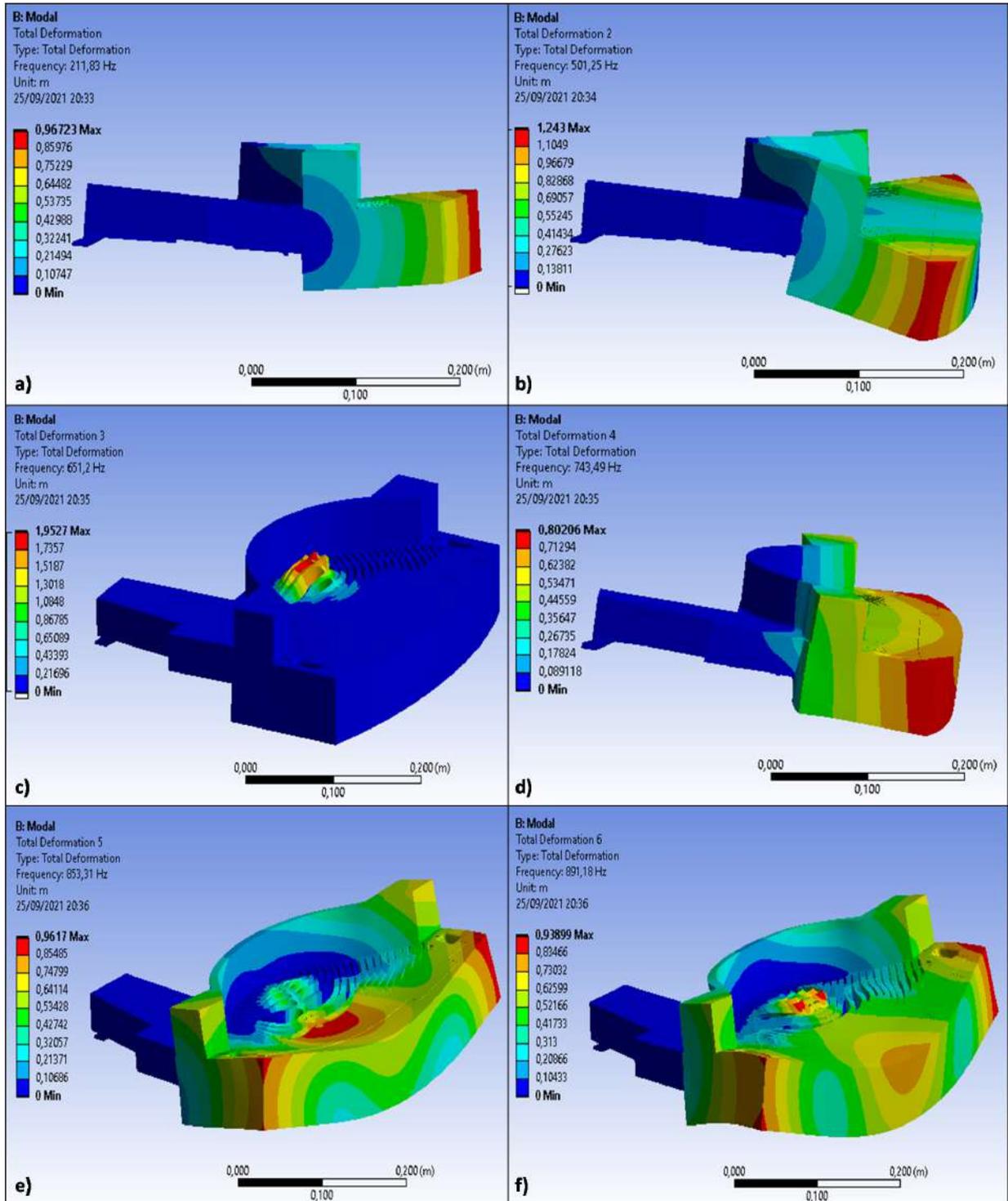
Além de analisar a frequência natural, é necessário observar a rotação por minuto (rpm) de um possível motor operando na cafeteira. Um motor desalinhado, desbalanceado ou com problemas de folgas, pode apresentar vibrações em toda a estrutura. Em vista disso, é indispensável que seja feita a conversão de frequência natural para rotação por minuto (rpm), como definido pela equação 6.3.

$$\text{Rotação por minuto (RPM)} = 60 \cdot \text{Frequência (Hz)} \quad (6.3)$$

6.4.1 Análise Modal Bandeja

Para análise modal da bandeja, obtiveram-se os seguintes modos de vibração apresentado na Figura 6.13.

Figura 6.13 – Modos de Vibração



Fonte: Os Autores

Com base nos resultados gerados em cada modo de vibração, verifica-se o comportamento da bandeja para cada tipo de frequência, sendo a região em vermelho a mais afetada. Além disso, conforme as frequências naturais geradas, a bandeja não corre risco de falhar por ressonância, em razão de que necessita-se no mínimo de 211,83 HZ, que de fato, é fora da realidade do projeto. Portanto, sabendo quais frequências naturais o componente entrará em ressonância, também é fundamental analisar a relação de rotação por minuto, especificado pela Equação 6.3. Através disso, desenvolveu-se a Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Conversão das frequências naturais para RPM de cada modo de vibração

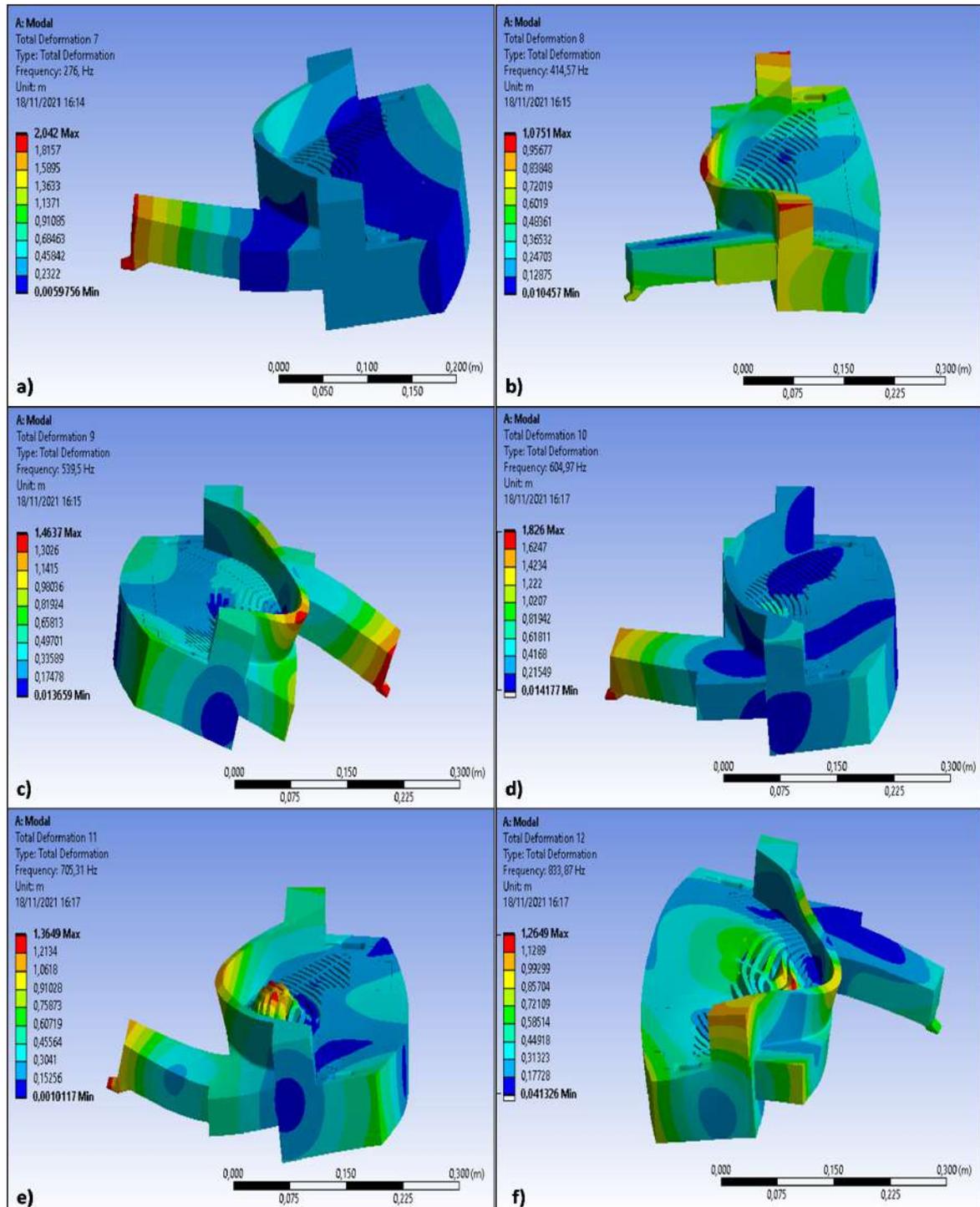
Modos de vibração	Frequência Natural (Hz)	RPM
1	211,83	12.709,8
2	501,25	30.075
3	651,2	39.072
4	743,49	44.609,4
5	853,31	51.198,6
6	891,18	53.470,8

Fonte: Os autores

Averiguando a Tabela 6.4, observa-se que a menor frequência natural é reproduzida pelo primeiro modo de vibração, ou seja, o mesmo valor representa uma condição mínima para que a cafeteira não entre em ressonância. Ademais, a partir dos valores expressivos de cada frequência natural, pode-se assegurar que a bandeja não falha por ressonância através de nenhum dos modos de vibração.

Dessa maneira, os resultados expressivos são devidos ao design robusto projetado (rígido) e suas condições de contorno impostas, o deixando ainda mais rígido, sendo que eventualmente e fisicamente isso pode ser diferente. Assim, para uma melhor análise sobre esses fatores, realizou-se a análise de vibração do corpo livre, apresentado na Figura 6.14.

Figura 6.14 – Modos de Vibração (livre)



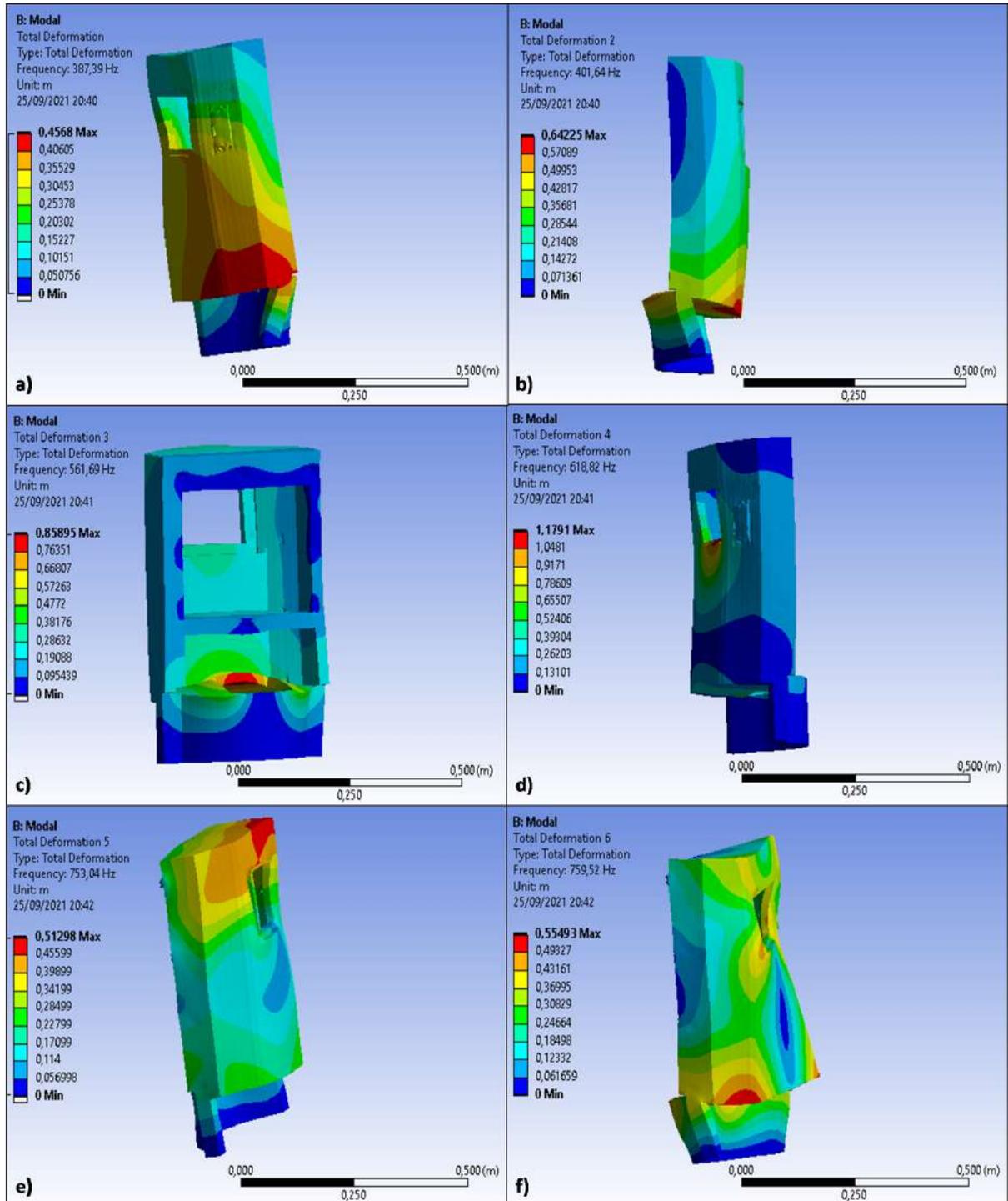
Fonte: Os Autores

Comparando os resultados dos modos de vibração da Figura 6.13 e 6.14, observa-se somente uma pequena variação sobre as frequências naturais. Permite-se dessa forma concluir que o componente realmente apresenta uma alta rigidez (robusto) e que suas condições de contorno não resulta em um aumento da sua rigidez de forma significativa. Portanto, não há risco de falhar por ressonância.

6.4.2 Análise modal componente frontal

Em seguida, realizou-se a análise modal para o componente frontal da estrutura, conforme a Figura 6.15.

Figura 6.15 – Modos de Vibração



Fonte: Os Autores

Logo, para cada modo de vibração apresentado pela Figura 6.15, é demonstrado, a partir de uma determinada frequência natural, um tipo diferente de deformação. Dessa forma, analisando os autovalores declarados pelo *software*, conclui-se que o componente não falha por ressonância, pelo fato de que somente entraria em colapso a partir de uma frequência natural mínima de 387,39 HZ, ou seja, sendo fora da realidade de operação do projeto.

Para uma melhor relação entre os valores das frequências naturais e de rotação por minuto para cada modo de vibração, elaborou-se a Tabela 6.5.

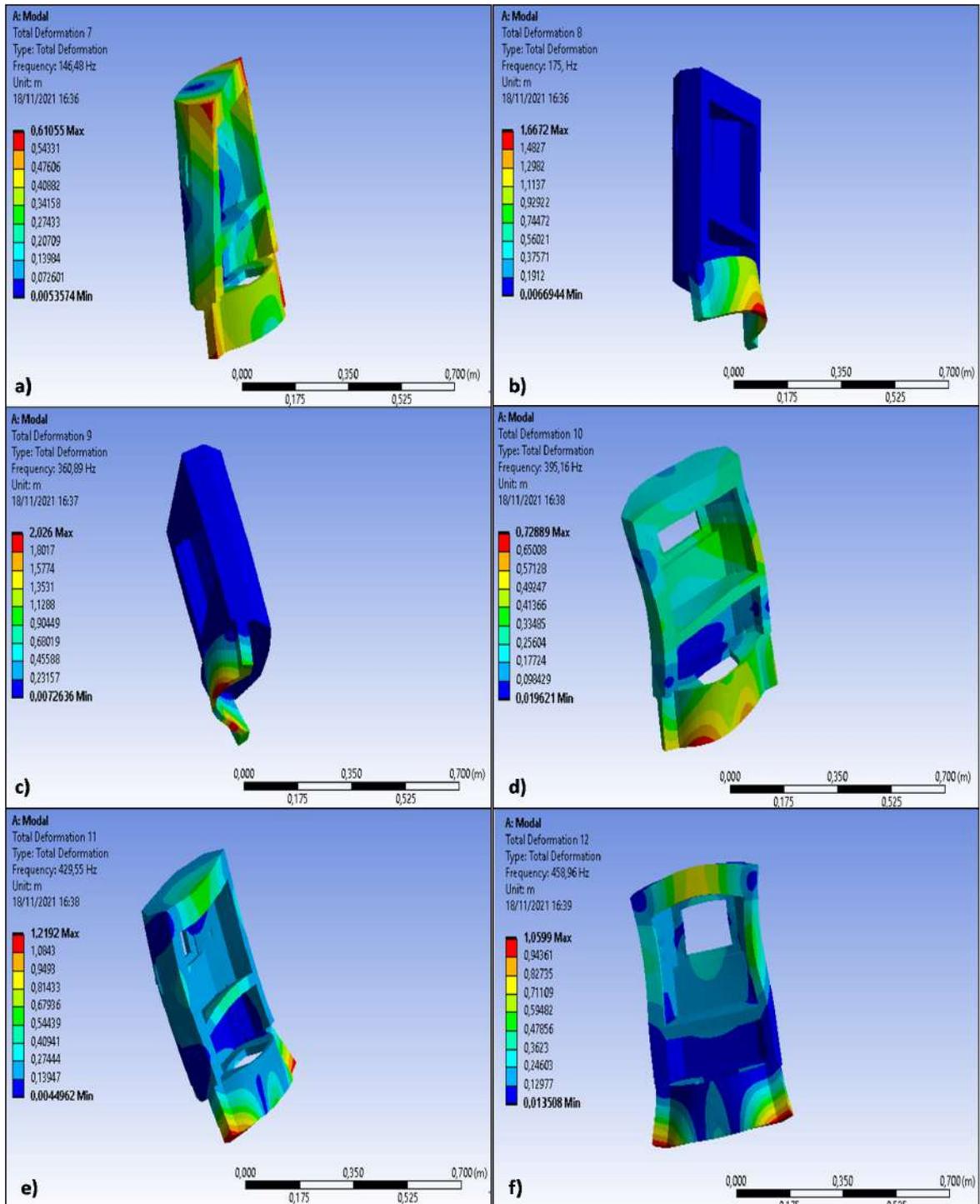
Tabela 6.5 – Conversão das frequências naturais para RPM de cada modo de vibração

Modos de vibração	Frequência Natural (Hz)	RPM
1	387,39	23.243,4
2	401,64	24.100,2
3	561,69	33.701,4
4	618,82	37.129,2
5	753,04	45.182,4
6	759,52	45.571,2

Fonte: Os autores

A partir das altas frequências naturais apresentadas em cada modo de vibração (??), verifica-se novamente a necessidade de analisar como o componente se comporta sem restrição (livre). Logo, na Figura 6.16 temos a análise de vibração livre do componente frontal.

Figura 6.16 – Modos de Vibração (livre)



Fonte: Os Autores

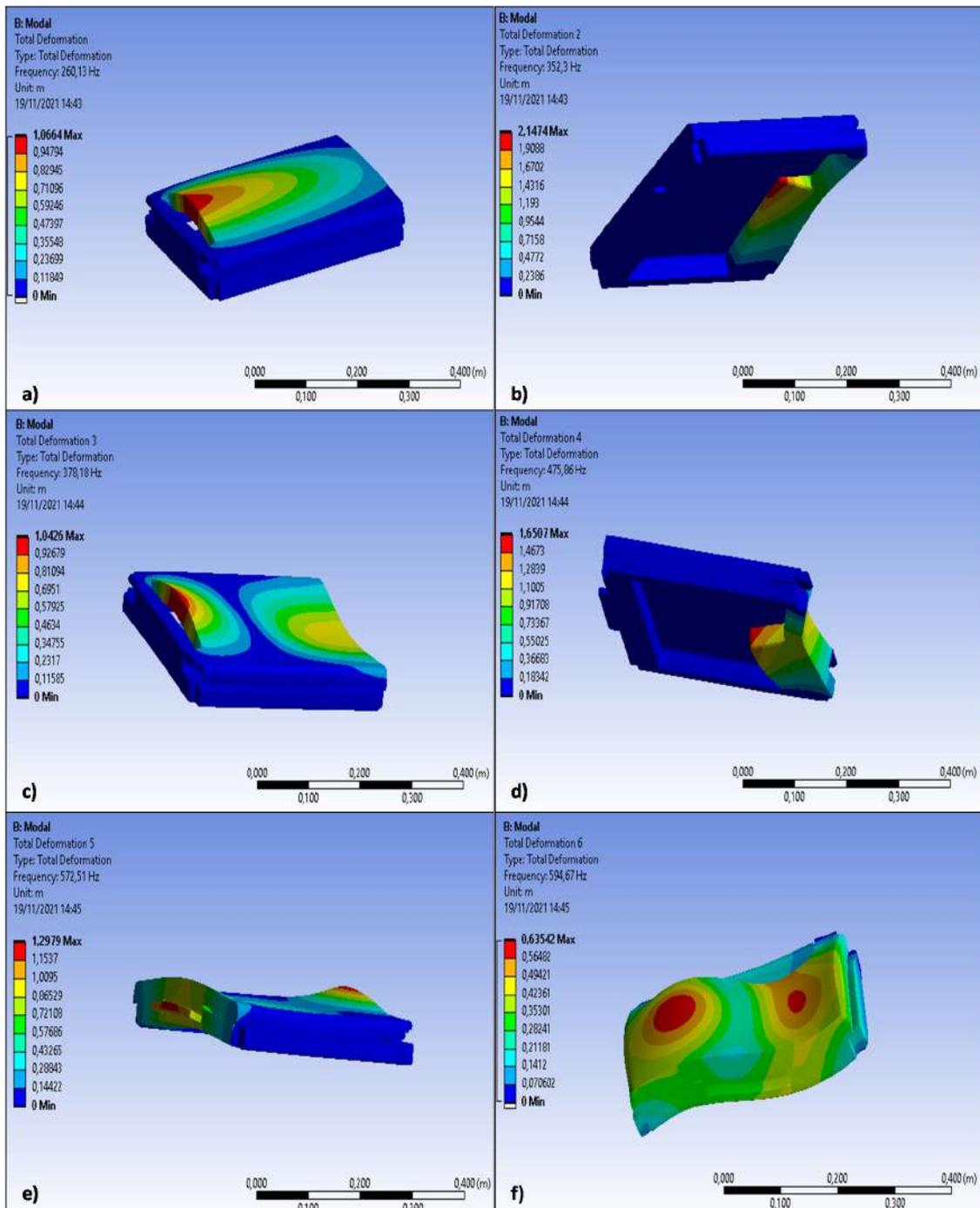
Avaliando os resultados apresentados na Figura 6.16, identifica-se uma alta robustez do componente, pelo fato de que a frequência natural mínima para que entre em ressonância é de 146,48 Hz. No entanto, ocorre uma maior variação em comparação aos valores obtidos nos modos de vibração da Figura 6.15, ou seja, as restrições aplicadas deixam o componente ainda

mais rígido. Assim, para saber se as condições de contorno aplicadas apresentam-se corretas, tem-se a necessidade de uma análise experimental para comparar os resultados.

6.4.3 Análise modal componente superior

Por fim, fez-se a análise modal no componente superior. O qual apresentou os seguintes modos de vibração, Figura 6.17.

Figura 6.17 – Modos de Vibração



Fonte: Os Autores

Avaliando os modos de vibração, observa-se pela Tabela 6.6 o mesmo padrão dos componentes anteriores, com altas frequências naturais e seus respectivos vetores de deslocamentos. Consequentemente, obtém-se a mesma conclusão de que o componente não falha por ressonância.

Tabela 6.6 – Conversão das frequências naturais para RPM de cada modo de vibração

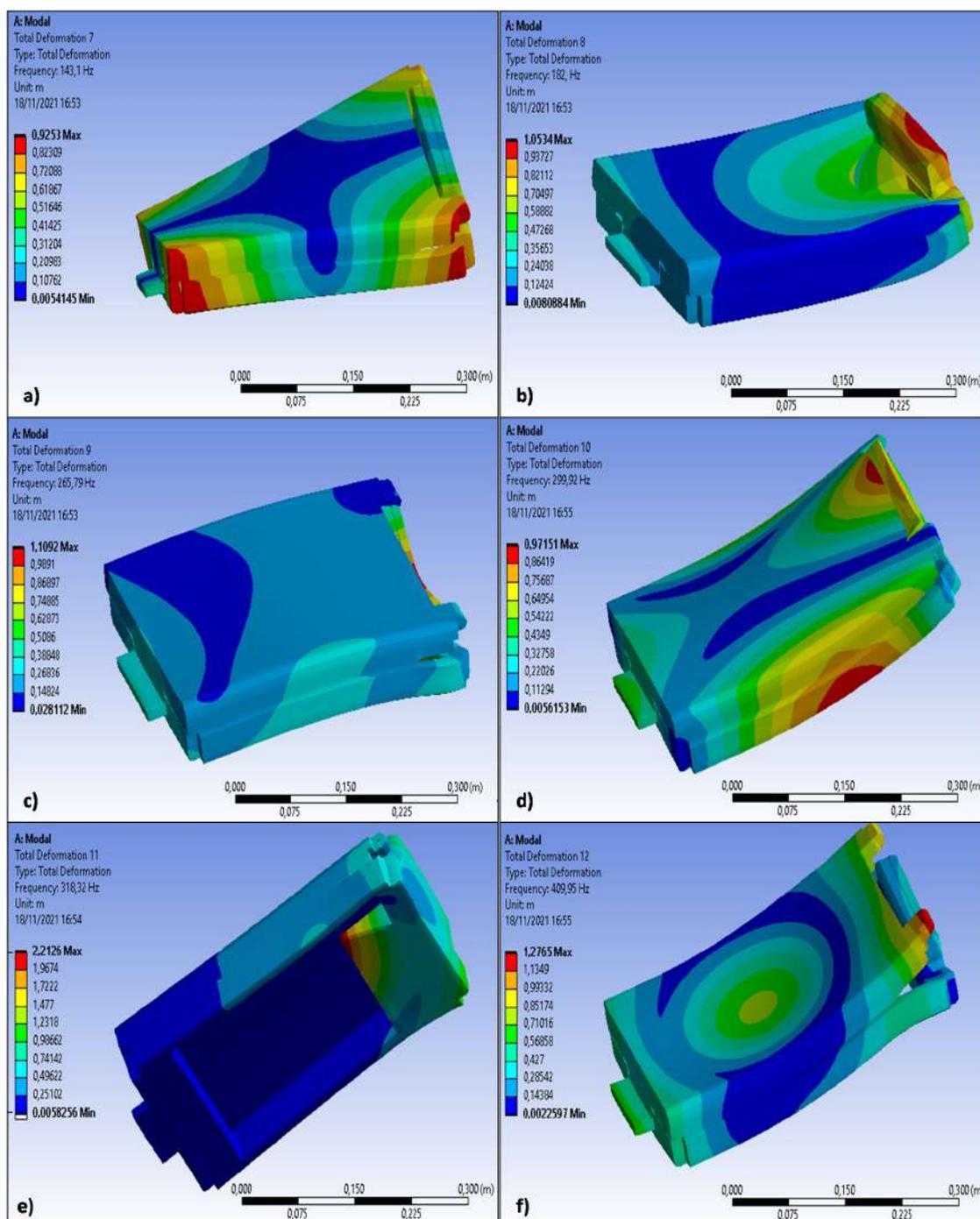
Modos de vibração	Frequência Natural (Hz)	RPM
1	261,82	15.709,2
2	378,68	22.720,8
3	386,45	23.187
4	573,78	34.426,8
5	594,39	35.663,4
6	768,75	46.125

Fonte: Os autores

Devido as altas frequências apresentadas em cada modo de vibração (Tabela 6.6), sendo a primeira acima de 261 Hz, o fenômeno de ressonância não acontece, o que indica em amplitudes de vibração muito baixas. Dessa maneira o efeito de falha por vibração é improvável no componente.

Diante disso, ocorre mais uma vez a necessidade de avaliar o componente sem restrição, ou seja, livre. Dado que, as restrições impostas podem aumentar a rigidez, sendo que fisicamente isso pode ser diferente. Portanto, pela Figura 6.18 nota-se a análise.

Figura 6.18 – Modos de Vibração (livre)



Fonte: Os Autores

Dessa forma, pelos valores apresentados constata-se primeiramente uma alta rigidez do componente. Além disso, não há realmente riscos do componente falhar por ressonância, pois são frequências naturais fora do campo de operação da estrutura. Entretanto, pode-se observar uma variação entre as frequências naturais dos modos de vibração da Figura 6.17 e Figura 6.18, pelo motivo das restrições aumentarem a rigidez do componente. Logo, para confirma-

se os resultados, necessita-se também de uma análise experimental no componente, como por exemplo, um análise modal com acelerômetro.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi feito o desenvolvimento da estrutura de uma cafeteira inteligente, através da metodologia *Design For Six Sigma* (DFSS), utilizando PLA como material para o processo de impressão 3D, na Universidade Federal de Lavras. Durante a sua execução foram realizados diversos estudos, aplicando diferentes ferramentas de planejamento e qualidade, que foram cruciais para que conseguíssemos desenvolver uma estrutura de baixo custo, fácil manutenção e montagem, atrativa e robusta. Neste sentido, conclui-se que o conjunto de ferramentas utilizado são extremamente eficiente para consolidar os objetivos planejados, pois fornecem uma metodologia segura para finalizar cada etapa do projeto. Ainda abordando as ferramentas disponíveis, conclui-se que a aplicação de um *Software* de CAD reduz o custo do projeto e o torna mais dinâmico, pelo fato de que possibilita obter de forma rápida, diferentes tipos de concepções.

Sobre a aplicação do *Software* de CAE, para as análises estruturais, conclui-se que dentro das limitações, é a melhor opção para se testar o comportamento de um projeto frente às possíveis solicitações que este poderá apresentar, pois permite a realização de diversos testes de maneira virtual em situações próximas da realizada, sem gastos com material.

Dessa forma, aos testes realizados, pode-se concluir que o equipamento apresenta altos níveis de segurança, devido que na Análise Estática Linear o valor mínimo obtido do coeficiente de segurança foi de 48. Já a análise de fadiga, realizada na Bandeja e no componente Frontal, são apresentas uma vida de 106 ciclos para ambos, o que confirma a resistência da estrutura. Para a análise de flambagem, os autovalores, resultaram-se em valores muito elevados, com uma carga crítica mínima de 843.840 N para a Bandeja, 123.210,00 N na Frontal e 51.640,00 na superior, comprovando que estes não falhariam por flambagem, porém, caso viessem a falhar por esta solicitação, seria por compressão. A estrutura mostrou resistente em relação a possíveis falhas por ressonância, sendo que a menor frequência a qual deveria evitar-se seria de 211,83 Hz, o que equivaleria a um motor de 12.709,8 RPM, que não condiz com a realidade de aplicação do equipamento. Além disso, os resultados das frequências naturais das análises de vibração livre demonstram a alta rigidez de cada componente. Portanto, afirma-se com base nos resultados de cada análise, que a estrutura satisfaz o objetivo de desenvolver um *Design* robusto, pelo fato de apresentar valores seguros em relação a cada tipo de falha.

Por fim, passadas todas estas etapas, pode-se definir que a estrutura tem um grande potencial competitivo no mercado, pois apresenta um design moderno, atrativo e resistente as

aplicações estipuladas (robusto), e ainda assim com baixo custo de execução. Concluindo então, que o presente trabalho conseguiu atingir os objetivos esperados, estando apto a ser impresso.

REFERÊNCIAS

- AAKER, D. A. **Administração estratégica de mercado**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- ABIC. **A Expansão do café no Brasil**. Associação Brasileira da Indústria do Café, 2007. Disponível em: <<https://www.abic.com.br/o-cafe/historia/a-expansao-do-cafe-no-brasil/>>. Acesso em: 03 nov. 2020.
- ALMEIDA, A. T. d.; FERREIRA, R. J. P.; CAVALCANTE, C. A. V. A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability. **IMA Journal of Management Mathematics**, Oxford University Press, v. 26, n. 3, p. 249–271, 2015.
- ANDERSEN, B.; PETTERSEN, P.-G. **Benchmarking handbook**. 1. ed. London: Chapman & Hall, 1995.
- ANDREWS, K. R. **The Concept of corporate strategy**. Universidade da Virgínia. Ed. Irwin. EUA, 1980.
- ARCHER, N. P.; GHASEMZADEH, F. An integrated framework for project portfolio selection. **International Journal of Project Management**, Elsevier, v. 17, n. 4, p. 207–216, 1999.
- AZEVEDO, Á. F. **Método dos elementos finitos**. 1. ed. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- BADOTTI, A. V. B. **Avaliação do processo de metalização superficial aplicado às peças obtidas por estereolitografia**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- BARBOSA, G. F. **Aplicação da metodologia DFMA-Design for Manufacturing and Assembly-no projeto e fabricação de aeronaves**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- BASSANI, A.; PESSAN, L. A.; JÚNIOR, E. H. Propriedades mecânicas de blendas de nylon-6/acrilonitrila-epdm-estireno (aes) compatibilizadas com copolímero acrílico reativo (mma-ma). **SciELO Brasil**, v. 12, n. 2, p. 102–108, 2002.
- BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. **Gestão, Tecnologia e Inovação: Revista Eletrônica dos Cursos de Engenharia, Curitiba**, v. 1, n. 3, p. 9–18, 2017.
- BOOTHROYD, G. et al. **Product design for manufacture and assembly**. 2. ed. New York, USA: Taylor Francis Group, 2002.
- BRITO, G. et al. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista eletrônica de materiais e Processos**, v. 6, n. 2, p. 127–139, 2011. Disponível em: <<http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/222/204>>. Acesso em: 15 dez. 2020.
- CAFEICULTURA. Dados sobre a produção e consumo de café no Brasil. **Revista Cafeicultura**, 2019. Disponível em: <<https://revistacafeicultura.com.br/?mat=69032>>. Acesso em: 03 nov. 2020.

- CARVALHO, M. P. et al. **Análise de tensões e deformações em estruturas termoplásticas usando o método de elementos finitos**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007.
- COOK, R. D. et al. **Concepts and applications of finite element analysis**. 3. ed. Madison, Wisconsin: John Wiley & Sons, 1989.
- COOPERCAM. ABCI acredita que o desafio do Brasil é exportar café de alta qualidade. **Cooperativa dos Cafeicultores de Campos Gerais e Campo do Meio**, 2019. Disponível em: <http://coopercam.com.br/noticias/selecionada/abic_exportacao_cafe>. Acesso em: 03 nov. 2020.
- COTIAN, L. F. P. **Engenharias, Ciência e Tecnologia 4**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. v. 4.
- CROWE, D. et al. **Desing for Reability**. Ebook. Morgan Hill, California, USA: CRC Press LLC, 2001. 223 p.
- DEGARMO, E. P. **Engineering economy**. New York, USA: MacmillanPublishingCo, 1979.
- DOBBRO, G. G. R. **Determinação de frequências naturais de passarela de concreto: análise modal experimental e método dos elementos finitos**. Monografia (Graduação) — Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2018.
- DORNELAS, J. C. A. **Empreendedorismo: transformando idéias em negócios**. Rio de Janeiro: Campus, 2001.
- EMBRAPA. Produtividade média dos cafés do Brasil equivale a 25 sacas por hectare em 2021. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/63114999/produktividade-media-dos-cafes-do-brasil-equivale-a-25-sacas-por-hectare-em-2021>>. Acesso em: 23 jun. 2021.
- FILHO, E. R. **Projeto do produto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- FRANCISCO, B. M. **Simulação no processo de injeção utilizando o software moldflow**. 40 p. Monografia (Graduação) — Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba, 2016.
- FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: a review. **Journal of Materials Engineering and performance**, Springer, v. 23, n. 6, p. 1917–1928, 2014.
- FU, Z.-F.; HE, J. **Modal analysis**. 1. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- FUSCALDI, K. D. C.; MARCELINO, G. F. **Análise SWOT: o caso da Secretaria de Política Agrícola**. Brasília: XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. SOBER – Universidade de Brasília, 2008.
- GARCIA, L. H. T. **Desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da tecnologia de manufatura aditiva**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- GEBHARDT, A. **Understanding additive manufacturing**. Munich: Hanser Publishers, 2011.

GRIMM, T. **User's guide to rapid prototyping**. [S.l.]: Society of Manufacturing Engineers, 2004.

ICHI, A. L. **Análise da viabilidade da aplicação da tecnologia CAD-CAM por prototipagem rápida na confecção de estrutura metálica da prótese parcial removível comparando-a ao método convencional**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

JOHNSON, J. et al. Designing new housing at the university of miami: a “six sigma” dmadv/dfss case study. **Quality Engineering**, Taylor & Francis, v. 18, n. 3, p. 299–323, 2006.

JÚNIOR Ênio L. **Implementação de estratégias de controle em uma impressora 3D**. Monografia (Graduação) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

KERZNER, H. **Project management metrics, KPIs, and dashboards: a guide to measuring and monitoring project performance**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

KIRSCH, U. **OptimumStructural Design**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc, 1981.

LEITE, M. S. R.; GASPAROTTO, A. M. S. Análise SWOT e suas funcionalidades: o autoconhecimento da empresa e sua importância. **Revista Interface Tecnológica**, v. 15, n. 2, p. 184–195, 2018.

LEONDES, C. T. **Structural Dynamic Systems Computational Techniques and Optimization: Computational Techniques**. [S.l.]: CRC Press, 1999. v. 13.

LETCHER, T.; WAYTASHEK, M. Material property testing of 3d-printed specimen in pla on an entry-level 3d printer. **ASME IMECE**, Montreal, CA, 2014. Disponível em: <file:///C:/Users/ITALO/Downloads/ASMEIMECE2014Paper-FINAL.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2014.

LIMA, M. F. **Estudo da Cadeia Produtiva do Polietileno Tereftalato (pet) na Região Metropolitana de Salvador como Subsídio para Análise do Ciclo de Vida**. 94 p. Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria) — Universidade Federal da Bahia, Sal, 2001.

LOVO, J. F. P.; FORTULAN, C. Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo fdm. **1º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**. São Carlos, 2016.

MANDELBAUM, J. **Value engineering handbook**. Virginia, USA, 2006. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA464089.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2021.

MARTINS, F. G.; COELHO, L. dos S. Aplicação do método de análise hierárquica do processo para o planejamento de ordens de manutenção em dutovias. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, n. 1, p. 65–80, 2012.

MARTINS, M. A. P. **Gestão Educacional: planejamento estratégico e marketing**. 1. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2007.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman e Artmed editora, 2013.

NÓBREGA P.G.B.; HANAI, J. **A Análise Modal na Avaliação de Estruturas de Concreto Pré-moldado**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado, São Carlos, 2005.

OLIVEIRA, M. G. d. **Análise de modo e efeito de falhas: gerenciamento de risco FMEA**. Monografia (Graduação) — Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2012.

OLIVEIRA, M. G. d. **Método de análise do processo de decisão do planejamento da inovação: uma contribuição para a avaliação e seleção de propostas de produtos inovadores**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

PALADY, P. **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram**. 3. ed. São Paulo: IMAM, 2004.

PEREIRA, R. de S. et al. **Priorização de projetos em uma indústria automobilística utilizando matriz trade-off e analytic hierarchy process**. XXXVIII encontro nacional de engenharia de produção, Maceió, Alagoas, 2018.

PINTO, M. I. A. **Análise Estratégica e desenvolvimento de uma estratégia de expansão para a Evoleo Technologies**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Economia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

PORTO, T. M. S. **Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil**. Monografia (Graduação) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

POSSAMAI, E. R. F. **Estudo do comportamento em fadiga do aço SAE 5160 aplicado em feixes de molas automotivas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

PRATA, R. F. et al. **Fundamentos do design for six sigma**. Bauru, SP, Brasil: XI SIMPEP, 2004. 7 p.

RAO, S. S. **Vibration of continuous systems**. 1. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007. v. 464. 1-16 p.

REDDY, J. **An Introduction to Finite Element Method**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc, 2000.

RIBEIRO, F. L. **Introdução ao método dos elementos finitos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2004.

RIBEIRO, R. J. B.; BLIACHERIENE, A. C. **Construindo o planejamento público: buscando a integração entre política, gestão e participação popular**. São Paulo: Editora Atlas SA, 2013.

RICH, N.; HOLWEG, M. Value analysis. **Value engineering**, Cardiff, UK, 2000. Disponível em: <https://www.urenio.org/tools/en/value_analysis.pdf>. Acesso em: 15 out. 2021.

ROLSTADAS, A. **Benchmarking - Theory and Practice**. 2. ed. New York, USA: Springer Science Business Media, LLC, 2001.

SANTANA, L. et al. Estudo comparativo entre petg e pla para impressão 3d através de caracterização térmica, química e mecânica. **SciELO Brasil**, Rio de Janeiro, v. 23, 2018.

SHAMES, I. **Energy and finite element methods in structural mechanics**. New Delhi: New AGE International Publishers, 2009.

SILVA, M. V. B. da. **Caracterização Mecânica de Materiais Utilizados em Prototipagem Rápida por Deposição de Material Fundido para Aplicação Aeroespacial**. Monografia (Graduação) — Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SLEEPER, A. D. **Design for Six Sigma Statistics**:. 59 Tools for Diagnosing and Solving Problems in DFSS Initiatives. Ebook. New York, USA: McGraw-Hill, 2006. 854 p.

SOBRAL, J.; ABREU, A. Manutenção produtiva total. **Manutenção Produtiva Total e Gestão Lean**, 2013.

STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**. Milwaukee: American Society for Quality, Quality Press, 2003.

TAVARES, J. M. R. S.; PADILHA, A. J. M. N. **Introdução ao método dos elementos finitos**. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998.

TOLEDO, J. C. d. et al. **FMEA-Análise do tipo e efeito de falha**. GEPEQ–Grupo de Estudos e Pesquisa em Qualidade-DEP–UFSCar. Apostila, 2010.

TSCIPTSCHIN, P. **Método de Elementos Finitos Aplicado à Seleção de Materiais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2007.

WANG, F.-K.; YEH, C.-T.; CHU, T.-P. Using the design for six sigma approach with triz for new product development. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 98, p. 522–530, 2016.

WIREMAN, T. **Benchmarking Best Practices for Maintenance, Reliability and Asset Management**. 3. ed. New York, USA: Industrial Press, 2014.

ZUÑIGA, A. **lanejamento Estratégico: Caso Consulting**. Monografia (Especialização em Gestão Empresarial) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ANEXO A – Matriz de Tomada de Decisão Para Concepções

Tabela 1 – Matriz de Tomada de Decisão Para Concepções

	Produção		Aplicação		Beleza			TOTAL
	Montabilidade	Manufaturabilidade	Interação Usuário/Máquina	Robustez Aparente	Beleza Aparente	Modernidade Aparente		
Concepção 1	3	3	3	3	4	5	21	
Concepção 2	4	3	3	4	3	3	20	
Concepção 3	4	4	3	5	3	3	22	
Concepção 4	3	3	3	4	4	4	21	
Concepção 5	3	3	3	3	4	5	21	
Concepção 6	4	5	3	4	3	4	23	
Concepção 7	4	4	4	5	4	4	25	
Concepção 8	5	5	4	5	5	5	29	
Concepção 9	4	4	5	5	4	5	27	
Concepção 10	5	5	5	5	5	5	30	

Fonte: Os Autores

ANEXO B – FMEA

Tabela 2 – FMEA

Componente	Função do componente	Modo(s) de falha	Efeito(s) Potencial(is) de Falha(s)	Severidade	Deteção de falha	Ação corretiva recomendada
Bandeja	Apoio de copo (tela não fixa)	Tela - Espessura Fina	Deformação ou rompimento da tela	8	2	Aumentar a rigidez e realizar análises de tensões antes e mensalmente durante o uso da estrutura
	Apoio de copo (tela não fixa)	Tela - Derramamento de café	Dano na peça	8	2	Manutenção Preditiva - Realizar inspeção quinzenal na tela
	Dirigir os respingos internos da máquina	Região da Canaleta - Danificada	Vazamento	8	3	Manutenção Preditiva - Realizar inspeção quinzenal na canaleta
	Apoio de copo	Estrutura - Encaixes desnivelados do conjunto	Desnivel	8	2	Realizar o nivelamento em software
	Suporte da tela	Estrutura - Interfaces danificadas	Vazamento	8	3	Manutenção Preditiva - Realizar inspeção quinzenal na canaleta
	Suporte da tela	Estrutura - Vibração excessiva	Deformação	8	2	Manutenção Preditiva - Realizar análises de vibração antes e mensalmente durante o uso da estrutura
Componente Frontal	Câmara de recepção de resíduo (canaleta & tela)	Acúmulo e Encrustamento de Sujidades	Influência negativa na aparência do equipamento; Mal cheiro; Acúmulo de insetos; Risco de food safety	10	1	Realizar limpeza de dois em dois dias nos locais; Em dias de pico de consumo, realizar limpeza no mesmo dia.
	Proteção frontal da cafeteira	Estrutura - Espessura fina	Deformação ou rompimento	8	2	Aumentar a rigidez e realizar análises de tensões antes e mensalmente durante o uso da estrutura
	Proteção frontal da cafeteira	Estrutura - Vibração excessiva	Deformação	8	2	Realizar análises de vibração antes e mensalmente durante o uso da estrutura
	Proteção frontal da cafeteira	Afrouxamento dos parafusos de fixação com o suporte de Alumínio	Rompimento da estrutura	9	2	Manutenção Preditiva - Realizar inspeção mensalmente dos parafusos de fixação
Componente Superior	Receber as matérias primas	Estrutura - Espessura fina	Deformação ou rompimento	8	2	Aumentar a rigidez e realizar análises de tensões antes e mensalmente durante o uso da estrutura
	Receber as matérias primas	Estrutura - Vibração excessiva	Deformação	8	2	Manutenção Preditiva - Realizar análises de vibração antes e mensalmente durante o uso da estrutura

Fonte: Os Autores