

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE ESFORÇOS DE UM SISTEMA ARTICULADO DE  
UMA MÁQUINA DE PEÇAS TERMOFORMADAS

por

Augusto Paese Minuzzi

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Fevereiro de 2024

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Minuzzi, Augusto Paese

Determinação e análise de esforços de um sistema articulado de uma máquina de peças termoformadas / Augusto Paese Minuzzi. -- 2024.

19 f.

Orientador: Daniel Milbrath De Leon.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. termoformagem. 2. força. 3. momento. 4. torque. 5. dimensionamento. I. De Leon, Daniel Milbrath, orient. II. Título.

Augusto Paese Minuzzi

DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DE ESFORÇOS DE UM SISTEMA ARTICULADO DE  
UMA MÁQUINA DE PEÇAS TERMOFORMADAS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Daniel Milbrath De Leon

Comissão de Avaliação:

Prof. Daniel Milbrath De Leon (Presidente)

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, Fevereiro de 2024

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, de maneira especial, a minha avó Rosalina, aos meus pais Sônia e Aurélio e a minha namorada Júlia pelo imenso suporte, apoio e carinho recebidos durante toda a jornada acadêmica.

Ao Professor Orientador Daniel Milbrath De Leon, sempre muito solícito e cordial, demonstrando vasto conhecimento ao atender minhas dúvidas e questionamentos de maneira extremamente segura e profissional.

À empresa em que atuo e aos colegas que não hesitaram em dispor do seu tempo para contribuir com a elaboração do trabalho realizado.

Minuzzi, Augusto Paese. **Determinação e Análise de Esforços de um Sistema Articulado de uma Máquina de Peças Termoformadas**. 2024. 19 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## RESUMO

A termoformagem é um processo eficaz e de baixo custo de remodelagem de materiais termoplásticos sob altas temperaturas, comumente utilizado na produção de embalagens rígidas. A escolha adequada dos parâmetros operacionais e do maquinário utilizado é de extrema importância para o processo, visto que condições de processamento inadequadas podem alterar de diversas formas a qualidade do produto final. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo determinar os esforços aos quais estão submetidos os componentes do conjunto denominado “estação de formação e corte” de uma máquina de termoformagem, além do motor elétrico, a fim de viabilizar o correto dimensionamento do mesmo. A partir do presente trabalho, foi possível compreender como atuam as forças no conjunto, como a variação da posição dos braços afeta essa dinâmica de transmissão de esforços e quais configurações geram maiores ou menores solicitações. Também foi possível determinar o valor de torque máximo ao qual o motor está submetido.

**PALAVRAS-CHAVE:** termoformagem, força, momento, torque, dimensionamento.

Minuzzi, Augusto Paese. **Determination and Analysis of Forces of an Articulated System of a Thermoformed Parts Machine.** 2024. 19 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## ABSTRACT

Thermoforming is an effective and low-cost process of reshaping thermoplastic materials under high temperatures, which is commonly used in rigid packaging industries. The choice of appropriate operational parameters and the machinery used is extremely important for the process, since inadequate processing conditions can alter the quality of the final product in several ways. In this context, the present work aims to determine the forces to which the components of the set called “forming and trimming station” of a thermoforming machine are submitted, in addition to the electric motor, in order to enable its correct design. Thus, from the present work it was possible to understand how the forces act on the set, how the variation in the position of the arms affects these forces transmission dynamics and which configurations generate greater or lesser demands. It was also possible to determine the maximum torque value to which the engine is subjected.

**KEYWORDS:** thermoforming, force, moment, torque, sizing.

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$\mathbf{a}_G$	Vetor da aceleração	[m/s <sup>2</sup> ]
$a_{Gx}$	Aceleração que atua no eixo x	[m/s <sup>2</sup> ]
$a_{Gy}$	Aceleração que atua no eixo y	[m/s <sup>2</sup> ]
$F$	Força	[N]
$\mathbf{F}$	Vetor da força	[N]
$\Sigma \mathbf{F}$	Somatório do vetor das forças	[N]
$\Sigma F_x$	Somatório das forças que atuam no eixo x	[N]
$\Sigma F_y$	Somatório das forças que atuam no eixo y	[N]
$I_z$	Momento de inércia da massa do eixo z	[kg m <sup>2</sup> ]
$m$	Massa	[kg]
$\Sigma M_z$	Somatório dos momentos que atuam no eixo z	[Nm]
$p$	Pressão	[Pa]
$x, y, z$	Eixos coordenados	

### Símbolos gregos

$\alpha_z$	Aceleração angular que atua no eixo z	[rad/s <sup>2</sup> ]
------------	---------------------------------------	-----------------------

### Abreviaturas e acrônimos

CLPs	Controladores Lógicos Programáveis
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto
PET	Polietileno Tereftalato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO DO PROBLEMA .....	2
3. CASO DE ESTUDO .....	3
3.1. DESCRIÇÃO DO CONJUNTO DA ESTAÇÃO DE FORMAÇÃO E CORTE.....	3
3.2. ANÁLISE CINÉTICA DO MECANISMO DE PRENSA .....	4
3.3. FORÇA DESENVOLVIDA POR UM CILINDRO PNEUMÁTICO .....	5
3.4. FORÇA DE CORTE ESPECÍFICA PARA LÂMINAS DE PET.....	6
3.5. ACELERAÇÃO DO CONJUNTO DA MESA MÓVEL .....	7
4. RESULTADOS .....	8
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	11

## 1. INTRODUÇÃO

O plástico é considerado um material revolucionário do final do século XX com amplas aplicações, sendo assim, a produção e o consumo de embalagens plásticas vêm crescendo cada vez mais e este se tornou um material essencial no dia a dia da população mundial (Crawford & Martin, 2020; Klein, 2022). Um processo de fabricação só pode ser tido como bem-sucedido caso possa produzir peças de mesma qualidade, mas com menor custo, ou de superior qualidade pelo mesmo custo (Schwarzmann, 2019). A termoformagem de espessura fina produz milhões de produtos com custos de produção inferiores aos produzidos por outros processos. Tradicionalmente, os produtos de espessura fina têm proporções entre área de superfície e espessura de até 100.000:1 (Throne, 2008). Quando comparados aos moldes por injeção, os moldes por termoformagem são mais econômicos devido ao contato de formação unilateral, ao invés da forma bilateral, como ocorre no método usual de injeção (Schwarzmann, 2019; Yang & Hung, 2004).

A termoformagem é um processo de remodelagem de materiais termoplásticos sob altas temperaturas para criar peças moldadas, comumente usado na indústria de embalagens rígidas. Uma variedade de materiais termoplásticos podem ser usados neste processo, como polímeros semicristalinos (Polipropileno – PP, Polietileno Tereftalato – PET e Polietileno de Alta Densidade – HDPE) e polímeros amorfos (Poliestireno - PS e Poliestireno de Alto Impacto – HIPS) (Gaspar-Cunha et al., 2021). O processo pode ser dividido em cinco principais etapas, sendo elas: (i) aquecimento do material semiacabado até sua temperatura de formação dentro da faixa do elastoplástico; (ii) pré-formação do material aquecido com pré-estiramento (iii) definição da forma pela ferramenta de termoformagem; (iv) resfriamento da peça formada sob retenção forçada, até que se atinja a temperatura necessária para a estabilidade geométrica ser alcançada; e, por fim, (v) a desmoldagem da peça formada após sua estabilização geométrica (Schwarzmann, 2019; Throne, 2008). Dessa forma, o desempenho final do produto termoformado é resultante da soma de todas essas ações que ocorrem nessas cinco etapas principais (Gaspar-Cunha et al., 2021).

A termoformagem é um método fácil e barato para a produção de diversos produtos plásticos. No entanto, a escolha dos parâmetros operacionais apropriados, visto que existem diversas variáveis durante o processo, é de extrema importância. As variáveis podem ser divididas em quatro categorias: (i) método de produção - alimentação, pré-aquecimento, força de prensagem, método de prensagem e etapa de resfriamento; (ii) design de entrada e saída – características da matéria-prima e produto desejado; (iii) material e projeto do molde; e, por fim, (iv) o sistema de controle do processo – aquecimento, formação e desmembramento do produto (Ghobadnam et al., 2015).

A definição de contorno, que equivale à precisão com que os contornos do molde são reproduzidos, é determinada, principalmente pela resistência à temperatura do produto semiacabado durante o processo de formação e pela efetiva pressão de contato gerada entre o plástico semiacabado e a superfície do molde (Schwarzmann, 2019). Ainda, a distribuição da espessura não uniforme, causada por condições de processamento inadequadas durante o processo de conformação, torna necessário otimizar o processo antes de moldar uma peça (Yang & Hung, 2004).

A prensa formadora do produto final possui muitas funções e pode atuar de diversas formas: pneumaticamente, com ligações servomecânicas ou eletricamente, possui elementos que necessitam de lubrificação contínua, deve prever espaço para acomodar o molde, além de possuir fácil acesso e conexão às linhas de ar e água. Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) são utilizados para ajustar diversos parâmetros e realizar configurações rápidas após a troca de moldes, por exemplo (Throne, 2008).

A palavra *sistema* geralmente é usada para denominar qualquer parte isolada ou porção de uma máquina/estrutura que desejamos estudar. Um sistema pode ser constituído por uma partícula, várias partículas, uma parte de um corpo rígido, um corpo rígido inteiro ou vários corpos rígidos. Pode-se simplificar a análise de máquinas ou estruturas complexas isolando sucessivamente cada elemento que as compõe para depois estudá-los e analisá-los com o emprego do diagrama de corpo livre, sendo assim, considerado um meio de subdivisão de um problema em segmentos mais fáceis de serem trabalhados. O diagrama de corpo livre estabelece direções dos eixos de referência, registra dimensões do subsistema e das magnitudes e direções das forças conhecidas, conseqüentemente ajudando a direcionar as não conhecidas (Budynas & Nisbett, 2016). Dessa forma, a análise de forças e momentos facilita a solução do problema e, para identificar corretamente todas as forças e momentos potenciais de um sistema, é necessário o entendimento correto do diagrama de corpo livre de cada membro que compõe a máquina (Norton, 2013).

Evidencia-se, portanto, que o preciso dimensionamento, aliado ao bom funcionamento e condições operacionais corretas da máquina termoformadora são essenciais para que se obtenha um processo eficiente de termoformagem, evitando perdas, bem como para que se atinja uma durabilidade prolongada da máquina, evitando possível sobrecarga das peças e do motor.

## 1.1. OBJETIVOS

Neste contexto, o principal objetivo do presente trabalho é determinar os esforços aos quais estão submetidos os componentes do conjunto denominado “estação de formação e corte” de uma máquina de termoformagem, que compreende uma série de eixos, braços articulados e peças responsáveis pela movimentação do sistema, além do motor elétrico, a fim de viabilizar a realização do correto dimensionamento do mesmo, tendo como objetivo específico determinar o torque ideal que deve ser fornecido pelo motor principal, necessário para o cumprimento dessa etapa do processo.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO DO PROBLEMA

A principal e mais popular classe de máquinas termoformadoras para espessuras finas é a alimentada por bobinas. A lâmina é alimentada continuamente a partir da estação de desbobinamento, ou desbobinador, sendo transportada através de correntes de arraste localizada nas laterais. Na sequência, a lâmina passa entre as seções superior e inferior da estufa, onde a mesma é aquecida por radiação, seguindo parâmetros predeterminados para que o polímero possa atingir a temperatura adequada para a formação. Ao chegar na estação de formação, a lâmina é prensada. Logo após o fechamento da estação, ar é injetado a fim de realizar a moldagem da lâmina sobre a cavidade do molde, fazendo com que ela adquira a forma do produto desejado. Após a formação, a lâmina segue sendo transportada através da máquina até a estação de corte (Throne, 2008). A realização do corte pode ser feita de diversas formas, contudo, nas máquinas utilizadas na fábrica, a grande maioria das ferramentas de corte são compostas por navalhas de aço. Pequenas falhas propositais ao longo do corte geram pontos de sustentação para que a peça não se desprenda totalmente da lâmina de PET. O desmembramento é realizado na etapa seguinte, através do empilhador, que marca a finalização do processo, organizando as peças através de pilhas em quantidades predeterminadas que serão posteriormente empacotadas e liberadas para a expedição.

Na Figura 1, está exibido um desenho esquemático de uma máquina termoformadora para espessura fina alimentada por bobina e seus principais subsistemas.

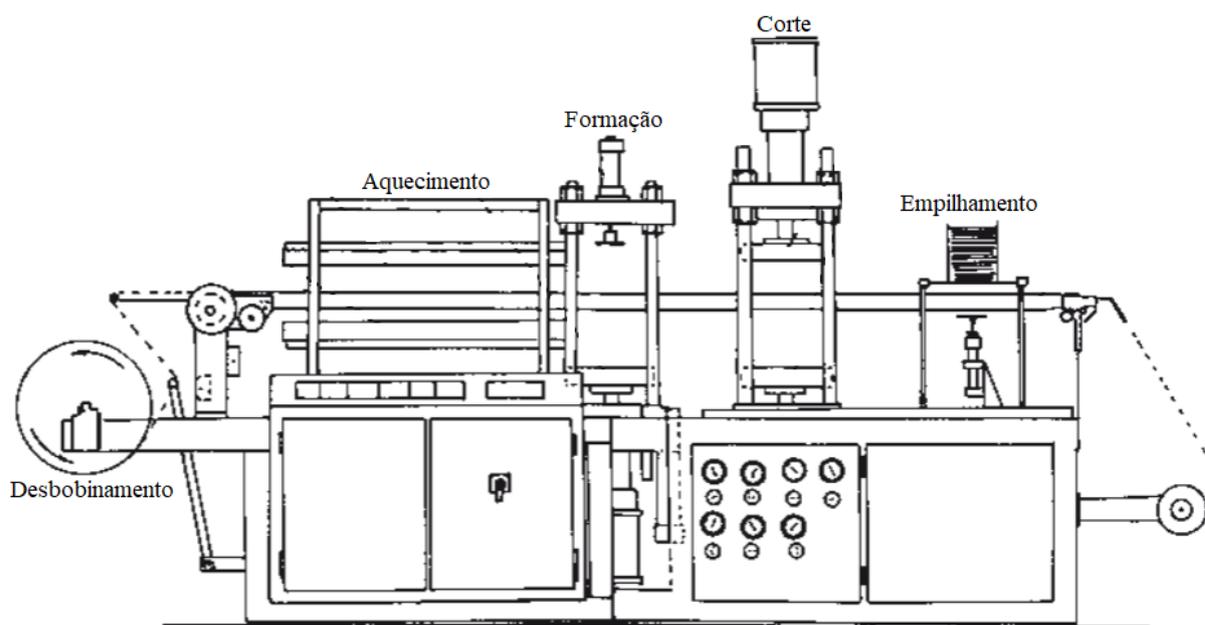


Figura 1 – Desenho esquemático de uma termoformadora. Adaptado de Throne (2008).

### 3. CASO DE ESTUDO

O presente trabalho utiliza métodos quantitativos, em forma de resultados numéricos e mensuráveis, a fim de determinar os esforços que atuam em um sistema de uma máquina de termoformagem de embalagens plásticas, além dos torques gerados no eixo do motor. Para a verificação dos esforços aos quais estão submetidas as peças é necessário o entendimento das forças envolvidas no processo.

#### 3.1. DESCRIÇÃO DO CONJUNTO DA ESTAÇÃO DE FORMAÇÃO E CORTE

A máquina termoformadora de pré-aquecimento com formação e corte em apenas uma estação é a classe mais comum encontrada fora da América do Norte, sendo capaz de produzir as peças termoformadas com maior precisão de corte, já que toda vez que a formação e o corte são realizados concomitantemente, o corte é feito precisamente no mesmo lugar, o que resulta, conseqüentemente, numa maior qualidade do produto final. A forma construtiva geral dessa classe de máquinas se assemelha bastante às demais termoformadoras alimentadas por bobinas, porém os sistemas de formação e corte são combinados em uma única ferramenta, para que as peças termoformadas estejam desmembradas do restante da lâmina de PET já ao final da etapa sem que seja necessário realizar tal separação posteriormente. Este tipo de mecanismo, contudo, requer matrizes com altíssima precisão e qualidade, o que encarece e dificulta sua implementação (Florian, 1996; Rosen, 2002).

Na estação de formação e corte, a lâmina passa entre as partes superior e inferior do molde, fixadas, respectivamente, a cada uma das duas estações, que são acionadas através de motorreductores em um movimento vertical com sentidos contrários, de modo a prensar a lâmina. O movimento de rotação do eixo acoplado ao motor, que é transmitido ao excêntrico, é convertido ao movimento de translação retilínea descrito pela mesa móvel por intermédio da biela, que realiza um movimento plano geral (translação e rotação), além do conjunto de braços articulados, que conectam o sistema de diversas formas.

O torque fornecido pelo motor, necessário para a realização do processo de formação e corte, está diretamente ligado às forças de corte envolvidas, além das forças necessárias para a movimentação do sistema. Contudo, devido à existência de quatro cilindros compensadores atuando pneumaticamente no sentido de facilitar o movimento de abertura e fechamento da mesa, a solicitação do motor relacionada a tal deslocamento fica bastante reduzida.

Na Figura 2, está exposto um modelo contendo uma representação dos principais componentes que compõe o conjunto da estação de formação e corte.

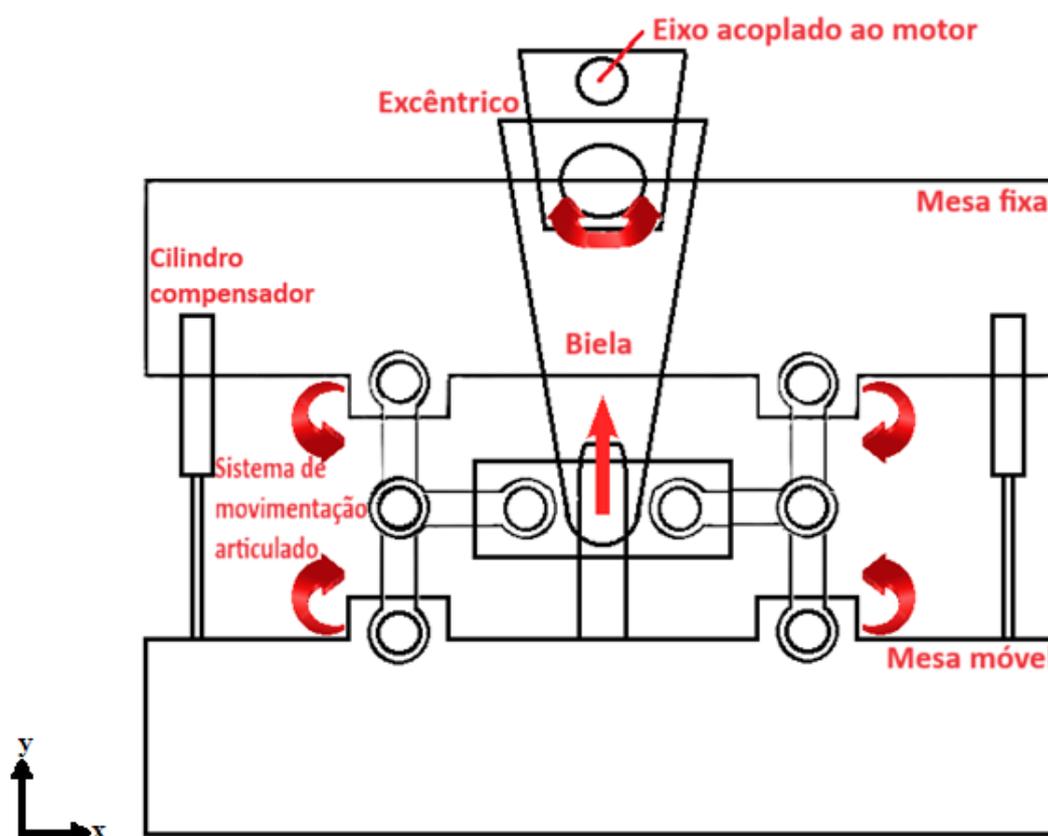


Figura 2 – Representação da estação de formação e corte superior. Na configuração representada, o conjunto superior encontra-se “fechado”, estando a sua “abertura” condicionada à “subida” da mesa móvel.

### 3.2. ANÁLISE CINÉTICA DO MECANISMO DE PRENSA

Cinética é um ramo da dinâmica que trata da relação entre a variação dos movimentos de um corpo e as forças que causam essa variação. A base para a cinética é a segunda lei de Newton, que tem embasamento no seguinte mecanismo: se a força resultante que atua sobre uma partícula não for nula, a partícula terá uma aceleração proporcional à intensidade da resultante e na mesma direção dessa força resultante (Hibbeler, 2018; Beer et al., 2012). Dessa forma, a diferença entre uma situação de carregamento estático e dinâmico é a presença ou não de acelerações (Norton, 2013).

Todas as máquinas existentes são tridimensionais, contudo, diversos sistemas tridimensionais podem ser analisados bidimensionalmente caso seus movimentos ocorram apenas em um plano ou em planos paralelos (Norton, 2013). No presente trabalho, foi

realizada uma análise bidimensional das forças atuantes em parte da máquina termoformadora, visto que tais forças só atuam nas direções  $x$  e  $y$ .

Para um sistema dinâmico, no qual há a presença de acelerações, a segunda lei de Newton pode ser verificada experimentalmente, aplicando uma força desequilibrada  $\mathbf{F}$  a uma partícula e; então, medindo a sua aceleração  $\mathbf{a}_G$  (Hibbeler, 2018; Beer et al., 2012), dada pela Equação 1:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}_G \quad (1)$$

onde  $\mathbf{F}$  é a força que atua sobre uma partícula de massa  $m$  [N],  $\mathbf{a}_G$  é a aceleração dessa partícula [ $\text{m/s}^2$ ] e  $m$  é a massa da partícula, também chamada de constante de proporcionalidade [kg], a qual é constante durante qualquer aceleração, fornecendo uma medida quantitativa da resistência da partícula a uma variação em sua velocidade (inércia).

Quando uma partícula estiver sujeita a várias forças simultaneamente a Equação 1 deve ser substituída pela Equação 2.

$$\Sigma\mathbf{F} = m\mathbf{a}_G \quad (2)$$

onde  $\Sigma\mathbf{F}$  é a soma, ou resultante, de todas as forças que atuam sobre a partícula [N].

No presente trabalho as forças atuam nos eixos  $x$  e  $y$  e os momentos atuam no eixo  $z$ , assim, originando as Equações 3, 4 e 5.

$$\Sigma F_x = ma_{Gx} \quad (3)$$

$$\Sigma F_y = ma_{Gy} \quad (4)$$

$$\Sigma M_z = I_z\alpha_z \quad (5)$$

onde  $a_{Gx}$  e  $a_{Gy}$  são as acelerações que atuam nos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente [ $\text{m/s}^2$ ],  $I_z$  é momento de inércia de massa [ $\text{kg m}^2$ ] e  $\alpha_z$  é a aceleração angular [ $\text{rad/s}^2$ ] em relação ao eixo  $z$ .

Se um sistema, ou parte dele, está imóvel ou tem velocidade constante, então o mesmo possui aceleração igual a zero sendo, dessa forma, caracterizado como um sistema em equilíbrio. Quando um sistema em equilíbrio está em repouso, pode-se dizer que o sistema está em equilíbrio estático. Assim, o somatório de forças para o caso bidimensional segue as Equações 6, 7 e 8 (Beer et al., 2012; Norton, 2013).

$$\Sigma F_x = 0 \quad (6)$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad (7)$$

$$\Sigma M_z = 0 \quad (8)$$

### 3.3. FORÇA DESENVOLVIDA POR UM CILINDRO PNEUMÁTICO

Normalmente, a força  $F$  desenvolvida por um cilindro pneumático é dada pela Equação 9 (Prudente, 2013).

$$F = p \times A \quad (9)$$

onde  $F$  é a força exercida pelo cilindro [N],  $p$  é a pressão a regime [Pa] e  $A$  é a área efetiva do pistão [m<sup>2</sup>].

É importante salientar que a área efetiva do pistão, quando o mesmo atua avançando, é  $A_1$  [m], já quando o cilindro atua retornando, temos  $A_2$  [m], onde a área da haste do cilindro  $A_3$  [m] deve ser descontada do valor de área  $A_1$  [m] (Prudente, 2013). A Figura 3 apresenta a representação das áreas efetivas.

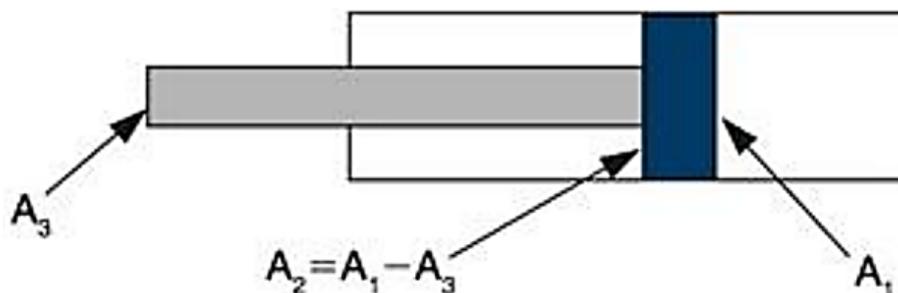


Figura 3 – Representação das áreas efetivas (Prudente, 2013).

### 3.4. FORÇA DE CORTE ESPECÍFICA PARA LÂMINAS DE PET

A fim de quantificar a força de corte necessária para que ocorra a ruptura da lâmina de PET, foi utilizado o trabalho realizado por Cousseau (2022), que executou, em uma máquina de ensaio universal MTS Landmark 370.25, o ensaio de corte para as espessuras de 0,21 mm, 0,34 mm, 0,5 mm e 0,9 mm das lâminas de PET, que são as mais amplamente utilizadas na fabricação das embalagens comercializadas pela empresa, variando-se também o tipo de navalha utilizado entre navalha de corte central e navalha de corte lateral, cuja diferença básica reside no fato de que a navalha central possui ambas as faces chanfradas, enquanto que a navalha lateral é chanfrada em apenas uma de suas faces. A Figura 4 apresenta uma representação do ensaio de corte, além de uma fotografia real expondo a realização do mesmo.

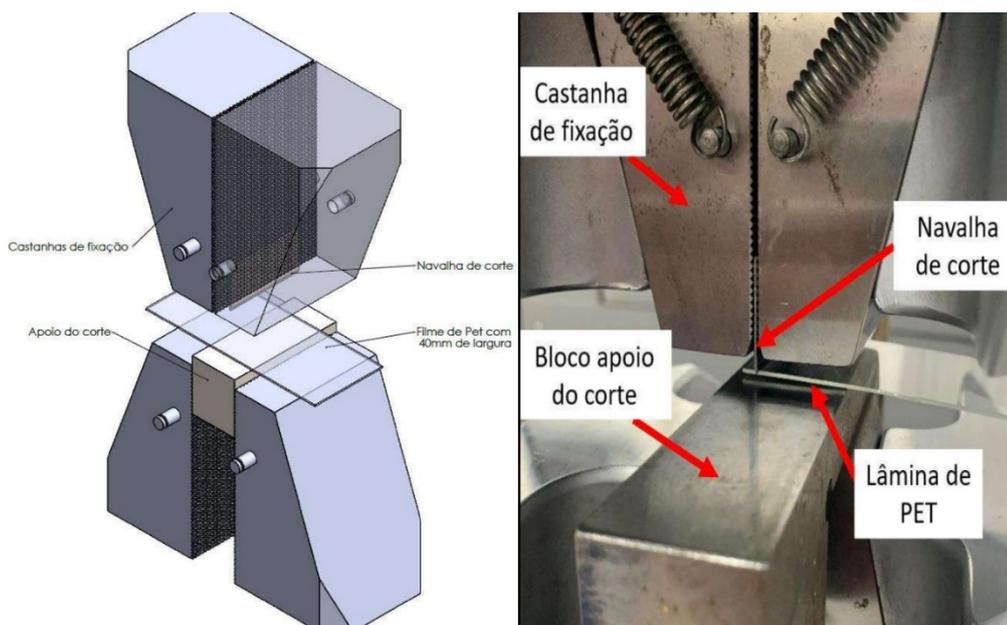


Figura 4 – Montagem e vista aproximada do ensaio de corte (Cousseau, 2022).

Os resultados de força específica de corte, expressos em N/mm, para as diferentes espessuras das lâminas de PET e diferentes modelos de navalha, obtidos a partir da realização do ensaio de corte, estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de força específica expressos em N/mm (Cousseau, 2022).

Navalha Central				
Espessura (mm)	0,21	0,34	0,5	0,9
Força máxima (N/mm)	22,65	28,05	36,77	51,48
Navalha Lateral				
Espessura (mm)	0,21	0,34	0,5	0,9
Força máxima (N/mm)	23,73	29,61	37,85	52,56

O comportamento dos valores das forças obtidas por Cousseau (2022) para as navalhas de corte central e navalhas de corte lateral foi extremamente parecido, além de apresentarem uma variação aproximadamente linear para as diferentes espessuras das lâminas de PET ensaiadas.

### 3.5. ACELERAÇÃO DO CONJUNTO DA MESA MÓVEL

Com o auxílio de um acelerômetro Bosch Sensortec 6-axis accelerometer/gyroscope, foi realizada a medição de aceleração do sistema. O equipamento foi fixado na superfície plana da mesa móvel, inicialmente em repouso, sendo a mesma acionada e permanecendo em operação por certo período de tempo, simulando a condição usual de trabalho, sendo possível, assim, medir as acelerações às quais ela está submetida. O acelerômetro em questão está destacado em vermelho e pode ser visualizado na Figura 5.

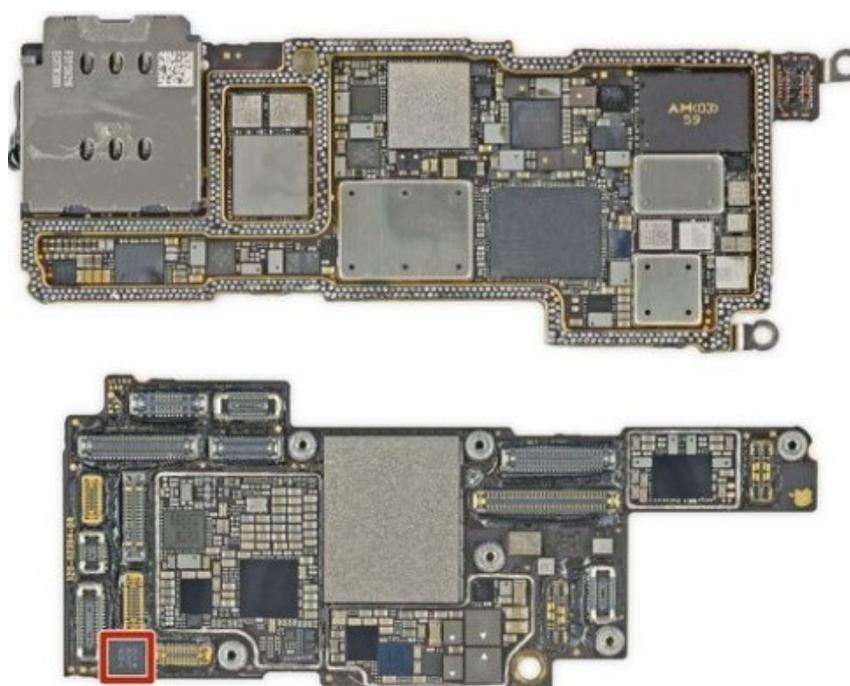


Figura 5 – Bosch Sensortec 6-axis accelerometer/gyroscope destacado em uma das placas do Iphone 13 PRO (Ifixit, 2021).

#### 4. RESULTADOS

Para realizar o cálculo da massa total do conjunto que é movimentado a partir do torque fornecido pelo motor, foi considerada a massa de todos os componentes que fazem parte da mesa móvel superior, além da massa do molde, que fica acoplado à mesa móvel superior, utilizado para a produção das embalagens na máquina em questão. Dessa forma, somando-se a massa de 1193,94 kg referente ao conjunto da mesa móvel à massa de 548,09 kg referente à parte superior do molde, totaliza-se uma massa de 1742,03 kg.

As medidas de aceleração do sistema estão expostas na Figura 6.

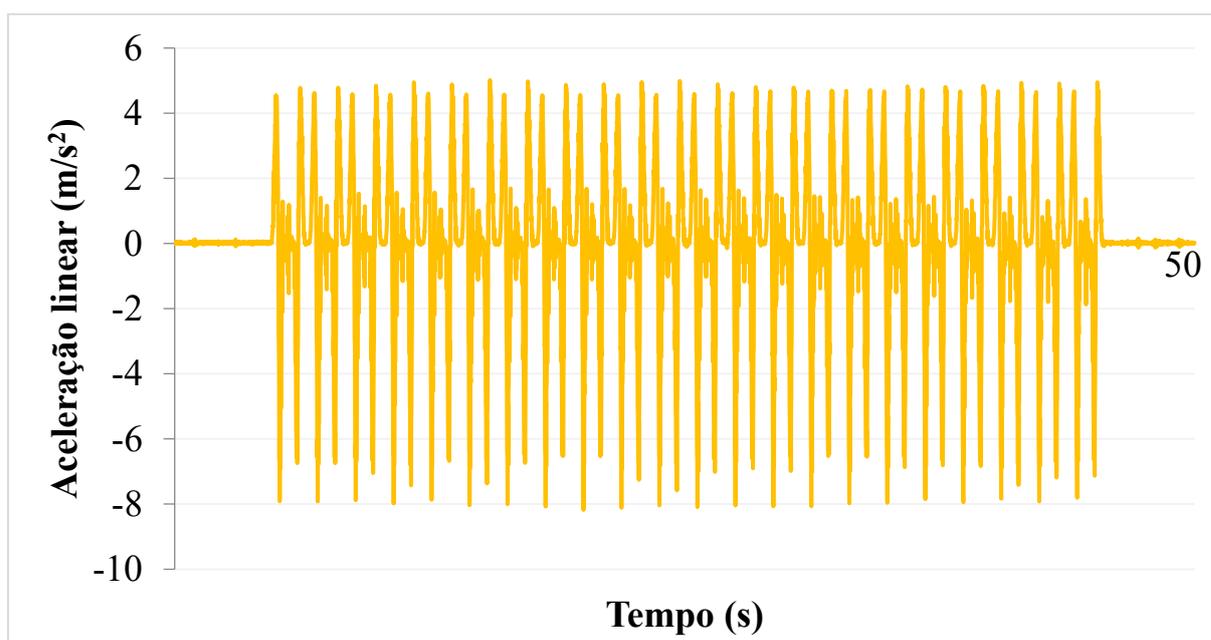


Figura 6 – Gráfico da aceleração linear *versus* tempo da mesa móvel.

Analisando-se o gráfico da Figura 6, é possível perceber que o valor de pico de aceleração do sistema que atua no eixo *y* em módulo é de 8 m/s<sup>2</sup>. Dessa forma, a força exercida pelo conjunto que é movimentado a partir do torque fornecido pelo motor pode ser calculada pela Equação 1.

$$F = 1742,03 \times 8 = 13936,24 \text{ N} \quad (10)$$

Os quatro cilindros compensadores estão conectados à rede de ar comprimido da empresa, com pressão de 6 bar, além de possuírem um diâmetro de 80 mm. Dessa forma, a força exercida no eixo *y* pelos quatro cilindros atuando contra a gravidade pode ser calculada pela Equação 9. Como o cilindro atua retornando na mesa superior e possui uma haste com diâmetro de 25 mm, deve-se subtrair o valor da área da haste do valor da área do êmbolo.

$$F_{cilindro} = 600000 \text{ Pa} \times (A_{\text{êmbolo}} - A_{\text{haste}}) \quad (11)$$

$$F_{cilindro} = 600000 \text{ Pa} \times (\pi \times 0,04^2 - \pi \times 0,0125^2) = 2721,41 \text{ N} \quad (12)$$

$$F_{total} = 2721,41 \times 4 = 10885,63 \text{ N} \quad (13)$$

Subtraindo o valor da força exercida no eixo *y* pelos quatro cilindros que atuam contra a gravidade do valor de força exercida no eixo *y* pela movimentação do conjunto atuando a

favor da gravidade, obtém-se o valor de força resultante referente ao movimento da mesa móvel, que atua no eixo  $y$  a favor da gravidade.

$$F_{\text{mesa}} = F - F_{\text{total}} \quad (14)$$

$$F_{\text{mesa}} = 13936,24 - 10885,63 = 3050,61 \text{ N} \quad (15)$$

Calculando a força de corte necessária para a embalagem específica produzida pela máquina, considerando-se o molde com 12 cavidades e sabendo que cada cavidade possui 683,3 mm de navalha, o comprimento total de navalha utilizado no molde é de 8199,6 mm. Além disso, para a espessura de 0,34 mm da lâmina de PET que é utilizada para fabricar a embalagem, com a utilização da navalha de corte central, temos, a partir dos dados da Tabela 1, um valor de força específica de corte de 28,05 N/mm.

Assim, a força de corte necessária para a situação apresentada pode ser obtida multiplicando-se o valor de força específica pelo comprimento de navalha total.

$$F_{\text{corte}} = 28,05 \times 8199,6 = 229998,78 \text{ N} \quad (16)$$

Por fim, introduzindo os valores de força como condições de contorno do modelo no Software Ftool, além de selecionar corretamente as restrições nos nós, o programa retorna o valor de torque no eixo do motor. Na figura 7 está representado um dos modelos geométricos construídos no *Software* Ftool utilizados para simular o conjunto da mesa móvel, mais especificamente com o ângulo  $\theta$  igual a  $45^\circ$ . Na Tabela 2 estão apresentados os valores de torque quando consideradas tanto a força resultante  $F_{\text{mesa}}$ , quanto a força de corte  $F_{\text{corte}}$ , para diferentes posições do conjunto da mesa móvel, variando-se o ângulo  $\theta$  entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ .

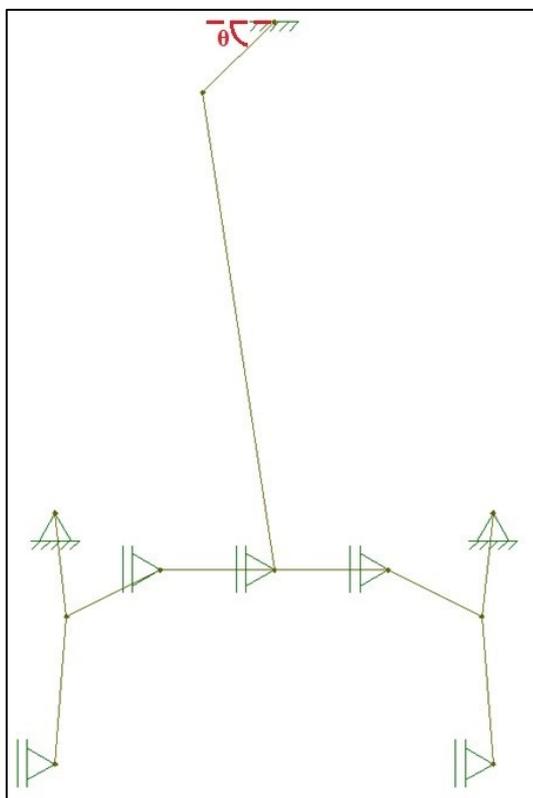


Figura 7 – Modelo geométrico que simula o conjunto da mesa móvel para o caso de  $\theta$  igual a  $45^\circ$ .

Tabela 2 – Valores de torque no eixo do motor expressos em Nm gerados pelas forças  $F_{corte}$  e  $F_{mesa}$  calculados no *Software Ftool*

$\theta$	Torque [Nm]	
	$F_{corte}$	$F_{mesa}$
0°	-	57,9
15°	-	37,2
30°	-	20,1
45°	-	10,2
60°	-	5,5
75°	-	2,7
80°	136	1,8
85°	68,5	0,9
90°	0	0

Os valores de torque para os ângulos  $0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$  gerados pela força  $F_{corte}$  não são considerados, pois a força de corte atua somente na iminência do fechamento do molde, portanto, para a análise dos torques gerados no eixo do motor a partir da força de corte, considerou-se o intervalo  $80^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ . O máximo valor de torque ao qual o motor está submetido é de 136 Nm, quando  $\theta$  é igual a  $80^\circ$ .

## 5. CONCLUSÃO

A partir da obtenção e análise dos valores de torque para as diversas configurações estudadas, foi possível compreender como atuam as forças no conjunto que compõe a estação de formação e corte, além de ser possível entender como a variação da posição dos braços afeta essa dinâmica de transmissão de esforços e quais configurações geram maiores ou menores solicitações. À medida que os valores de  $\theta$  aumentam, estando os componentes do sistema cada vez mais alinhados, o valor de torque exigido para que tal movimentação ocorra decresce, chegando a zero quando  $\theta$  vale  $90^\circ$ .

As forças  $F_{mesa}$  e  $F_{corte}$  atuam de maneiras distintas. A força resultante referente ao movimento da mesa móvel atua durante todo o movimento do sistema, desde quando  $\theta$  vale  $0^\circ$  até quando  $\theta$  vale  $90^\circ$ , porém, devido a atuação dos quatro cilindros pneumáticos no sentido de facilitar esse deslocamento, sua influência fica bastante reduzida. Já a força de corte está presente apenas quando se dá o fechamento do molde, sendo considerada, para fins de análise, no intervalo entre  $80^\circ$  e  $90^\circ$ , contudo, como sua magnitude é bastante alta, principalmente quando comparada a da força resultante referente ao movimento da mesa móvel, sua influência no modelo é bem mais expressiva, gerando o torque máximo ao qual o motor está submetido, que vale 136 Nm, para os pontos de análise considerados.

Como sugestões para que se dê seguimento ao trabalho, pode-se realizar uma análise referente ao superdimensionamento do conjunto de motor e redutor atualmente empregado na estação de formação e corte das máquinas, com o objetivo de otimizar o sistema e reduzir custos, sugerindo-se outro conjunto mais adequado, que supra as demandas impostas de maneira mais eficiente, ou então, desenvolvendo-se um sistema que limite o torque empregado pelos motores já existentes, utilizando como condição de contorno para tal, os valores de torque obtidos no estudo realizado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação - ABNT NBR 14724 2011**, 2011.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; CORNWELL, P. J. **Mecânica Vetorial para Engenheiros – Dinâmica**, 9<sup>a</sup> ed., AMGH Editora Ltda, Porto Alegre, Brasil, 2012a.
- BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; MAZUREK, D. F. **Mecânica Vetorial para Engenheiros – Estática**, 9<sup>a</sup> ed., AMGH Editora Ltda, Porto Alegre, Brasil, 2012b.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**, 10<sup>a</sup> ed., AMGH Editora Ltda, Porto Alegre, Brasil, 2016.
- COUSSEAU, L. D. (2022). **Análise da quebra de navalhas em ferramentas de corte de peças termoformadas fabricadas em politereftalato de etileno**. Relatório Técnico, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2022.
- CRAWFORD, R. J.; MARTIN, P. J. **Plastics Engineering**. 4<sup>th</sup> ed., Butterworth-Heinemann – An Imprint of Elsevier, UK, 2020.
- FLORIAN, J. **Practical Thermoforming**, 2<sup>nd</sup> ed., CRC Press – Taylor & Francis Group, U.S., 1996.
- GASPAR-CUNHA, A.; COSTA, P.; GALUPPO, W. C.; NÓBREGA, J. M.; DUARTE, F.; COSTA, L. Multi-Objective Optimization of Plastics Thermoforming. **Evolutionary Algorithms in Engineering Design Optimization**, v. 9, No. 15, p. 1760, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/math9151760>>.
- GHOBADNAM, M.; MOSADDEGH, P.; REJANI, M. R.; AMIRABADI, H.; GHAEI, A. Numerical and experimental analysis of HIPS sheets in thermoforming process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, p. 1079-1089, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-014-6329-y>>.
- HIBBELER, R. C. **Dinâmica: Mecânica para Engenharia**, 14<sup>a</sup> ed., Pearson Education do Brasil Ltda, São Paulo, Brasil, 2018.
- IFIXIT. **iPhone 13 Pro Full Chip ID**. 2021. Disponível em: <https://pt.ifixit.com/Guide/iPhone+13+Pro+Full+Chip+ID/144993>. Acesso em: 28 jan. 2024.
- KLEIN, P. **Fundamentals of Plastics Thermoforming**, 1<sup>th</sup> ed., Springer, Switzerland, 2022.
- NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem Integrada**, 4<sup>a</sup> ed., Bookman Editora Ltda, Porto Alegre, Brasil, 2013.
- PRUDENTE, F. **Automação Industrial Pneumática: Teoria e Aplicações**, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- ROSEN, S. R. **Thermoforming: Improving Process Performance**, 2<sup>nd</sup> ed., Society of Manufacturing Engineers, Michigan, U.S., 2002.
- SCHWARZMANN, P. **Thermoforming: A Practical Guide**. 2<sup>nd</sup> ed., Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019.
- THRONE, J. L. **Understanding Thermoforming**, 2<sup>nd</sup> ed., HANSER, USA, 2008.
- YANG, C., HUNG, S. W. Modeling and Optimization of a Plastic Thermoforming Process. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 23, No. 1, p. 109-121, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0731684404029324>>.