

PROJETO DE UMA MÁQUINA DE TERMOFORMAGEM À VÁCUO

Hugo Tison¹

Anderson Daleffe²

Resumo: A termoformagem de polímeros é um dos métodos de conformação considerado mais simples, além de ser econômico. Dentro da indústria é uma área pouco desenvolvida e que vem em ascensão. O maquinário para a produção de polímeros termoformados é relativamente barato se comparado a outros sistemas de conformação. Os polímeros por seu custo consideravelmente baixo, e por substituir o aço em ambientes específicos, vem crescendo dentro da indústria como nova possibilidade, como por exemplo ambientes onde o aço é exposto a muita oxidação, com a substituição por plástico pode prolongar a vida útil de um equipamento. Com o avanço de softwares de simulação, dependendo da aplicação pode se construir perfis de polímeros extremamente resistentes, capazes de substituir o aço sem ter que aumentar bruscamente suas dimensões físicas.

O processo de termoformagem auxilia na produção de peças com um bom acabamento, gerando diversos formatos diferentes. Estas peças podem ser úteis na indústria dos polímeros e também na indústria em geral, na aplicação de novos produtos, protótipos, formação de carenagens e peças de acabamento.

Foi desenvolvido um projeto de uma máquina de termoformagem a vácuo, com um sistema semiautomático, capaz de moldar peças mais robustas, pretendendo ser um sistema simples e rápido, além de ter um grande foco na parte de segurança do operador. O ideal do projeto foi produzir uma máquina que conseguisse termoformar um capô de um veículo baja-sae, com ênfase na tecnologia diferencial das máquinas concorrentes do mercado, para que a própria máquina seja mais intuitiva e fácil de ser operada, o projeto conta com atuadores pneumáticos para todos os componentes móveis que manipulam a chapa polimérica. A etapa seguinte do projeto consistiu numa análise de risco conforme a norma NR12. Utilizando assim uma cortina de luz na única parte onde o operador tem contato com a peça, desarmando seu funcionamento caso a cortina detecte algum objetivo durante a termoformagem de uma peça. Estes atuadores e o sistema de segurança, colaboram para que no cotidiano do operador, o mesmo consiga reduzir chances de acidentes e lesões por fadiga do trabalho. Por fim todos os componentes pneumáticos foram validados por cálculos, e o projeto se tornou pronto para a construção de seu primeiro protótipo.

Palavras-Chave: Termoformagem. Polímero. Vacuum forming. Atuadores pneumáticos. NR-12.

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: hugo.tison@hotmail.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Atualmente os materiais poliméricos têm sido utilizados nas mais diversas áreas das indústrias, e com a elaboração de polímeros cada vez mais resistentes, o uso deles pode ser a opção mais viável para diversas aplicações.

Dentro das várias formas de transformação de matéria-prima polimérica em uma peça, o trabalho se aprofundou na termoformagem a vácuo de chapas poliméricas.

A termoformagem é uma técnica utilizada para a obtenção de produtos poliméricos de diversas áreas, como embalagens alimentícias, peças automotivas e moldes para laminação de fibra de vidro, sua grande utilização ocorre pelo seu baixo custo e sua grande versatilidade (ALMEIDA, 2014).

O processo de termoformagem consiste em aquecer um termoplástico semi-acabado até a temperatura de formação ser atingida e subsequentemente, a forma desejada é obtida por meio da diferença de pressão e alongamento mecânico. Este processo é realizado na maioria das vezes utilizando apenas uma superfície do molde (ENGELMANN, 2012).

Embora a termoformagem esteja frequentemente associada à fabricação de embalagens de alimentos e materiais descartáveis, as vantagens de custo e tempo que esse processo pode trazer são aplicadas a uma gama de produtos de diversos setores da indústria. (SRINIVASAN, 2010)

O presente trabalho foca no projeto de uma máquina de termoformagem a vácuo, com o objetivo geral de formar um Capô de um veículo mini-baja. Também sendo aplicados para outras peças como moldes de laminação, peças teste dentro da indústria e carenagens para máquinas menores.

O capô do veículo da equipe BAJA SATC teve suas dimensões usadas como referência, sendo assim; comprimento de 380mm, largura de 325 mm e altura de 250mm. Foi considerada uma área de termoformagem que contemplasse essas medidas, tentando manter as dimensões da máquina menores possíveis, para que a mesma possa ser colocada em lugares confinados, e seja fácil de transportar.

Observou-se que as máquinas já consolidadas no mercado que formam produtos semelhantes ao deste projeto, não contam com itens de segurança. Sendo

muitas vezes totalmente expostas, além de todos os acionamentos serem manuais, exigindo do operador um contato direto com o processo.

Portanto o projeto conta com uma máquina adequada a NR12, dessa forma prevenindo possíveis acidentes com o operador, e fazendo com que o operador tenha menor contato com a peça possível durante o processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A palavra polímero pode ser dividida em duas partes: o prefixo poli, que significa muita (o) s, e mero, que pode ser entendido como unidade de repetição. Logo, um polímero pode ser identificado como uma substância que em sua composição tem uma parte que se repete inúmeras vezes, essa unidade pode ser chamada de monômero, onde o prefixo mono indica apenas uma unidade repetitiva, a qual reage com outra semelhante para se obter o polímero. Esse processo reacional é conhecido como polimerização e ocorre mediante a ação de calor, pressão, catalisador (es) e reagentes, dentro de um reator. Os polímeros podem ser derivados do petróleo, do gás natural e do carvão na grande maioria (ALMEIDA, 2014).

Atualmente se estuda fortemente a utilização de outras fontes de matéria-prima, visando criar materiais menos nocivos ao meio ambiente, a exemplo o polímero obtido através da cana-de-açúcar (ALMEIDA, 2014).

Dentre as propriedades químicas mais importantes dos materiais poliméricos, relacionado a sua aplicação, podemos citar, a resistência à oxidação, ao calor, a radiação ultravioleta, à água e ácidos e bases, solventes e reagentes. (BIASOTTO, 2019)

2.1 ETAPAS DO PROCESSO DE TERMOFORMAGEM

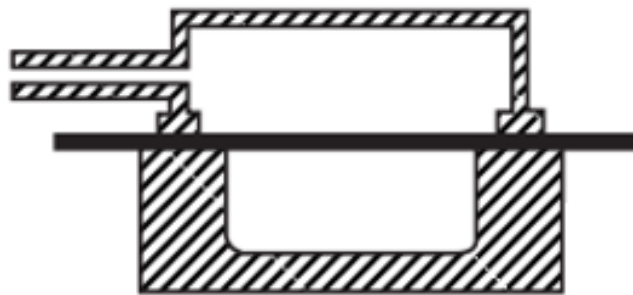
Na termoformagem, a chapa termoplástica é o elemento mais importante. Durante o processo de termoformagem onde ela será moldada até alcançar seu ponto de amolecimento, deve-se utilizar uma pressão baixa porque o polímero a ser moldado é menos resistente que o material do molde (SRINIVASAN, 2010).

O Processo de termoformagem varia conforme o produto que se almeja obter, mas seu processo básico passa pelas etapas a seguir;

2.1.1 Fixação da Chapa

Primeiro passo seria a fixação da chapa, prendendo ela em todas as suas extremidades, evitando assim que a passagem de ar ocorra por dentro da chapa, caso ela não esteja bem fixa, essa passagem do ar pode atrapalhar o processo danificando o acabamento e a forma do produto final, na Fig. 1, temos a representação desse processo. (SRINIVASAN, 2010).

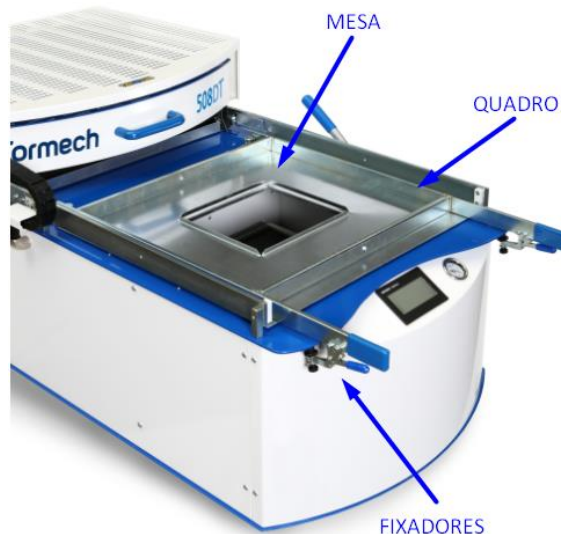
Figura 1: Fixação da Peça



Fonte: Adaptado de Srinivasan (2010)

Essa fixação em máquinas geralmente se utiliza a mesa com um rasgo no meio (parte que será termoformada) e um quadro que prenderá as extremidades, este quadro deve prender a peça sobre a mesa. Muitas vezes fixados por parafusos ou encaixes rápidos de pressão, conforme a Fig. 2 demonstrada abaixo, alguns casos utilizam essa mesa móvel para cima e para baixo e o molde permanece estático;

Figura 2: Componentes de fixação



Fonte: Adaptado de Formech (2010)

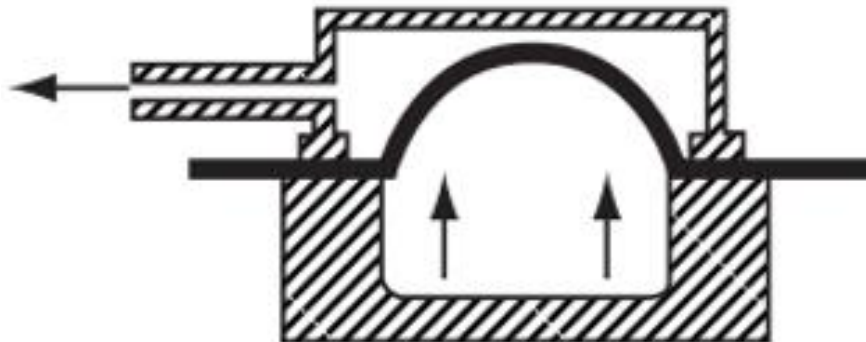
2.1.2 Alongamento da Chapa

Após a fixação se inicia o processo de aquecimento da chapa, de forma que a chapa entre no estado de amolecimento, os mecanismos mais utilizados para o aquecimento das chapas são resistências elétricas e gás natural formando uma espécie de forno.

Este forno pode se aproximar da chapa, geralmente construído como uma gaveta ou pode vir de cima para baixo. Em casos onde a base da chapa for móvel, o forno permanece no local e a chapa que se aproxima dele.

A etapa seguinte é o processo de *pre-stretch*, ou alongamento. Já em estado de amolecimento, nessa etapa a chapa sofre uma deformação que antecede seu contato com o molde, pode ser provocado por algum mecanismo com característica de sopro, ou em alguns projetos esse alongamento se faz em função da gravidade. Na Fig. 3, temos a representação desse processo. (SRINIVASAN, 2010).

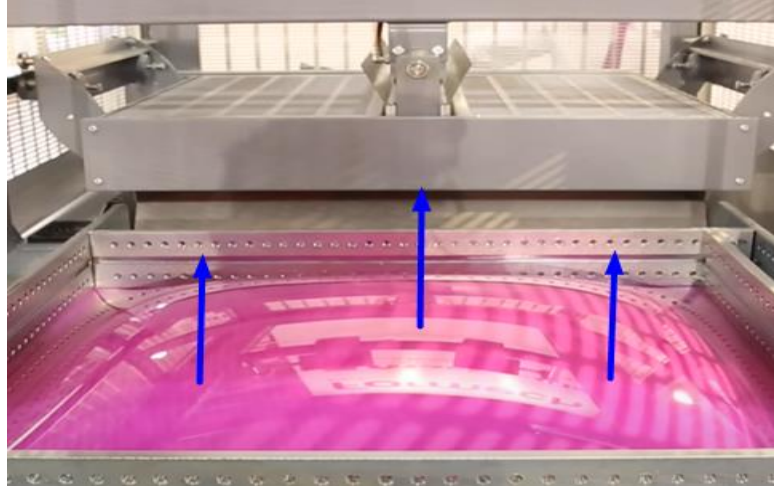
Figura 3: *Pre-stretch*.



Fonte: Adaptado de Srinivasan (2010)

O Pre-stretch pode ser provocado por mecanismo diferentes, dependendo da forma construtiva da máquina de termoformagem, no exemplo da Fig. 4 a chapa passa por esse processo através de um sopro, empurrando assim a superfície da chapa para cima, evidenciando o seu ponto de amolecimento.

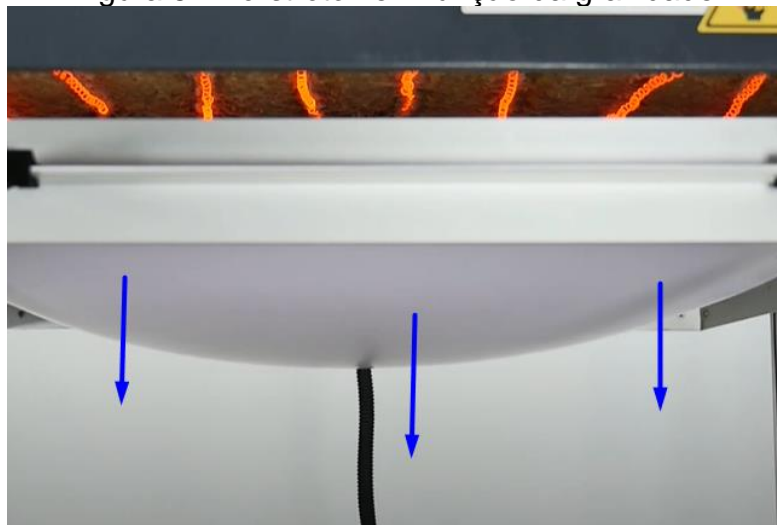
Figura 4: *Pre-stretch* em função de mecanismo de sopro.



Fonte: Adaptado de Formech (2016)

Em outras máquinas de termoformagem o processo de *pre-stretch* pode ser diferente, são as máquinas onde a mesa que apoia o molde é fixa, e o quadro de fixação da chapa é móvel. A Fig. 5 demonstra como seria esse processo.

Figura 5: *Pre-stretch* em função da gravidade.



Fonte: adaptado de Make & Tinker (2020)

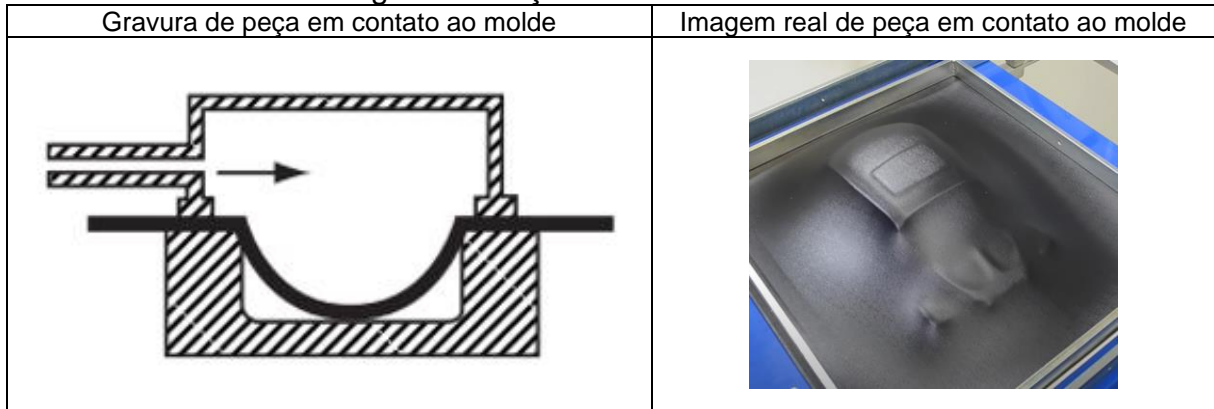
Desta forma o *Pre-stretch* é feito a partir de ação da gravidade, causando uma espécie de barriga na chapa quando ela entra em seu estado de amolecimento.

2.1.3 Primeiro Contato da Chapa com o Molde

Após a etapa de alongamento a chapa entra em contato com o molde, podendo a chapa ir até o molde, ou o contrário, essa etapa a peça começa a tomar

sua forma inicial, na Fig. 6 está demonstrado um caso teórico de como seria esse processo e ao lado, sua aplicação real (SRINIVASAN, 2010).

Figura 6: Peça em contato ao molde.



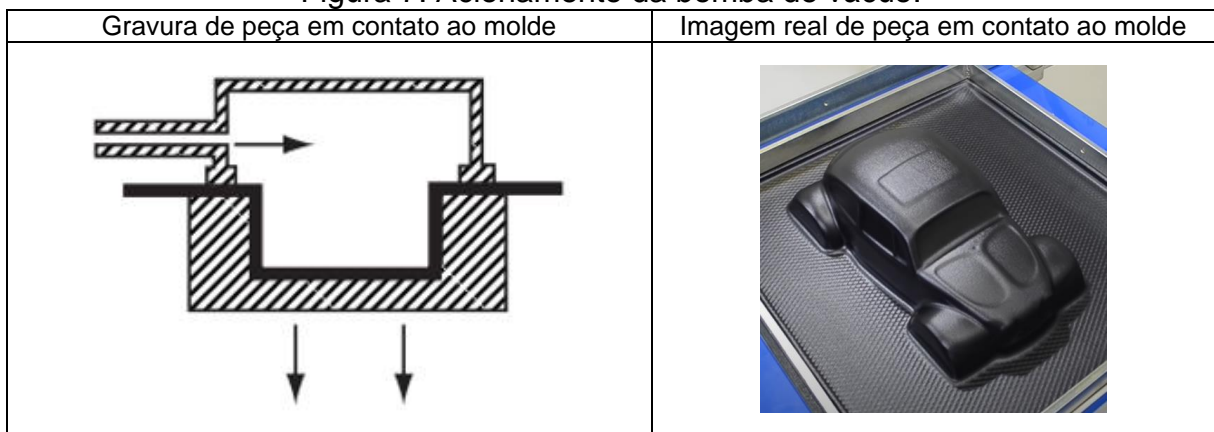
Fonte: adaptado de (Srinivasan, 2010 e Formech, 2014).

Apenas fazendo o contato com a chapa e marcando os vincos o ideal é que o grosso da termofixagem já se molde nessa etapa, deixando para que na próxima etapa apenas fique os detalhes e as superfícies mais complexas.

2.1.4 Acionamento da bomba de vácuo

No processo final de termofixagem é onde se utiliza o vácuo, uma bomba é ativada para que a peça incorpore o máximo da superfície do molde, formando cantos e vincos que sem o vácuo não seria possível, na Fig. 7 está demonstrado um caso teórico de como seria esse processo e ao lado, sua aplicação real (SRINIVASAN, 2010).

Figura 7: Acionamento da bomba de vácuo.



Fonte: adaptado de (Srinivasan, 2010 e Formech, 2014).

O vácuo em poucos segundos molda os detalhes finais da peça, deixando ela com o aspecto do seu resultado, respeitando todas as condições do molde

Alguns processos com cavidades mais profundas podem ser necessários à utilização de um êmbolo automático para ajudar na formação, a exemplo a Fig. 8 demonstrada abaixo. (SRINIVASAN, 2010).

Figura 8: Assistência de *plug* na modelagem final.



Fonte: Adaptado de Formech (2014)

Após este processo um resfriamento da peça deve ser feito, de modo com que a peça volte para sua condição e sua propriedade Inicial, esse resfriamento pode ser feito de maneira natural, ou muitas vezes se faz necessário a utilização de ventiladores para otimizar o processo e o tempo de fabricação (SRINIVASAN, 2010).

2.2 MOLDES PARA TERMOFORMAGEM

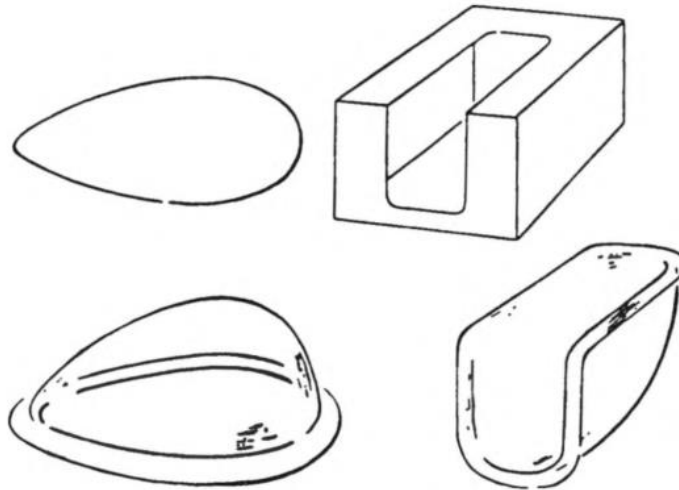
O princípio da termoformagem em base é simples, porém ao ter uma peça em mente, a definição do molde a ser utilizado pode ser mais complexa.

Nesta etapa se deve escolher um molde que proporcione um melhor acabamento na peça, um menor desperdício de material e o menor tempo de fabricação. Cada sistema de moldagem tem suas características e existem diversos, abaixo segue alguns dos mais utilizados.

2.2.1 Sistema Ondulado

Sistema ondulado, também conhecido com formação livre ou bolha, esse sistema não depende de um contato com molde, aquecido e moldado pelo ar dentro de uma câmara de pressão, nesse caso o diferencial de pressão para que a chapa tome uma forma sendo ela côncava ou convexa. Este processo em caso de produção seriada deve ter um excelente controle do ar e pressão na câmara, pois isso vai influenciar diretamente no acabamento das peças e em sua padronização. Na Fig. 9 abaixo, segue exemplo de peças formadas por este método (GRUENWALD, 1998).

Figura 9: Acabamento final do processo de formação livre.

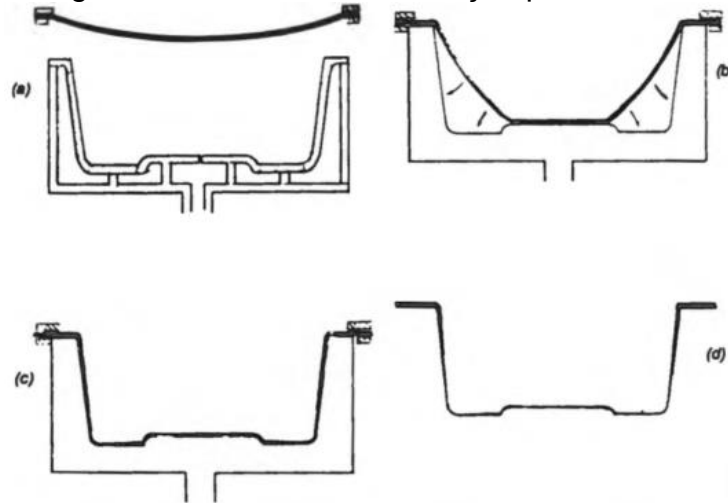


Fonte: Adaptado de Gruenwald (1998)

2.2.2 Sistema de Formação Direta

Um dos sistemas mais utilizados é o de formação por cavidade, também conhecido como formação direta ou simples. Neste caso se usa um molde fêmea negativo, côncavo ou convexo. A chapa é aquecida e entra em contato com as bordas do molde, desta forma o ar que passaria entre a peça e o molde é bloqueado. A folha entra em contato com o molde aquecida pressão atmosférica e após se acomodar no molde, a bomba de vácuo é ligada para tomar a formação final da peça, na Fig.10 segue exemplo desse processo de termoformagem (GRUENWALD, 1998).

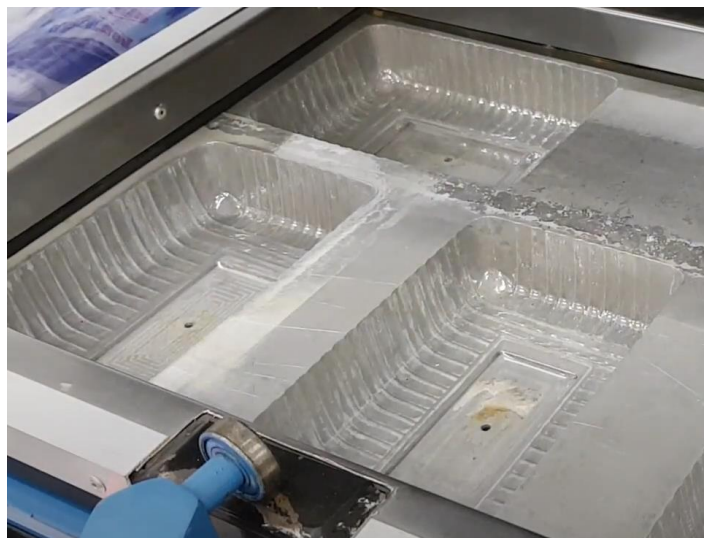
Figura 10: Processo de formação por cavidade.



Fonte: Adaptado de Gruenwald (1998)

O método de conformação positiva é frequentemente usado em aplicações de máquina de chapas, na Fig. 11 demonstra um caso real desse método (ENGELMANN, 2012).

Figura 11: Processo de formação por cavidade em embalagens de alimentos.



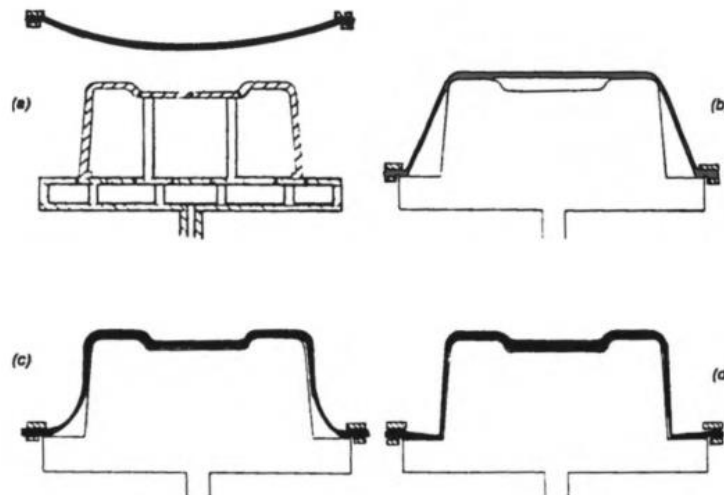
Fonte: Adaptado de Flock Color (2019)

Este processo é considerado um dos mais simples e é adequado para peças rasas, visto que quanto maior for uma cavidade menor a espessura da chapa na extremidade da peça (GRUENWALD, 1998).

2.2.3 Sistema de Formação por Cortina

O terceiro método básico de formação é conhecido como formação de cortina, este utiliza um molde macho, positivo e convexo. Neste processo a chapa polimérica é presa a um quadro em todas as extremidades. Quando o material é aquecido o quadro abaixa até que a folha se encaixe no molde. Este pode ser feito com o quadro com a chapa fixa e o molde móvel se movimentando de baixo para cima em direção a chapa. A lâmina polimérica entrará primeiro em contato com as áreas elevadas do molde, que conseguem se solidificar com a espessura próxima de original do início do processo, a área restante da lâmina se estica durante o movimento para baixo, a parte com mais afinamento ocorre nas formadas no processo final, apenas pelo vácuo. Na Fig. 12 segue exemplo desse processo de termoformagem (GRUENWALD, 1998).

Figura 12: Processo de formação por cortina.



Fonte: Adaptado de Gruenwald (1998)

Neste método de formação, o produto semi-acabado é puxado sobre a forma do molde, o formato está no interior da peça acabada, na Fig. 13 o exemplo desse processo aplicado em um caso real (ENGELMANN, 2012).

Figura 13: Processo de formação por cortina.



Fonte: Adaptado de Formech (2010)

2.2.4 Utilização de Plug-Assist

A termoformagem por *plug-assist* consiste em uma força auxiliar utilizada por um plugue contra uma cavidade, forçando o molde sobre suas paredes mais finas.

É utilizado em áreas mais profundas, onde a termoformagem normal não consegue formar, como por exemplo furos. (SRINIVASAN, 2010).

Estes plugs são muitas vezes feitos de materiais sintéticos, como espuma. São cobertos por um revestimento deslizante, que tem como objetivo diminuir a aderência, evitando deformar a superfície da cavidade. (SRINIVASAN, 2010).

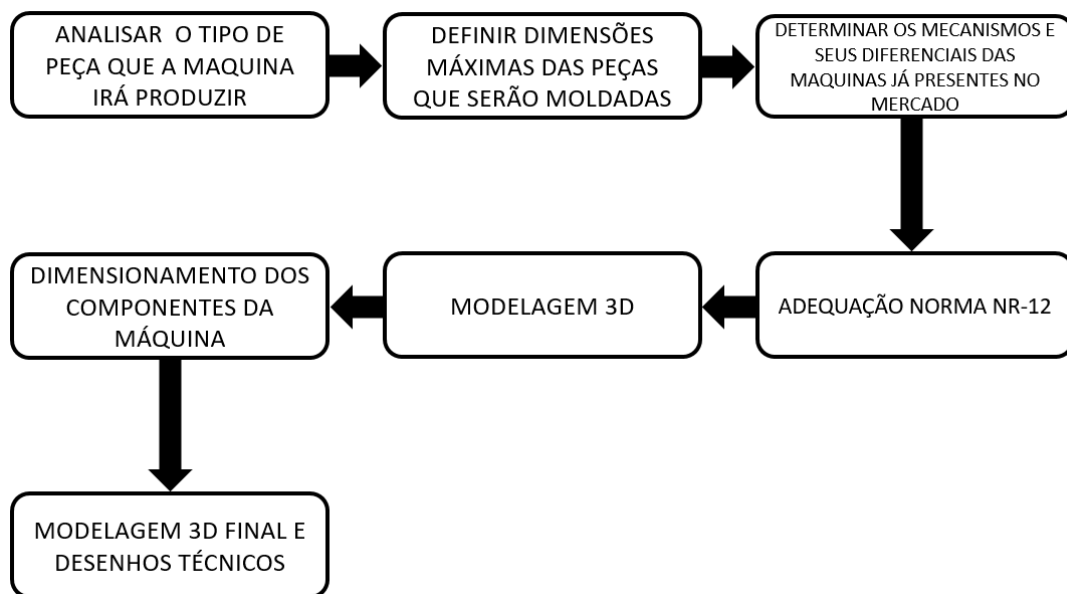
2.2.5 Sistema de Formação por Dois Moldes

Em alguns casos mais restritos, onde a espessura da peça deve se manter o mais próximo do original, se usa um molde macho contra um molde fêmea, dessa forma a chapa aquecida é prensada entre os dois moldes e se forma de maneira mais uniforme (GRUENWALD, 1998).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS / METODOLOGIA

Neste tópico será apresentado as metodologias do projeto e as atividades realizadas para a produção do produto, o fluxograma da Fig. 14, apresenta a sequência utilizada para desenvolvimento do mesmo.

Figura 14: Fluxograma do trabalho.

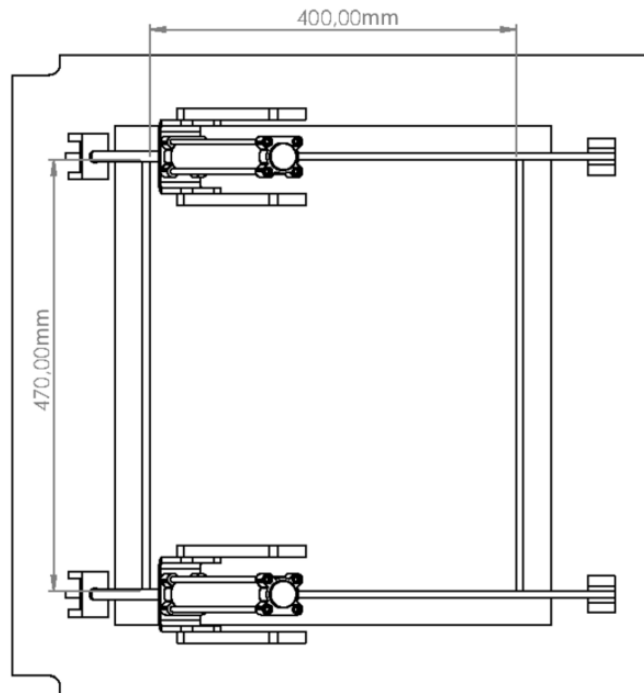


Fonte: Do autor (2021)

3.1 DEFINIÇÃO DO PRODUTO QUE SE DESEJA OBTER

O primeiro passo para início do estudo foi idealizar que categoria de máquina seria projetada, considerando que a um vasto grupo de máquinas de termoformagem a vácuo. A escolha veio do intuito de conseguir fabricar um capô de um veículo baja SAE, que também servisse para materializar peças que pudessem ser utilizadas na indústria como testes, peças de acabamento, moldes para laminação de fibra. Na Fig. 15 A modelagem do formato do quadro de fixação, considerando as medidas abaixo em milímetros.

Figura 15: Quadro de fixação de chapa.



Fonte: Do autor (2021)

3.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA

Tendo em mente o produto que se deseja obter, o próximo passo foi definir os mecanismos da máquina. Em máquinas de embalagem se idealiza ter automação em todas as etapas do processo, dessa forma independe de um operador no processo e aumenta a produtividade.

Como o projeto da máquina não visa fazer peças seriadas, e funcionar o tempo todo, não se faz necessário o uso completo de um sistema totalmente automatizado. Porém alguns recursos utilizados nas máquinas automáticas, podem auxiliar muito o operador.

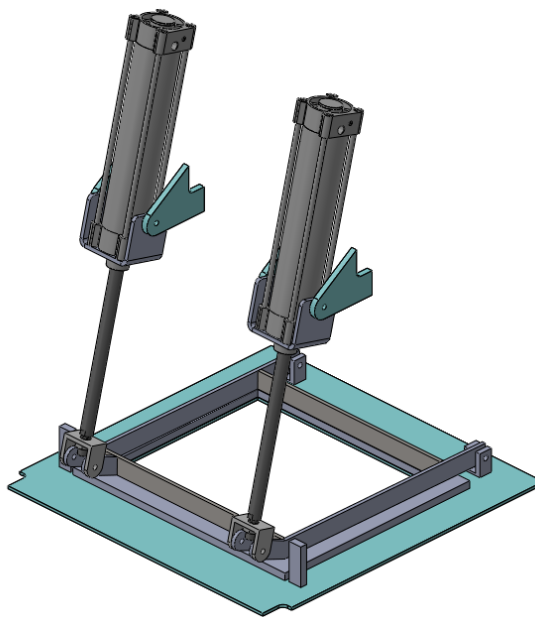
3.3 ACIONAMENTOS DA MÁQUINA

Então se optou por uma construção de uma máquina com automações relativamente simples, buscando algumas ferramentas de auxílio ao operador de modo a tornar o processo menos cansativo para o trabalhador, aumentando sua produtividade.

3.3.1 Sistema Pneumático

Sistemas pneumáticos auxiliarão o operador de forma com que ele não faça esforços repetitivos, na fixação das chapas onde na maioria das máquinas se utilizam grampos fixadores, será utilizado atuadores pneumáticos. Na Fig. 16, segue a modelagem desse equipamento.

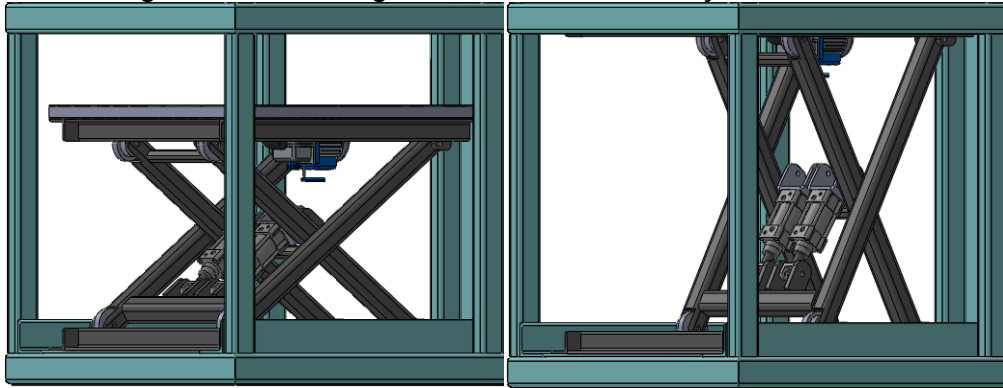
Figura 16: Modelagem 3D mesa de fixação.



Fonte: Do autor (2021)

A mesa que leva o molde até a chapa contará com acionamento pneumático, por um atuador, controlando seu deslocamento vertical. Na Fig. 17 temos a modelagem da mesa de elevação totalmente recolhida e posteriormente totalmente elevada.

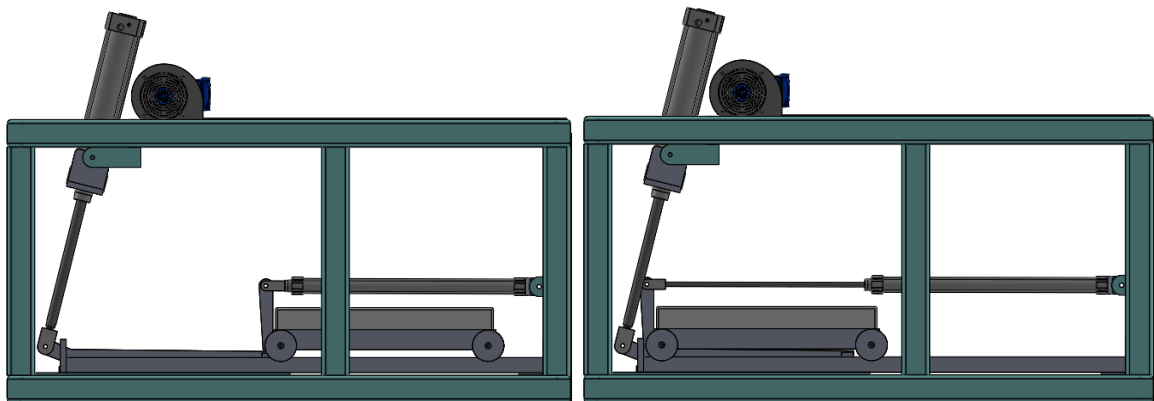
Figura 17: Modelagem 3D mesa de elevação do molde.



Fonte: Do autor (2021)

Outro acionamento que não será manual é o acionamento do aquecedor da chapa, quando a chapa está presa e pronta para o processo, um botão aciona o atuador que faz o carro com o aquecedor andar sobre um trilho no sentido horizontal. Na Fig. 18 temos a modelagem do sistema de aquecimento totalmente recolhida e na posição onde aquece a chapa.

Figura 18: Modelagem 3D Sistema de aquecimento.

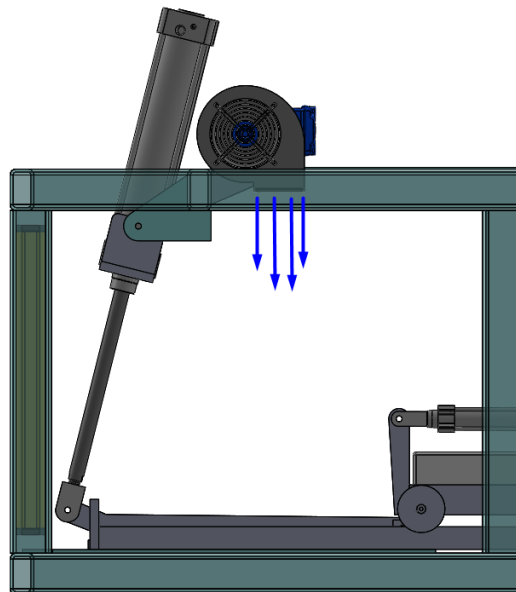


Fonte: Do autor (2021)

3.3.2 Sistema de Ventilação

Outro item importante é um ventilador voltado direto à chapa, desse modo reduzindo o tempo para ela voltar para a temperatura ambiente, aumentando assim a produtividade de peças. Na Fig. 19 temos a modelagem do sistema de ventilação.

Figura 19: Modelagem 3D Sistema de refrigeração.



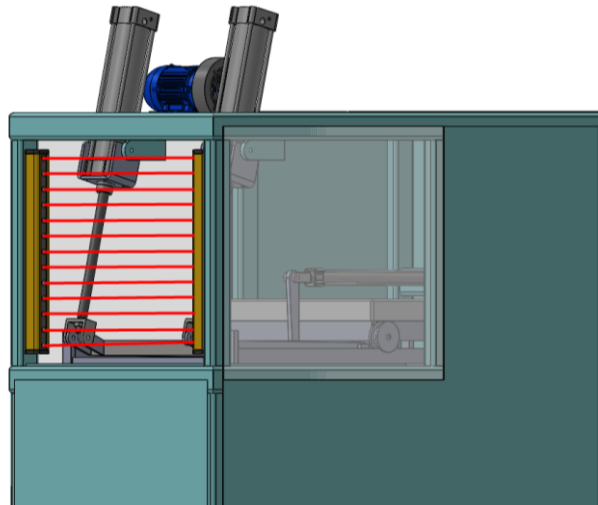
Fonte: Do autor (2021)

3.3.3 Sistema de Segurança

Observando as máquinas que dominam o mercado, se percebeu que muitas delas não contam com requisitos de segurança, então o vigente projeto conta com requisitos de segurança da norma NR-12 cujo objetivo é evitar acidentes envolvendo o operador.

A única parte do equipamento que é aberta é a parte frontal, para retirada e colocada das chapas, essa mesma conta com um sensor cortina de luz, e caso o alguém ultrapasse a barreira durante o trabalho da máquina, a mesma desarma e para nas posições que estão, para evitar qualquer tipo de acidente com o operador. Na Fig. 20 temos a modelagem do Sistema de segurança, indicando a área onde a cortina de luz irá funcionar.

Figura 20: Modelagem 3D Sistema de segurança.



Fonte: Do autor (2021)

3.3.4 Sistema de Aquecimento de Chapa

Outra ideia da máquina seria a utilização de um mostrador interativo com uma base de dados, com os tempos de amolecimento de polímeros diversos, então para cada polímero utilizado, o aquecedor funcionaria durante o tempo do amolecimento desta chapa, e esse tempo seria determinado a partir de experimentos levando em consideração variações de temperatura ambiente.

Foram feitos experimentos com duas amostras de polímeros distintos na mesma condição de temperatura, de modo a analisar a diferença entre os pontos de amolecimento, considerando o ponto de amolecimento no instante em que o polímero começa a formar uma espécie de barriga. Abaixo na Fig. 21 temos as imagens dos dois polímeros após passarem pelo seu ponto de amolecimento.

Figura 21: Ponto de amolecimento das chapas.



Fonte: Do autor (2021)

As Imagens demonstram o ponto de amolecimento de cada chapa, sendo que a chapa identificada como preta seria do material: Poliestireno de Alto Impacto (HIPS) e a do material branco: PET-G. Abaixo na Tab. 1 temos a temperatura que foi utilizada no experimento, e os tempos que cada polímero levou para entrar no amolecimento nas mesmas condições. Demonstrando uma diferença considerável entres os tempos de amolecimento. O ideal seria ensaiar todos os polímeros que deseja formar, para conhecer o comportamento dele antes de formar a peça.

Tabela 1: Temperatura polímeros.

Variáveis	Valores Otimizados (sem saturação)
Temperatura Forno (C°)	220
Tempo amolecimento HIPS (s)	1,02
Tempo amolecimento PET-G (s)	1,52

Fonte: Do autor (2021)

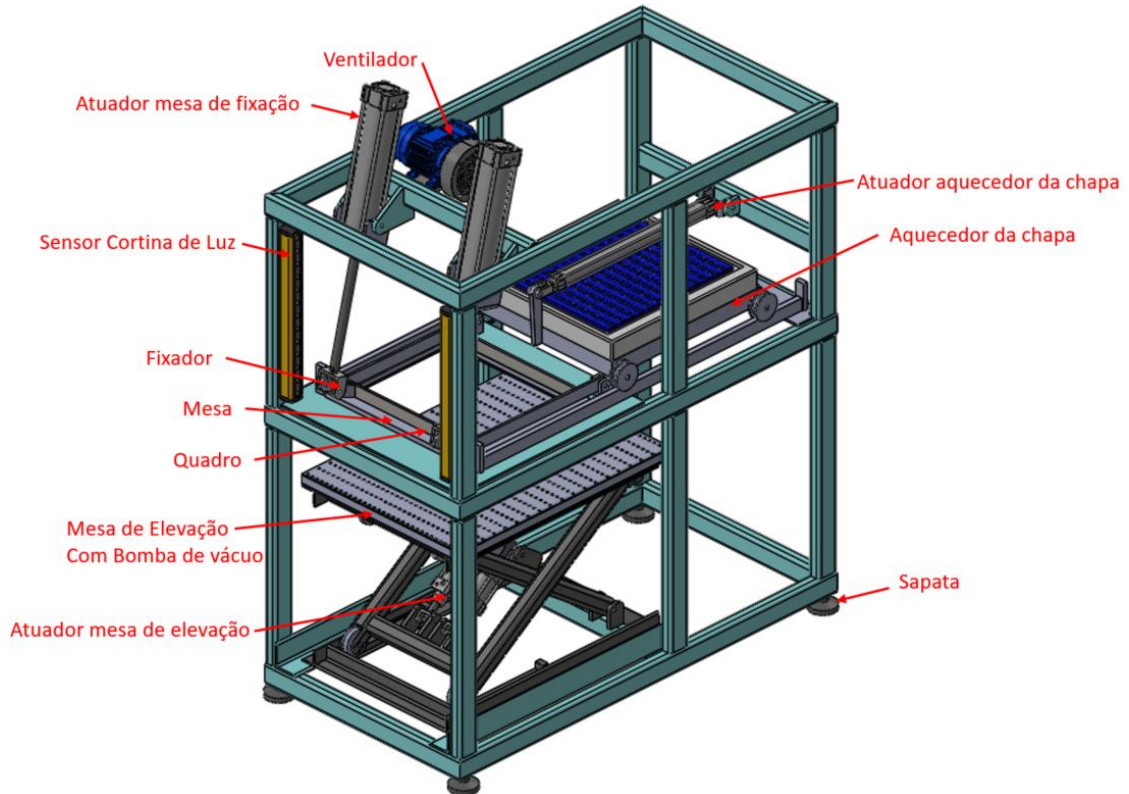
A idealização para a produção desse projeto foi pensada a partir das etapas colocadas a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. MODELAGEM FINAL

A modelagem da máquina nas Fig. 22 e 23 contempla todos os acessórios e componentes citados no decorrer do trabalho.

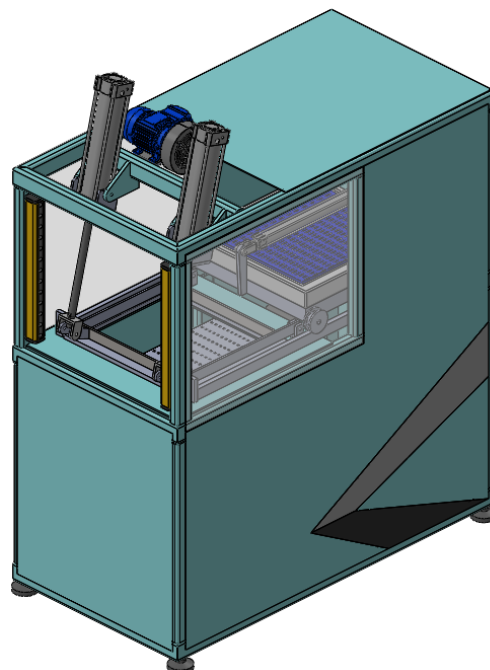
Figura 22: Modelagem 3D Detalhada.



Fonte: Do autor (2021)

Com todas as chapas e carenagens o resultado estético da máquina resultaria na modelagem abaixo.

Figura 23: Modelagem 3D máquina fechada.



Fonte: Do autor (2021)

As partes de acesso à máquinas são fechadas, deixando amostra apenas a parte frontal e a parte superior, por conta do movimento dos atuadores e localização do motor.

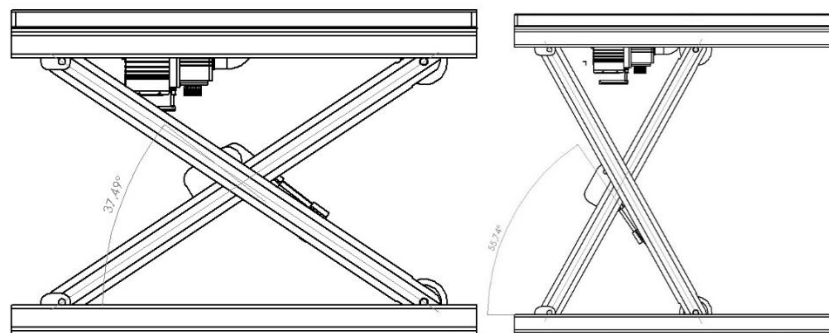
4.2. DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES

Para a escolha dos atuadores mais indicados foi feito analisado o curso que ele deveria ter e a força necessária para o funcionamento do mecanismo.

4.2.1 Dimensionamento Mesa de Elevação

Para o atuador da mesa de elevação foi dimensionado através de um somatório de forças considerado o caso mais grave e considerando a força peso como maior agravante. Na Fig. 24 o exemplo dos dois piores casos para mesa de elevação

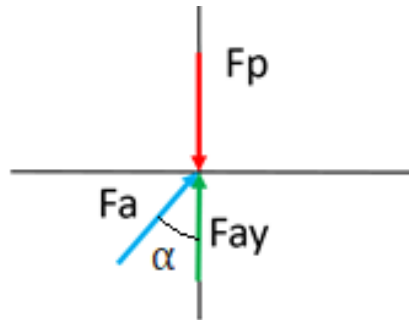
Figura 24: Ângulo mesa de elevação.



Fonte: Do autor (2021)

Considerando os piores casos para o atuador seria com ele totalmente abaixado e totalmente elevado, necessitando de uma força capaz de vencer o peso de todo o mecanismo. Posteriormente, após definir os piores casos, foi realizado o diagrama de corpo livre na Fig. 25.

Figura 25: Diagrama de corpo livre.



Fonte: Do autor (2021)

Com o diagrama formado foi feito somatório das forças.

$$F_a = F_p \times \text{sen}(\alpha) \quad (1)$$

Onde:

F_a = Força aplicada (N);

F_p = Força peso (N);

α = Ângulo entre F_a e vertical (°);

Com a modelagem dos componentes no *software* Solidworks® foi possível definir o peso dos componentes a partir da densidade de cada material.

Para a massa da estrutura, os tubos quadrados e cantoneiras foram consideradas aço A36. Sendo um dos aços mais comum comercialmente para este tipo de aplicação. E para as rodas que deslizam a mesa foram consideradas em Nylon.

Desta forma conseguimos determinar a força peso da mesa de elevação indicada na Tab. 2.

Tabela 2: Levantamento de dados.

Variáveis	Valores Otimizados (sem saturação)
Massa estrutura (Kg)	7,4
Massa peça adicional (Kg)	100,0
Massa Total (Kg)	107,4
Gravidade (m/s ²)	9,8
Força peso – F_p (N)	1053,5

Fonte: Do autor (2021)

Com a força necessária e o ângulos determinados, através da trigonometria foi calculado as forças necessárias no atuador para as duas ocasiões. Indicadas na Tab. 3.

Tabela 3: Força do atuador para ângulos selecionados.

Variáveis	Valores Otimizados (sem saturação)
Força Atuador - Fa 37,49° (N)	1731,1
Força Atuador - Fa 55,74° (N)	1274,7

Fonte: Do autor (2021)

Logo se percebe que o pior caso seria o para a mesa totalmente abaixada, ou seja, atuador no ângulo formado de 37,49° com a horizontal.

Considerando a pressão dos atuadores como 8 Bar (Pressão padrão para atuadores pneumáticos), a força teórica considerada acima e o coeficiente de atrito padrão para vedações e haste em movimento de 0.9. Se obtém a área de retorno.

A mesma é fundamental para o dimensionamento de um atuador, sendo assim, quanto maior a área, maior será a força para manter a mesma pressão no sistema.

E conhecendo a pressão no sistema e a área de retorno, conseguimos obter a força que o atuador deve exercer, pela fórmula descrita abaixo.

$$A = \frac{Fa}{Ps} \quad (2)$$

Onde:

A= Área de retorno (m²);

Fa = Força aplicada (N);

Ps = Pressão no sistema (bar);

Considerando o coeficiente mecânico no cálculo conseguimos encontrar a área de retorno com os dados da Tab. 4.

Tabela 4: Cálculo de área de retorno.

Variáveis	Valores Otimizados (sem saturação)
Pressão Sistema (Bar)	8
Força Teórica (N)	1731,1
Coeficiente Mecânico	0,9
Área de Retorno (m ²)	0,002404

Fonte: Do autor (2021)

Foi analisado fabricantes que cumprissem as necessidades do projeto, assim foi utilizado no projeto componentes do catálogo do fabricante FESTO®, analisando os movimentos da máquina da modelagem 3D foi traçado todos os cursos necessários de atuadores para que as peças conseguissem ter seu funcionamento completo. E a partir disso foi feita uma relação da área de retorno por outra conhecida, considerando o diâmetro do êmbolo e da haste.

$$A = (\pi \times Re^2) - (\pi \times Rh^2) \quad (3)$$

Onde:

A= Área de retorno (m²);

Re = Raio do êmbolo (m);

Rh = Raio da haste (m);

Este atuador será utilizado em um espaço restrito, logo não seria o ideal utilizar um atuador de diâmetro de êmbolo muito grande. Então para a mesa de elevação foi considerado dois atuadores trabalhando junto, para dessa forma conseguir suprir a necessidade do projeto. Na Tab. 5, as medidas utilizadas no atuador e sua área de retorno.

Tabela 5: Cálculo de área de retorno atuador.

Variáveis	Valores Otimizados (sem saturação)
Diâmetro do êmbolo (mm)	50
Diâmetro da haste (mm)	20
Área de Retorno (m ²)	0,001649
Área de Retorno 2 atuadores (m ²)	0,003299

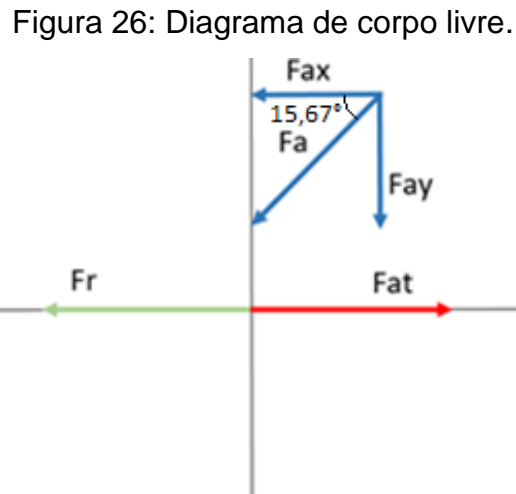
Fonte: Do autor (2021)

4.2.2 Dimensionamento Mesa de Fixação da Chapa

Para os atuadores escolhidos o mesmo tem diâmetro de êmbolo de 50mm e diâmetro de haste de 20mm, resultado em uma área de retorno de 0,003299 m², superior a 0,002404 m² antes calculado.

Para o atuador da mesa de fixação da chapa, deveria ser dimensionado para prender toda a chapa, no caso de alguém tentar puxar ela na horizontal. Para garantir que a chapa fique presa deve-se considerar um bom coeficiente, e nesse caso foi dimensionado para uma força que fizesse a chapa de PET-G deformar plasticamente, considerando assim que ninguém poderia fazer essa força com as mãos.

Conforme o ensaio de tração, foi analisado que com uma força de 1000N o material teria deformado aproximadamente 2 mm, por conta disso foi considerado essa força como a resultante. Abaixo na Fig. 26 foi realizado o diagrama de corpo.



Fonte: Do autor (2021)

Com o diagrama formado foi feito somatório das forças.

$$F_{ax} = F_a \times \text{sen}(15,67^\circ) \quad (4)$$

$$F_{ay} = F_a \times \text{cos}(15,67^\circ)$$

Onde:

F_a = Força aplicada (N);

F_{ax} = Força resultante na horizontal (N);

F_{ay} = Força resultante na vertical (N);

Fazendo o diagrama de corpo livre a partir destas variáveis, considerando o peso do projeto pelo *software* Solidworks®, Sendo a base e todas as fixações feitas em Aço A36. na Tab. 6 segue o levantamento dos dados para determinar a força resultante que o atuador deve exercer.

Tabela 6: Levantamento de dados.

Variáveis	Valores Otimizados (sem saturação)
Força Resultante (N)	1000
F_{ax} (N)	$\text{Sen } 15,67^\circ \times F_a$
F_{ay} (N)	$\text{Cos } 15,67^\circ \times F_a$
Massa componentes (Kg)	5,08
Gravidade (m/s^2)	9,81
Peso componentes (N)	49,90
Coeficiente atrito Polímero e aço	0,1

Fonte: Do autor (2021)

Fazendo somatório de forças no eixo x se encontrou a força necessária que o atuador deve exercer para impedir que a força de 1000N na horizontal consiga mover a chapa, como nessa base se utiliza dois atuadores, então essa resultante deve ser dividida entre dois atuadores.

$$F_r + F_{ax} = F_{at} \quad (5)$$

$$F_r + F_{ax} = \text{Coef} \times N$$

$$F_r + F_{ax} = \text{Coef} \times (P_c + F_{ay})$$

Onde:

F_r = Força Resultante (N);

F_{ax} = Força resultante na horizontal (N);

Coef = Coeficiente atrito Polímero e aço;

P_c = Peso componente (N);

F_{ay} = Força resultante na vertical (N);

Na Tab. 7 segue os valores da força resultante no sistema, e dividada por atuador.

Tabela 7: Força resultante do atuador.

Variáveis	Valores Otimizados (sem saturação)
Força Atuador – F_a (N)	5718,4
Força Atuador – $F_a \times 2$ (N)	2859,2

Fonte: Do autor (2021)

A área de retorno foi calculada pelo mesmo método anterior demonstrado na Tab. 8, considerando as mesmas variáveis até por estarem conectadas a um mesmo sistema pneumático.

$$A = \frac{F_a}{P_s} \quad (6)$$

Onde:

A = Área de retorno (m^2);

F_a = Força aplicada (N);

P_s = Pressão no sistema (bar);

Tabela 8: Cálculo de área de retorno.

Variáveis	Valores Otimizados (sem saturação)
Pressão Sistema (Bar)	8
Força Teórica (N)	2859,2
Coefficiente Mecânico	0,9
Área de Retorno por atuador (m^2)	0,00397

Fonte: Do autor (2021)

Utilizando o catálogo do mesmo fabricante foi considerado para a mesma fórmula de modo a encontrar a relação dos diâmetros do êmbolo e da haste

$$A = (\pi \times R e^2) - (\pi \times R h^2) \quad (7)$$

Onde:

A= Área de retorno (m²);

Re = Raio do êmbolo (m);

Rh = Raio da haste (m);

Chegando assim em um resultado de área de retorno descrito na Tab 9.

Tabela 9: Cálculo de área de retorno atuador.

Variáveis	Valores Otimizados (sem saturação)
Diâmetro do êmbolo (mm)	80
Diâmetro da haste (mm)	25
Área de Retorno (m ²)	0,004536

Fonte: Do autor (2021)

Para os atuadores escolhidos o mesmo tem diâmetro de êmbolo de 80mm e diâmetro de haste de 25mm, resultado em uma área de retorno de 0,004536 m², superior a 0,003972 m² antes calculado.

4.2.3 Dimensionamento de Parafusos Mesa de Fixação da Chapa

A fim de evitar acidentes com a máquina em operação, foi determinado os pontos mais críticos da mesma. Considerando assim, a mesa de fixação da chapa, que o atuador exerce a maior força. Nesta se fez necessário o cálculo da tensão de cisalhamento no parafuso de fixação, considerando a fórmula.

$$T = \frac{F}{A} \quad (8)$$

$$T = \frac{F}{(\pi \times R^2)}$$

Onde:

T= Tensão (MPa);

F = Força (N);

A = Área (m²);

R = Raio (m);

Neste parafuso tem dois pontos de cisalhantes que devem ser considerados, por isso se tem a necessidade de multiplicar a área por dois. Na Tab. 10 temos os dados considerados para realização dos cálculos e seus resultados.

Tabela 10: Cálculo para escolha de parafuso.

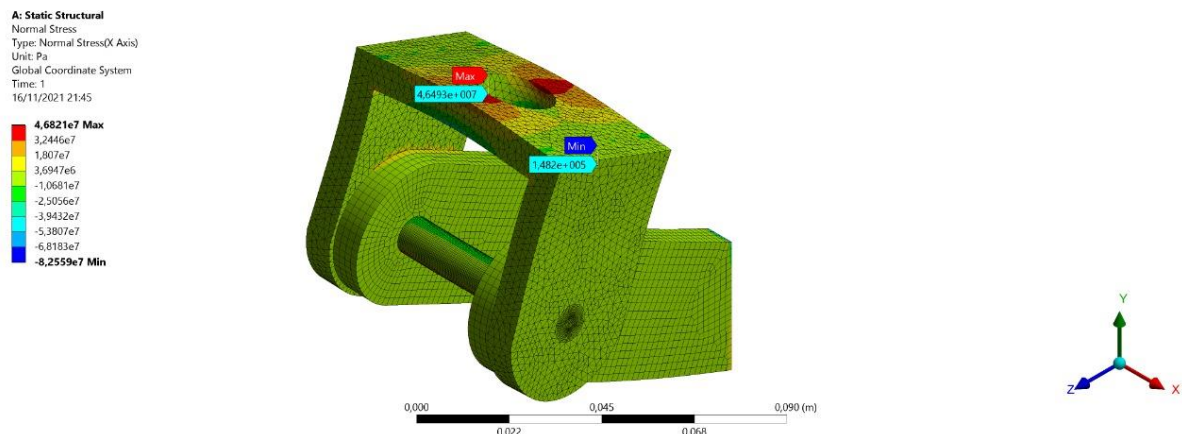
Variáveis	Valores Otimizados (sem saturação)
Tensão parafuso Classe 5.8(Mpa)	420
Força (N)	2859,2
Áreas de possível cisalhamento	2
Coefficiente de segurança	2
Diâmetro calculado (mm)	2,94
Parafuso com coeficiente considerado	M6

Fonte: Do autor (2021)

4.2.4 Análise Simulação Estrutural Suporte Mesa de Fixação

Como a junta da mesa com o atuador foi considerada a parte mais crítica do projeto, além dos estudos de cisalhamento do parafuso, para seu dimensionamento. Foi necessário também dimensionar as partes que fixam os componentes. Na Fig. 27 se demonstra os resultados dos ensaios de tensão normal em uma análise estática no software ANSYS®, na malha da simulação, foi considerado para a um *body sizing* de 0,02m para o suporte interno da junta, e para a peça externa um *body sizing* de 0,01m.

Figura 27: Simulação estrutural da junta.



Fonte: Do autor (2021)

A tensão normal máxima seria de 46.8MPa, estando assim longe do seu escoamento que seria de 330MPa

5 CONCLUSÕES

Com todos os cálculos dimensionais da estrutura ela se torna pronta para o desenvolvimento de sua prototipagem, lembrando que o projeto elétrico deve seguir a mesma linhagem de todos os comandos citados no trabalho.

Com todas as ideias propostas, o projeto contará com tecnologia para o auxílio do operador em suas práticas diárias e também garantindo a segurança do mesmo.

Vale destacar que essas máquinas são pouco utilizadas fora das empresas plásticas, e sua utilização para o setor de aplicação na empresa, como novos protótipos, pode trazer novas ideias e ajudar em diversas formas.

Sua utilização dentro da parte de moldes também pode ser muito útil. Por exemplo, para a utilização de pequenas peças, com essa máquina e uma impressora 3D, se possibilita fazer um molde de laminação para produção em escala.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G. S. G. Processo de transformação conceitos, características e aplicações de termoformagem e rotomoldagem de termoplásticos. **Saraiva**, p. 161, 2014.

CORCORAN, R. E. Thermovacuum forming plastics for artistic endeavors. 1981.

ENGELMANN, S. **Advanced Thermoforming Methods, Machines and Materials, Applications and Automation**. [s.l: s.n.]. v. 53

GRUENWALD, G. **Thermoforming A Plastics Processing Guide**. [s.l: s.n.].

MURALISRINIVASAN, N. S. **Update on troubleshooting in thermoforming**. [s.l: s.n.].

FLOCK COLOR. **Máquina para fazer bandeja plástica - Vacuum forming (molde**

fêmea) Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=vOjMLiwrLbY>>. Acesso em: 13 jun. 2021.

Formech. **Formech 508FS – Manual Vacuum Forming Machine** Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=BqV_jsxD0UA>. Acesso em: 2 jun. 2021.]

Formech. **Formech 508DT** Disponível em: <https://formech.com/product/508/>>. Acesso em: 09 jun. 2021.

Formech. **Using the pre-stretch feature on your Formech vacuum forming machines** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=k6Nt5FgsJol>>. Acesso em: 2 jun. 2021.]

Make & Tinker. **The Ultimate DIY Vacuum Former - Part 2** Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=CrX9xrVh_ps>. Acesso em: 7 mar. 2021.]

Formech. **Formech TF Series 2 – Automatic Vacuum Forming Machine** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=qjjxZo5F0IQ>>. Acesso em: 16 mar. 2021.]

Eloisa Biasotto Mano. **Polímeros como materiais de engenharia**. [s.l: s.n.].