

ANÁLISE DE TROCA TÉRMICA EM ESTUFA DE MÁQUINA TERMOFORMADORA DE DESCARTÁVEIS

Odair Dall’Agnol¹

Daniel Kesting²

Resumo: Na indústria, a energia térmica é usada nos mais diversificados processos. A competitividade no mercado não permite desperdícios, por isso é constante a busca por sistemas que aproveitam ao máximo esta energia. No processo de termoformagem existe um grande consumo de energia elétrica nas estufas de aquecimento, onde uma parte da energia térmica gerada é perdida para o ambiente por radiação e convecção. Este trabalho visa o aumento da eficiência energética de uma máquina termoformadora de descartáveis através do uso de isolamento térmico na região da estufa. A análise realizada inclui a modelagem térmica através do balanço de massa e energia na região do volume de controle que contém a estufa; utilização do software EES para implementação e verificação dos resultados teóricos; e medições de temperaturas em regiões específicas da termoformadora. O uso do isolamento térmico aumentou a eficiência da estufa em 9,8% em função da diminuição da perda de energia térmica para o ambiente. Além disso, o uso do isolamento minimiza os custos de produção, uma vez que a potência fornecida para a estufa superior e inferior, diminuiram 9,9% e 15,6%, respectivamente.

Palavras-chave: Troca térmica. Forno. Estufa Termoformadora. Termoformagem. Eficiência energética.

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que os recursos naturais de nosso planeta são finitos e o aumento do consumo de energia elétrica é crescente em todo o mundo. Seguem também em crescimento as construções e diversificações de novas usinas de geração de energia. Embora, no Brasil, as hidrelétricas contem com maior potência instalada, algumas novas tecnologias como geração eólica, fotovoltaica e biomassa vêm ganhando espaço. O que contribui para o desenvolvimento sustentável, pois têm baixo impacto ambiental.

No Brasil, o crescimento no consumo foi de 4,56 % comparado ao período de 2012 a 2016. Em megawatt/hora o aumento foi de 552.498 GW/h para 579 GW/h

¹ Graduando em Eng Mecânica. E-mail: odall.agnol@icloud.com

² Prof. Me. Daniel Kesting. E-mail: Daniel.kesting@satc.edu.br

(Epe, 2017). Por isso, o Brasil segue colocando em operação novas usinas geradoras, porém estima-se que até 2030, o Brasil usará cerca de 94% da capacidade de geração por hidrelétricas (Ciência e Natura, 2014). Nesse sentido, o país vem diversificando a matriz energética a fim de ter mais flexibilidade para ligar as usinas que melhor convém, quando a época do ano ou clima estiver favorável.

Com o consumo de energia em alta, somado às variações climáticas, aumenta também o preço da tarifa, o que pode sofrer acréscimo em determinadas épocas do ano e período do dia. Na indústria, o consumo de energia pode agregar um custo altíssimo ao produto acabado. Assim é necessário procurar cada vez mais equipamentos eficientes, capazes de ter maior produção, consumindo menos energia elétrica.

De acordo com o Sindicato da Indústria de Material Plástico no estado de Santa Catarina (Simpesc Apud Plástico 2014), o estado é responsável por processar 45% do plástico da região sul e 16% da produção nacional. Em peso esse valor representa 988 mil toneladas de resina plástica por ano.

Nas máquinas termoformadoras de copos ou potes descartáveis, o maior consumo de energia elétrica está nos fornos de aquecimento da lâmina de PP (Polipropileno) ou PS (Poliestireno), antes da formação do produto. Parte da energia térmica gerada é dissipada no ambiente, sem gerar efeito na confecção do produto. Por isso é necessário avaliar o quanto de energia térmica está sendo perdida, por onde e, se possível, sugerir modificações na máquina a fim de aproveitar ao máximo esse insumo.

Em uma máquina termoformadora de copos, a potência total instalada, dependendo da configuração, pode chegar a 180 kW, sendo que somente a estufa tem aproximadamente 151 KW instalados (AMD Máq. e Equipamentos, 2019), isso é equivalente a quase 84 % do total da máquina. A busca pela melhoria e aumento de rendimento nos fornos através do maior aproveitamento da energia térmica, pode aumentar a competitividade e também reduzir impactos ambientais devido ao consumo excessivo de energia.

Com esse pensamento, em testes de bancada, Martins (2015) já havia confirmado a influência do isolamento térmico em estufa de aquecimentos em máquinas termoformadoras, conforme o teste realizado com um protótipo de estufa, onde fez medições com e sem o isolamento térmico. Martins (2015) confirmou que os testes realizados com o protótipo com isolamento obtiveram um menor tempo de

aquecimento, até atingirem a temperatura ideal de processo, isso indica menor perda de energia térmica para o ambiente.

Várias situações foram testadas, dentre elas, somente a estufa superior ligada, simulando lâmina de Poliestireno (PS), com e sem isolamento térmico. Também com as duas estufas ligadas simulando a produção de produtos em Polipropileno (PP). Também foram feitos testes com e sem isolamento. Nos testes sem isolamento, os tempos para atingir a temperatura de aproximadamente 550°C chegaram a dez minutos. A temperatura ao redor do protótipo chegou a 40°C e o sensor (denominado receptor, pelo autor) posicionado para detectar o calor dissipado para fora da estufa atingiu até 135°C. Para o teste com isolação térmica, o tempo para atingir a temperatura de trabalho foi de seis minutos e a temperatura ao redor do protótipo não ultrapassou 30°C assim como no receptor com isolamento.

Desta forma, é importante calcular a quantidade de energia que está sendo perdida e quanto está sendo absorvida pelo polímero e verificar a possibilidade de isolar partes onde ocorrem as maiores perdas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Eficiência energética consiste na relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização. Este conceito é bem estabelecido, assim como o processo de termoformagem.

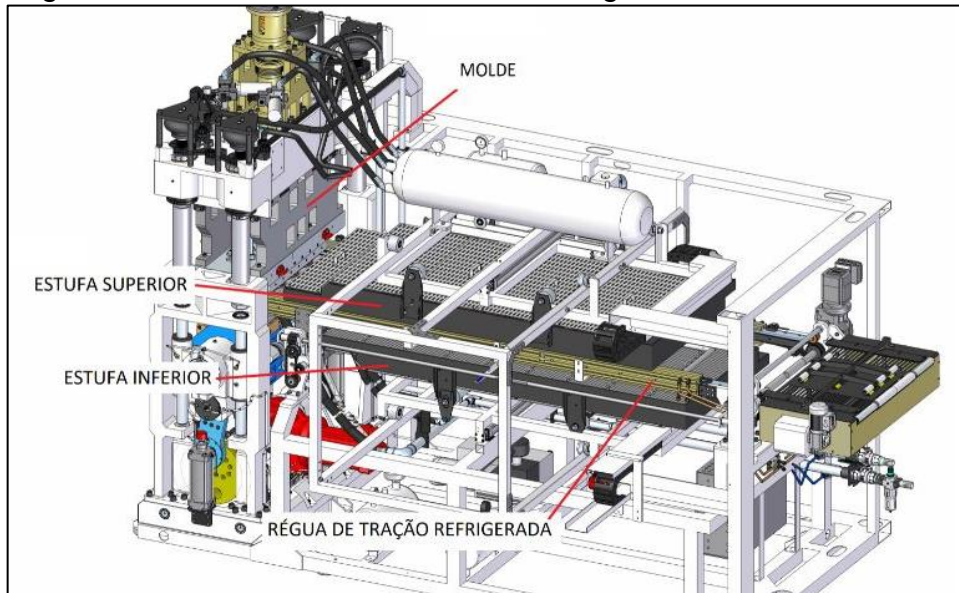
Esta revisão parte da apresentação dos aspectos técnicos da termoformagem, assim como do balanço de massa e energia no processo de transferência de calor entre a estufa de aquecimento, lâmina de polímero e o ambiente.

3. TERMOFORMAGEM E SUAS PRINCIPAIS ETAPAS

Termoformadoras são máquinas que dão formas a objetos em polímeros, usando basicamente energia térmica, mecânica e um molde. Atualmente são usadas em grande escala na indústria mundial. Seja para termoformar peças em polímero para automóveis, aviões, bebidas, produtos lácteos, copos, pratos, potes e uma infinidade de outros produtos de diversos tipos de polímeros.

Este trabalho é direcionado para o estudo de uma máquina termoformadora de potes descartáveis, que geralmente são fabricados em polipropileno (PP) ou em Poliestireno (PS). Uma visão geral da termoformadora é apresentada na Fig. 1.

Figura 1- Desenho em CAD 3D da montagem da termoformadora.



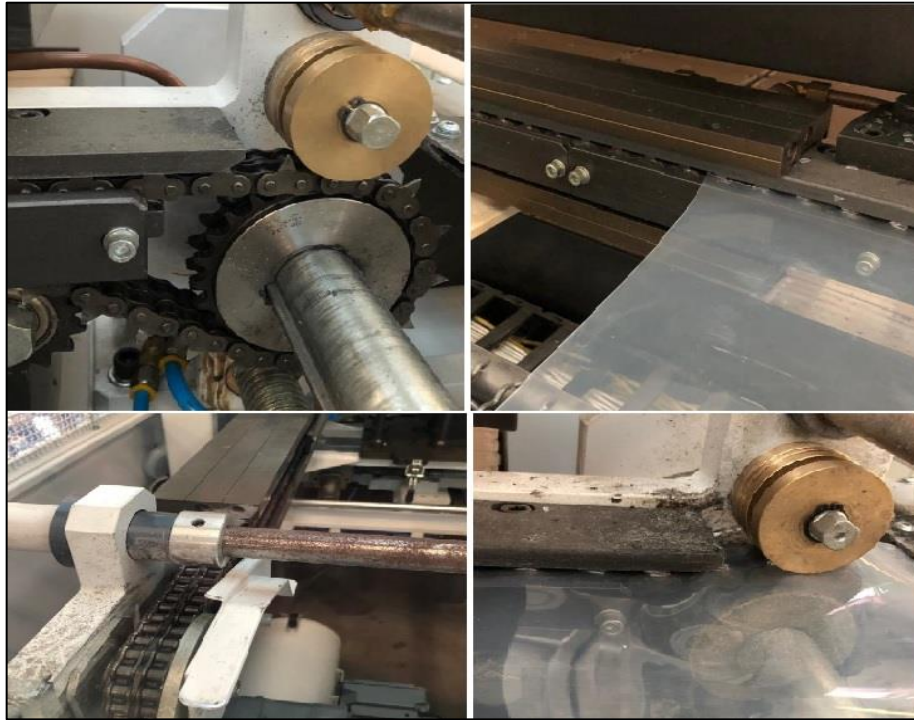
Fonte: AMD Máquinas e Equipamentos (2019).

Conforme Pickler *et al.* (2016), *apud* Throne (2008), a termoformagem possui como principais etapas:

- ✓ Fixação da lâmina de polímero;
- ✓ Aquecimento;
- ✓ Moldagem;
- ✓ Resfriamento;
- ✓ Corte.

Durante o funcionamento, a lâmina de polímero, que vem enrolada em bobinas, fica posicionada atrás da máquina e antes de chegar nas régua de tração, passa pelo pré-aquecedor onde a lâmina sofre um pré-aquecimento por condução através de rolos quentes. Depois é tracionada por uma corrente no sentido horizontal para a região de aquecimento. As correntes não possuem movimentos contínuos devido ao tempo de formação do produto dentro do molde. Este tempo define o ciclo de produção, assim como a velocidade de produção da máquina que é determinada em ciclos por minuto. A Fig. 2 mostra detalhes da fixação da lâmina de polímero.

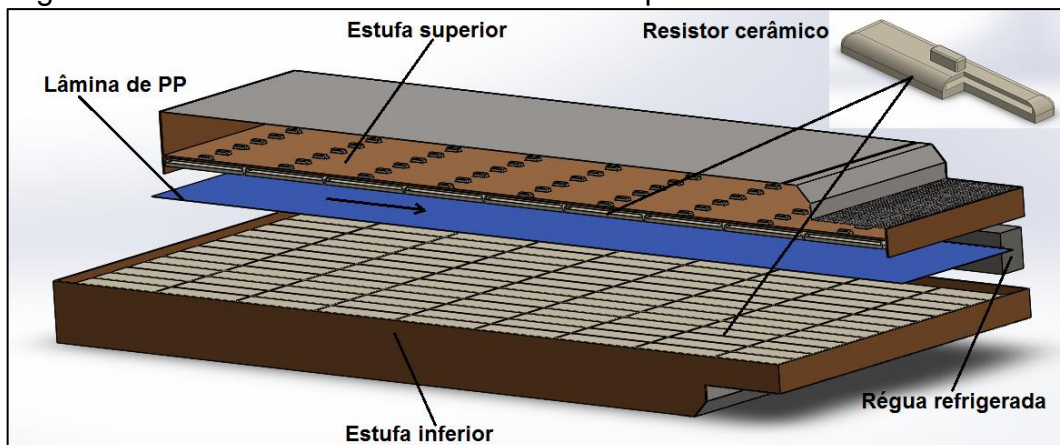
Figura 2- Fixação da lâmina de polímero.



Fonte: Do Autor (2019).

O aquecimento da lâmina de polímero é feito através da radiação emitida por aquecedores radiantes, mais especificamente por resistências cerâmicas. Estas resistências são instaladas nas estufas de aquecimento superior e inferior conforme representado na Fig. 3.

Figura 3- Desenho em Corte da Estufa de Aquecimento.

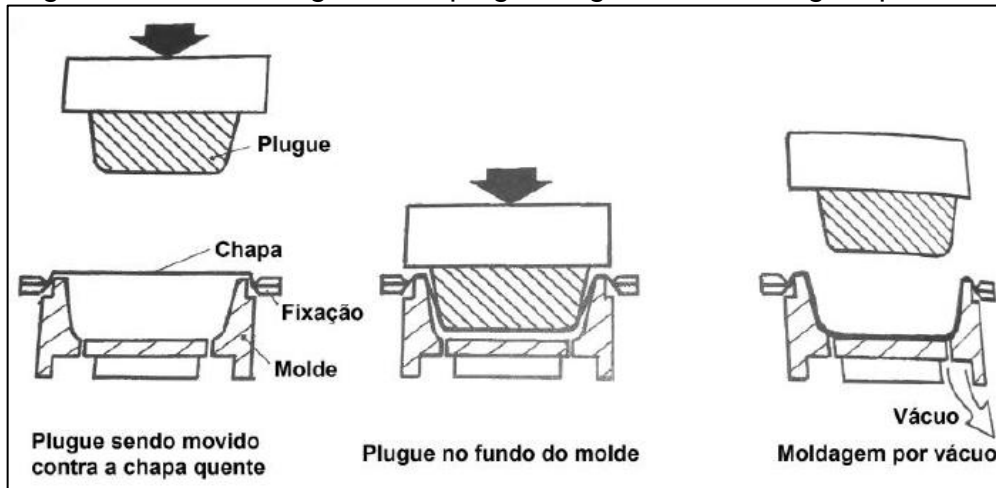


Fonte: Desenvolvida pelo autor baseado na estufa (2019).

Após aquecida, a lâmina de polímero entra na estação de moldagem, onde tem início o processo de conformação dos potes. Inicialmente um plug começa o estiramento do material, forçando-o para dentro do molde. No segundo momento,

entra a pressão de formação auxiliada pelo vácuo, que faz o polímero aquecido ocupar todo o espaço dentro do molde (Fig. 4). Após a finalização deste processo, as paredes do molde refrigeradas mantêm o polímero na forma desejada.

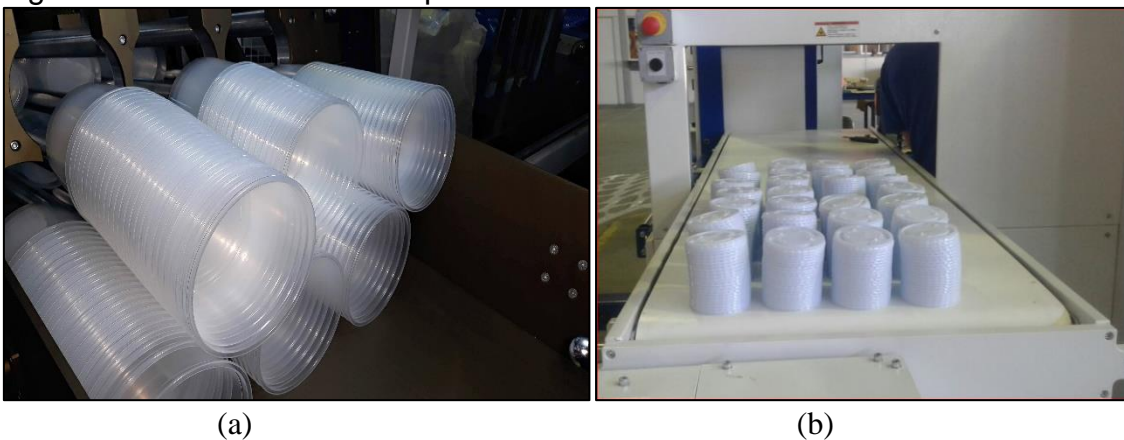
Figura 4 - Pré-moldagem com plugue seguida de moldagem por vácuo.



Fonte: Modificado de Throne (1996).

Com todas as etapas anteriores concluídas, o produto em sua forma final é cortado da lâmina de polímero remanescente e extraído do molde pelo robô. Em seguida, é empilhado no magazine (Fig. 5 (a)) e encaminhado para esteira de saída onde será embalado. O mesmo procedimento é realizado para a formação das tampas em PS representadas na Fig. 5 (b).

Figura 4- Potes em PP e Tampas em PS.



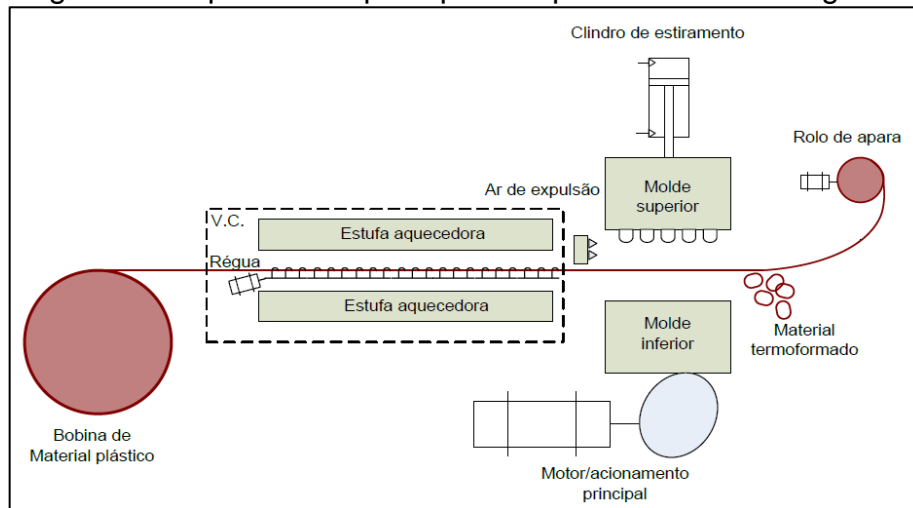
Fonte: AMD Máquinas e Equipamentos (2019).

4. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

A termoformadora é um equipamento para produção em série, sendo assim os parâmetros operacionais praticamente não sofrem alterações durante o funcionamento do equipamento que é projetado para operar de forma contínua. Este princípio de funcionamento, permite considerar que a termoformadora trabalha em regime permanente, sendo desprezados para este estudo, a partida da máquina, término de operação e paradas para manutenção.

O balanço de massa e energia compreende somente a região das estufas, que é o objeto principal do estudo térmico deste trabalho. Para análise, as estufas foram delimitadas pelo volume de controle (V.C.) mostrado na Fig. 5.

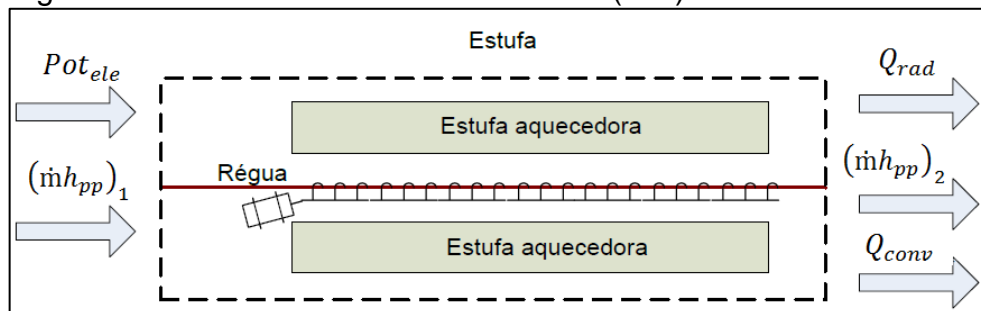
Figura 5- Esquema das principais etapas de termoformagem.



Fonte: Adaptado de Pickler (2016, p. 87).

O Balanço de massa e energia do V.C. é detalhado e representado pela Fig. 6.

Figura 6- Volume de Controle das estufas (V.C).



Fonte: Adaptado de Pickler (2016, p.87).

No V.C. entra a potência elétrica para o aquecimento radiante (Pot_{ele}) e energia contida na lâmina de PP, $(\dot{m}h_{pp})_1$. Deixam o V.C., as taxas de transferência de calor por convecção (Q_{conv}) e radiação (Q_{rad}), e a energia contida na lâmina de PP após o aquecimento na estufa $(\dot{m}h_{pp})_2$.

As seguintes relações simplificadoras são adotadas para o desenvolvimento matemático aplicado ao volume de controle.

- ✓ A estufa de aquecimento opera em regime permanente;
- ✓ A lâmina de polímero é fina o suficiente para que sejam desprezadas as trocas de calor por condução através de sua espessura e comprimento;
- ✓ A configuração da estufa de aquecimento é aproximada por duas cavidades: superior e inferior. A cavidade superior é constituída pela superfície do conjunto de resistências cerâmicas, pela superfície da lâmina de polímero e pelas superfícies das paredes laterais (imaginárias) do volume de controle. Por simetria, a cavidade inferior também é composta pela superfície do conjunto de resistências cerâmicas, pela superfície da lâmina de polímero e pelas superfícies das paredes laterais (imaginárias) do volume de controle Conforme Fig. 8 e 9.
- ✓ A transferência de calor por radiação nas cavidades (regiões confinadas) ocorre entre superfícies cinzas e difusas;
- ✓ O espaço físico de instalação e operação da termoformadora é grande e, conseqüentemente, se comporta como um corpo negro;

5. EQUACIONAMENTO DA ESTUFA

A vazão mássica de polímero que entra no volume de controle. é calculada pela Eq. 1.

$$\dot{m}_p = \rho_p \cdot V_p \cdot A_{t,p} \quad (1)$$

Onde:

\dot{m}_p = Vazão mássica de polímero (kg/s)

ρ_p = Massa específica do polímero (kg/m^3)

V_p = Velocidade média da lâmina de polímero (m/s)

$A_{t,p}$ = Área da seção transversal da lâmina de polímero (m^2)

A velocidade média da lâmina de polímero que passa pela estufa é determinada pela Eq. 2.

$$V_p = \frac{L_{ciclo}}{t_{ciclo}} [m/s] \quad (2)$$

A área da seção transversal é calculada pela Eq. 3.

$$A_{t,p} = e_p \cdot l_p \quad (3)$$

Onde:

e_p = Espessura do polímero (m)

l_p = Largura do polímero (m)

A Eq. 4 e Eq. 5 fornecem uma representação conveniente para a taxa de transferência de calor radiante líquida em uma superfície, onde o esquema de troca de calor na seção radiante da estufa é mostrado na Fig. 7 e 8, (Pickler, 2016).

$$Q_i = \frac{Eb_i - J_i}{(1 - \varepsilon_i)/\varepsilon_i \cdot A_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(\varepsilon_j \cdot F_{ij})^{-1}} [W] \quad (4)$$

Onde:

Q_i = Taxa de transferência de calor líquida por radiação emitida pela superfície (W)

Eb_i = Emissão de corpo negro da superfície i (W/m²)

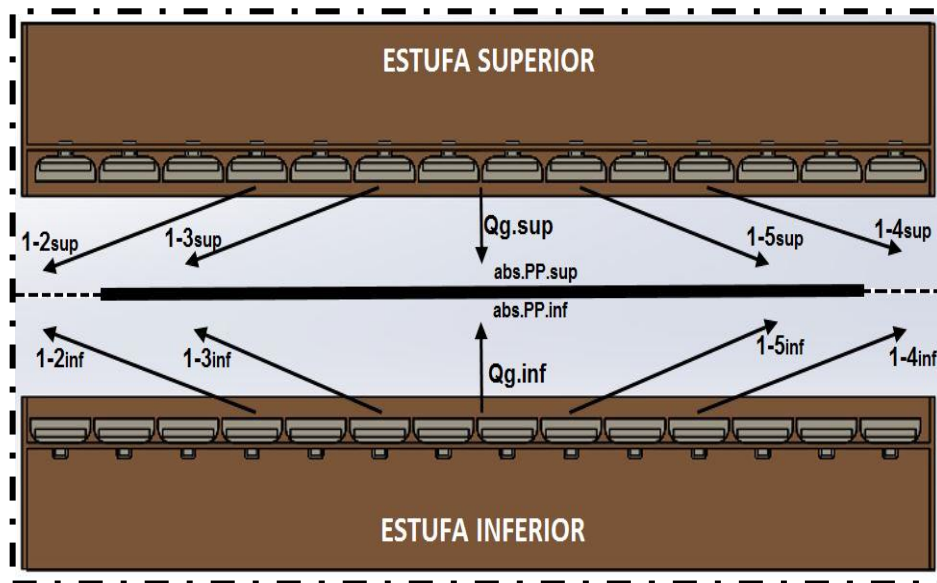
J_i = Radiosidade da superfície i (W/m²)

ε_i = Emissividade da superfície i (adm.)

A_i = Área da superfície i (m²)

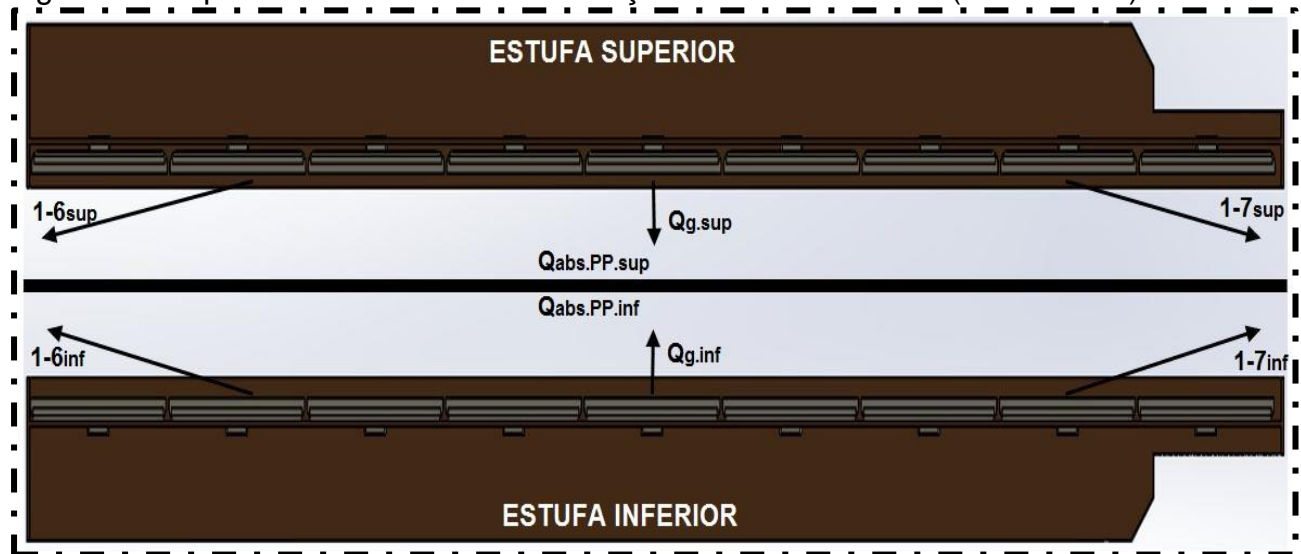
F_{ij} = Fator de forma entre a superfície i e uma superfície j qualquer (adm.)

Figura 7 - Esquema de troca de calor na seção radiante da estufa (Vista frontal).



Fonte: Do autor (2019)

Figura 8 - Esquema de troca de calor na seção radiante da estufa (Vista lateral).



Fonte: Do autor (2019).

Para os cálculos de energia perdida por convecção e radiação, no momento, não importa como a transferência ocorre dentro do material que compõe a estufa (condução) e, sim, o quanto de energia está sendo trocada com o meio externo.

A perda de calor por radiação através das paredes externas da estufa é calculada pela Eq. 5 (Incropera, 2014).

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_c (T_s^4 - T_{viz.}^4) [W] \quad (5)$$

Onde:

Q_{rad} = Perda de calor por radiação (W/m²)

σ = Constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10⁻⁸ W/m².K⁴)

ε = Emissividade do aquecedor e plástico (adm.)

T = Temperatura (K)

O calor perdido por convecção natural nas paredes externas da estufa é calculado pela Eq. 6, (Incropera, 2014):

$$q_{conv} = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) [W] \quad (6)$$

Onde:

q_{conv} = Calor perdido por convecção (W)

h_c = Coeficiente médio de transferência de calor por convecção (W/m².K)

A = Área da superfície (m²)

T_s = Temperatura da superfície (°C)

T_∞ = Temperatura ambiente (°C)

Para determinar o coeficiente de convecção natural, será utilizada a Eq. 7 também usada por (Kang/Rong, 2004):

$$h_c = \frac{Nu \cdot K}{L} [W/m^2 \cdot K] \quad (7)$$

Onde:

h_c = Coeficiente de convecção natural (W/m².K)

Nu = Número de Nusselt (adm.)

k = Condutividade térmica (W/m.K)

L = Comprimento da estufa (m)

Como o número de Nusselt é diferente para cada situação, isto é, dependendo do tipo de escoamento, se for vertical, horizontal, com aquecimento em

cima ou embaixo da placa. Na sequência, será utilizado o número de Nusselt para duas situações. Nu para placas planas com superfície quente embaixo, (Eq. 8) e com a superfície quente em cima (Eq. 9), como segue respectivamente (Chy/Boulet, 2011):

$$Nu = 0,27 \cdot Ra_L^{\frac{1}{4}} [adm.] \quad (8)$$

$$Nu = 0,15 \cdot Ra_L^{\frac{1}{3}} [adm.] \quad (9)$$

Onde:

Ra_L = Número de Rayleigh (adm.)

A convecção nas chapas laterais, frontais e traseiras da estufa serão calculadas usando Nu da Eq. 10 para chapas verticais. (Çengel/Ghajar, 2012):

$$Nu = \left(0,825 + \left(\frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right) \right)^2 [adm.] \quad (10)$$

O número de Rayleigh é encontrado pela Eq. 11 (Kang/Rong, 2004):

$$Ra = Gr \cdot Pr = \left(\frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot Lc^3}{\gamma^2} \right) \cdot Pr [adm.] \quad (11)$$

Onde:

g = Força gravitacional (m/s²)

β = Coeficiente de expansão térmica do ar (1/K)

T_s = Temperatura da superfície (°C)

T_∞ = Temperatura ambiente (°C)

L_c = Razão entre área e perímetro da superfície aquecida (m)

Pr = Número de Prandtl (adm.)

γ = Viscosidade cinemática do ar (m²/s)

Os dados para β , Pr , γ são encontrados em tabelas de propriedades termodinâmicas dos gases, que trazem valores para determinadas faixas de temperatura para o ar. A temperatura usada para buscar os dados na tabela é a temperatura de filme (T_f), conforme Eq. 12. Para placas verticais " L_c " é igual " L " que é igual a altura da placa. (Kreith, 2003).

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (12)$$

Onde:

T_f = Temperatura de filme ($^\circ\text{C}$)

O calor absorvido pela lâmina de PP é encontrado pela Eq. 13, que é a somatória das trocas líquidas por radiação entre a superfície i (superior e inferior), e a lâmina de PP mais a troca líquida em cada superfície da cavidade da estufa, (Pickler (2016):

$$Q_{abs.PP.T} = Q_{abs.PP.sup} + Q_{abs.PP.inf} + Q_{inf.1-3} + Q_{inf.1-5} + Q_{sup.1-3} + Q_{sup.1-5} \text{ [W]} \quad (13)$$

Onde:

$Q_{abs.PP.T}$ = Calor total absorvido pela lâmina de PP (W)

$Q_{abs.PP.sup}$ = Calor absorvido da estufa superior pela lâmina de PP (W)

$Q_{abs.PP.inf}$ = Calor absorvido da estufa inferior pela lâmina de PP (W)

$Q_{inf.1-3}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 inferior (resistores) e a lâmina de PP superfície 3 (W)

$Q_{inf.1-5}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 inferior (resistores) e a lâmina de PP superfície 5 (W)

$Q_{sup.1-3}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 superior (resistores) e a lâmina de PP superfície 3 (W)

$Q_{sup.1-5}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 superior (resistores) e a lâmina de PP superfície 5 (W)

A somatória da energia gasta na estufa superior é encontrada pela Eq. 14 (Pickler (2016)):

$$\begin{aligned}
 Q_{g.sup} &= Q_{abs.PP.sup} + Q_{sup.1-2} + Q_{sup.1-4} + Q_{sup.1-3} + Q_{sup.1-5} + Q_{sup.1-6} + Q_{sup.1-7} \\
 &+ Q_{sup.conv} \\
 &+ Q_{sup.rad} [W]
 \end{aligned} \tag{14}$$

Onde:

$Q_{g.sup}$ = Energia gasta na estufa superior (W)

$Q_{abs.PP.sup}$ = Calor absorvido dos resistores superior pela lâmina de PP (W)

$Q_{sup.1-2}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 superior (resistores) e a lateral da estufa, superfície 2 (W)

$Q_{sup.1-4}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 superior (resistores) e a lateral da estufa, superfície 4 (W)

$Q_{sup.1-6}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 superior (resistores) e a lateral da estufa, superfície 6 (W)

$Q_{sup.1-7}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 superior (resistores) e a lateral da estufa, superfície 7 (W)

$Q_{sup.conv}$ = Calor perdido por convecção natural na estufa superior (W)

$Q_{sup.rad}$ = Calor perdido por radiação na estufa superior (W)

A somatória da energia gasta na estufa inferior é encontrada pela Eq. 15 (Pickler (2016)):

$$\begin{aligned}
 Q_{g.inf} &= Q_{abs.PP.inf} + Q_{inf.1-2} + Q_{inf.1-4} + Q_{inf.1-2} + Q_{inf.1-5} + Q_{inf.1-3} + Q_{inf.1-5} + Q_{inf.conv} \\
 &+ Q_{inf.rad} [W]
 \end{aligned} \tag{15}$$

Onde:

$Q_{g.inf}$ = Energia gasta na estufa inferior (W)

$Q_{abs.PP.inf}$ = Calor absorvido dos resistores inferior pela lâmina de PP (W)

$Q_{inf.1-2}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 inferior (resistores) e a lateral da estufa, superfície 2 (W)

$Q_{inf.1-4}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 inferior (resistores) e a lateral da estufa, superfície 4 (W)

$Q_{inf.1-6}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 inferior (resistores) e a lateral da estufa, superfície 6 (W)

$Q_{inf.1-7}$ = Troca líquida de calor entre a superfície 1 inferior (resistores) e a lateral da estufa, superfície 7 (W)

$Q_{inf.conv}$ = Calor perdido por convecção natural na estufa inferior (W)

$Q_{inf.rad}$ = Calor perdido por radiação na estufa inferior (W)

As perdas por convecção natural e radiação nas carcaças superior e inferior da estufa são fornecidas pela Eq. 16 (Pickler (2016):

$$Q_{p.cv.rd} = Q_{inf.conv} + Q_{inf.rad} + Q_{sup.conv} + Q_{sup.rad} [W] \quad (16)$$

Onde:

$Q_{p.cv.rd}$ = Somatória da energia perdida por convecção natural e radiação nas estufas superior e inferior (W).

A energia total perdida nas estufas superior e inferior é encontrada pela Eq. 17. (Pickler (2016):

$$\begin{aligned} E_{p.e} &= Q_{p.cv.rd} + Q_{inf.1-2} + Q_{inf.1-4} + Q_{inf.1-6} + Q_{inf.1-7} + Q_{sup.1-2} + Q_{sup.1-4} + Q_{sup.1-6} \\ &\quad + Q_{sup.1-7} [W] \end{aligned} \quad (17)$$

Onde:

$E_{p.e}$ = Energia total perdida nas estufas durante o processo (W)

Para calcular a temperatura da lâmina de polímero na saída da estufa, é necessário conhecer a entalpia neste ponto, que pode ser calculada pela Eq. 18 (Çengel/Ghajar, 2012):

$$Q_{abs.PP.T} = \dot{m}_{pp} \cdot (h_{pp,2} - h_{pp,1}) [W] \quad (18)$$

Onde:

$Q_{abs.PP.T}$ = Calor total absorvido pela lâmina de PP (W)

\dot{m}_{pp} = Vazão mássica da lâmina PP através do V.C. (kg/s)

$h_{pp,1}$ = Entalpia de entrada do PP (J/kg)

$h_{pp,2}$ = Entalpia de saída do PP (°C)

A entalpia da lâmina de polímero não varia linearmente com a temperatura, assim, Pickler (2016) desenvolveu a Eq. 19 que permite calcular a temperatura do polímero quando se conhece a entalpia nesta temperatura.

$$T_{pp} = \frac{\ln\left(\frac{h_{pp,2}}{41,657}\right)}{0,0134}, 42^\circ C \leq T_{pp} \leq 163^\circ C [^\circ C] \quad (19)$$

Onde:

T_{pp} = Temperatura da chapa de PP na saída da estufa (°C)

$h_{pp,2}$ = Entalpia de saída do PP (°C)

A eficiência da estufa de aquecimento é calculada dividindo o calor total absorvido pela lâmina de PP pelo total de calor gerado nas estufas superior e inferior conforme Eq. 20.

$$\eta = \frac{Q_{abs.PP.T}}{Q_{g.sup} + Q_{g.inf}} [adm.] \quad (20)$$

Onde:

η = Eficiência da estufa (adm.)

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A termoformadora utilizada para este trabalho foi fabricada pela AMD Máquinas e Equipamentos de Urussanga-SC. A termoformadora será apresentada a seguir, assim como os métodos utilizados nas medições.

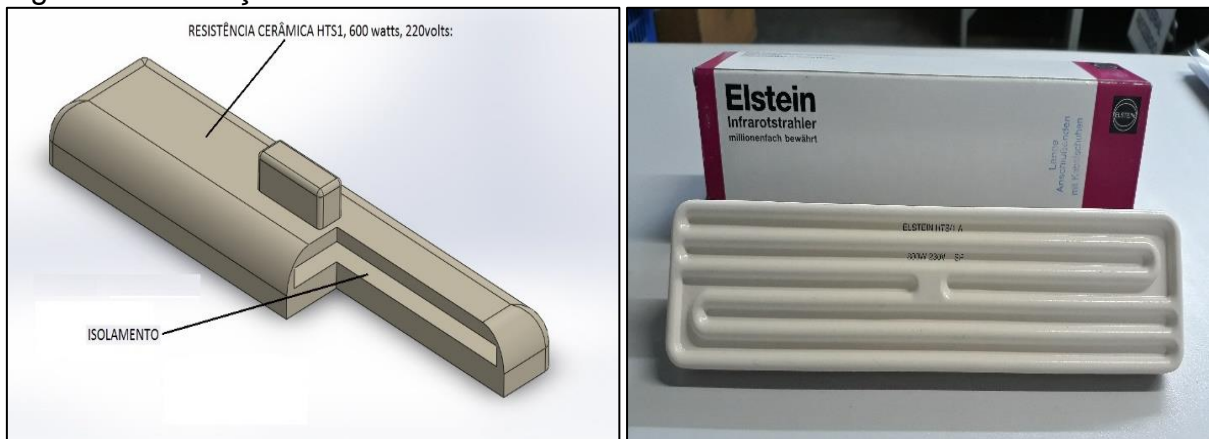
6.1 TERMOFORMADORA AMD-78P

A termoformadora avaliada neste trabalho é fabricada especialmente para produção de potes da linha industrial e utiliza várias etapas até a finalização do produto pronto. Inicia-se pelo desbobinador que controla a velocidade que a lâmina de PP é desbobinada, essa velocidade é sincronizada com a ciclagem da termoformadora. Em seguida, a lâmina passa pelo pré-aquecedor de rolos e segue para a estufa de aquecimento onde é tracionada pelas correntes montadas na régua de refrigeração até chegar ao molde, onde ocorre a formação do produto.

Esta máquina se encaixa na categoria das termoformadoras Tilt. É uma categoria de máquinas em que o molde, após formar e cortar o produto, gira para frente para que o robô extraia o produto de dentro das cavidades e empilhe no magazine e, em seguida, manda para esteira de saída.

Este modelo, não possui isolamento na estufa, uma vez que cada resistor modelo HTS utilizado na estufa de aquecimento, possui em sua fabricação isolamento interno conforme Fig. 9, e pode atingir picos de até 900°C ligados em 230 Volts, mas a temperatura de trabalho é 700°C.

Figura 9 - Ilustração do resistor em corte mostrando isolamento e resistor Elstein.



(a)

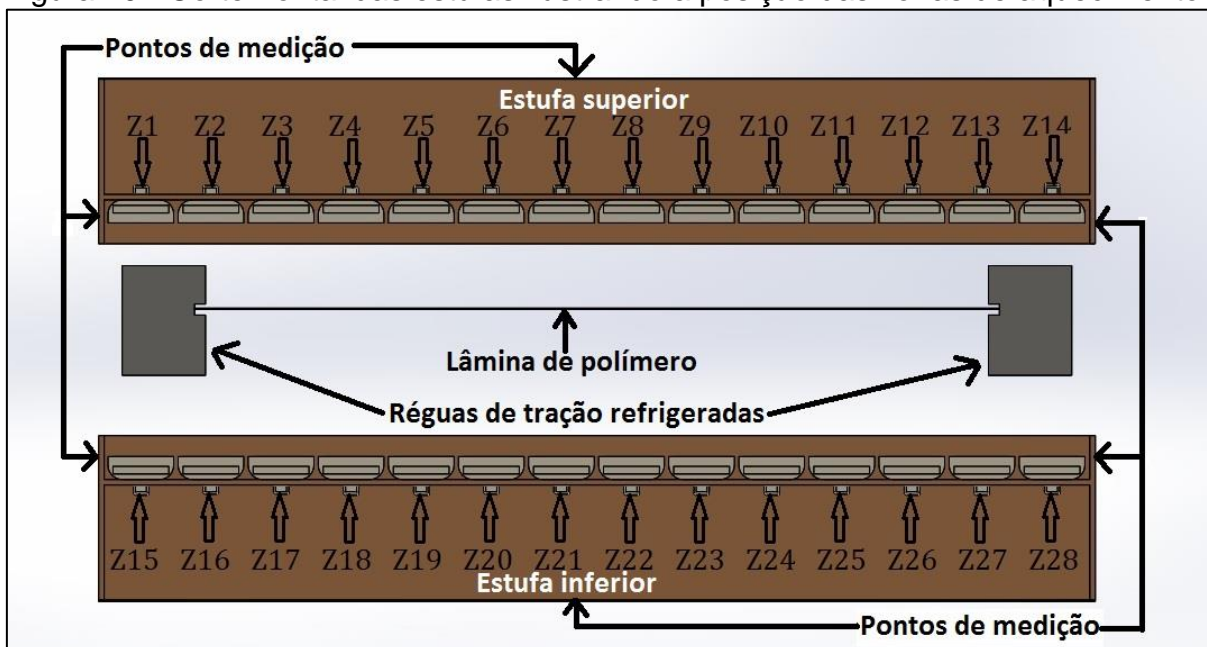
(b)

Fonte: Do autor (2019).

As estufas de aquecimento são montadas com 252 resistores de 600 Watts cada. São 126 na estufa superior e 126 na inferior. Uma das estufas fica acima da lâmina de polímero emitindo a radiação para baixo. A outra estufa fica abaixo da lâmina emitindo radiação para cima conforme Fig. 10. Também é possível ver na mesma figura, a indicação dos pontos de medições da carcaça.

Além dos pontos de medição de temperatura na carcaça, também foram coletadas as temperaturas nas 28 zonas longitudinais, compostas por resistores cerâmicos. Sendo 14 zonas na estufa superior e 14 na estufa inferior, conforme indicado na Fig. 10.

Figura 10 - Corte frontal das estufas ilustrando a posição das zonas de aquecimento.



Fonte: Desenvolvida pelo autor baseado na estufa (2019).

O ajuste de temperatura é feito por zonas longitudinais, correspondentes as fileiras de cavidades do molde e são controladas individualmente por pirômetros, onde o ajuste é feito diretamente pela IHM (Interface homem máquina) da Termoformadora. Sendo os termopares tipo K, que ficam embutidos na própria resistência, os responsáveis por gerar um sinal correspondente à temperatura.

6.3 TEMPERATURA DE FORMAÇÃO PARA O PP, CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES TÉRMICAS.

Vários parâmetros devem ser considerados na termoformagem de produtos descartáveis, os principais são: tipo de material, (PS, PP, PET..etc), espessura, largura e temperatura da lâmina, que para o PP está entre 153°C a 163°C (Braskem, 2018 via e-mail para o auto), e também refrigeração do molde.

A largura da lâmina é uma característica de projeto e não interfere diretamente na temperatura dos resistores, porém absorve calor e gera consumo de energia elétrica. Mas a espessura tem grande impacto sobre o ajuste da faixa de temperatura da estufa. Quanto mais espessa, maior deve ser a temperatura, pois necessita de mais tempo para que o núcleo da lâmina chegue à temperatura de formação. Porém se a lâmina for muito espessa, e a temperatura muito alta, pode ocorrer a queima da superfície do plástico antes de atingir a temperatura ideal no núcleo da lâmina (Gruenwald, 1998).

Na Tab. 1, pode ser verificado algumas propriedades térmicas do PP e temperatura de formação.

Tabela 1: Propriedades térmicas do PP.

Massa específica [kg/m³]	910
Condutividade térmica [W/m.K]	0,21
Calor específico [J/kg.K]	3391
Difusibilidade térmica [m²/s]	6,80E-08
Emissividade [adm.]	0,95
Temperatura de formação [°C]	153 a 163

Fonte: Pickler (2016); apud Throne (2008).

Algumas características e temperaturas de transição dos principais polímeros para termoformagem são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2: Propriedades e características do PP e PS

Material	<i>T_g</i> (°C)	<i>T_d</i> (°C)	<i>T_m</i> (°C)	Característica
PP (Polipropileno)	-10	170	330-410	Elevada resistência ao calor, elevada resistência química.
PS (Poliestireno)	-85-105	240	280 - 440	Dureza e rigidez, boa colorabilidade, ótima brilhatura e transparência.

Fonte: Pickler (2016); apud Turci (2007).

Onde T_g é a temperatura de transição vítrea, T_d é a temperatura de decomposição do polímero e T_m é a temperatura de fusão.

6.3 Procedimento para Coleta de Dados.

Para a execução do trabalho, os dados foram coletados de uma máquina termoformadora de potes em PP. A máquina encontrava-se na empresa fabricante e os dados foram coletados durante os testes da máquina, após finalização da montagem.

As temperaturas foram registradas utilizando sensores termopares tipo “K” nos diversos pontos da carcaça das estufas e um termômetro infravermelho para a conferência de temperatura dos pontos. Também foi usado o sistema de medição da própria máquina durante a fase de testes, onde houve a fabricação de potes, e ela estava operando com as temperaturas que a lâmina de PP requer para que haja a formação ideal do produto, (entre 153°C a 163°C). Foram anotadas três temperaturas em cada zona de aquecimento registradas pela IHM (Interface homem máquina) da termoformadora. Com o termômetro infravermelho, foram verificadas as temperaturas em cada ponto de medição na estrutura da estufa durante a operação. Como a máquina possui um pré-aquecedor de rolos, que faz um pré-aquecimento da lâmina por condução, foi coletada também a temperatura do polímero antes da entrada dele na estufa usando o termômetro infravermelho. A temperatura ambiente foi coletada nas próprias resistências da máquina antes de ligá-la, e também conferido com o termômetro infravermelho em pontos da máquina, piso e bobina de PP à temperatura ambiente.

A ciclagem da máquina foi buscada na IHM. A espessura da lâmina é fornecida pelo fabricante da bobina e a largura útil da lâmina de PP foi medida assim que foi fixada nas correntes da régua de tração. A temperatura de entrada e saída da água de refrigeração foi coletada na IHM do refrigerador. Todos os dados dos resistores foram buscados no manual do fabricante. Também feito alguns testes de bancadas para verificar a diferença entre as temperaturas medidas pelo termopar da resistência e a temperatura em sua superfície emissora de radiação e na superfície isolada.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os dados das medições de temperatura na estufa da termoformadora, também os resultados da modelagem matemática e a comparação com os cálculos de potência elétrica e potência térmica baseados nos dados de catálogo. Será considerado tudo que foi gerado no sistema, o que foi aproveitado para formar o produto e o que foi perdido por radiação, convecção e absorção pela refrigeração.

7.1 DADOS DE PROCESSO E COLETA DAS TEMPERATURAS.

Para realização do trabalho precisou-se fazer o levantamento dos dados mais importantes e indispensáveis para a realização dos cálculos. Entre eles estão os dados de processo conforme Tab. 3.

Tabela 3: Dados de ciclagem da máquina.

Dados de Processo	Valor medido
Ciclagem da Máquina	15 ciclos/min
Tempo de ciclo	4,00 s
Passo da Lâmina	0,36 m
Velocidade de ciclo	0,09 m/s

Fonte: Do autor.

Também as dimensões da lâmina de polipropileno apresentadas na Tab. 4.

Tabela 4: Dimensões da lâmina de PP.

Dados da lâmina de PP	Valor medido
Largura	0,740 m
Espessura	0,0014 m

Fonte: Do autor.

As dimensões das estufas, que são simétricas e podem ser vistas na Tab.

5.

Tabela 5: Dimensões da estrutura das estufas.

Medidas das estufas	Valor medido
Comprimento	2,260 m
Largura	0,910 m
Altura	0,150 m
Espessura das chapas laterais	0,005 m

Espessura da chapa do fundo	0,002 m
Espessura da chapa da tampa	0,001 m

Fonte: Do autor.

A Tab.6 mostra as distâncias entre os resistores inferiores e superiores até a lâmina de PP e também das laterais até a régua. Essas distâncias entre resistores e polímero podem sofrer variações dependendo do ajuste de cada máquina.

Tabela 6: Principais distâncias no conjunto de aquecimento.

Outras medidas importantes das estufas	Valor medido
Distância dos resistores superior até a lâmina de PP	0,080 m
Distância dos resistores inferior até a lâmina de PP	0,117 m
Altura (espessura) da régua de tração refrigerada	0,100 m
Distância entre a borda da estufa superior até a régua	0,020 m
Distância entre a borda da estufa inferior até a régua	0,055 m
Distância da cabeceira da estufa até o molde	0,050 m

Fonte: Do autor.

A coleta de temperaturas nas estufas foi realizada nas 28 zonas (Fig. 10 do item 9.1), e indicados na Tab. 7 para a estufa superior e Tab. 8 para a estufa inferior. Também consta nas mesmas tabelas, a média das temperaturas externas das estufas. As temperaturas em alguns pontos da carcaça foram coletadas com o principal objetivo de avaliar a perda de calor por convecção e radiação nestes pontos. E posteriormente, caso feitas algumas modificações, como aplicação de isolamento térmico, será avaliado se sofrerão alguma redução. Também é importante mencionar a temperatura de entrada na estufa, que sai do pré-aquecedor com 42°C.

Tabela 7- Média das temperaturas da estufa superior.

Temperatura média das zonas da estufa superior (°C)													
T_∞(°C)	26												
Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14
487	442	422	412	399	396	396	394	397	407	427	432	477	482
Temperatura média das Paredes externas da estufa superior													
Lateral dir.	Lateral esq.		Frontal	Traseira		Tampa							
181	212		189	188		75							

Fonte: Fonte: Do autor.

Para montar as Tabelas 7 e 8, as temperaturas foram coletadas com a máquina em processo. Esta média foi feita usando três coletas em cada ponto.

Tabela 8 - Média das temperaturas coletadas na estufa inferior.

Temperatura média das zonas da estufa inferior (°C)													
T_{∞} (°C)	26												
Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20	Z21	Z22	Z23	Z24	Z25	Z26	Z27	Z28
339	334	334	332	327	327	328	328	328	332	337	342	352	362
Temperatura média das Paredes externas da estufa inferior (°C)													
Lateral dir.	Lateral esq.		Frontal	Traseira		Tampa		Molde					
123	191		181	117		82		15					

Fonte: Fonte: Do autor.

Para comparar a temperatura medida pelo termopar interno da resistência e a temperatura na superfície emissora, foram feitos testes em bancada onde os resultados são apresentados na Tab. 9. Os testes foram filmados e tiveram um tempo de 10 minutos para cada resistência e posteriormente foi medido o tempo que cada resistência ficou ligada e também a tensão no momento do teste.

Tabela 9- Comparação entre a temperatura interna e na superfície radiante

Tempo de teste de 10 min após estabilizar temperatura					
	$T_{interna}$ (°C)	$T_{externa}$ (°C)	Diferença (°C)	t. ligada(min)	Volts
T_{∞}	20	20			
$T_{est.sup}$	426	392	34	04:34	210 a 215
$T_{est.inf}$	336	305	31	03:17	210 a 215

Fonte: Do Autor

A temperatura ambiente (T_{∞}) estava entre 20°C e a diferença entre a temperatura do termopar interno e o externo, fixado na superfície radiante, foi de 34°C para a resistência que estava operando a 426°C, correspondente a média da estufa superior. Já a diferença para a resistência que estava operando a 336°C, correspondente a estufa inferior, foi de 31°C.

7.2 DADOS DO MANUAL DA RESISTÊNCIA ELSTEIN.

Os resistores HTS Elstein utilizados nas estufas são projetados para trabalhar com alimentação de 230 Volts para gerar a taxa de energia térmica conforme

manual do fabricante e devem ser instalados 64 resistores por metro quadrado conforme demonstrado na Tab. 10. Porém, no caso das estufas estudadas, são instalados 61 resistores por metro quadrado. Outro fator que influencia é a tensão usada, que é de 220 volts, isso na prática, diminui um pouco a potência de aquecimento.

Tabela 10: Principais dados dos resistores Elstein.

Dados dos resistores HTS- Elstein	Valor
Potência	600 W
Tensão de projeto	230 V
Temperatura de trabalho	700 °C
Taxa de energia térmica gerada	38,4 W/m ²
Eficiência	0,80 [adm.]
Emissividade	0,84 [adm.]

Fonte: Manual de resistores Elstein.

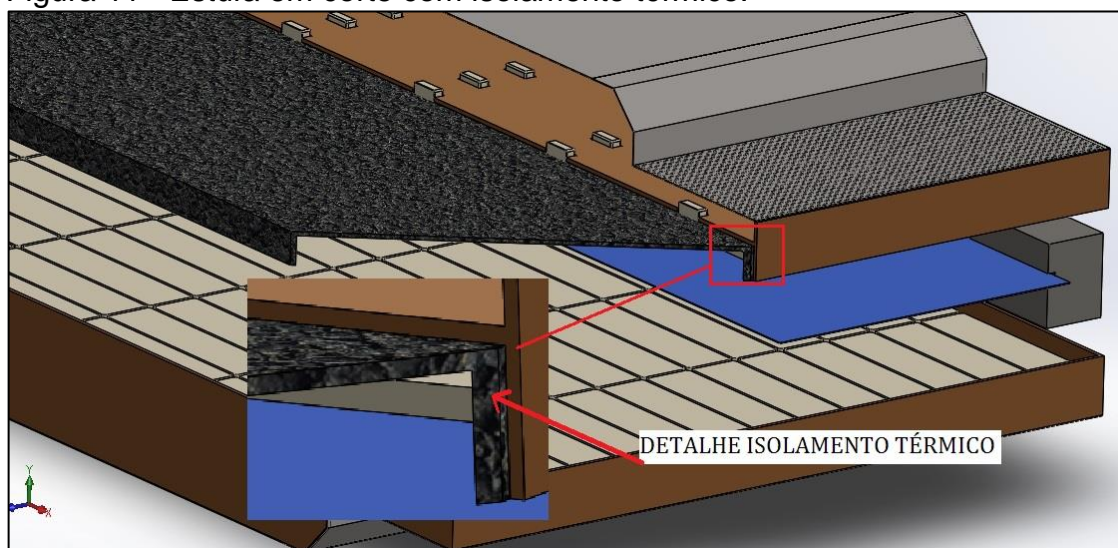
Será simulado também a aplicação de isolante térmico entre os resistores e a carcaça da estufa conforme Fig. 11. Para o cálculo, serão usadas as características do isolante térmico Pyrogel para uma faixa de temperaturas conforme Tab 11.

Tabela 11: Dados do isolante térmico.

Temperatura Média (°C)	0	100	200	300	400	500	600
Condutividade térmica (mW/m.K)	20	23	28	35	46	64	89
Emissividade (adm.)	0,15						

Fonte: Aspen Aerogels (2017).

Figura 11 - Estufa em corte com isolamento térmico.



Fonte: Autor, 2019.

7.3 RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO.

O resultado mais importante do processo é a qualidade dos produtos fabricados, para isso a temperatura de formação deve ser controlada dentro da faixa entre 153°C a 163°C. Abaixo ou acima dessa faixa, certamente ocorrerá problemas.

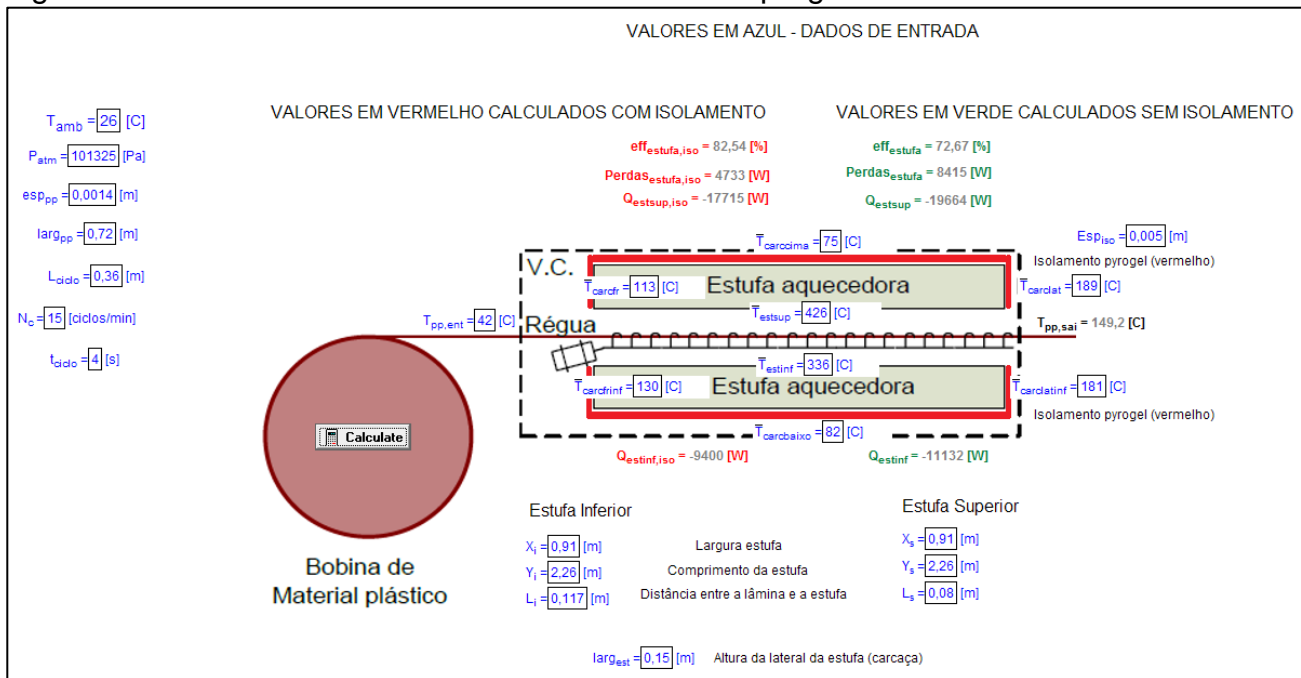
Após inserir os dados medidos no programa EES conforme Fig.12, obtve-se a resposta de temperatura de saída para lâmina de PP de 149,2 °C e a diferença para a temperatura mínima para o processo de formação foi de 2,48%. O programa também mostrou a energia térmica fornecida por cada estufa, considerando o cálculo sem isolamento, que foi de aproximadamente 19,7 kW para a superior e 11,1 kW para a inferior. Com isolamento de 5 milímetros, os resultados foram de 17,8 kW e 9,4 kW, respectivamente. Em percentual a diferença foi de 9,9% para a superior e 15,6% para a inferior.

As perdas sem isolamento na carcaça da estufa foram aproximadamente 8,4 kW, com o isolamento as perdas foram de 4,7 kW. Obteve-se uma redução de aproximadamente 56%. Apenas com a implantação de um isolamento de 5 milímetros.

A eficiência da estufa foi 72,7% sem o isolamento e 82,5% com o isolamento. O aumento da eficiência foi de 9,8%

Com esses resultados pode-se perceber a importância do isolamento térmico no sistema, pois com a simulação da aplicação de apenas 5 milímetros de isolamento, teve uma melhora significativa na eficiência em virtude da diminuição das perdas que ocorrem na estufa.

Figura 12 - Tela de entrada e saída de resultados do programa EES.



Fonte: Adaptado de Pickler (2016).

8. CONCLUSÕES

Embora não haja muitos estudos como este na literatura, este trabalho foi importante para evidenciar por onde ocorrem as maiores perdas na região da estufa da termoformadora, e também relatar as limitações que ocorreram no projeto. Isso permite que outros que tenham interesse na área de eficiência energética em máquinas termoformadoras de descartáveis possam se basear, já entendendo as limitações e como contorná-las.

Sobre os resultados encontrados, precisa-se salientar que a eficiência, variará consideravelmente, principalmente com o tipo de produto, peso, cor, espessura de lâmina, formulação da matéria prima utilizada etc. que estiver em processo. Também contribuem para isso, as condições climáticas e ajustes operacionais.

Como limitações pode-se citar o curto tempo de testes onde houve a coleta de dados, pois é evidente que com a máquina em operação por mais tempo, a temperatura nas diversas partes da estufa, estará em equilíbrio térmico, favorecendo a coleta de dados com maior qualidade.

Também é importante mencionar que quanto maior o número de pontos de medição de temperatura, maior é a precisão e confiabilidade dos resultados. Porém o

custo para este processo aumenta. Uma alternativa, seria a coleta de dados por câmera termográfica, onde as imagens coletadas podem ser tratadas e editadas através de software como o FlukeConect, permitindo saber a temperatura máxima, média e mínima no ponto escolhido.

Para um melhor aproveitamento da energia térmica gerada e, conseqüentemente, aumento da eficiência energética, as seguintes melhorias podem ser adotadas.

- Instalação de isolamento térmico nas estufas;
- Instalação de isolamento nos moldes e tubulações;
- Alteração do projeto visando eliminar as aberturas laterais da estufa;
- Avaliar o fechamento superior das carenagens por tecido térmico melhorando o enclausuramento da estufa.

REFERÊNCIAS

AMD MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, Coleta de Dados e Figuras. 2018.
<http://www.amdnet.com.br/>

AspenAerogels, Disponível em:
https://www.aerogel.com/_resources/common/userfiles/file/Data%20Sheets/Pyrogel-HPS-Datasheet-PT.pdf

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA 2017 ANO BASE 2016.
Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>

BRASKEM, Temperatura de formação do Polipropileno e Poliestireno (via e-mail para autor).2018.

CIÊNCIA NATURA (Sobre a Situação Energética Brasileira: de 1970 A 2030).
Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/viewFile/18492/pdf>

CHY, Estimation and Control of Plastic Temperature in Heating Phase of Thermoforming Process, Quebec, Canada 2013. Disponível em:
<http://digitool.library.mcgill.ca/thesisfile126971.pdf>

CHY, Development of an Improved Mathematical Model of the Heating Phase of Thermoforming Process. McGill University 3480 University Street Montreal, QC H3A 2A7, Canada.

ÇENGEL, Transferência de Calor e Massa, Quarta Ed. Porto Alegre-RS, 2012.

ELSTEIN, Ceramic Infrared Emitters. Disponível em: <http://www.elstein.com/>

ERCHIQUI, Non-isothermal Finite-Element Analysis of Thermoforming of Polyethylene Terephthalate Sheet: Incomplete Effect of the Forming Stage. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117309778>

GRUENWALD, Thermoforming: A Plastics Processing Guide -Technomic Publishing Company, Inc.- ISBN No. 1-56676-625-7

INCROPERA, Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, Sétima ed; Rio de Janeiro 2014.

MARTINS, (2015): Estudo de Isolamento Térmico para Sistema de Transferência de Calor em Máquina termoformadora de descartáveis plásticos.

Pickler, Análise de Eficiência Energética de uma Termoformadora de Copos Poliméricos Descartáveis, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/174696/344790.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PLÁSTICO, Plástico no Sul, 2014.

<https://www.plastico.com.br/plastico-sul-regiao-responde-por-305-volume-e-33-faturamento-da-transformacao-brasileira/>

THRONE, J. L. Technology of thermoforming. 1ª edição. Muni-que: Carl Hanser Verlag, 1996. 882 p.

KANG, Modeling and simulation of load heating in heat treatment furnaces. Department of Mechanical Engineering, Center for Heat Treating Excellence, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 100 Institute Road, Beijing MA 01609, China. Março 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605004851>

KREITH, Princípios de Transferência de Calor, 1234040503, São Paulo-SP, 2003.