



**UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE MINAS GERAIS**



**ESCOLA DE DESIGN**

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)  
MESTRADO EM DESIGN

**YRURÁ GARCIA JÚNIOR**

**ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA TERMOFORMAGEM A VÁCUO  
EM EMBALAGEM *BLISTER* POR TERMOGRAFIA  
E ANÁLISE DE REGRESSÃO**

**Belo Horizonte**

**2015**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

G216a Garcia Júnior, Yrurá.

Análise exploratória da termoformagem em embalagem *Blister* por termografia e análise de regressão [manuscrito] / Yrurá Garcia Júnior. – 2015.

96 f. il. color. grafs. tabs. fots. ; 31 cm.

Orientadora: Rosemary Bom Conselho Sales  
Coorientador: Carlos Alberto Silva de Miranda  
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Design.

Bibliografia: f.85-90

1. Desenho (Projeto) – Embalagens – Moldagem por injeção de plástico - Teses. 2. Desenho Industrial – Plásticos – Moldagem – Embalagens – Teses - 3. Polímeros – Termografia - Teses. 4. Fotografia Infravermelha - Desenho (Projeto) – Embalagens - Teses - I. Sales, Rosemary Bom Conselho. II. Miranda, Carlos Alberto Silva de. III. Universidade do Estado de Minas Gerais. Escola de Design. IV. Título.

CDU: 7.05:659.154

Ficha Catalográfica: Cileia Gomes Faleiro Ferreira CRB 236/6

**YRURÁ GARCIA JÚNIOR**

**ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA TERMOFORMAGEM A VÁCUO  
EM EMBALAGEM *BLISTER* POR TERMOGRAFIA  
E ANÁLISE DE REGRESSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em *Design* da Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, como requisito parcial para a obtenção de grau de Mestre em *Design*, na linha de pesquisa: *Design*, Materiais, Tecnologia e Processos.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Rosemary do Bom Conselho Sales, Dr<sup>a</sup>. (UEMG).

Coorientador: Prof. Carlos Alberto Silva de Miranda, Dr. (UEMG)

**Belo Horizonte**

**Universidade do Estado de Minas Gerais**

**2015**



UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE MINAS GERAIS



ESCOLA DE DESIGN

Programa de Pós-graduação em Design (PPGD)  
MESTRADO EM DESIGN

## ANÁLISE EXPLORATÓRIA DA TERMOFORMAGEM A VÁCUO EM EMBALAGEM BLISTER POR TERMOGRAFIA E ANÁLISE DE REGRESSÃO.

Autor: Yrurá Garcia Júnior

Esta dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para a obtenção do título de Mestre em Design no Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 31 de agosto de 2015.

Rita de Castro Engler  
Coordenação Doutorado e Mestrado  
MASP: 1160198-6  
ESCOLA DE DESIGN - UEMG

Prof<sup>ª</sup>. Rita de Castro Engler  
Coordenadora do PPGD

BANCA EXAMINADORA

Prof<sup>ª</sup>. Rosemary Bom Conselho Sales, Dr<sup>ª</sup>.  
Orientadora  
Universidade do Estado de Minas Gerais

Prof. Carlos Alberto Silva de Miranda, Dr.  
Coorientador  
Universidade do Estado de Minas Gerais

Prof. Juan Carlos Campos Rubio, Dr.

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Marcelo Lemos de Medeiros, Dr.

Instituto Brasileiro de Mercado de Capitais  
Universidade de Itaúna

Prof<sup>ª</sup>. Maria Regina Álvares Correia Dias, Dr<sup>ª</sup>.

Universidade do Estado de Minas Gerais

Aos meus queridos filhos,  
Mariana e Daniel,  
em especial à minha companheira de vida,  
Ana Garcia.

## AGRADECIMENTOS

Ao Grande Arquiteto do Universo, por tudo, pelo amor, pela paz, pela sabedoria, Obrigado.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosemary do Bom Conselho Sales, pela motivação pelo incentivo, principalmente pela compreensão, pela dedicação e capacidade de compartilhar de modo especial, pela sua seriedade, competência e amizade.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Silva de Miranda, pela coorientação deste trabalho, pela motivação, pelo carinho, apoio e pela amizade.

À Universidade do Estado de Minas Gerais e à Escola de *Design*, pela ampliação das possibilidades de crescimento acadêmico com a implantação do mestrado em *Design* e pelo apoio institucional aos alunos deste mestrado.

Ao Sr. Clinger Matos Gomes (ELETROMECC) e seu funcionário, Edeilson Mendes de Oliveira, pela disponibilização da empresa e dos equipamentos para os ensaios termoformagem.

Ao Sr. Ronaldo Lopes (MM Instalações), pelo apoio e empréstimos de equipamentos de controle de temperatura.

Ao Sr. Luiz Cezar da Cruz (Metal líder), pelo apoio e fabricação dos moldes de prova.

Ao Sr. Davi Neiva Alves pelo apoio técnico nos ensaios termográficos, e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Wanderson Oliveira Leite, Universidade Federal de Minas Gerais, pelo apoio, sugestões e suporte técnico.

Aos professores e colegas do mestrado, pelo convívio, aprendizado e amizade.

Aos professores e amigos da Escola de *Design*, pelos conselhos, apoio e incentivo.

Aos familiares, que compreenderam a minha ausência e rezaram pelo meu sucesso, em especial à minha esposa, pelo apoio. Eu te amo muito.

Aos meus filhos, Mariana e Daniel, por torcerem por mim, pelo companheirismo e participação nas horas de muita aflição e trabalho.

“Não é nem a inteligência, nem a ciência que salva o homem... É o amor.”

Charmot.

## RESUMO

A termoformagem a vácuo, ou *vacuum forming*, é o método utilizado para conformação de chapa de polímero por meio da pressão produzida na cavidade do molde que adquire seu perfil. A termoformagem de embalagens geralmente utiliza polímeros (plásticos), em especial o poliestireno (PS). O uso de materiais amorfos requer cuidados especiais com a temperatura de aquecimento, uma vez que a manufatura do produto e a qualidade final dependem de diversos fatores, tais como parâmetros do processo, da matéria-prima, do ambiente de fabricação do equipamento, dos moldes, entre outros. Trata-se de um processo de difícil previsibilidade e depende de conhecimento prévio ou aprendizagem do executor. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros de fabricação aplicáveis em embalagens termoformadas, utilizando chapas de PS com espessuras de 0,3, 0,5 e 1,0 mm, que foram termoformadas em moldes em *Medium-Density Fiberboard* (MDF) e alumínio (Al). Com base na literatura foram identificadas as limitações aplicáveis à fabricação de moldes, as quais poderão vir a direcionar projetos de *design*. Utilizou-se a termografia infravermelha para identificar o comportamento térmico dos materiais durante o processo de termoformagem e para identificar peças com boa qualidade. Os dados foram submetidos à regressão linear em que o modelo recíproco foi o de melhor resposta, que gerou curvas de associação entre as variáveis para cada espessura estudada. Os resultados propiciaram interpolar valores a partir de curvas de temperatura e estimar o tempo, de tal forma que pela espessura da chapa (entre 0,3 e 1,0 mm) se possa reduzir o tempo, o *set-up* dos equipamentos, melhorando os custos e a produtividade nas indústrias. Os resultados demonstraram que o binômio temperatura x tempo é específico para cada espessura, podendo ser projetado para outras espessuras com base nas coletas e análises estatísticas dos dados. Constatou-se a aplicabilidade do modelo de regressão linear, o que possibilitou estabelecer curvas de associação entre essas variáveis para cada espessura dentro das faixas estudadas, podendo esses dados subsidiar a seleção de chapas em espessuras inferiores, dentro dos limites estudados. Contudo, isso não isenta a possível aplicação do mesmo processo em testes e estudos posteriores.

**Palavras-chave:** Termoformagem a vácuo. *Design* e embalagens. Termografia infravermelha. Análise de regressão.

## ABSTRACT

The vacuum thermoforming or vacuum forming, is a methodology used in the process of forming polymers by means of the pressure plate produced in the mold cavity acquiring its profile. The thermoforming packaging generally uses polymers (plastics), in particular polystyrene (PS). The use of amorphous materials requires special care with the heating temperature, since the manufacture of the product and final quality depends on many factors, such as: Process parameters of raw materials, equipment manufacturing environment, molds, among others. It is a process difficult to predict and it depends on prior knowledge or executor learning. This work aims to assess the relevant parameters in manufacturing thermoformed packaging, using PS plates with thicknesses of 0.3, 0.5 and 1.0 mm, which were thermoformed into molds for Medium-Density Fiberboard (MDF) and aluminum (Al). Based on the literature, were identified limitations applicable to the manufacture of molds, which are likely to direct design projects. We used the infrared thermography to identify the thermal behavior of materials during the thermoforming process recognizing parts and good quality. The data were submitted to linear regression, in which, the mutual model was the best answer. It generated associated curves between the variables studied for each thickness. The results have led to interpolate values from the temperature curves, and estimate the time, so that the plate thickness (between 0.3 and 1.0 mm) it can reduce the time, the equipment set-up, improving costs and productivity in industries. The results showed that the binomial temperature versus time is specific to each thickness and can be designed for other thicknesses based on the statistics collection and data analysis. It was found the applicability of linear regression model, which made it possible to establish association curves between these variables for each thickness within the ranges studied, these data may support the selection of plates at lower thicknesses, within the studied limits. However, this does not exempt the possible application of the same process in testing and further studies.

**Keywords:** Vacuum Thermoforming, pDesign and packaging. Infrared thermography. Regression analysis.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Tipos de moldes-----	27
FIGURA 2 - Distribuição do plástico nos moldes-----	28
FIGURA 3 – Contramolde ou <i>plug</i> -----	29
FIGURA 4 - Ângulo de extração-----	29
FIGURA 5 - Corte negativo e ângulo de extração-----	30
FIGURA 6 - Furos para ventilação-----	30
FIGURA 7 - Molde multicavidade-----	31
FIGURA 8 - Tipos de molde positivo-----	34
FIGURA 9 - Moldes de resina-----	34
FIGURA 10 - Moldes de alumínio-----	35
FIGURA 11 – Temperaturas locais no caso hipotético de existir um tempo ótimo-----	38
FIGURA 12 - Termoformagem a vácuo por molde positivo-----	40
FIGURA 13 - Termoformagem a vácuo por molde negativo-----	41
FIGURA 14 - Termoformagem por pressão de ar ( <i>pressure forming</i> )-----	41
FIGURA 15 - Termoformagem processo <i>billow forming</i> -----	42
FIGURA 16 - Termoformagem mecânica ( <i>mechanical Forming</i> )-----	43
FIGURA 17 - Termoformagem processo <i>billow snap-back vacuum forming</i> -----	43
FIGURA 18 - Moldagem com contramolde ( <i>plug assist</i> )-----	44
FIGURA 19 - Termoformagem dupla-chapa ( <i>twin-sheet forming</i> )-----	45
FIGURA 20 – Rugas: em moldes positivos-----	46
FIGURA 21 - Afinamento das paredes-----	47
FIGURA 22 - Embalagens <i>blister</i> -----	49
FIGURA 23 - Divisão do espectro eletromagnético-----	50
FIGURA 24 - Imagem térmica do ser humano-----	51
FIGURA 25 - Termocâmera de infravermelho: FLIR P-640-----	52
FIGURA 26 - Etapas do procedimento experimental-----	55
FIGURA 27 - Equipamento de termoformagem-----	57
FIGURA 28 - Termocâmera de infravermelho e desenho esquemático-----	58
FIGURA 29 - Projeto dos moldes para serem usinados em MDF e Al-----	59
FIGURA 30 - Moldes usinados em Al e MDF-----	60
FIGURA 31 - Preparação da amostra de PS antes e pós-termoformagem-----	61

FIGURA 32 - Seleção de amostras-----	62
FIGURA 33 - Termogramas das temperaturas iniciais das amostras – média 23°C.....	63
FIGURA 34 - Termogramas nas três situações de temperatura-----	64
FIGURA 35 - Termograma da temperatura (T1 e T2) molde A1 -----	65
FIGURA 36 - Registro das imagens termográficas para cada espessura e para cada tipo de molde. ....	66
FIGURA 37 - Máquina de termoformagem -----	78
FIGURA 38 - Peças conformadas com base nas estimativas-----	79

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Temperaturas inicial e final registradas no molde de Al.....	70
Gráfico 2 - Temperaturas inicial e final registradas no molde de MDF .....	72
Gráfico 3 -Temperaturas inicial e final registradas nos moldes de Al e MDF.....	73
Gráfico 4 - Curvas de associação entre temperatura x tempo de aquecimento do PS .....	78
Gráfico 5 - Pontos analisados no gráfico .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de condutividade térmica e difusão térmica de polímeros e material dos moldes. ....	32
Tabela 2 - Distribuição das 96 amostras a serem termoformadas para os ensaios termográficos .....	61
Tabela 3 - Valores iniciais coletados por termografia .....	63
Tabela 4 - Temperatura registrada nas amostras consideradas sem defeito do molde positivo/Al .....	69
Tabela 5 - Temperaturas registradas nas amostras consideradas sem defeito do molde negativo/Al .....	70
Tabela 6 - Temperaturas registradas nas amostras consideradas sem defeito do molde positivo/MDF.....	71
Tabela 7 - Temperaturas registradas nas amostras consideradas sem defeito do molde negativo/MDF.....	71
Tabela 8 - Temperaturas médias registradas nos ensaios de termografia .....	73
Tabela 9 - Variáveis temperatura e tempo de processamento .....	74
Tabela 10 - Análise de variância (ANOVA) para regressão linear com modelo recíproco....	75
Tabela 11 - Coeficientes de regressão estimados para o modelo proposto, significância estatística e coeficiente de determinação para as espessuras estudadas.....	76
Tabela 12 - Espessuras dentro das faixas estudadas .....	77
Tabela 13 - Estimativas com base nas curvas do GRÁF. 5.....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
ABIEF	Associação Brasileira da Indústria de Embalagens Plásticas Flexíveis
ABRE	Associação Brasileira de Embalagens
Al	Alumínio
AM	Amplitude modulada
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CCD	<i>Charged coupled device</i>
Ce	Calor específico do material
CEDtec	Centro de Estudos em <i>Design</i> e Tecnologia
CNI	Confederação Nacional da Indústria
<i>E</i>	Espessura da parede
EUA	Estados Unidos da América
FM	Frequência modulada
IBM	<i>International Business Machines</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
KPa	Kilopascal
Mbar	Milibar
MDF	<i>Medium-Density Fiberboard</i>
Mpa	Megapascal
PET	Politereftalato de etileno
PIB	Produto Interno Bruto
PS	Poliestireno
PVC	Cloreto de polivinila
SPSS	<i>Statistical Package for Social Sciences</i>
UEMG	Universidade do Estado de Minas Gerais

## SUMÁRIO<sup>1</sup>

1	INTRODUÇÃO .....	18
1.1	Objetivo geral .....	20
1.2	Objetivos específicos.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
2.1	Embalagens.....	22
2.1.1	<i>Design</i> da embalagem.....	24
2.1.2	Conceito de embalagens .....	24
2.1.3	Projeto de embalagens .....	25
2.2	Moldes para embalagens .....	27
2.2.1	Projeto e geometria dos moldes .....	27
2.2.2	Seleção de materiais para fabricação de moldes .....	31
2.3	Termoformagem a vácuo.....	35
2.3.1	Contexto histórico .....	35
2.3.2	Etapas da termoformagem .....	37
2.3.3	Métodos de termoformagem.....	39
2.3.3.1	Termoformagem a vácuo.....	39
2.3.3.2	Termoformagem por pressão.....	41
2.3.3.3	Moldagem por força mecânica.....	42
2.3.3.4	Termoformagem dupla.....	44
2.3.3.5	Principais defeitos dos termoformados.....	45
2.3.3.6	Embalagens termoformadas a vácuo.....	47
2.4	Termografia infravermelha.....	49
2.4.1	Radiação infravermelha .....	50
2.4.2	Descrições do método de termografia .....	51
2.4.3	Interpretação de imagens térmicas .....	52

---

<sup>1</sup> Este trabalho foi revisado de acordo com as novas regras ortográficas aprovadas pelo Acordo Ortográfico assinado entre os países que integram a Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP), em vigor no Brasil desde 2009. E foi formatado de acordo com a ABNT NBR 14724 de 17.04.2014.

3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1	Materiais para molde.....	55
3.1.1	Equipamento de termoformagem.....	56
3.1.2	Equipamento de termografia.....	57
3.1.3	<i>Softwares</i> utilizados.....	58
3.2	Métodos.....	59
3.2.1	Elaboração do projeto e usinagem dos moldes.....	59
3.2.2	Preparação das amostras.....	61
3.2.3	Método para primeira etapa.....	61
3.2.4	Métodos da segunda etapa.....	67
3.2.5	Análise de variância (ANOVA).....	68
3.2.6	Análise no <i>software IBM SPSS</i> .....	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
4.1	Resultados obtidos na primeira etapa.....	69
4.2	Resultados obtidos na segunda etapa.....	75
4.3	Validação dos resultados.....	78
5	CONCLUSÕES.....	81
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	REFERÊNCIAS.....	83
	APÊNDICES.....	89

# 1 INTRODUÇÃO

Hoje o segmento de embalagens busca soluções para viabilizar a demanda de novos produtos e ao mesmo tempo tenta minimizar os reflexos provenientes de uma população crescente e altamente consumista (BRASKEM, 2014). Dados do *Census Bureau* (2015) mostra que a população mundial ultrapassa hoje a marca de 7,2 bilhões de habitantes e a previsão, segundo a Rede Independente de Conservação da Natureza “Relatório Planeta Vivo” (WWF, 2010), é de que essa população irá em 2030 utilizar recursos equivalentes à taxa de dois planetas por ano e de 2,8 planetas em 2050. Da mesma forma, observa-se crescente aumento do consumo de água, de energia elétrica, além da degradação ambiental (KAZAZIAN, 2005). Apesar de medidas governamentais, como a Política Nacional dos Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305/10, sancionada em 2010, percebe-se que são necessárias atitudes que contribuam para o controle do uso desses recursos naturais.

Os termoformados representam 5,93% de todo o material termoplástico consumido no Brasil, o que equivale a 402 mil toneladas de poliestireno (PS). Da demanda total comercializada no ano de 2013, a indústria de alimentos utilizou 21,8%, seguida do setor de utilidades domésticas, com 13,5%, e pela indústria de bebidas, com 10,4% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS - ABRE, 2014). Dados do Instituto Akatu mostram que o volume de lixo produzido cresce em torno de 60 toneladas por dia no Brasil (AKATU INSTITUTO, 2013).

A termoformagem é um termo genérico para um grupo de processos que envolvem a conformação de uma chapa de polímeros preaquecida, sendo considerado um dos mais antigos métodos de conformação de plásticos e atualmente uma das mais adequadas tecnologias de produção de embalagens flexíveis (THRONE, 2008). Nesse grupo de processos, a termoformagem a vácuo, ou *vacuum forming*, se processa por meio da pressão produzida nos espaços da cavidade de um molde que suga a chapa contra os contornos do mesmo, que adquire seu perfil.

De modo geral, um polímero é qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural que tenha alto peso molecular e com variedades estruturais repetitivas, sendo que

normalmente essa unidade que se repete é de baixo peso molecular. De acordo com seu comportamento mecânico, os polímeros são divididos em três grandes grupos: elastômeros ou borrachas, plásticos e fibras. Eles podem ser classificados de diferentes maneiras, dependendo do objetivo de quem os classifica. As formas mais comuns de classificação são: a partir do ponto de vista de sua estrutura química, do método de preparação, das características tecnológicas e do comportamento mecânico. As características que impõem diferentes processos tecnológicos classificam os polímeros em termoplásticos e termorrígidos. Os materiais termoplásticos são substâncias caracterizadas por sua propriedade de mudar de forma sob a ação do calor, o que permite seu tratamento e moldagem por meios mecânicos (MANRICH, 2005).

Na termoformagem, o ideal é que o material seja de fácil conformação em temperatura baixa de termoformação, ter boas características de fluidez e condutividade térmica, além de baixa contração no resfriamento (FORMECH, 2011).

Segundo Muralisrinivasan (2010), a sequência completa do processo de termoformagem, ou seja, aquecimento, estiramento, vácuo, resfriamento e extração, depende dos parâmetros do processo, matéria-prima, ambiente de fabricação, equipamento, moldes, tempo de ciclo, umidade, temperatura ambiente, espessura da chapa, projeto do molde e outras características não lineares. O que se vê na prática, no entanto, é que até que o molde seja fabricado de determinado material, testado usando o equipamento, processo e parâmetros escolhidos, a capacidade real do processo é de difícil previsibilidade e depende de um pré-conhecimento ou aprendizagem do executor (KLEIN, 2009; LEITE *et al.*, 2013).

A termografia infravermelha é uma técnica de inspeção não destrutiva e não invasiva do campo de temperatura de uma superfície, por meio da imagem gerada pela radiação térmica emitida na faixa do infravermelho (CASTANEDO, 2005; SALES *et al.*, 2011). A adoção dessa técnica na indústria permite monitorar o comportamento térmico dos materiais e processos, identificar e analisar problemas considerados inacessíveis por outros métodos. Baseada na teoria de que todo corpo, acima do zero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ), absorve e emite radiação térmica (INCROPERA; DEWITT, 2008), a termografia permite mensurar e avaliar as características dos materiais em uma variedade de investigações que envolvam os fenômenos de transferência de calor.

Nesse sentido, o presente trabalho consiste primeiramente no estudo experimental da influência de moldes, materiais e parâmetros de fabricação do processo de termoformagem a vácuo. Posteriormente, foi feita a análise dos produtos e métodos utilizados e, por fim, foi feita a análise de regressão linear e desenvolveram-se curvas de associação entre as variáveis (tempo X temperatura) para controlar o processo.

Para tanto, buscaram-se na literatura os parâmetros de fabricação aplicáveis em embalagens termoformadas, utilizando amostras de chapas de poliestireno com espessuras de 0,3 mm, 0,5 mm e 1,0 mm. Foram registradas as variáveis geométricas e identificadas as limitações para fabricação dos moldes, as quais poderão vir a direcionar projetos de *design* similares para o segmento industrial.

A termografia infravermelha foi empregada para identificar o comportamento térmico do poliestireno (PS) durante o processo de termoformagem, buscando identificar o material de melhor dissipação térmica para os moldes. A termografia também foi utilizada para avaliar e selecionar, com base no binômio (tempo X temperatura), peças com boa conformação.

Os dados foram submetidos à análise de regressão linear que gerou curvas de associação entre as variáveis para cada espessura estudada. Os resultados propiciaram interpolar valores a partir das curvas e estimar o tempo de tal forma que, pela espessura da chapa entre 0,3 e 1,0 mm, se possa reduzir o tempo para *set-up* dos equipamentos, melhorando os custos e a produtividade nas indústrias. Contudo, isso não isenta a possível aplicação do mesmo processo em testes e estudos posteriores.

## **1.1 Objetivo geral**

Avaliar os parâmetros ideais de *design* e de fabricação relacionados ao processo de termoformagem a vácuo, buscando otimizar o binômio tempo X temperatura no desenvolvimento de embalagens tipo *blister* fabricadas em PS, apoiados pela termografia e análise de regressão.

## 1.2 Objetivos específicos

- a) Identificar os parâmetros limítrofes de geometria aplicáveis a projetos de *design* de embalagens tipo *blister* e produtos similares.
- b) Realizar ensaios de termografia durante o processo de termoformagem de forma a identificar a dissipação térmica dos materiais (PS e moldes).
- c) Avaliar o comportamento térmico e a qualidade das peças termoformadas.
- d) Identificar parâmetros do binômio tempo X temperatura ideais para a termoformagem em chapas de PS com espessuras 0,3, 0,5 e 1,0 mm.
- e) Submeter os resultados à análise estatística.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Embalagens

Ao longo da história as embalagens tiveram a finalidade primordial de conter, proteger e transportar os produtos. Ao carregar consigo os objetos e alimentos, o homem fez uso de diferentes recursos naturais, tais como bexigas, chifres de animais, sacos de couro, folhas de plantas, cabaças, bambus, entre outros. No momento em que surgiram as embalagens fabricadas pelo homem, esses objetos naturais deram lugar aos manufaturados, tais como os vasos, cestos, garrafas e caixas. Posteriormente, os efeitos da industrialização proveniente da Revolução Industrial do século XVIII, as embalagens, além de seu papel primordial de contenção e transpor de produtos, passaram a fazer parte dele (EVANGELISTA, 1998).

Com o surgimento do autosserviço, as embalagens adquiriram também a função comunicativa, como instrumento de marketing, e de modo geral são o resultado de um sistema que envolve materiais, tecnologia, processos, equipamentos, *design*, marketing, logística e comunicação (FACCA, 2010). A qualidade e o preço passaram à condição de pressuposto e a inovação, o *design* nos seus mais diversos aspectos, consolidou-se como fator diferencial e decisivo para a competitividade das empresas. A Associação Brasileira da Indústria de Embalagens Plásticas Flexíveis (ABIEF) mostra que o mercado de termoformados cresceu nos últimos anos, respondendo por 5,93% de todo o material termoplástico consumido no Brasil. O setor utilizou 402 mil toneladas de poliestireno (PS), o equivalente a 25% da demanda total comercializada no país no ano de 2013. Na indústria de alimentos a demanda foi de 21,8% desse volume, seguida pela produção de utilidades domésticas, com 13,5%, e pela indústria de bebidas, com 10,4%. No mesmo período, a produção física de embalagens em polímeros atingiu 29,74% do total de embalagens produzidas no Brasil, em peso (ABRE, 2014).

Segundo Löbach (2001), em um contexto no qual a qualidade dos produtos é bastante semelhante, a apresentação atraente da embalagem por meio de aspectos estéticos implementada por estudos de *design* em uma área denominada *packaging designer* passa a ser fundamental. Nesse ponto de vista, torna-se importante o entendimento da relação entre

as empresas e o mercado, no sentido de captar o desejo do consumidor não somente de forma ampla, mas também individual.

Muitas vezes, é por meio da embalagem que o produto exerce papel decisivo nos resultados das empresas (vendas atreladas à lucratividade), cujos valores atribuídos pelo *design* serão potencializados e percebidos pelo consumidor, tais como: praticidade, conveniência, facilidade de uso, conforto, segurança, proteção, funcionalidade, identidade e personalidade. Salienta-se aqui o valor do *design* de embalagem, uma vez que por meio dele o empresário pode agregar valor aos seus produtos, permitindo a sua adequação eficiente às necessidades e expectativas, estas explícitas ou implícitas, do consumidor, além de promover e definir o posicionamento correto da empresa ou produto no segmento em que atua. Torna-se assim um instrumento estratégico para a consolidação no mercado e para a empresa. Assim, um bom *design* de embalagem pode elevar a lucratividade da empresa, otimizar os custos, além de comunicar de forma eficiente, pois se trata de um elemento de comunicação que caracteriza a interface entre o cliente, o produto e o mercado.

Surge então a possibilidade da diferenciação de um produto por meio da assimilação de valor adicional agregado pelo *design*. Para Löbach (2001), a embalagem pode contribuir para a conservação do produto por mais tempo, ter facilidade adicional no manuseio, ser de materiais que não agridam o meio ambiente e possibilitar, após seu uso, uma segunda utilidade. Contudo, quando se trata de empresas de pequeno porte, que não contam com estrutura organizacional adequada, o desenvolvimento de embalagens fica normalmente a cargo de empresas terceirizadas, agências ou de escritórios de *design*. Nesse cenário, cuja inserção no processo de desenvolvimento requer organização e conhecimentos multidisciplinares e, em alguns casos, habilidade de gerenciamento de projetos no trabalho em conjunto com profissionais de outras áreas (SLACK; CHAMBERS, 1999; ULRICH; EPPINGER, 1995), Oliveira (2000) já destacava a necessidade de interação entre o *designer* gráfico e o *designer* de produto, estabelecendo constantes relações e trocas profissionais.

### 2.1.1 *Design da embalagem*

O processo de *design* de embalagens inicia-se da mesma forma com que se projeta um produto, ou seja, com a identificação das necessidades que podem ser resultantes da queda de vendas, acirramento da concorrência, necessidade de crescimento organizacional ou reposicionamento do produto já existente (DOLAN, 1993). Buss e Cunha (2001) ressaltam que o planejamento de produtos de acordo com a percepção de necessidade dos clientes exige, além da identificação das necessidades, a tradução dessas informações em “ideias de produtos”, que irão culminar em “conceitos de produtos” de acordo com atributos que se julgarem importantes. De acordo com Slack e Chambers (1999), o objetivo de projetar produtos e serviços é satisfazer os consumidores, atendendo às suas necessidades e expectativas, atuais ou futuras. Assim, o desenvolvimento de novos produtos pode ser classificado em quatro categorias sugeridas por Cheng e Melo e Filho (2010):

- a) Extensão de linha de produtos existente;
- b) uso de materiais, tecnologia e equipamentos existentes para desenvolver produtos com novas aplicações;
- c) desenvolvimento de produtos que utilizam os mesmos canais de vendas e distribuição dos existentes;
- d) desenvolvimento de produtos que não tenham qualquer conexão com os produtos existentes.

### 2.1.2 *Conceito de embalagens*

Primeiramente, é conceituado o produto baseado em informações mercadológicas inerentes a esse processo, o que se denomina de *briefing*. Durante a elaboração do conceito do produto, faz-se necessário definir qual o posicionamento desejado para o produto (DOLAN, 1993). São considerados o público-alvo, as características, modo e ocasião de consumo do produto, forma de venda (estratégia e logística de distribuição) e as características identificadas em pesquisas de mercado, testes de conceito e mapas de percepção. Ulrich e Eppinger (1995) propõem cinco passos para a geração de conceitos: identificar o problema, pesquisas externas, pesquisas internas, análise sistemática e reflexão sobre as soluções encontradas e sobre o processo de fabricação.

Neste ponto é necessária a interação entre as duas dimensões propostas (*design* gráfico/*design* de produto), em que o *design* estruturado deve ser executado em perfeita sinergia com o *design* da comunicação e essa atividade requer detalhada análise por parte do responsável pelo gerenciamento da execução desse projeto. Para Quarante (1994), a análise da atividade deve contemplar também aprofundado estudo ao longo do ciclo de vida do produto, desde sua criação até o seu descarte final, abrangendo a fabricação do produto, sua utilização na maior gama possível de situações, seu grau de interação com o usuário, sua reciclagem, recuperação ou eliminação.

### 2.1.3 Projeto de embalagens

Após a escolha das alternativas a serem desenvolvidas, o próximo passo é a adequação do projeto à realidade produtiva do fabricante, em que são consideradas as limitações técnicas e produtivas, bem como as limitações dimensionais impostas pelo maquinário disponível e sistemas logísticos de transporte utilizados. A execução de protótipos em modelação tridimensional com o uso de tecnologia *Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing/ Computer Aided Engineering* (CAD/CAM/CAE) facilita o processo e reduz os custos associados ao desenvolvimento. O acesso às tecnologias de prototipagem também permitem essa agilidade e confiabilidade ao processo de desenvolvimento. A construção de protótipos foi facilitada pelo uso de novas tecnologias, como o projeto auxiliado por computador. Os sistemas de CAD proporcionam a capacidade auxiliada por computador para criar e modificar desenhos de produtos, cuja vantagem, entre tantas outras, é a capacidade de armazenar e recuperar dados de projeto rapidamente (SLACK; CHAMBERS, 1999).

São definidas também nesta etapa características relacionadas à reciclagem, visto que a embalagem se constitui em importante componente do lixo urbano, porém não é o maior componente, ficando este posto com o lixo orgânico. Porém, é o lixo que é mais visto em diversas situações, daí a associação (MESTRINER, 2002). Conforme Manzini e Vezzoli (2005), *Life Cycle Design* e *design* para a sustentabilidade são duas atividades absolutamente complementares para o desenvolvimento de produtos e serviços sustentáveis. Quarante (1994) preleciona que o “eco-produto” pode ser considerado aquele que respeita o máximo possível os requisitos de preservação do meio ambiente durante todas as etapas do seu ciclo de vida. Características de sustentabilidade podem ser

atribuídas nesta etapa da atividade projetual. Manzini e Vezzoli (2005) apresentam um modelo a ser seguido, no qual são privilegiadas a extensão da vida dos materiais, a otimização da vida dos produtos e a escolha de recursos e processos de baixo impacto ambiental. A extensão da vida dos materiais pode ser alcançada a partir dos seguintes requisitos:

- a) Adotar a reciclagem em efeito cascata;
- b) escolher materiais com tecnologias de reciclagem eficientes;
- c) facilitar a recolha e o transporte após o uso;
- d) identificar os materiais;
- e) minimizar o número de materiais incompatíveis entre si;
- f) facilitar a separação dos materiais incompatíveis entre si;
- g) facilitar a limpeza;
- h) facilitar a combustão;
- i) facilitar a compostagem.

Os mesmos autores indicam que, para a otimização da vida dos produtos, devem ser observadas as seguintes diretrizes:

- a) Projetar a duração adequada;
- b) projetar a segurança;
- c) facilitar a atualização e a adaptabilidade;
- d) facilitar a manutenção;
- e) facilitar a reparação e a reutilização;
- f) facilitar a remodelação;
- g) intensificar a utilização.

Contudo, existe crescente demanda por embalagens práticas, com funções que contemplem facilidades como abertura e fechamento, capacidade para preparação do produto na própria embalagem, possibilidade de cozimento ou aquecimento em forno de micro-ondas, entre outras. Esses conceitos demandam um *design* diferenciado e específico para cada aplicação (LANGE; WYSER, 2003). De acordo com estudo da Confederação Nacional da Indústria (CNI), 75% das empresas que investiram em *design* em suas embalagens registraram aumento de vendas, sendo que 41% delas também reduziram seus custos de produção.

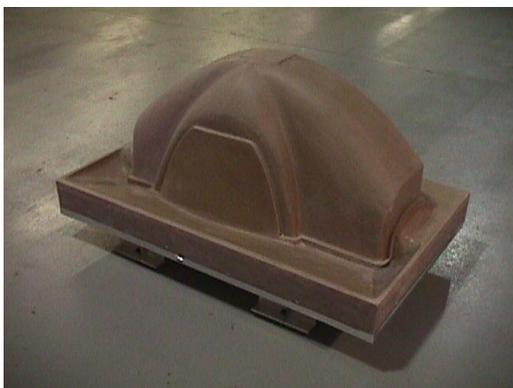
Como consequência, emergem no mercado novos materiais poliméricos (plásticos) que apresentam propriedades mais adequadas para serem utilizados como embalagens, como baixa densidade, flexibilidade, resistência, transparência e facilidade de processamento em comparação com o metal ou o vidro. Uma das formas de transformação dos polímeros em embalagens acontece pelo processo de termoformação, em que o material é aquecido sob determinadas condições de tempo e temperatura e, por meio de um molde, é obtido o formato adequado para receber o produto a ser embalado. No setor de termoformagem de polímeros, os fabricantes de moldes desenvolvem peças complexas e com nível tecnológico bastante elevado. Com isso, o setor de embalagens desenvolve vantagens competitivas entre as empresas ao oferecer a possibilidade de novos moldes para termoformar produtos de melhor qualidade, alto nível tecnológico e *design* mais moderno (PADILHA; BOMTEMPO, 1999).

## 2.2 Moldes para embalagens

### 2.2.1 Projeto e geometria dos moldes

Segundo Throne (2008), existem basicamente dois tipos de molde, o positivo e o negativo (FIG. 1). Segundo Rosen (2002a) e Muralisrinivasan (2010), as indústrias utilizam técnicas de termoformagem a vácuo em ambos os moldes, de acordo com a necessidade, com ou sem a utilização de pressão de ar ou vácuo.

FIGURA 1 - Tipos de moldes



Positivo

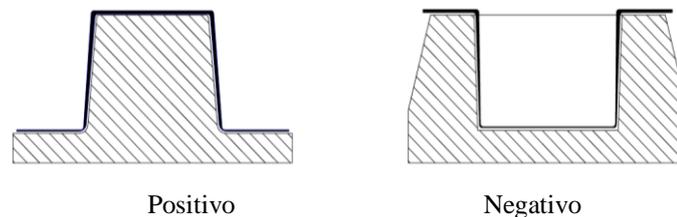


Negativo

Fonte: <http://www.intertoolgroup.com> <http://plastykembalagens.>

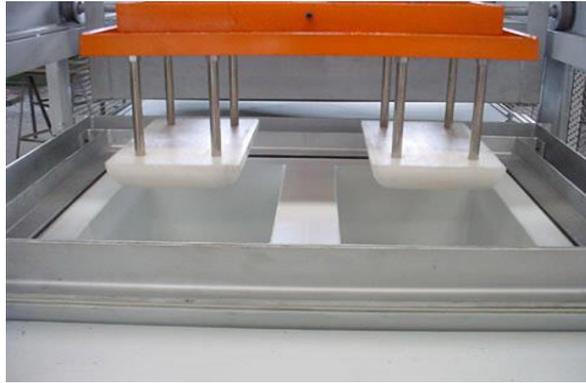
O molde positivo é adequado para peças que necessitam de melhor acabamento externo, em situações que seu interior ficará oculto. Por outro lado, uma bandeja de compartimento e várias divisões seriam mais bem conformadas em um molde negativo, pois necessitam de melhor acabamento interno. Segundo Throne (2008), a termoformagem em molde positivo produz peças com laterais, cantos e bordas mais finos que em sua parte inferior. De acordo com Strong (1996), a superfície que servirá de face principal do produto final será a que estiver em contato direto com o molde. Para definição e escolha de um molde positivo ou negativo, deve ser levado em conta qual dos lados requer melhor definição de acabamento (FIG. 2).

FIGURA 2 - Distribuição do plástico nos moldes



No processo de termoformagem a vácuo, no instante em que é aplicado o vácuo, o material aquecido tende a sofrer tensões e esticar-se para alcançar as extremidades do molde. Nesses pontos de encontro de superfície, as espessuras ficam mais finas, principalmente nas extremidades. Nos moldes negativos, para que as espessuras fiquem mais uniformes, um contramolde (FIG. 3) também conhecido como *plug* pode ser aplicado, ajudando a pré-estirar a chapa de polímero, momentos antes que o vácuo seja aplicado (THRONE, 2008). Rosen (2002b) considera os *plugs* são um auxílio mecânico com a função de distribuir o termoplástico ainda quente no molde antes da pressão do vácuo ser acionada.

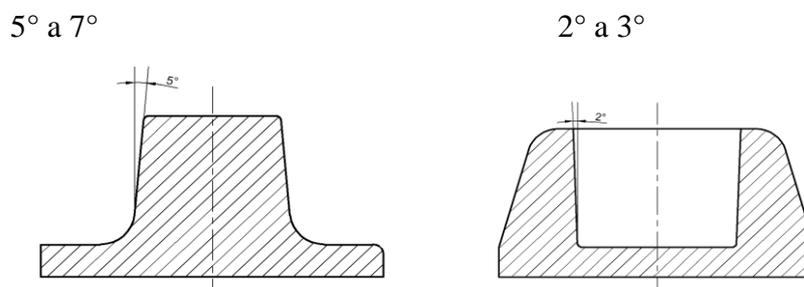
Em alguns estudos citados por Leão (2009), à medida que o contramolde pressiona até atingir o ponto final do molde, o vácuo automaticamente é acionado e força a moldagem da chapa no molde, formando todas as paredes da peça. Para Sors, Bardócz e Radnóti (2002), esse método eleva consideravelmente a uniformidade de espessura da peça termoformada. É empregado quando o molde possui cavidade muito profunda.

FIGURA 3 – Contramolde ou *plug*

Fonte: <http://www.eleto-forming.com.br/machine.php?id=9>.

Por outro lado, a maioria dos moldes é produzida com pequenas angulações que lhe atribuem um formato “cônico” para facilitar a remoção da peça (FIG. 4). Esse grau de conicidade ou ângulo de extração dependerá de diversos fatores, tais como: a qualidade desejada da superfície da ferramenta, sua profundidade das faces verticais, o tipo de material utilizado no molde e as técnicas de pré-estiramento utilizadas. Em alguns casos, nas cavidades internas podem ser utilizados ângulos de inclinação igual a zero, já que a contração do material no momento do resfriamento vai forçar a peça a se descolar das paredes do molde. No entanto, para garantir a boa qualidade de formação e moldagem, recomenda-se angulação mínima de  $5^\circ$ , quanto maior a angulação, mais uniforme será a espessura da chapa e mais fácil será a remoção. Para moldes negativos, é recomendado ângulo mínimo de  $2^\circ$  a  $3^\circ$  e para moldes positivos, o mínimo de  $5^\circ$  a  $7^\circ$  (FORMECH, 2011; KLEIN 2009; STRONG, 1996; THRONE 2008).

FIGURA 4 - Ângulo de extração



Diversos recursos podem ser empregados na fabricação do molde para que ele proporcione e garanta melhor desempenho no processo. Moldes cujos ângulos de saída são diferentes dos citados podem ter problemas para a retirada da peça moldada. Existem situações em

que a direção de remoção deve ter ângulo superior ao corte negativo, possibilitando a extração da peça (FORMECH, 2011; STRONG, 1996), conforme ilustrado na FIG. 5. O ângulo determinado pode possibilitar ou não a retirada da peça do molde.

FIGURA 5 - Corte negativo e ângulo de extração



Fonte: adaptado de Formech (2011).

No projeto do molde, uma das técnicas utilizadas para melhorar a extração da peça é o planejamento da localização dos furos de ventilação (FIG. 6). Estes devem ser estrategicamente posicionados, visando facilitar a retirada do ar preso entre a chapa de termoplástico e o molde (FORMECH, 2011). Eles devem ser posicionados geralmente nas faces das bordas, cavidades e cantos internos do molde, pois são áreas que necessitam de muita ventilação (círculo), com o objetivo de garantir melhor formação da peça e rápida despressurização do molde ao final da termoformagem.

FIGURA 6 - Furos para ventilação



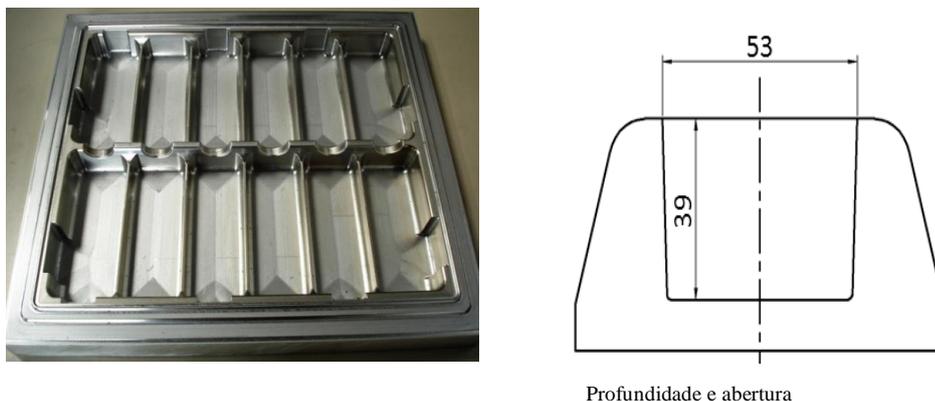
Fonte: <http://www.conversationsmarketing.com/>.

De acordo com Throne (2008), todos os moldes devem ter ventilação adequada para remover rapidamente o ar existente entre a cavidade do molde e o termoplástico. O ar existente entre a chapa e o molde causará leve ondulação da superfície da peça.

Segundo Formech (2011), o tipo do termoplástico utilizado e suas características físicas e mecânicas, aliado à complexidade do molde, vão determinar a quantidade de furos necessários para ventilação. É ideal que esses furos sejam capilares, evitando assim seu aparecimento como marcas indesejadas copiadas nas faces das peças. No entanto, se a quantidade de furos for menor que o necessário e o fluxo de ar reduzido e lento, a peça pode sofrer arrefecimento antes de ser totalmente moldada. O diâmetro dos furos deve ter suas dimensões entre a faixa de 0,5 mm e 1,0 mm de diâmetro. Desse modo, um balanceamento entre temperatura e poder de sucção (vácuo) durante o processo de termoformagem dará às peças termoformadas garantia de precisão dimensional e qualidade no acabamento, quer sejam peças de alta ou baixa complexidade.

A quantidade de cavidades de um molde também é um critério projetual que deve ser considerado. Normalmente, moldes de multicavidades são empregados em situações que requerem alta produtividade (FIG. 7), uma vez que eles permitem a termoformagem a vácuo de várias peças do mesmo formato ao mesmo tempo, ou seja, dentro do mesmo ciclo de produção. Já a profundidade da cavidade da peça no molde não deve ultrapassar 75% do diâmetro ou largura da abertura na superfície (FORMECH, 2011).

FIGURA 7 - Molde multicavidade



Fonte: <http://www.sosgravacoes.com.br> - adaptado de Formech (2011, p. 38).

### 2.2.2 Seleção de materiais para fabricação de moldes

Os moldes para termoformagem a vácuo podem ser fabricados em vários tipos de materiais. Quando são requeridas peças de geometria simples, em quantidades reduzidas ou mesmo protótipos, é comum a utilização da madeira natural maciça ou compósito (*Medium-Density Fiberboard* - MDF). Para peças de geometrias mais complexas,

geralmente os moldes são produzidos em alumínio, gesso, resina epóxi, poliéster ou mesmo uma composição desses materiais (FORMECH, 2011; INNOVA, 2011; KLEIN, 2009; STRONG, 1996; THRONE, 2008).

Uma das etapas mais importantes do processo de termoformagem a vácuo, portanto, é a escolha do material para fabricação do molde. Neste caso, é essencial determinar o material mais compatível e adequando para confecção para cada caso específico. Uma das vantagens do processo da termoformagem a vácuo são as pressões significativamente menores em relação ao processo de injeção, o qual exige alta resistência mecânica do material de constituição dos moldes de Sors, Bardócz e Radnóti (2002).

Essa especificidade permite produzir uma quantidade relativamente alta de peças antes da degradação do molde. O custo reduzido de fabricação e modificação dos moldes, aliado ao reduzido tempo de fabricação, devido à sua simplicidade, constitui um dos pontos positivos na escolha desse processo (THRONE, 1996). Van Vlack (1970) salienta que é importante avaliar as propriedades térmicas do material escolhido para o molde. Materiais com alto valor de condutividade térmica tem bom desempenho neste quesito, como, por exemplo, o alumínio e o cobre, como mostra TAB. 1.

TABELA 1 - Valores de condutividade e difusão térmica de polímeros e material dos moldes

Material	Condutividade térmica Btu/ft <sup>2</sup> F (10 <sup>-3</sup> KW/m <sup>2</sup> C)	Difusão térmica X10 <sup>-4</sup> ft <sup>2</sup> /h (x10 <sup>-4</sup> cm <sup>2</sup> /S)	Condutividade térmica relativo ao PS
Poliestireno	0.105 (0.180)	29.7 (7.66)	1
ABS	0.070 (0.120)	25.0 (6.45)	0.67
Policarbonato	0.121 (0.207)	33.0 (8.51)	1.15
PVC rígido	0.100 (0.171)	32.5 (8.39)	0.95
Polietileno de baixa densidade	0.230 (0.390)	46.0 (11.9)	2.2
Polietileno de alta densidade	0.290 (0.500)	55.0 (14.2)	2.75
Polipropileno	0.110 (0.190)	25.0 (6.45)	0.67
PET	0.138 (0.236)	36.8 (9.49)	1.3
Polipropileno + 40%l Talc	0.308 (0.527)	73.0 (19.0)	2.5
Polipropileno + 40 % fibra de vidro	0.144 (0.246)	36.0 (9.30)	1.2
Naylon 6	0.167 (0.268)	62.0 (16.0)	2.1
Naylon 6 + 30% de fibra de vidro	0.133 (0.278)	27.0 (7.00)	0.9
Polioximetileno (acetil)	0.633 (1.083)	203 (52)	6.8
Polioximetileno + 30% fibra de vidro	0.867 (1.483)	252 (65)	8.5
Espuma de os baixa densidade	0.016 (0.027)	80.0 (20.6)	0.15
Alumínio	72.5 (124)	18,850 (4860)	690
Aço	21.3 (36.4)	3,930 (1010)	200
Madeira (Carvalho)	0.073 (0.125)	104 (26.8)	0.7
Gesso	0.174 (0.298)	120 (31.0)	1.66
Espuma sintética	0.07 (0.12)	40 (10.3)	0.67

Fonte: adaptado de Throne (2008).

A madeira apresenta baixo valor de condutividade térmica, o que favorece mais resistência à passagem de energia térmica. Por ser um material poroso e pobre em elétrons livres (responsáveis pela rápida transmissão de energia), a madeira tem a propriedade de ser má-condutora de calor. Dessa forma, a madeira e seus derivados possuem baixa condutividade térmica, podendo atuar como isolantes térmicos. Ao comparar valores para matérias-primas de molde como o alumínio e o MDF, constata-se que o primeiro possui valores muito superiores.

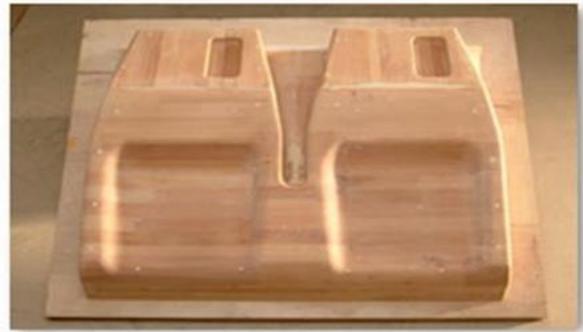
Segundo Klein (2009), a seleção do material do molde pode variar de acordo com a complexidade geométrica da peça. Para a moldagem de polímeros que exigem temperatura mais baixa de processamento e quantidades reduzidas de produção, podem ser utilizados a madeira ou o gesso na confecção dos moldes. Quando a produção exige maior quantidade de peças e temperaturas mais elevadas de processamento, os moldes devem ser fabricados à base de resina ou metálicos, preferencialmente de alumínio, podendo ser moldes de multicavidades ou de cavidade única.

Os moldes de gesso (FIG. 8a) são os mais recomendados para fabricação de protótipos, por serem de baixo custo e de rápida confecção. São muito adequados para quantidades reduzidas de produção, pois devido às pressões aplicadas no processo geram degradação progressiva por desgaste do molde. Por ter uma superfície sensível à retenção de calor, por ser um material cerâmico, o molde pode desenvolver fissuras decorrentes do processo de contração (MURALISRINIVASAN, 2010). Klein (2009) enfatiza que os moldes fabricados em madeira possuem baixo custo de fabricação, podendo ter ainda mais durabilidade (FIG. 8b), e em muitos casos chegar a ultrapassar mais de 500 ciclos. É importante que o tipo de madeira escolhida seja própria para confecção de moldes, pois sua deterioração durante o processo é inevitável. Em alguns casos, essa deterioração pode ser reduzida ou amenizada com a aplicação de esmaltes ou vernizes à base de resinas fenólicas.

FIGURA 8 - Tipos de molde positivo



(a) Gesso



(b) Madeira

Fonte: <http://www.oople.com> e <http://www.genplas.com>.

Existem no mercado vários tipos de resinas de baixo custo se comparadas aos moldes metálicos (FIG. 9). Os moldes fabricados a partir desse material são duráveis e apresentam boa moldabilidade, conferindo ao produto termoformado excelente acabamento superficial. Para alguns tipos de resinas sintéticas, que são sensíveis ao calor na sua superfície, é adicionado pó de alumínio em sua constituição, aumentando a estabilidade térmica e garantindo mais durabilidade. Para moldes maiores, blocos de madeira ou espuma são empregados na fabricação, auxiliando na redução do custo e, conseqüentemente, do peso, e são utilizados com a finalidade de ocupar as lacunas e espaços vazios, reduzindo o uso do material metálico, mais dispendioso (KLEIN, 2009).

FIGURA 9 - Moldes de resina



Negativo



Positivo

Fonte: <http://plastykembalagens.blogspot.com> e <http://www.silaex.com.br>.

O alumínio, por ser um material com boa dissipação térmica e resistência mecânica, é frequentemente selecionado para a fabricação de moldes de produção. Segundo Throne (2008), os moldes fabricados em alumínio (FIG. 10a) podem ser confeccionados a partir de

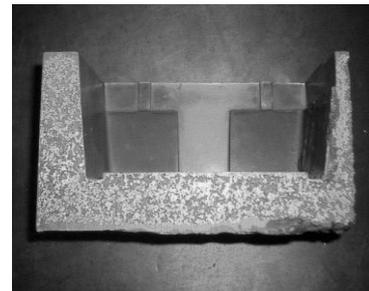
blocos forjados ou fundidos. Suas propriedades térmicas permitem que a temperatura da peça moldada seja rapidamente dissipada. Existe uma gama de possibilidades de acabamentos superficiais, os quais podem ser empregados nos moldes de alumínio. Mas o ideal é que a sua superfície seja jateada, pois isso evita que o ar fique preso entre o molde e a chapa de termoplástico. Os moldes em alumínio são excelentes por terem maior ciclo de produção, exibindo desgaste mínimo, praticamente desprezível (THRONE, 2008).

Formech (2011) refere que o alumínio poroso é constituído de material com microporos em toda a sua superfície, o que o torna permeável ao ar (FIG. 10b). O desenvolvimento de novas tecnologias dos materiais direcionadas para a melhoria no desempenho das ferramentas de termoformagem a vácuo, tais como: fabricação dos moldes a partir desse alumínio poroso, permitiu que o processo se tornasse mais rápido e com menos distorções geométricas e de acabamento.

FIGURA 10 - Moldes de alumínio



(a) Alumínio duas cavidades



(b) Alumínio poroso

Fonte: <http://www.solidus.pt/portfolio-moldes/termoformagem> e Plastiforma (2011).

## 2.3 Termoformagem a vácuo

### 2.3.1 Contexto histórico

A termoformagem é um termo genérico para um grupo de processos que envolve a conformação de uma chapa de polímeros preaquecido em determinadas condições de tempo e temperatura e submetido à pressão de um vácuo e à superfície de um molde. É considerado um dos mais antigos métodos de conformação de plásticos e atualmente uma das mais adequadas tecnologias de produção. As primeiras experiências com o vácuo já aconteciam no século XVII, com a descoberta do vácuo (RYANS; ROPER, 1986). O físico

alemão Otton Von Guericke mapeou as primeiras propriedades, a partir da primeira bomba de vácuo, fazendo uso dos “hemisférios de Magdeburgo”, equipamento constituído de duas cúpulas metálicas, as quais eram unidas pelo vácuo gerado no espaço esférico entre elas. A partir daí a tecnologia do vácuo vem se desenvolvendo de tal forma que seu uso se tornou indispensável no mundo moderno (CHAMBERS; FITCH; HALLIDAY, 1998). A tecnologia do vácuo veio propiciar significativo aumento de desempenho nos sistemas de termoformagem, tornando viáveis os processos que são afetados pela atmosfera padrão (DEGASPERI, 2002). A pressão atmosférica padrão ( $P_{atm}$ ) em relação ao nível do mar é de 1013,25 mbar (101,325 kPa). E qualquer sistema que proporcione pressão abaixo da atmosférica (padrão) pode ser definido como um sistema sob pressão de vácuo (MOUTINHO; SILVA; CUNHA, 1980; RYANS; ROPER, 1986).

Assim, a termoformagem a vácuo, ou *vacuum forming*, foi desenvolvida na década de 1870 e, de acordo com Throne (2008), é considerada um dos mais antigos processos de fabricação de objetos utilitários em plástico (YAM, 2009).

Os primeiros relatos acerca da termoformagem surgiram nos Estados Unidos da América (EUA), quando John Wesley Hyatt, considerado o pai da transformagem de plásticos, e seu colega de graduação em Engenharia Mecânica, Charles Burroughs, enrolaram finas folhas de papel à base de nitrato de celulose em formato de tubos. Esses tubos foram colocados em moldes de aço que continham as formas de pequenas garrafas. As folhas foram previamente aquecidas com vapor de água sob pressão, que suavizou a celulose; e a pressão no interior dos tubos forçou as folhas contra as formas do molde. Os moldes foram então resfriados em água, tendo enrijecido o plástico. Os moldes foram abertos e as peças retiradas. Com esse procedimento, foi possível fabricar pequenas garrafas com formato de chocalhos para bebês.

Chabot (1992) reporta que, no século XVIII, nos EUA, fabricantes de pentes utilizaram o método de termoformagem a vácuo para produzir o produto com materiais poliméricos. O processo iniciou-se entre as duas grandes guerras. Porém, foi durante a Segunda Guerra Mundial que o processo foi aplicado em maior escala, na fabricação de equipamentos e peças para aviões.

Para Yam (2009), o interesse pela termoformagem surgiu com a demanda do poli (metacrilato de metila) na fabricação de janelas de bombardeiros, fechamento de armas e para-brisas de aviões. Segundo o mesmo autor, em geral, a termoformagem é utilizada quando são necessárias peças de grande superfície, a avaliação rápida de projetos e quando a quantidade de produtos não é muito elevada.

No entendimento de Chabot (1992), esse contexto histórico e avanços tecnológicos determinaram a termoformagem como uma opção técnica de grande utilização nas fábricas de produtos termoplásticos. Em 1955, com o avanço da tecnologia das máquinas, foi possível a moldagem de peças com dimensões maiores e com mais produtividade. Tais melhorias contribuíram para a expansão do processo para outros segmentos das indústrias automobilística e náutica, atingindo, por consequência, as indústrias de embalagens. Com a utilização do processo e sua automação mecânica, em que garras eram usadas para transferir a chapas de uma estação para outra, o processo de termoformagem a vácuo continuou a aprofundar no segmento, chegando às indústrias de embalagens alimentícias (MICHAELI *et al.*, 1995).

O processo de termoformagem a vácuo possibilitou o uso de máquinas de baixo custo, chapas com pequenas espessuras e de superfícies mais extensas. Devido a essas facilidades e na produção dos moldes de baixo custo (em comparação com o molde da injeção de termoplástico), houve significativa redução no tempo de desenvolvimento dos produtos. Normalmente, o processo de termoformagem é aplicado em espessuras que variam entre 0,27 mm e 12 mm, em que o material é encontrado no mercado em formato de bobinas ou em chapas paletizadas. O processo de termoformagem a vácuo pode ser realizado em quatro etapas, a saber, alimentação, aquecimento, moldagem e resfriamento (STRONG 1996; THOMAZI, 2014).

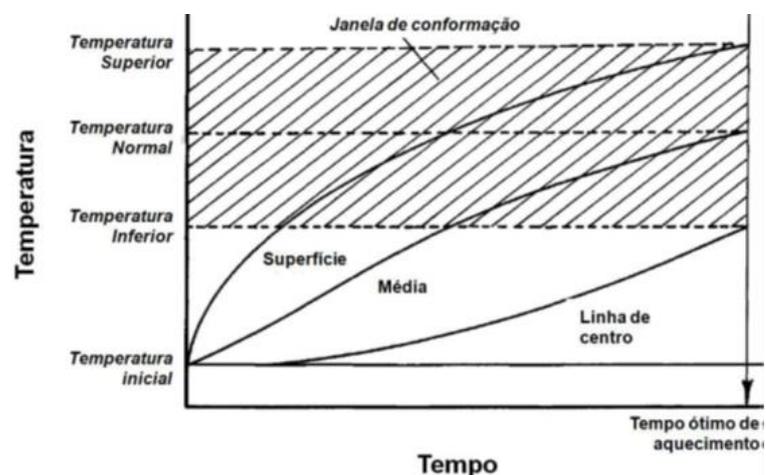
### **2.3.2 Etapas da termoformagem**

As etapas de termoformagem compreendem quatro fases: alimentação, aquecimento, moldagem e resfriamento. Segundo relato de diferentes autores (ENGELMANN, 2012; GRUENWALD, 1998; KLEIN, 2009; MORAES, 2004; MURALISRINIVASAN, 2010; ROSEN, 2002a; 2002b; THRONE, 2008), cada tipo de equipamento de termoformagem exige um tipo de alimentação de matéria-prima, podendo ser contínuo (bobinas) ou em

chapas. No caso da alimentação contínua, as espessuras dos materiais devem ter em torno de 2,5 mm, no caso das chapas, podendo ser adequadas a cada tipo de equipamento ou às dimensões do molde. De maneira geral, as máquinas possuem um quadro de fixação, que é projetado para suportar materiais com diferentes espessuras, que são fixados no quadro e o material é mantido tenso no momento do aquecimento e da termoformagem.

O aquecimento da matéria-prima acontece por fontes de calor que podem vir de aquecedores de combustão (gás natural), aquecedores de cerâmica, de quartzo, resistências elétricas ou lâmpadas. O controle da temperatura é um dos fatores essenciais para se obterem peças de qualidade. Assim, para a termoformagem de um polímero termoplástico em uma peça plástica, o ideal é determinar uma faixa de temperatura considerada ótima ou janela de conformação e aquecer a peça até esse patamar. A FIG. 11 apresenta de forma esquemática as temperaturas locais na placa em função do tempo no caso improvável de existir um tempo ótimo. A área destacada nesse caso é conhecida como janela de conformação, que depende da espessura da placa, temperatura da superfície, do centro e média e, ainda, do tempo de aquecimento (THRONE, 1996). Dessa maneira, a temperatura do polímero, a temperatura do forno e a distância entre eles são parâmetros importantes na etapa de aquecimento. A eficiência com que a energia térmica é transmitida para o polímero é proporcional à quantidade de calor conduzida ou irradiada por convecção do ar aquecido. Contudo, durante o processo podem ocorrer perdas de calor que variam de 50 a 90% do total.

FIGURA 11 – Temperaturas locais no caso hipotético de existir um tempo ótimo



Fonte: adaptado de Throne (1996).

Após aquecida, a chapa de termoplástico é submetida ao contato com o molde, acionando-se uma força de pressão a vácuo que conforma o material sobre o molde rígido. Em seguida, o sistema de vácuo retira todo o ar que se encontra entre a cavidade do molde e o termoplástico, por meio de pequenos furos capilares distribuídos de maneira equidistante em toda a superfície do molde (de 0,5 a 1,0 mm). Os furos permitem que o vácuo atue forçando a atração da face inferior da chapa que se conforma nos contornos do molde de maneira controlada e rápida. Logo, a chapa que entrou em contato com o molde perde calor por condução, a peça é retirada do molde e o calor dissipa-se para o ambiente.

O termoplástico possui taxa de contração que pode provocar mais aderência do material ao molde. No processo de retirada da peça do molde são utilizadas pressões de ar comprimido, que reduz o calor e facilita o deslocamento do produto. Alguns processos exigem que haja paralisação definitiva da contração do material. Nesse caso, utiliza-se uma névoa aquosa combinada a pressões de ar comprimido, aumentando assim a sua capacidade de resfriamento. Uma das tecnologias mais utilizadas de resfriamento interno dos moldes é o uso de serpentinas no interior dos moldes. Porém, no setor produtivo, são utilizados na maioria dos casos ventiladores ou exaustores. Estes fazem circular o ar acima da peça, ocasionando a troca de temperatura. Após a peça moldada estar suficientemente resfriada e com as dimensões estáveis, ela pode ser removida do molde.

### **2.3.3 Métodos de termoformagem**

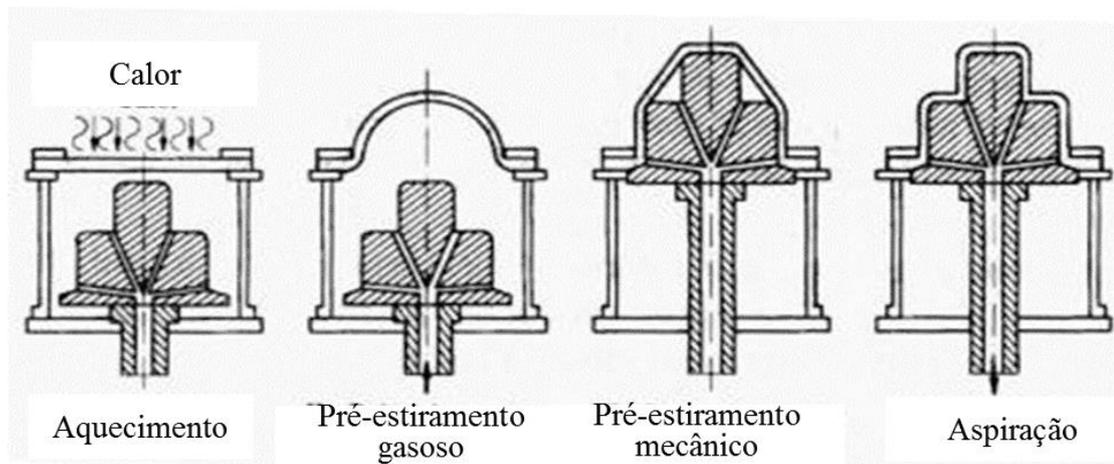
Basicamente, existem quatro métodos de termoformagem: a) termoformagem a vácuo utilizando molde positivo ou negativo; b) moldagem por pressão positiva; c) moldagem por força mecânica; d) termoformagem dupla.

#### **2.3.3.1 Termoformagem a vácuo**

Nesse tipo de processamento, também denominado termoformagem positiva, a chapa de polímero é fixada, aquecida e direcionada para baixo, onde se encontra com o molde positivo que é erguido por meio de um pistão (FIG. 12). O ar entre a chapa e o molde é retirado ao penetrar o molde, esticando a chapa contra as bordas do mesmo. O ar sob

pressão força então a chapa de polímero contra o molde positivo. Nessa técnica, a peça fica com o fundo mais espesso e as paredes mais finas (YAM, 2009). Um recurso que pode ser usado nesse processo de termoformagem é o pré-estiramento. Ele é aplicado no processo de termoformagem de peças com profundidade elevada e ângulos de inclinação acentuados e também para moldes mais complexos (STRONG, 1996; THRONE, 2008). O pré-estiramento consiste em uma bolha negativa, ou embarrigamento, que é aplicada no momento em que a chapa de polímero alcança a temperatura ideal para ser conformada no molde, conhecido como estado plástico. Esse processo auxilia na uniformidade da espessura do material quando o vácuo é aplicado.

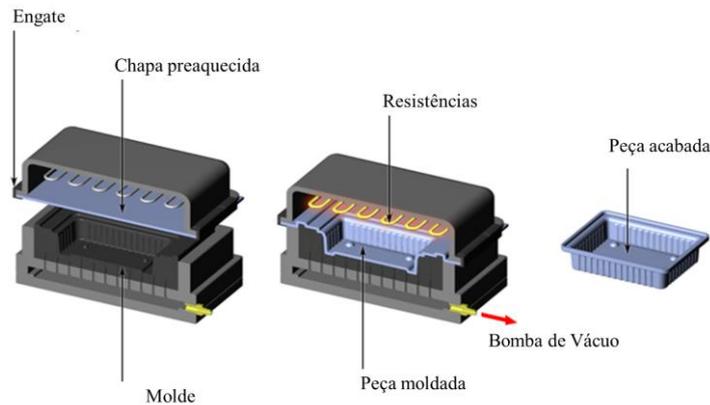
FIGURA 12 - Termoformagem a vácuo por molde positivo



Fonte: <http://www.ebah.com.br>.

Na termoformagem a vácuo com molde negativo, conforme descrito por Sors, Bardócz e Radnóti (2002), a chapa de termoplástico é fixada em um quadro, que é posicionado sobre o molde, enquanto é aquecida a chapa. Com o aquecimento, inicia-se o estriamento da chapa a ser conduzida para a geometria do molde. Nesse processo, a chapa de polímero depois de aquecida e o vácuo aplicado por baixo da chapa empurram esta para a superfície do molde. De acordo com Thomazi (2014), no processo negativo a chapa de polímero preaquecida é forçada para o interior do molde, enquanto no processo positivo a chapa é aspirada sobre o molde. Após a moldagem e resfriamento, a peça é retirada (FIG. 13). Nessa técnica, as áreas da chapa de polímero que tocam por último no molde serão as partes mais finas da peça depois de termoformada (YAM, 2009).

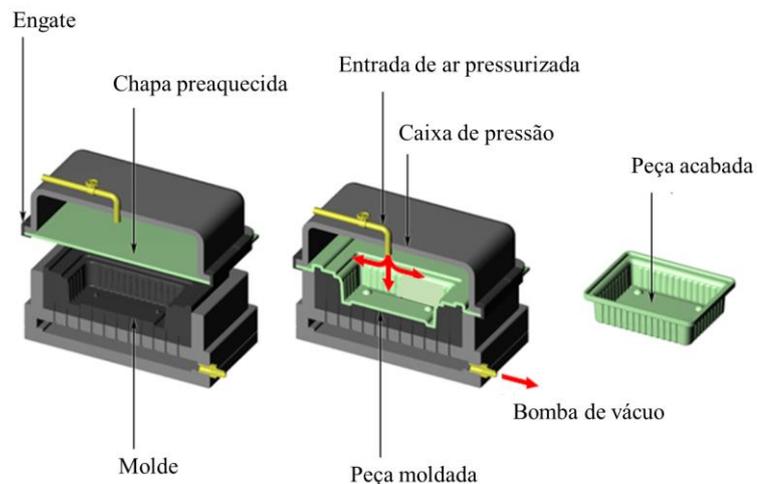
FIGURA 13 - Termoformagem a vácuo por molde negativo



Fonte: <http://www.custompartnet.com>.

### 2.3.3.2 Termoformagem por pressão

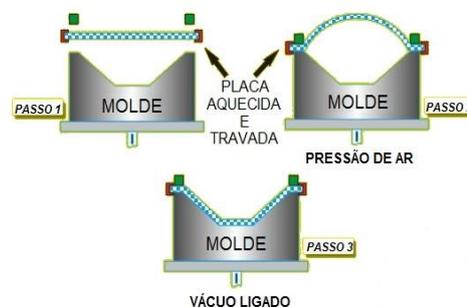
Nesta técnica, uma caixa de pressão é colocada sobre a chapa de polímero, forçando-a contra a cavidade do molde (FIG. 14). O ar é injetado sob pressão, forçando a chapa nos cantos do molde, onde a caixa de pressão promove a vedação na superfície livre da chapa, com pressão de ar entre 0,7 e 1,4 MPa (INNOVA, 2011; ROSEN, 2002a; 2001b; THRONE, 2008; YAM, 2009).

FIGURA 14 - Termoformagem por pressão de ar (*pressure forming*)

Fonte: <http://www.custompartnet.com>.

No processo *billow forming*, a chapa de polímero é fixada para ser aquecida e uma bolha é formada com a pressão de ar. A quantidade de ar é controlada com o auxílio de uma fotocélula, que detecta a parte mais alta da bolha. Esta etapa é denominada de formagem multietapas, em que o ar ambiente, mais frio que a chapa, resfria-se livremente na bolha, sem tocar uma superfície sólida durante o estiramento. Dessa forma, a espessura da parede da bolha é bastante uniforme, exceto perto da área de fixação da chapa (FIG. 15).

FIGURA 15 - Termoformagem processo *billow forming*

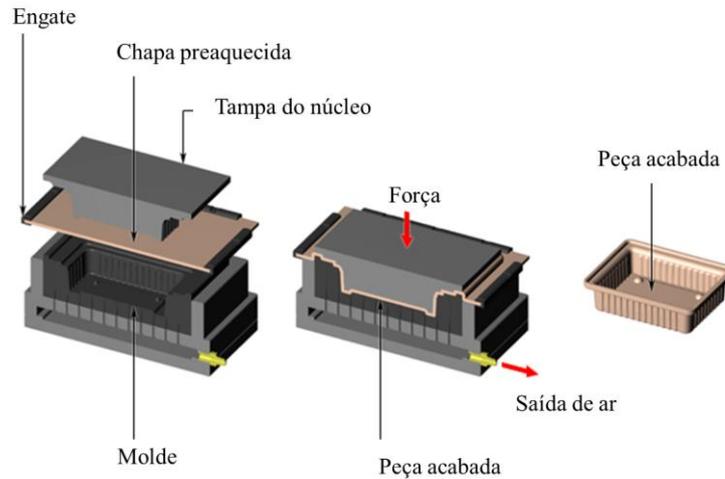


Fonte: <http://www.tripp-enterprises.com>.

A partir desse ponto, existem algumas variações desse método de termoformagem por sopro. Na primeira, o molde positivo é pressionado contra a parte superior da bolha pré-esticada (*billow drape forming*). As espessuras de parede são muito mais uniformes. Na segunda, quando se usa um molde negativo, a pressão diferencial que inflou a bolha se reverte. Isso faz com que a chapa pré-esticada tenha desempenho em todas as paredes do molde negativo (*billow vacuum forming*). A espessura de parede da peça é muito mais uniforme (INNOVA, 2011; ROSEN, 2002a; 2002b; THRONE, 2008; YAM, 2009).

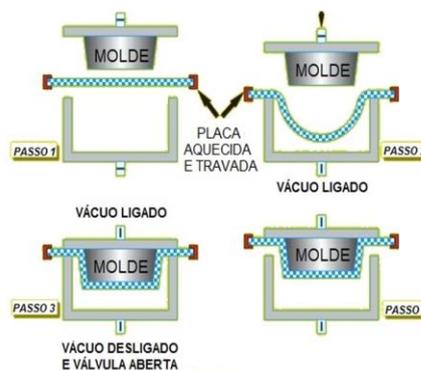
### 2.3.3.3 Moldagem por força mecânica

A chapa termoplástica é forçada mecanicamente em torno do molde por contato direto. Tipicamente, um módulo de núcleo vai empurrar a chapa para dentro da cavidade do molde e forçá-lo na forma desejada (FIG. 16).

FIGURA 16 - Termoformagem mecânica (*mechanical Forming*)

Fonte: <http://www.custompartnet.com>.

A inversão da bolha pode ser complicada, por envolver complexidade operacional, o que dificulta muito o uso dessa técnica. E se é utilizado o vácuo para formar a bolha, é necessária a aplicação de uma caixa de vácuo. O molde é submergido sobre a chapa pré-esticada, onde se aplica o vácuo, e se injeta ar sob pressão do lado oposto. Então, a bolha envolve a superfície do molde, fenômeno denominado *billow snap-back vacuum forming* (FIG. 17).

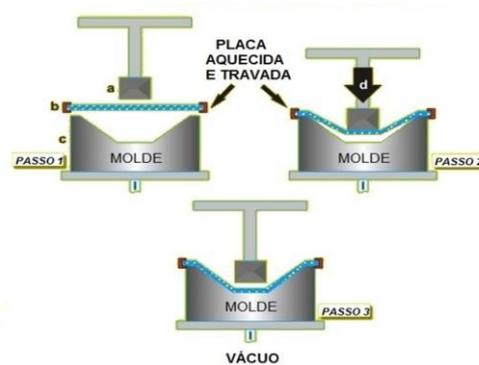
FIGURA 17 - Termoformagem processo *billow snap-back vacuum forming*

Fonte: <http://www.tripp-enterprises.com>.

Na termoformagem com auxílio de pistão a moldagem a vácuo recebe auxílio de pistão (molde negativo), quando o polímero é fixado e aquecido. Esse pistão pré-estira a chapa de termoplástico, empurrando-a contra a cavidade do molde negativo. Quando a chapa do pistão atinge o ponto final, é aplicado um vácuo para completar a moldagem. A espessura

da parede é determinada de acordo com o tamanho do pistão (FIG. 18). As áreas que entram em contato com o polímero e o pistão formam paredes mais espessas, devido à rápida troca de calor. Na moldagem por pressão com auxílio de pistão, o processo é similar à moldagem por vácuo com pistão. Exceto pelo fato de que, como o pistão entra até a chapa de material, permite-se a movimentação do ar que se encontra debaixo da chapa. Quando o pistão termina seu deslocamento selando o molde, aplica-se ar sob pressão desde o pistão. Esse ar pode entrar através do pistão ou por trás do mesmo. Aquelas áreas de chapa que entram em contato primeiro com o ar esfriam-se primeiramente. Em alguns casos requer ar aquecido. As temperaturas do pistão são também importantes. Esse método pode ser controlado para produzir uniforme distribuição de material em toda a peça (INNOVA, 2011; ROSEN, 2002a; 2002b; THRONE, 2008; YAM, 2009).

FIGURA 18 - Moldagem com contramolde (*plug assist*)

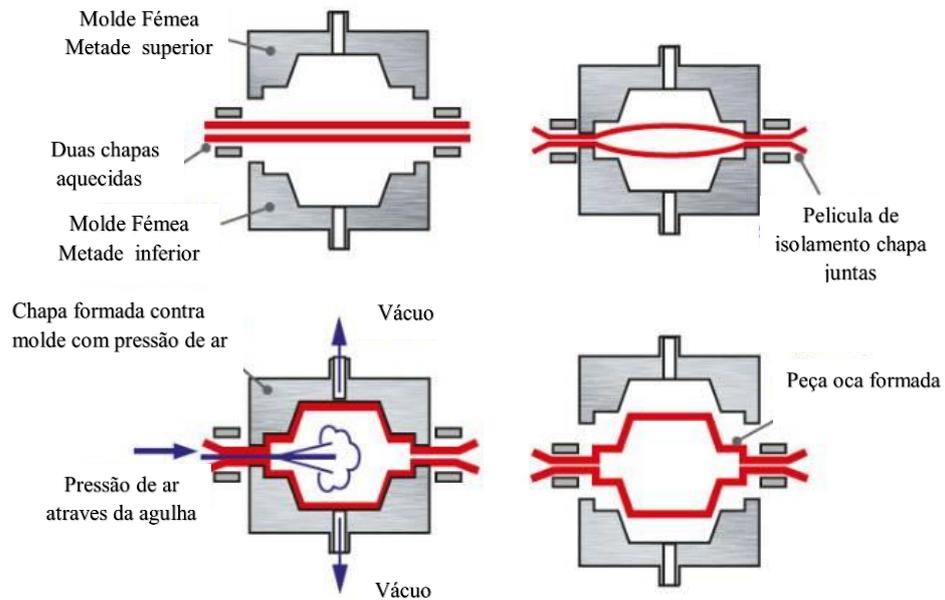


Fonte: <http://www.tripp-enterprises.com>.

#### 2.3.3.4 Termoformagem dupla

A termoformagem dupla é um processo de pressão ou vácuo formando duas chapas de plástico simultaneamente com um molde separado, sendo uma chapa superior e outra inferior (FIG. 19). Uma vez que as peças tenham sido moldadas, os moldes permanecem unidos. E com a respectiva temperatura de formação sob elevada pressão, é efetuada a solda entre as partes.

FIGURA 19 - Termoformagem dupla-chapa (*twin-sheet forming*)



Fonte: <http://www.cannonergos.com>.

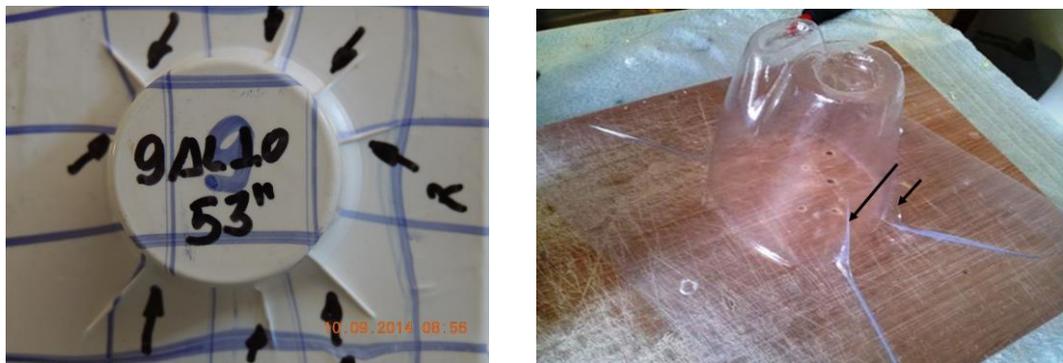
O desenvolvimento do processo de termoformagem tem evoluído desde sua aplicação inicial. Trata-se apenas de um processo simples de termoformagem a vácuo, com somente duas etapas de processo. Essas etapas eram o aquecimento e o resfriamento da chapa termoplástica. Com o surgimento de aplicações de novas tecnologias nas etapas, estas tornaram-se mais sofisticadas e automatizadas. Novas técnicas auxiliam o processo, a distribuição de material ao longo da superfície do produto e também o seu nível de detalhes. Com isso, impacta diretamente no aumento de produtividade e aplicabilidade desse processo.

### 2.3.3.5 Principais defeitos dos termoformados

Mesmo sendo um processo de fácil aplicação, ainda existem algumas limitações a serem observadas, como, por exemplo, a dificuldade no controle da espessura. Dependendo da complexidade do produto, o processo de termoformagem a vácuo torna-se inviável. Sua seleção se mostra inadequada no caso de tolerâncias dimensionais rigorosas entre produtos do mesmo lote ou mesmo se estas forem mais exigentes que as tolerâncias do processo (ENGELMANN, 2012; ROSEN, 2002a; 2002b; THRONE 2008). Dos principais defeitos relacionados ao processo de termoformagem e suas variáveis, citam-se o enrugamento, marcas de resfriamento, afinamento e contração.

O enrugamento é um defeito de processamento de grande influência negativa, que pode condenar a peça e mesmo o projeto do molde. O enrugamento acontece quando o material contrai sobre si mesmo (FIG. 20). Segundo alguns autores, tais rugas podem ser causadas por superaquecimento do material quando este entra em contato com o molde (KLEIN, 2009; MURALISRINIVASAN, 2010). Acredita-se que tais anomalias de conformação também possam ser causadas por outros fenômenos, como altura do molde superior ao comprimento da base, quinas vivas em cantos verticais, ângulos fora da especificação, moldes de multicavidades, cavidades muito próximas umas das outras, excesso de material para moldes de pequeno porte.

FIGURA 20 – Rugas: em moldes positivos



Fonte: <http://www.e-voo.com>.

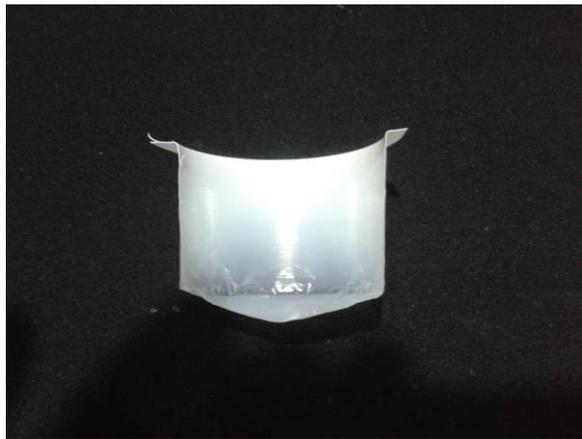
As rugas podem ser minimizadas ou até mesmo eliminadas adotando-se medidas consideradas simples, tais como: redução da área de material em torno do molde, utilizar o método de contramolde com pressão de vácuo mais lenta e uso de chapas termoplásticas com espessura maior.

As marcas de resfriamento acontecem durante o processo de moldagem da chapa de termoplástico aquecida. Quando o calor da chapa é dissipado no momento em que ela entra em contato com o molde, reduzindo o fluxo de material que sofre tensões desiguais na parte superior do molde com a peça, provoca um afinamento nas paredes laterais com a força do vácuo (FORMECH, 2011).

O afinamento é outro problema frequente enfrentado no processo de termoformagem a vácuo, proveniente de alturas superiores dos moldes em relação ao comprimento da base e com ângulos de saída mínimos (FIG. 21). O material polimérico, quando aquecido, pode

acumular-se em cantos quadrados e não fluir uniformemente sobre o molde, o que provoca furos, paredes muito finas, teia e afinamento da parede lateral (ROSEN, 2012a; 2002b). A aresta em que as paredes laterais se cruzam perto da parte superior do molde pode induzir excessivo acúmulo de material plástico ao longo da borda com a superfície do molde e não ser suficiente para absorver o excesso de material.

FIGURA 21 - Afinamento das paredes



Os termoplásticos estão sujeitos à contração de volume durante o esfriamento no interior da cavidade do molde. Nesse caso, as dimensões das peças conformadas serão menores do que as dimensões estabelecidas pelo coeficiente de contração (no caso do PS, de 0,4 a 0,7%). Experiências anteriores demonstram que os moldes positivos são capazes de retardar a contração da peça, ou seja, são capazes de manter as medidas projetuais. Depois da peça resfriada e retirada do molde, o material termoformado ainda não entrou em equilíbrio térmico com o ambiente e essa contração pode continuar, cessando somente quando a peça atingir esse equilíbrio térmico (ENGELMANN, 2012). Esse efeito pode causar consideráveis divergências dimensionais, que devem ser previstas pelo projetista. Porém, somente são consideradas importantes essas alterações quando as medidas e tolerâncias indicadas no desenho e exigidas na peça se tornem críticas, ao ponto de inviabilizar a aplicação do produto.

#### **2.3.3.6 Embalagens termoformadas a vácuo**

A termoformagem é empregada em larga escala na indústria de embalagens e descartáveis e produtos em geral. Ela pode atingir ampla gama de espessuras, desde as medidas finas

utilizadas em alimentos, até chapas mais grossas utilizadas na fabricação de interiores de geladeiras. As embalagens termoformadas atendem principalmente aos setores alimentício, de higiene, limpeza, cosméticos, farmacêutico e industrial. Além de embalar e transportar produtos, elas têm as funções de atrair a atenção e a confiança do consumidor, além de produzir uma impressão global favorável. Algumas empresas priorizam o *design*, a funcionalidade e a qualidade, uma vez que embalagens bem desenhadas podem criar valor de conveniência para o consumidor e valor promocional para o fabricante dos bens de consumo (PADILHA; BOMTEMPO, 1999). Mundialmente, as embalagens movimentam mais de US\$ 500 bilhões, representando entre 1% e 2,5% do Produto Interno Bruto (PIB) de cada país. No Brasil, ela movimenta atualmente R\$ 47 bilhões e gera mais de 200 mil postos de trabalho diretos e formais (ABRE, 2015). Hoje se pode afirmar que a embalagem deixou de ser parte para ser o produto.

Um dos principais tipos de embalagens obtidas a partir da termoformagem é a *blister* (bolha). São normalmente individualizadas (em grande parte para alimentos), largamente utilizadas pela população brasileira em hotéis, restaurantes, empresas de transporte aéreo, hospitais, supermercados, padarias, entre outros. Ressalta-se que as embalagens de alimentos devem cumprir seu papel de proteção e ao mesmo tempo proporcionar uso seguro, preservando a inocuidade do alimento (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO, 2015).

Existem outros tipos de embalagens *blister*, com duas fases - tampa e fundo - ou maleta, conhecida como *blister clamshell* (concha fechada). A FIG. 22 mostra exemplos de embalagens *blister* para acondicionar alimentos e outros produtos industrializados dentro de uma bolha plástica normalmente com o formato dos contornos do produto (PRECONIZ, 2014; THRONE, 2008). Esse tipo de embalagem é muito resistente, acondiciona o produto e protege de maneira eficaz de fatores externos, proporcionando melhor visibilidade do produto no ponto de venda. A fim de garantir inviolabilidade a pequenos utensílios, tais invólucros são muitas vezes confeccionados com chapas grossas de cloreto de polivinila (PVC) ou de politereftalato de etileno (PET) e seladas quente nas extremidades. Assim, a embalagem pode ser considerada um atrativo para melhorar a comercialização dos produtos, com influência direta nos custos, na tecnologia de fabricação, na distribuição e na conquista de consumidores.

FIGURA 22 - Embalagens *blister**Blister bolha**Blister clamshell*

Fonte: <http://www.multiforming.com.br>.

Grandes mercados de embalagens despontam ao redor do mundo, mostrando o seu crescimento tecnológico. O Brasil faz parte do cenário mundial de negócios, tendo acesso às mais novas tendências de gerenciamento de projetos e sendo referência no desenvolvimento de novas tecnologias, como, por exemplo: o plástico verde desenvolvido a partir da cana-de-açúcar, as embalagens cartonadas assépticas, o sistema abre-fácil de tampas metálicas, entre outras. Destaca-se também a aplicação do *design*, buscando agregar valor ao produto, reduzir custos no processo produtivo, facilitar o manuseio e, conseqüentemente, melhorar a competitividade (ABRE, 2015).

## 2.4 Termografia infravermelha

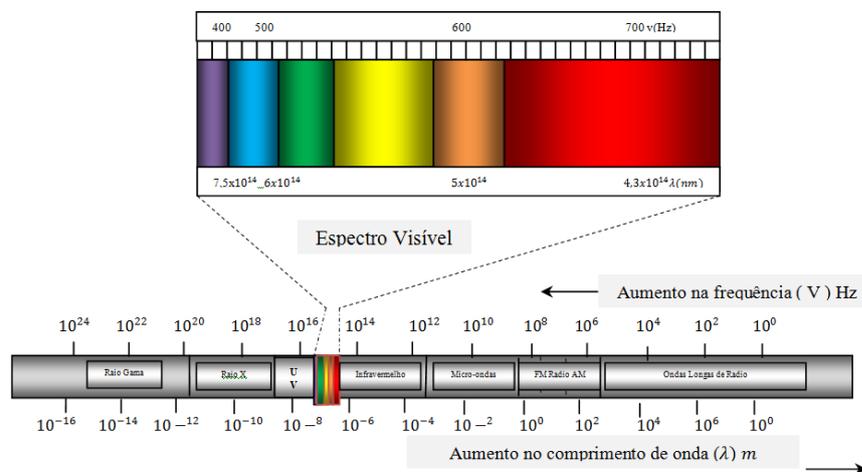
A história da termografia teve início com os estudos de Frederick Willian Herschel (1738-1822), em meados do século XVIII, com as publicações de seus estudos experimentais baseados nas experiências de Isaac Newton sobre a decomposição da luz solar. A termografia propriamente dita nasceu no período do Pós-Guerra como uma técnica militar de imageamento remoto destinada a localizar e rastrear alvos noturnos a partir de imagens térmicas. Sua evolução se deu com o surgimento do radiômetro e desenvolveu-se de forma efetiva com o surgimento do detector *charged coupled device* (CCD), dispositivo que transforma a luz em sinais elétricos capazes de criar imagens de alta qualidade e baixo ruído. Com a adoção dos bolômetros (detector térmico que não necessita de resfriamento) foi possível desenvolver novos detectores e câmeras infravermelhas mais eficientes e mais sofisticadas. Assim, a termografia mede a temperatura pela captação da radiação emitida na faixa do infravermelho na superfície do material.

### 2.4.1 Radiação infravermelha

O estudo da radiação infravermelha está ligado à transmissão de energia na forma de ondas eletromagnéticas. De acordo com a teoria eletromagnética, as ondas são compostas de campos elétricos e magnéticos que podem ser gerados por fenômenos naturais, como o Sol, ou criadas pelo homem. Elas têm a capacidade de carregar energia para longe da fonte que as gerou. O conjunto de todas as frequências das ondas eletromagnéticas é chamado de espectro eletromagnético (HOLST, 2000; INCROPERA; DEWITT, 2008; KREITH, 1977; PAPPALETERE, 2004).

O espectro eletromagnético abrange vasta gama de comprimentos de onda. Conforme apresenta a FIG. 23, cada uma delas é caracterizada por uma faixa de frequência. A única região que o olho humano pode perceber compreende uma parte muito pequena do espectro eletromagnético, chamada “espectro visível”. As frequências acima do visível são chamadas de ultravioleta. Além do ultravioleta, encontram-se os Raios-X e os Raios-gama, com comprimento de ondas curtas. As frequências abaixo são micro-ondas, as radiofrequências (frequência modulada - FM - e amplitude modulada - AM) e as ondas longas de rádio. Todas essas ondas se deslocam na velocidade da luz, o que faz com que os gráficos normalmente mostrem as frequências crescentes e os comprimentos de onda decrescentes correspondentes em um mesmo eixo.

FIGURA 23 - Divisão do espectro eletromagnético



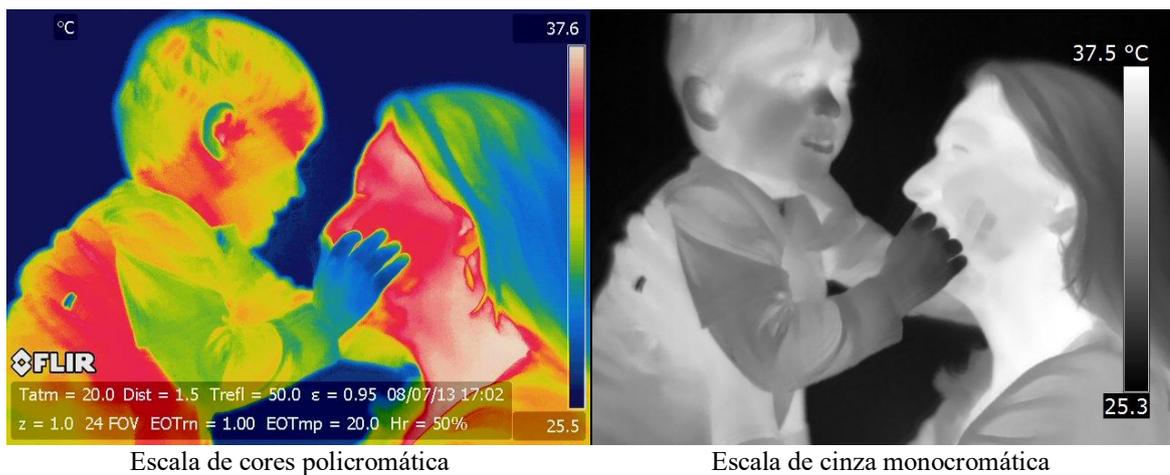
Fonte: adaptado de Callister (2002).

Em função da temperatura absoluta e das características de sua superfície, todos os corpos com temperaturas acima de zero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) emitem continuamente energia na região do infravermelho com diferentes intensidades e comprimentos de ondas. As unidades mais comuns em infravermelho é micrón -  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 1/1.000 \text{ mm}$ ), sendo que a região em que se encontram os infravermelhos pode variar entre 0,75 e 1.000  $\mu\text{m}$ .

#### 2.4.2 Descrições do método de termografia

O processo termográfico é feito por meio de equipamentos que convertem a energia emitida pela superfície dos materiais em imagens térmicas. São constituídos basicamente de sensores ou detectores de radiação, amplificadores de sinais e um processador. A imagem é obtida pelos detectores sensíveis ao infravermelho, que captam a radiação térmica e a convertem em sinais elétricos. Esses sinais normalmente são baixos e proporcionais ao fluxo de radiação, por isso são amplificados, lidos e processados por meio de *softwares* e são transformados em imagens térmicas ou termogramas (SALES, 2008). A FIG. 24 apresenta uma imagem infravermelha adquirida por uma câmera ThermaCAM P640 da marca Flir. Na lateral direita do termograma, a escala de cores representa a amplitude da temperatura registrada em graus *Celsius*.

FIGURA 24 - Imagem térmica do ser humano



Os termovisores ou câmeras termográficas (FIG. 25) possibilitam adequar o campo de visão do aparelho às necessidades específicas de cada observação. Dessa forma, elas captam por meio de lentes intercambiáveis a radiação infravermelha que é emitida pelo

objeto e decodifica (a partir de algoritmos) em tons de cinza que variam dos mais escuros para os mais claros (escala monocromática) ou em uma escala de cores padronizada (escala policromática). De modo geral, o registro das imagens térmicas gerados pelos sistemas infravermelhos pode ser analógico ou digital, o que permite a ligação do sistema a televisores ou computadores para posterior análise e processamento das informações (SALES, 2008).

FIGURA 25 - Termocâmara de infravermelho: FLIR P-640



Fonte: FLIR Systems.

### 2.4.3 Interpretação de imagens térmicas

O ensaio de termografia é de fácil procedimento, porém existem diferentes fatores que podem influenciar a captação das imagens. Fatores como as condições térmicas do objeto e do meio em que se encontra;, fontes externas tais como sombra, reflexão, superfícies com diferentes acabamentos; condições de medição - emissividade adotada, temperatura do ar, distância entre a câmera e o objeto - e o ângulo de observação, entre outros, podem interferir significativamente nas respostas térmicas dos materiais e originar análise e conclusões equivocadas se não forem tomados cuidados antes e durante a realização do ensaio (BARREIRA, 2004; CORTIZO, 2007; SALES *et al.*, 2011).

O fluxo óptico (grandeza medida pelos detectores de infravermelhos) depende da emissividade e da temperatura do material, portanto, para medir valores reais de temperatura é preciso conhecer o valor efetivo da emissividade. Para tanto, existem métodos simplificados que podem determinar esse valor (SALES, 2008). Autores como Incropera e Dewitt (2008) disponibilizam uma tabela com os principais materiais e seus respectivos valores de emissividade, assim como no manual do fabricante do equipamento de termografia (FLIR, 2015).

Contudo, antes de se utilizar esses valores, devem-se verificar as condições de medição, a temperatura de ensaio, o acabamento da superfície do material, a gama de comprimentos de onda adotada e o ângulo de medição.

O campo de atuação da termografia infravermelha cresce em todo o mundo, principalmente para monitorar dispositivos em funcionamento, para manutenção industrial, controle da temperatura em caldeiras, fornos e tubulações, para monitorar umidade e infiltração, inspeção de fachadas e tetos, em testes de eficiência energética, controle da calefação e refrigeração, preservação do patrimônio histórico, análise de edifícios e obra de arte. Danese *et al.* (2010) mostram como a análise visual pode ser utilizada para facilitar a interpretação das imagens termográficas para fins de restauro do patrimônio cultural, na tentativa de identificar padrões que possam fornecer informações sobre o nível de deterioração em objetos históricos. O estudo foi realizado na fachada de um edifício do século XIII (Catedral de Matera - Itália). Karoglou *et al.* (2011) avaliaram uma metodologia de engenharia reversa no revestimento de um edifício histórico, buscando mapear o revestimento original do monumento. Os resultados revelaram a presença de brita, utilizada como agregado, sem a adição de quaisquer pigmentos. Com base nesses dados, várias composições de revestimentos de recuperação foram preparadas e testadas. Sua avaliação foi realizada com base em critérios de compatibilidade com o revestimento histórico.

Na área médica, a termografia demonstra seu potencial para diagnóstico de diferentes doenças como o câncer de mamas, fibromialgias, dores musculares, entre outras. Bouzida, Bendada e Maldague (2009) estudam o sistema de termorregulação do corpo humano com base na geração e perda de calor por estimulação fria e controle do fluxo de sanguíneo. A visibilização é feita utilizando-se dispositivos de infravermelhos. As imagens resultantes revelam equilíbrio de temperatura entre a estimulada e as não estimuladas. Herman e Cetingul (2011) exploraram a viabilidade de imagem de infravermelho para detecção de tumores, com ênfase no rastreamento e detecção precoce do melanoma. O estudo foi realizado em pacientes com lesão pigmentada com indicação clínica para a biópsia. Comparou-se a diferença nas respostas térmicas entre tecido saudável e maligno e compararam-se os dados com os resultados da biópsia. Concluiu-se que o aumento da atividade metabólica da lesão de melanoma pode ser detectado por imagem de infravermelhos. Fernández-Cuevas *et al.*

(2015) demonstram que ainda existe falta de informações completas acerca dos fatores que influenciam o uso da termografia em seres humanos e propõem uma classificação em três grupos principais: fatores ambientais, individuais e técnicos. O objetivo foi discutir os resultados do estudo para identificar as áreas que necessitam de mais pesquisas.

Apesar de ser uma técnica pouco investigada em algumas áreas do conhecimento, a termografia se apresenta como uma técnica de inspeção definida por alguns autores como uma atividade de monitoramento capaz de fornecer dados suficientes para uma análise de tendências. Por ser um ensaio não invasivo, a termografia pode ser usada como alternativa para o diagnóstico de defeitos, identificação de anomalias, falhas em materiais e processos que envolvam a transferência de calor. Sales (2008) avaliou a potencialidade da técnica de termografia para a caracterização de concretos. Para tanto, foram realizados ensaios em corpos-de-prova de concreto endurecido de diferentes idades, sendo introduzidas imperfeições, e outros foram submetidos à ação de altas temperaturas e ácidos. Os resultados mostraram que a termografia foi capaz de identificar imperfeições no interior do concreto.

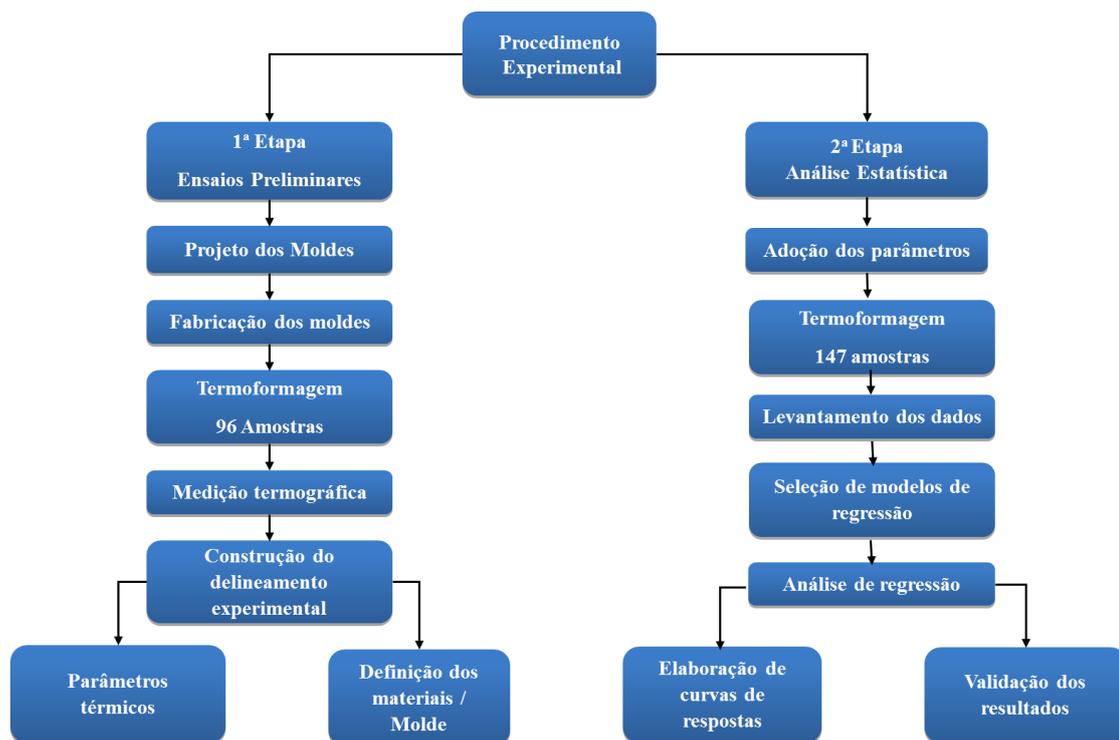
Pedra (2011) avalia as potencialidades da termografia infravermelha para o estudo do *design* do conforto térmico, utilizando um modelo de alvenaria estrutural de concreto/cerâmica e poliestireno expandido. Os resultados evidenciaram que a termografia pode contribuir para o estudo conforto térmico e que o conjunto bloco de concreto/cerâmica e poliestireno contribui para a obtenção de alvenarias mais isolantes. Pereira (2013) investiga, com base na termografia infravermelha, o comportamento da temperatura de aquecimento e resfriamento (conforto térmico) nos assentos de cadeiras escolares fabricados com materiais diversos. Os resultados informam que a termografia se mostrou capaz de identificar a influência da temperatura em diferentes materiais.

Na literatura consultada não foram encontrados trabalhos científicos que tenham utilizado a termografia durante o processo de termoformagem. Dessa forma, nesta pesquisa a termografia foi utilizada com a finalidade de avaliar parâmetros de comportamento do material poliestireno (PS) durante e após o processo de termoformagem, para identificar qual o material de melhor dissipação térmica mais adequado para fabricação dos moldes e as faixas de temperatura em que se obtêm peças bem conformadas e sem defeitos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise do comportamento da termoformagem a vácuo de embalagens *blister* utilizando termografia infravermelha e análise de regressão foi de caráter experimental e desenvolveu-se em duas etapas (ensaios experimentais e análises estatísticas). Os ensaios foram realizados na Indústria Eletromec, utilizando como metodologia os critérios e procedimentos estabelecidos na empresa para termoformagem em linha de produção. As etapas do trabalho seguiram critérios cabíveis para cada necessidade e tipo de ensaio e os procedimentos estabelecidos são mostrados esquematicamente na FIG. 26.

FIGURA 26 - Etapas do procedimento experimental



#### 3.1 Materiais para molde

Os materiais foram definidos tomando-se como referência os dados da literatura, na qual diferentes autores recomendam materiais distintos para situações específicas. Para baixa

produtividade, o material mais recomendado para o molde é a madeira; e para peças de geometria complexas, recomendam-se materiais de melhor desempenho e alta resistência mecânica, como o alumínio ou resina (BOSER, 2013; GRUENWALD, 1998; KLEIN, 2009; STRONG, 1996; THRONE, 2008). Quanto ao formato dos moldes segundo Throne (2008), os moldes positivos e negativos são os mais utilizados tanto para experimentos (prototipagem) quanto no mercado produtivo.

Definiu-se nesta pesquisa utilizar o compósito MDF e o alumínio *American Society for Testing and Materials* (ASTM) – Al 6351.

Utilizaram-se os dois tipos de moldes positivo e negativo desenvolveu-se um molde para cada tipo de material – alumínio (Al) e MDF.

O material utilizado para termoformagem foi chapas laminadas de poliestireno (PS) na cor branca, em chapas de 2000 x 1000 mm com espessuras de 0,3; 0,5 e 1,0 mm.

### **3.1.1 Equipamento de termoformagem**

O equipamento de termoformagem a vácuo utilizado é de médio porte e do tipo manual, fabricado pela própria empresa que cedeu, além da estrutura, um operador de máquina e o local onde foram realizadas todas as termoformagens (FIG. 27). O equipamento possui as seguintes características: quadro de fixação do suporte do molde de 200 x 200 mm, acionamento pneumático de movimento vertical, forno duplo de 800 x 1200 mm, seis conjuntos de resistências de 1.500 Watts (total 9.000 Watts, ligado em 220 volts trifásico). Possui controle de temperatura por termopar (percentual 0 a 100% de temperatura), o que corresponde ao controle de temperatura de 0 a 300°C nas resistências, bomba de vácuo com selo d'água com capacidade de 30 m<sup>3</sup>/hora acoplado a um reservatório de vácuo com controle eletromecânico de consumo, regulável de 280 a 520 mm na coluna de Hg.

A opção por utilizar tal equipamento foi aproximar-se da realidade do setor, onde grande parte das empresas de pequeno e médio porte projeta e fabrica seus próprios equipamentos e determina os métodos de trabalho de forma a obter mais domínio nas fases de processamento.

FIGURA 27 - Equipamento de termoformagem



Para calibrar a máquina, adotaram-se o tempo no módulo variável crescente e a temperatura no módulo fixo. O aquecimento das chapas foi realizado na câmara elétrica e a temperatura foi controlada por termopares analógicos.

Nos ensaios experimentais a temperatura adotada permaneceu em  $255^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ , sendo essa temperatura um critério da empresa. As variáveis de ensaio foram: espessura do material (0,3; 0,5 e 1,0 mm), tipo de molde (positivo e negativo), tipo de material do molde (AL/MDF) tempo de exposição na câmara de aquecimento (de 10 a 63 segundos), temperatura de termoformagem (de 150 a  $90^{\circ}\text{C}$ ).

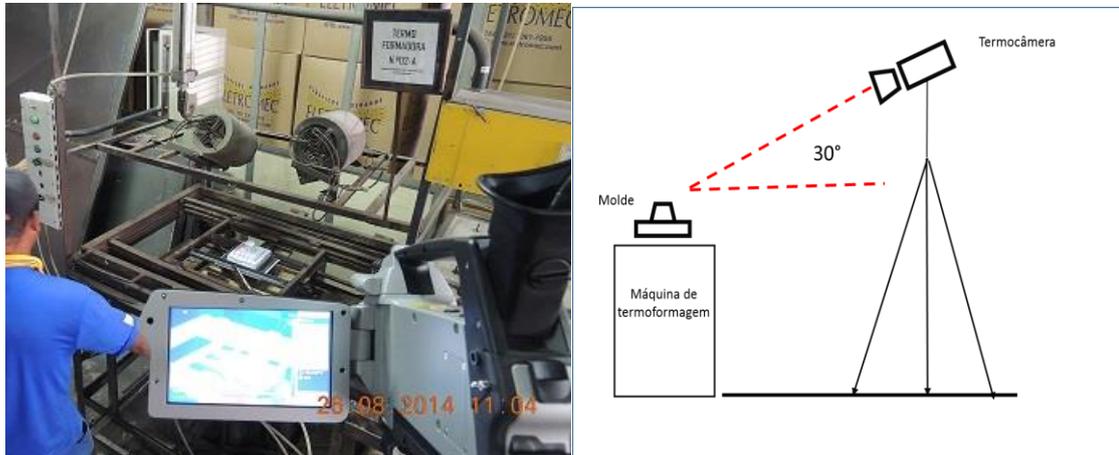
### 3.1.2 Equipamento de termografia

Para os testes termográficos, empregou-se câmera termográfica ThermaCAM P-640, com escala de temperatura na faixa de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $500^{\circ}\text{C}$  e incerteza de medição  $\pm 2\%$  das leituras (dados do fabricante). O equipamento foi disponibilizado pelo Centro de Estudos em *Design* e Tecnologia (CEDtec) da Universidade do Estado de Minas Gerais e aferido pelo fabricante.

Para a obtenção de melhores imagens, o equipamento foi fixado em uma plataforma auxiliar (tripé) à distância de 950 mm do equipamento de termoformagem. Embora a angulação recomendada pelo fabricante seja em torno de  $30^{\circ}$  (FLIR, 2015), utilizou-se nos

ensaios ângulo de 45° em relação à mesa de termoformagem para se obter mais segurança e melhor manuseio do equipamento na área em teste (FIG. 28).

FIGURA 28 - Termocâmara de infravermelho e desenho esquemático



Os parâmetros ambientais para os ensaios termográficos foram: temperatura 31°C, temperatura refletida 25,3°C, umidade relativa 50% e temperatura atmosférica 25,3°C. A emissividade do alumínio foi considerada 0,96 (disco não polido) e do MDF 0,90 (madeira de carvalho). Para o poliestireno (PS) considerou-se 0,94, conforme tabela do fabricante do equipamento (FLIR, 2015).

### 3.1.3 Softwares utilizados

Para análise estatística e construção do documento de dissertação utilizaram-se os programas:

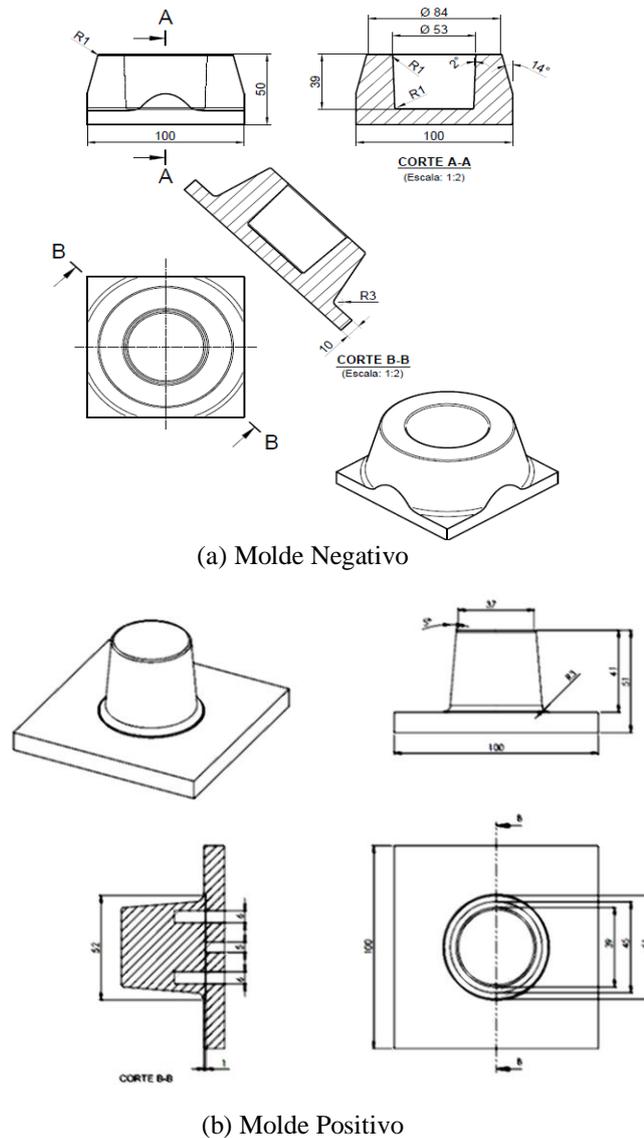
- a) *International Business Machines (IBM) Statistical Package for Social Sciences (SPSS) Statistics®* versão 19 (Chicago, Illinois, EUA);
- b) *Software FLIR Report® 8.5 SP3 Professional Edition (FLIR Systems® Inc., EUA);*
- c) *Software FLIR QuickReport®. 1.2 SP1 (FLIR Systems® Inc., EUA);*
- d) *Microsoft® Office Starter 2010*, pacote de *softwares* utilizado para edição de texto, planilhas eletrônicas e apresentação de *slides*.

### 3.2 Métodos

#### 3.2.1 Elaboração do projeto e usinagem dos moldes

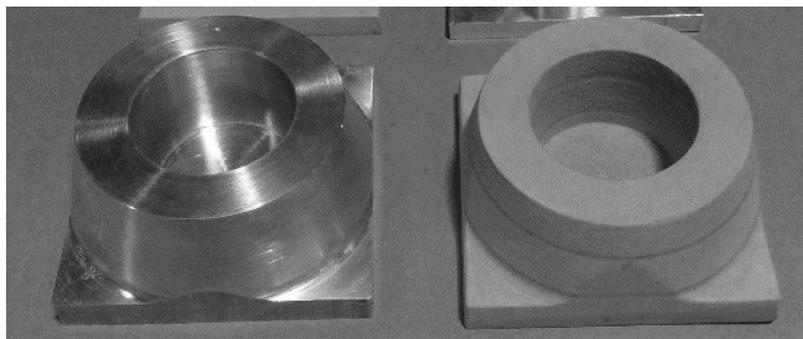
Para elaboração do projeto dos moldes foi dada atenção especial à geometria da peça. Para o molde negativo foi considerada a profundidade de cavidade, respeitando-se a relação máxima de 75% em relação à medida da abertura nominal e o ângulo de extração de  $2^\circ$  (FIG. 28a). No molde positivo foi considerado o ângulo de saída de  $5^\circ$  em relação à altura (FIG. 28b). Foram utilizados raios de 1 e 3 mm para reforços e acabamentos, conforme demonstrado no projeto dos moldes apresentados na FIG. 29a e 29b.

FIGURA 29 - Projeto dos moldes para serem usinados em MDF e Al

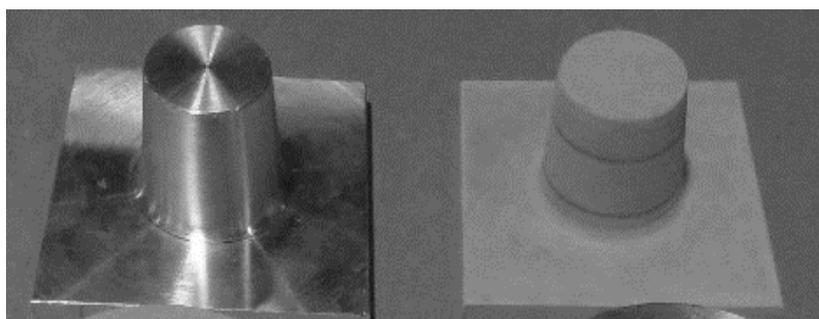


Alguns autores consideram, além da geometria da peça, a matéria-prima do molde, o material a ser conformado, a espessura e temperatura (GRUENWALD, 1998; MURALISRINIVASAN, 2010; STRONG, 1996; THRONE, 2008). Não foram encontradas na literatura pesquisada descrições das relações ou inter-relações entre desvios dimensionais e geométricos do produto, porém são citados três principais que afetam ambos os desvios, a saber: geometria da peça, o projeto do molde e a forma como o material flui sobre o molde durante o processamento (LEITE *et al.*, 2013; ROSEN, 2002a; 2002b; SALA; LANDRO; CASAGO, 2002). Com base nos projetos, foram usinados quatro moldes, dois negativos e dois positivos, um de cada tipo de material (Al e MDF), conforme mostra a FIG. 30.

FIGURA 30 - Moldes usinados em Al e MDF



Moldes negativos



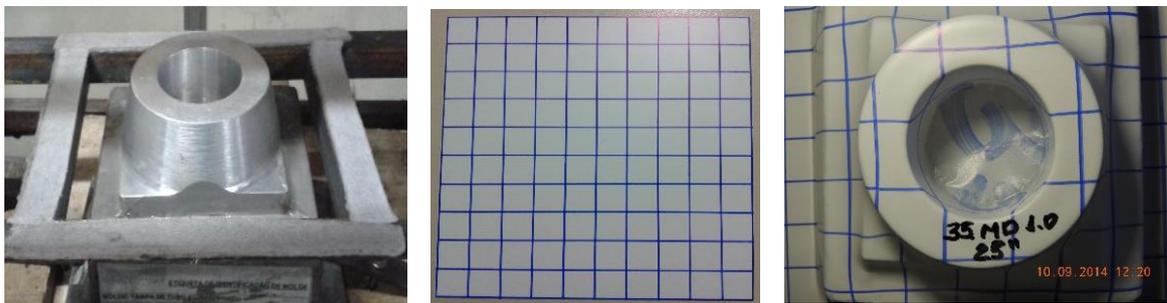
Moldes positivos

Na prática, o que se percebe em processos de baixa e média produção é que, até que o molde seja fabricado de determinado material, testado usando-se o equipamento e matéria-prima selecionada com o processo e parâmetros escolhidos, a capacidade real do processo é de difícil previsibilidade e depende do conhecimento prévio ou da aprendizagem do executor (LEITE *et al.*, 2013).

### 3.2.2 Preparação das amostras

As chapas de PS foram cortadas com dimensões compatíveis com o equipamento (200 X 200 mm), conforme mostrado na FIG. 31a e nas três espessuras utilizadas (0,3 , 0,5 e 1,0 mm). Em cada amostra foram traçadas linhas paralelas e perpendiculares entre si, equidistantes umas das outras em 20 mm, de forma a estabelecer uma retícula balizadora da termoformagem. O objetivo dessa marcação foi criar um parâmetro visual para análise qualitativa da deformação plástica do poliestireno após a termoformagem (FIG. 31b; 31c).

FIGURA 31 - Preparação da amostra de PS antes e pós-termoformagem



(a) Quadro de fixação da máquina

(b) Amostra de poliestireno

(c) Deformação da chapas

### 3.2.3 Método para primeira etapa

Foram termoformadas oito amostras para cada espessura de material, 24 para cada tipo de molde, total de 96 peças termoformadas (TAB. 2).

TABELA 2 – Distribuição das 96 amostras a serem termoformadas para os ensaios termográficos

Espessura (PS)	Molde Positivo		Molde Negativo	
	MDF	AL	MDF	AL
0,3mm	8	8	8	8
0,5mm	8	8	8	8
1,0mm	8	8	8	8
TOTAL	24	24	24	24

Os dados obtidos nessa primeira etapa de termoformagem foram organizados em tabelas e gráficos para melhor visualização dos resultados Anexos A a F. Em seguida, cada uma das espessuras de avaliação (0,3, 0,5 e 1,0 mm) foi submetida à análise de regressão logística (BUSSAB; MORETTIN, 2010; MONTGOMERY; RUNGER, 2009; WALPOLE; MYERS, 2009), com o objetivo de relacionar a variável dicotômica (embalagem adequada e embalagem inadequada após termoformagem) às variáveis de interesse (tempo e

temperatura de termoformagem), visando obter um modelo de previsão probabilístico que medisse o grau de incerteza na produção de uma embalagem adequada em determinada combinação de tempo e temperatura. O modelo produzido foi testado por análise de variância (ANOVA) bem como a capacidade de predição do modelo.

Após a análise estatística, as peças foram identificadas com base nos defeitos encontrados (rugas, afinamentos, bolhas, rasgos, etc.), sendo classificadas as amostras consideradas de boa qualidade, sem defeito, dos resultados ruins, amostras que apresentaram defeitos (FIG. 32a; 32b).

FIGURA 32 - Seleção de amostras



(a) Amostras sem defeito

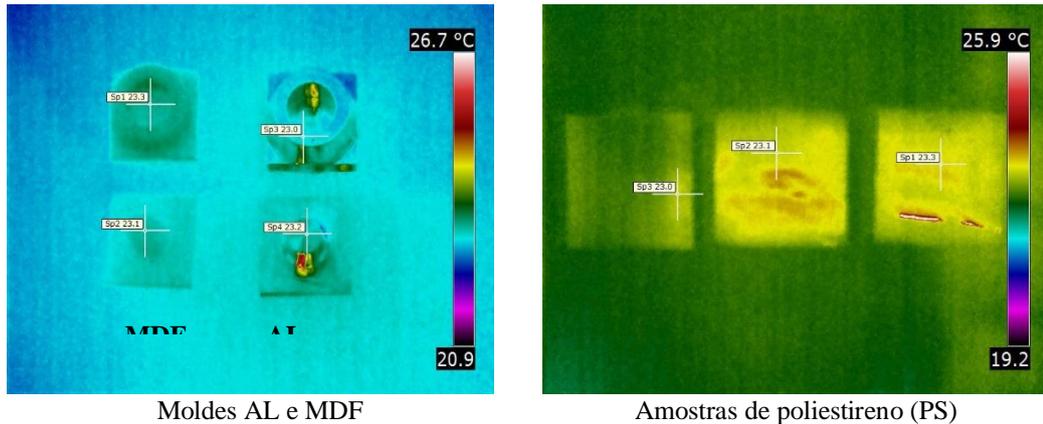


(b) Amostras com defeitos

Os ensaios preliminares foram desenvolvidos com base nos estudos de Karjust, Küttner e Ponlak (2007) e Klein (2009), nos quais os autores propõem a fabricação de peças-testes com moldes protótipos para verificação da real capacidade do cenário de produção, o que foi validado por Chang, Wen e Liu (2005) em testes de laboratório.

Para demonstrar que os materiais antes dos testes se encontravam em equilíbrio térmico com o ambiente, antes do início da termoformagem avaliou-se a temperatura de cada amostra e do material do molde a ser utilizado, para comprovar que eles se encontravam em equilíbrio térmico com o ambiente, como registra a FIG. 33.

FIGURA 33 - Termogramas das temperaturas iniciais das amostras – média 23°C



Os valores coletados por termografia foram transcritos para a TAB. 3. Observa-se que tanto as temperaturas máximas e mínimas (escala de temperatura na lateral direita do termograma), temperaturas entre 19 e 26°C quanto a temperatura do material dos moldes, em torno de 23°C, encontravam-se em equilíbrio térmico.

TABELA 3- Valores iniciais coletados por termografia

Material	Tipo de Molde/Espessura	Temperatura máxima/mínima	Temperatura Medida
AL	Positivo	26,7 - 20,9	23,2
MDF			23,1
AL	Negativo		23,1
MDF			23,3
Poliestireno	0,3	25,9 – 19,2	23,0
	0,5		23,1
	1,0		23,3

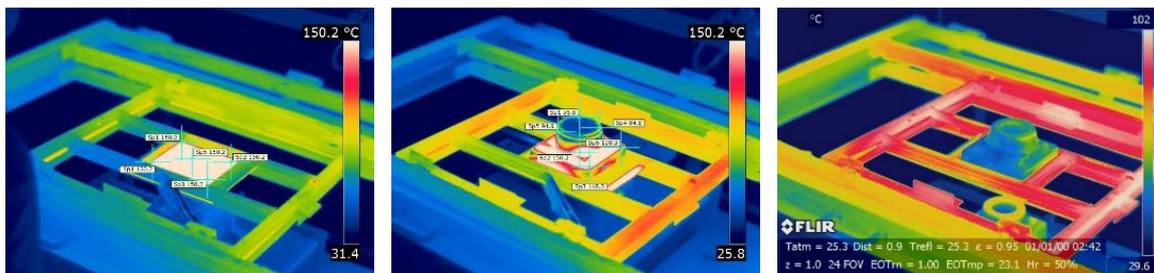
Em seguida, o molde foi acoplado ao equipamento e a chapa de poliestireno foi fixada no quadro, introduzida na câmara de aquecimento para início dos ensaios experimentais. Segundo Rosen, (2002a; 2002b) e Throne, (2008), a eficiência de transferência de calor pelo sistema de aquecimento no processo de termoformagem depende de características radiantes como tipo de forno e disposição dos elementos mecânicos, tais como quadros de fixação, trilhos, paredes laterais do forno, resistências elétricas, refletores, entre outros.

Para garantir que as variáveis utilizadas seriam iguais para todos os testes, os ensaios foram realizados no mesmo equipamento, com o mesmo sistema de aquecimento. Gruenwald (1998) e Throne (2008) defendem que duas variáveis expressam como um polímero aquece até à sua temperatura de conformação, a entalpia, que é quantidade total

de energia necessária para aquecer um polímero até a sua temperatura de conformação e o calor específico, que é a quantidade de calor necessária para elevar 1°C uma unidade de massa desse material, ambas as unidades em Btu/lb (Kcal/kg).

O tempo de exposição das chapas de PS na câmara térmica foi registrado por um cronômetro digital marca Kenko e as temperaturas foram registradas pela câmera de termografia. Após o aquecimento, a chapa de PS foi transportada para a superfície do molde e foram realizadas as medições termográficas. Muralisrinivasan (2010) opina que a condição ideal é que a temperatura da chapa seja tão uniforme quanto possível a partir da sua espessura no momento da conformação. O termograma da FIG. 34a mostra que a temperatura da chapa se encontra uniforme, em toda a extensão, logo que sai da câmara térmica, apresentando temperaturas em torno de 150°C. Entretanto, entre os autores não há consenso sobre qual seria a temperatura ideal, uma vez que, durante o processo de termoformagem, logo que o material sai da câmara térmica ele começa a sofrer interferências ambientais. As FIG. 34b e 34c mostram o momento em que a chapa é depositada sobre o molde e acionado o vácuo, exibindo também o momento em que o molde é baixado da peça.

FIGURA 34 - Termogramas nas três situações de temperatura



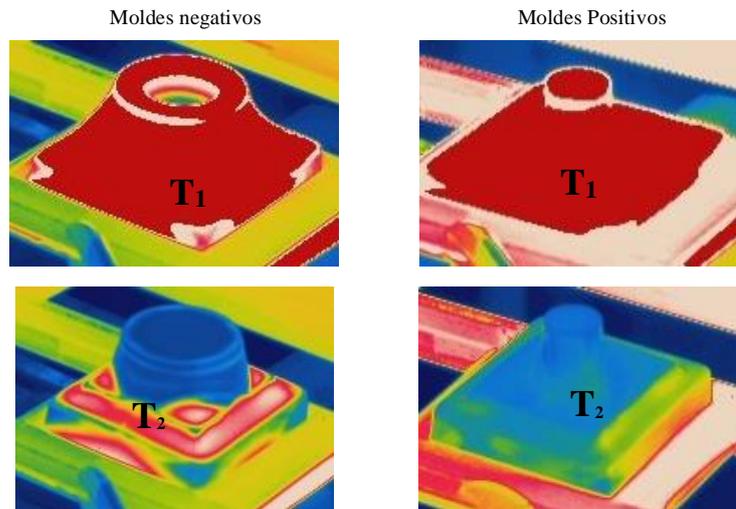
(a) chapa a 150°C

(b) chapa sobre o molde

(c) Peça conformada.

A temperatura foi medida por termografia em dois momentos: quando a chapa de PS foi depositada sobre o molde e acionado o vácuo e após a termoformagem da peça, quando o molde é baixado. O local onde foram realizadas as coletas das temperaturas pode ser visto na FIG. 35 representado por  $T_1$  e  $T_2$ .

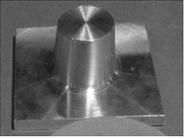
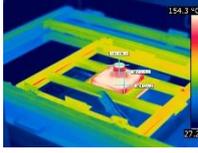
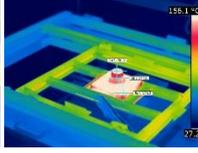
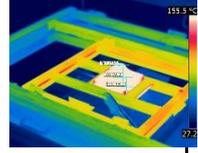
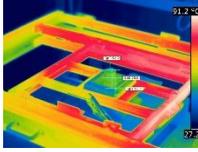
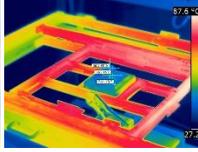
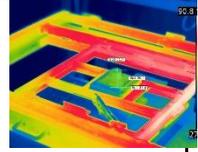
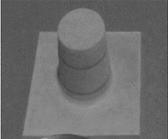
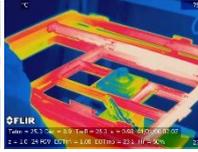
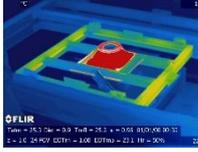
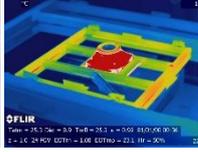
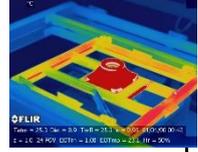
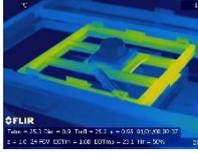
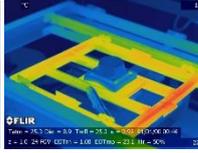
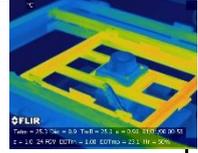
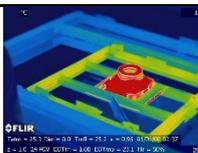
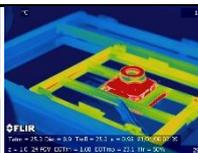
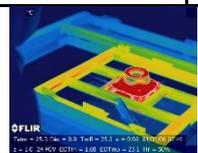
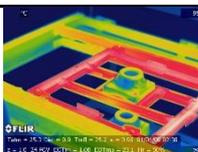
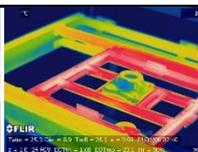
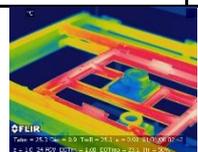
FIGURA 35 - Termograma da temperatura (T1 e T2) molde Al



Para a relação entre material (PS) e molde, o que se observa é que o resfriamento inicia-se quando o material da amostra entra em contato com a superfície do molde. Assim, usando o conceito de trocas térmicas, o material quente aquece o molde frio e o molde resfria a chapa de PS. Klein (2009) sugere que o molde deva atuar como um permutador de temperatura para extrair o calor da chapa e acomodar as contrações do produto, devendo-se observar as características térmicas do material do molde. Contudo, existem variáveis que podem influenciar no resfriamento, como a matéria-prima utilizada, a espessura do material depois da conformação, a temperatura do material, a temperatura do equipamento, a temperatura do molde, o material do molde, entre outras, que tornam seu controle e previsão uma atividade complexa, com características não lineares e objetivos conflitantes (KLEIN, 2009; THRONE, 2008; YANG; HUNG, 2004).

As imagens termográficas foram organizadas em grupos (tipo de molde, material e espessura) e analisadas qualitativa e quantitativamente pelo *software* FLIR *QuickReport*® nos pontos específicos de aferição de temperatura (FIG. 36).

FIGURA 36 - Registro das imagens termográficas para cada espessura e para cada tipo de molde

Tipo de Molde	Ponto	Espessura da chapa de PS (mm)			Temperatura Medição
		0,3	0,5	1,0	
 Positivo AL	T <sub>1</sub>				Temperatura inicial
	T <sub>2</sub>				Temperatura após termoformagem
 Positivo MDF	T <sub>1</sub>				Temperatura inicial
	T <sub>2</sub>				Temperatura após termoformagem
 Negativo AL	T <sub>1</sub>				Temperatura inicial
	T <sub>2</sub>				Temperatura após termoformagem
 Negativo MDF	T <sub>1</sub>				Temperatura inicial
	T <sub>2</sub>				Temperatura após termoformagem

### 3.2.4 Métodos da segunda etapa

Para o tratamento dos dados da segunda etapa de termoformagem, as combinações do binômio tempo e temperatura que obtiveram sucesso no processamento, gerando amostras adequadas, foram submetidas à análise de regressão linear simples, com um modelo recíproco transformado (MONTGOMERY; RUNGER, 2009). O modelo de análise de regressão teve origem nos trabalhos de Gauss, no período de 1809 a 1821. O modelo recíproco foi escolhido tendo-se em vista o conhecimento prévio de relação entre as grandezas temperatura e o tempo de termoformagem. O modelo produzido foi testado por ANOVA e a significância de seus coeficientes foi testada pela estatística t de *student*, bem como a capacidade de predição do modelo a partir da comparação entre os resultados observados e esperados (BUSSAB; MORETTIN, 2010; DEVORE, 2006; MONTGOMERY; RUNGER, 2009; SPIEGEL; SCHILLER; SRINIVASAN, 2004; WALPOLE; MYERS, 2009). A regressão é um dos métodos de análise de dados estatísticos mais utilizados na pesquisa científica. Trata-se de uma técnica que estuda o efeito que variáveis explicativas exercem sobre uma variável resposta. Técnicas clássicas de regressão linear assumem a hipótese de que os erros entre valor observado e valor modelado tenham média zero e variância constante quando se faz um modelo estatístico a partir de observações de  $n$  dados. A partir daí constrói-se um modelo que servirá, por exemplo, para encontrar pares em que uma resposta ótima é obtida ou prever valores para condições não conhecidas.

Assim, cada uma das espessuras de avaliação (0,3; 0,5 e 1,0 mm) foi submetida à análise de regressão logística (BUSSAB; MORETTIN, 2010; MONTGOMERY; RUNGER, 2009; WALPOLE; MYERS, 2009). No modelo logístico, a variável resposta  $Y_i$  é binária e assume dois valores,  $Y_i = 0$  e  $Y_i = 1$ , denominados, respectivamente, embalagem inadequada e embalagem adequada após termoformagem. Com as variáveis de interesse (tempo X temperatura de termoformagem) busca-se obter um modelo de previsão probabilístico que seja capaz de medir o grau de incerteza na produção de uma embalagem adequada em determinada combinação de tempo e temperatura. Para análise na segunda etapa foi utilizado o modelo de regressão recíproca, conforme Equação (1):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \frac{1}{X_i} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Sendo:

$Y_i$  = temperatura de termoformagem adequada em  $t_i$  ;

$\beta_0$  e  $\beta_1$  = parâmetros do modelo;

$x_i$  = tempo de termoformagem adequado na parcela experimental  $i$  ;

$\varepsilon_i$  = erro experimental na parcela experimental  $i$  .

### 3.2.5 Análise de variância (ANOVA)

O modelo produzido foi testado por ANOVA bem como a capacidade de predição do modelo, a partir da comparação entre os resultados observados e esperados (MONTGOMERY, 2013). A ANOVA é um modelo estatístico utilizado para analisar as diferenças entre as médias de dados agrupados (fatores) e suas interações. Em sua forma mais simples, fornece teste estatístico para a comparação de média de fatores em diferentes grupos e, por consequência, generaliza o teste *t-de student para* dois ou mais fatores. Da mesma forma o teste *F* validou quais os principais fatores e as interações estatisticamente significativas de 5% de probabilidade A significância de seus coeficientes foi testada pela estatística *t de student*, bem como a capacidade de predição do modelo por meio da comparação entre os resultados observados e os esperados (BUSSAB; MORETTIN, 2010; DEVORE, 2006; MONTGOMERY; RUNGER, 2009; SPIEGEL; SCHILLER; SRINIVASAN, 2004; WALPOLE; MYERS, 2009;).

### 3.2.6 Análise no software IBM SPSS

Todas as análises foram processadas no *software IBM SPSS Statistics* versão 19 e os parâmetros avaliados foram considerados significativos quando os valores-*p* obtidos nos procedimentos de inferência foram inferiores a 5%.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com os métodos descritos no capítulo 3 e suas respectivas análises são apresentados em dois blocos: resultados obtidos na primeira etapa e resultados obtidos na segunda etapa.

### 4.1 Resultados obtidos na primeira etapa

Os ajustes do modelo de regressão logística obtidos na primeira etapa para cada uma das espessuras avaliadas não apresentaram significância estatística em algum caso e, assim, o modelo proposto não mostrou capacidade de predição na termoformagem de uma embalagem adequada para qualquer combinação de temperatura e tempo dentro das faixas de estudo. (ANEXOS A a F).

Para definição do material dos moldes, as TAB. 4, 5 apresentam os valores relativos às amostras selecionadas e consideradas de boa qualidade para o molde de alumínio. Foram reunidos dados referentes à espessura, às temperaturas de processamento e aos tempos de processamento dentro da câmara de aquecimento. A partir desses dados foi construído um comparativo, conforme pode ser visto no GRÁF. 1.

TABELA 4 - Temperatura registradas nas amostras consideradas sem defeito do molde positivo/ Al

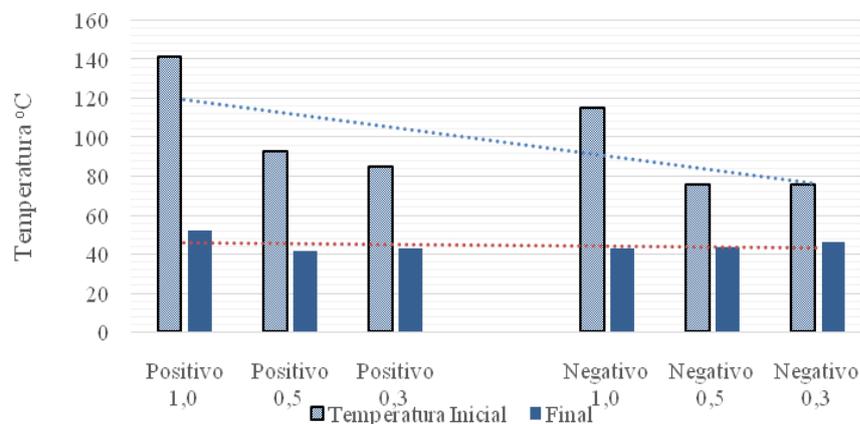
Amostras	Espessura (mm)								
	1,0			0,5			0,3		
	Temperatura (°C)		Tempo (S)	Temperatura (°C)		Tempo (S)	Temperatura (°C)		Tempo (S)
	Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
1	149,90	39,07	53	95,10	36,03	25	86,63	42,75	10
2	147,03	38,67	50	92,50	37,67	20	81,43	43,00	10
3	107,27	43,30	45	91,10	39,30	18	88,93	43,07	10
4	150,20	53,57	44	76,17	38,83	16	81,43	43,00	10
5	129,50	53,43	40	105,20	41,07	16	81,43	43,30	10
6	150,20	64,67	35	97,93	41,60	16	86,63	43,87	9
7	150,20	59,53	33	94,33	43,87	16	88,93	42,75	9
8	150,20	61,50	30	93,57	43,07	16	86,63	41,75	9

TABELA 5 - Temperaturas registradas nas amostras consideradas sem defeito do molde negativo/Al

Amostras	Espessura (mm)								
	1,0		Tempo (S)	0,5		Tempo (S)	0,3		
	Temperatura (°C)			Temperatura (°C)			Temperatura (°C)		
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final			
1	150,20	41,13	10	78,77	44,00	20	61,23	39,40	55
2	118,67	42,53	10	72,83	37,70	18	69,63	48,97	55
3	119,47	43,37	10	69,70	41,80	18	71,97	46,97	55
4	96,20	43,87	10	78,37	43,00	18	130,90	52,40	54
5	112,77	43,37	10	84,30	43,50	18	69,63	55,90	54
6	117,50	43,87	09	69,70	41,80	18	71,97	50,90	54
7	105,97	42,83	09	78,37	43,00	18	67,30	35,00	53
8	100,70	42,53	09	78,37	53,67	18	67,30	38,70	49

O GRÁF. 1 mostra as temperaturas iniciais e finais registradas nos moldes de Al (positivo e negativo). Percebe-se claramente nos moldes positivos que as temperaturas foram proporcionais às espessuras do PS, ficando entre 140 e 85°C e para os moldes negativos de 115 a 78°C, como apresenta a linha de tendência (pontilhada) decrescente da temperatura. As temperaturas finais mantiveram praticamente a mesma intensidade, entre 40 e 45°C, independentemente do tipo de molde ou espessura. A linha de tendência evidencia essa estabilidade. Pode-se inferir que uma faixa de trabalho para o molde positivo ou negativo de Al para essas espessuras poderia girar em torno de 140 a 115°C.

GRÁFICO 1 – Temperaturas inicial e final registradas no molde de Al



Para o molde de MDF pode-se observar, além da espessura, a temperatura de processamento e os tempos de processamento dentro da câmara de aquecimento. A partir desses dados foi construído um comparativo dos dados (GRÁF. 2).

TABELA 6 – Temperaturas registradas nas amostras consideradas sem defeito do molde positivo/MDF

Amostras	Espessura (mm)								
	1.0			0.5			0.3		
	Temperatura (°C)		Tempo (S)	Temperatura (°C)		Tempo (S)	Temperatura (°C)		Tempo (S)
	Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
1	150,20	58,27	44	123,43	50,73	27	80,80	48,23	20
2	145,83	47,30	41	118,33	52,57	23	98,23	55,47	19
3	147,23	56,93	40	98,57	54,47	20	84,03	55,13	10
4	145,20	67,83	40	83,40	53,03	15	91,33	51,90	10
5	129,87	46,10	32	97,17	50,77	13	82,13	50,00	10
6	147,80	67,53	20	103,17	50,93	12	89,47	58,90	9
7	132,23	47,23	30	100,03	50,80	10	82,83	55,90	7
8	150,20	60,30	25	123,43	53,37	15	80,80	46,50	7

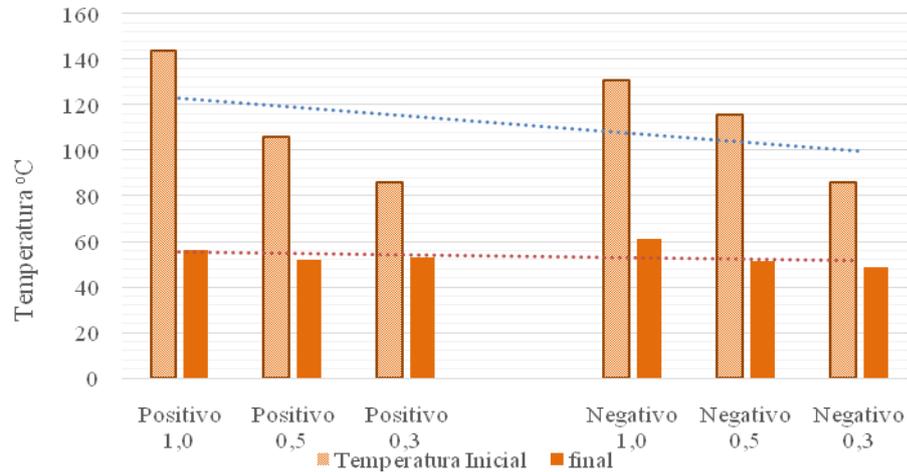
TABELA 7 - Temperaturas registradas nas amostras consideradas sem defeito do molde negativo /MDF

Amostras	Espessura (mm)								
	1,0			0,5			0,3		
	Temperatura (°C)		Tempo (S)	Temperatura (°C)		Tempo (S)	Temperatura (°C)		Tempo (S)
	Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final	
1	137,67	66,33	54	109,93	51,10	35	76,90	49,67	10
2	133,90	59,73	43	123,27	54,30	30	76,90	50,10	10
3	134,70	66,13	40	107,10	54,97	25	91,87	49,67	10
4	133,40	66,13	40	119,27	52,30	20	91,87	50,10	9
5	127,20	48,30	41	108,07	50,37	20	90,60	49,67	9
6	134,70	59,33	35	116,50	43,97	20	76,90	46,50	8
7	131,60	63,77	30	150,20	48,97	17	90,60	46,50	7
8	113,10	60,30	25	92,73	53,37	15	90,60	46,5	7

No GRÁF. 2 apresentam-se os resultados das temperaturas iniciais registradas nos moldes positivo e negativo de MDF. As temperaturas também foram proporcionais às espessuras do PSs, ficando entre 145 e 85°C, conforme linha de tendência decrescente. Para os moldes negativos a faixa foi entre 130 e 85°C e as temperaturas finais ficaram próximas dos 45 a

60°C, independentemente do tipo de molde ou espessura. A linha de tendência também evidencia essa estabilidade. Conclui-se que a faixa de trabalho para o MDF nessas espessuras poderia ser entre 145 e 130°C.

GRÁFICO 2 – Temperaturas inicial e final registrada no molde de MDF



A partir dos dados coletados e das análises realizadas nas faixas de temperatura, podem-se identificar quatro faixas de temperatura por termografia infravermelha, sendo essas faixas responsáveis pelo maior número de peças bem conformadas.

- Temperatura inicial do molde Al positivo/negativo 140 a 115°C;
- temperatura inicial do molde MDF positivo/negativo 145 a 130°C;
- temperatura final molde Al positivo/negativo 40 a 45°C;
- temperatura final molde MDF positivo/negativo 45 a 60°C.

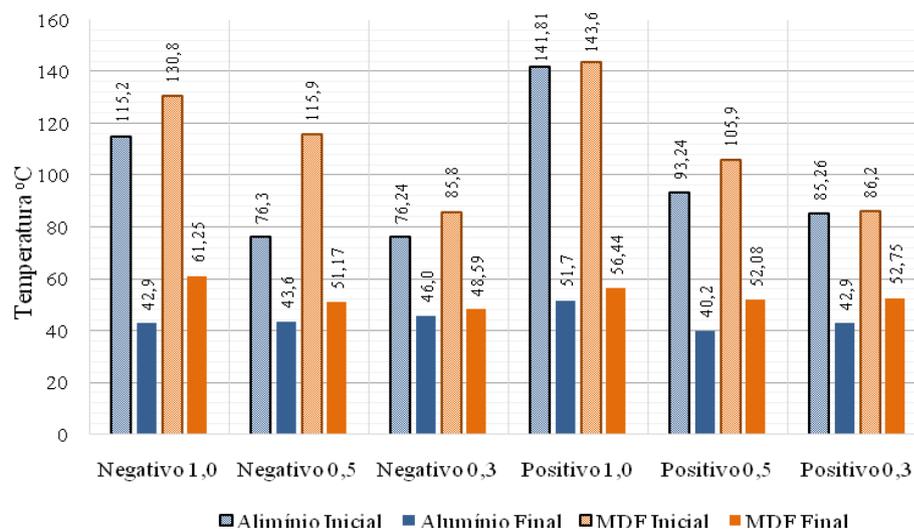
Embora já fosse esperado que o alumínio apresentasse melhor dissipação térmica quando comparado ao MDF (THRONE, 2008), na literatura consultada não foram encontradas publicações científicas desse comportamento registrado por termografia. Assim, a partir dos dados coletados calculou-se a média aritmética das temperaturas, com o intuito de se avaliar se a termografia seria capaz de perceber de forma mais específica o comportamento térmico do material utilizado nos moldes (Al e MDF). Os valores são apresentados na TAB. 8 e no GRAF. 3.

TABELA 8 - Temperaturas médias registradas nos ensaios de termografia

Tipo de Molde	Espessura PS (mm)	Al		MDF	
		Temperatura (°C)			
		Inicial	Final	Inicial	Final
Negativo	1,0	115,2	42,9	130,8	61,25
	0,5	76,3	43,6	115,9	51,17
	0,3	76,24	46,0	85,8	48,59
Positivo	1,0	46,5	54,8	143,6	56,44
	0,5	42,6	44,9	105,9	52,08
	0,3	41,6	45,9	86,2	52,75

O GRÁF. 3 demonstra a temperatura média para todas as medições realizadas (inicial e final). Percebe-se que tais temperaturas ficaram mais baixas nos moldes de Al e que nos moldes positivo as temperaturas tanto iniciais quanto finais estavam mais equilibradas e coerentes com a literatura, ou seja, suas propriedades térmicas permitem que a temperatura da peça moldada seja rapidamente dissipada, apresentando, assim, no molde de Al as temperaturas mais baixas antes e após termoformagem. A termografia também revelou que, independentemente do tipo do molde (positivo/negativo) ou do material, a variação de temperatura é proporcional à espessura do material (quanto mais espesso o material maior a temperatura). Nos moldes positivo com espessura de 1,0 e 0,3, a temperatura inicial se iguala nos dois materiais do molde. Acredita-se que isso esteja relacionado às medidas discrepantes que estariam dentro do erro de medição e que poderiam ser desconsideradas (143,6°C e 86,2°C, respectivamente).

GRÁFICO 3 – Temperaturas inicial e final registradas nos moldes de Al e MDF



A partir da identificação desses parâmetros, foram selecionados os critérios: tipo de molde (positivo) e o material do molde (Al), que passaram a ser fixos. Definiu-se como critérios

tempos de processamento X temperaturas de processamento e faixas de temperatura, obtidas nos ensaios preliminares onde foram identificadas as amostras de boa qualidade. Partindo do princípio de que a temperatura da câmara de aquecimento inicialmente foi de  $255^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$  e as temperaturas registradas nas chapas de PS foram na faixa de 145 a  $130^{\circ}\text{C}$ , adotou-se como referência, para a segunda etapa de testes, temperaturas e tempos compatíveis com tal situação. Ou seja, para se conseguir termoformagem considerada de boa qualidade, as temperaturas para aquecimento das chapas de PS teriam que ficar entre 140 e  $240^{\circ}\text{C}$  e os tempos de permanência das chapas na câmara de aquecimento entre 10 e 63 segundos (TAB. 9).

TABELA 9 - Variáveis temperatura e tempo de processamento

<b>Temperatura</b>	<b>Tempos</b>
( $^{\circ}\text{C}$ )	(Segundos)
<b>140</b>	<b>10*</b>
<b>150</b>	<b>13</b>
<b>160</b>	<b>23</b>
<b>180</b>	<b>33</b>
<b>200</b>	<b>43</b>
<b>220</b>	<b>53</b>
<b>240</b>	<b>63</b>

Obs.: \* tempo mínimo necessário para o processamento das chapas.

O uso da técnica de termografia infravermelha possibilitou chegar a um resultado satisfatório de identificação de temperaturas levando-se em consideração as peças bem conformadas. Verificou-se que a metodologia empregada e os parâmetros obtidos durante a primeira etapa de experimentos contribuíram para a redução dos tempos no processo e, conseqüentemente, do índice de peças defeituosas. A referência do binômio tempo X temperatura utilizado em uma peça com espessuras determinadas (0,3, 0,5 e 1,0 mm) serviu como parâmetros para indicar que os testes poderiam ser realizados também em um material mais espesso ou mesmo de espessura inferior. A partir dessa observação, detectou-se que essas variáveis poderiam gerar uma progressão que permitiria a compilação de dados e um gráfico para consultas, com base no tratamento estatístico.

Diante do exposto, foi realizada nova etapa de testes que levaram em consideração os parâmetros térmicos e variáveis das análises iniciais. Foram então fabricadas novas amostras de peças conformadas apenas em molde de alumínio, ou seja, 49 peças de cada espessura (0,3; 0,5 e 1,0 mm), somando o total de 147 novas amostras de poliestireno termoformadas.

#### 4.2 Resultados obtidos na segunda etapa

Os resultados obtidos no ajuste do modelo são apresentados na TAB. 10. Observa-se que em cada uma das espessuras avaliadas a regressão foi altamente significativa, com valores- $p$  inferiores a 1%. Isso mostra que a temperatura a ser utilizada na produção de embalagens adequadas no processo de termoformagem tem relação recíproca (inversa) com o tempo do processo. Sendo assim, esse resultado confirma que quanto menor a temperatura na produção de embalagens adequadas, maior será o tempo exigido de exposição da chapa na câmara térmica, e vice-versa.

TABELA 10 - Análise de variância (ANOVA) para regressão linear com modelo recíproco

Fonte de variação	Espessura (cm)	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Estatística	
					$F$	Valor- $p$
Regressão		2531,1	1	2531,7	35,7	0,002
Resíduo	0,3	354,6	5	70,9		
Total		2885,7	6			
		4892,1	1	4892,1	43,0	<0,001
	0,5	796,8	7	113,8		
		5688,9	8			
		5587,9	1	5587,9	20,8	0,004
	1,0	1612,1	6	268,7		
		7200,0	7			

Na TAB. 11 são apresentados os coeficientes obtidos pelo modelo e suas respectivas significâncias. Pode-se observar que os coeficientes obtidos em todos os modelos foram altamente significativos, sugerindo grande poder de previsibilidade do modelo. Os valores obtidos para os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) mostram que 87,7; 86,0; e 77,6% das

variações da temperatura utilizada para a termoformagem de uma embalagem adequada são explicadas pela variação do tempo da termoformagem da embalagem nas espessuras de 0,3; 0,5 e 1,0 cm, respectivamente. Esse resultado sugere que o modelo proposto pode ser utilizado com credibilidade para se estabelecer a temperatura inicial de regulagem do processo de termoformagem a partir do tempo disponível para a produção de cada embalagem.

TABELA 11 – Coeficientes de regressão estimados para o modelo proposto, significância estatística e coeficiente de determinação para as espessuras estudadas

Espessura (cm)	Coeficientes	Desvio-padrão	Estatística <i>t</i>	Valor- <i>p</i>	R <sup>2</sup>	
0,3	$\beta_1$	687,5	115,1	6,0	0,002	0,877
	$\beta_0$	138,4	6,4	21,7	<0,001	
0,5	$\beta_1$	872,4	133,1	6,6	<0,001	0,860
	$\beta_0$	154,0	6,7	23,1	<0,001	
1,0	$\beta_1$	917,3	201,1	4,6	0,004	0,776
	$\beta_0$	161,97	10,2	15,9	<0,001	

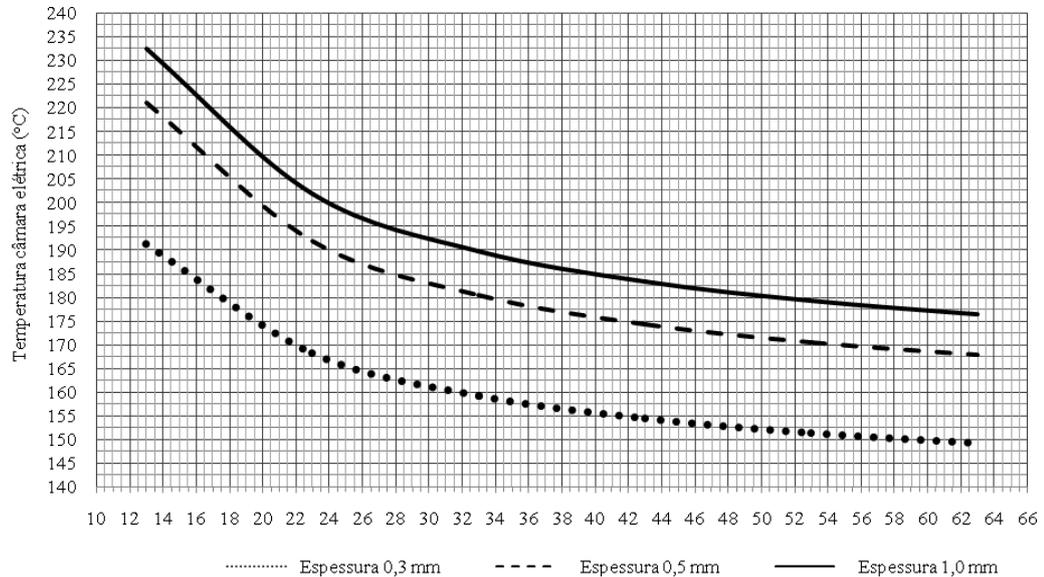
Considerando que as estimativas obtidas pelo modelo recíproco de embalagens adequadas se mostraram satisfatórias para estabelecer uma relação entre temperatura X tempo necessário para aquecimento das chapas de PS antes da termoformagem, ou seja, temperaturas entre 150 e 240°C e tempo entre 10 e 63 segundos (TAB. 12), foi possível gerar uma curva de associação entre essas variáveis para cada espessura dentro das faixas estudadas (GRÁF. 4).

TABELA 12 - Espessuras dentro das faixas estudadas

Espessura (PS) (mm)	Temperatura (°C)			Tempo (Segundos)		
	Valor Medido	Faixa Variação	Faixa Total	Valor Medido	Faixa Variação	Faixa Total
0,3	150	150 a 200	150 a 240	53	10 a 53	10 a 63
	150			43		
	160			33		
	180			23		
	160			23		
	200			13		
	200			10		
0,5	160	160 a 220		63	13 a 63	
	160			53		
	180			43		
	180			33		
	200			33		
	200			23		
	180			23		
	220			13		
1,0	160	160 a 240		63	10 a 63	
	160			53		
	180			43		
	200			43		
	200			33		
	220			23		
	240			13		
	240			10		
	240		10			

O GRÁF. 4 apresenta as faixas de temperatura X tempo de aquecimento do PS, em que foram obtidas peças consideradas de boa qualidade. A partir da combinação desses fatores e da espessura da embalagem, estima-se que seja possível interpolar um valor entre 0,3 e 1,0 mm (caso seja diferente dos valores estudados) e com a combinação de temperatura X tempo de aquecimento seja possível se chegar aos parâmetros de produção em poucos testes de regulagem do equipamento de termoformagem.

GRÁFICO 4 - Curvas de associação entre temperatura x tempo de aquecimento do PS



### 4.3 Validação dos resultados

Com base nas curvas de associação tempo X temperatura foram realizados ensaios em um equipamento de termoformagem de pequeno porte do laboratório de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), de acordo com a FIG. 37.

FIGURA 37 - Máquina de termoformagem



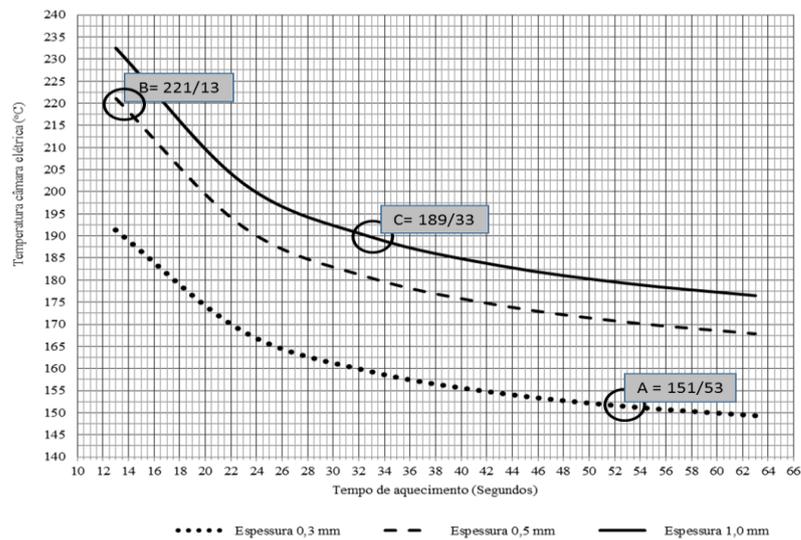
Foram escolhidos, aleatoriamente, valores nas curvas do GRÁF. 4 para o *setup* do equipamento. O intuito foi validar a confiabilidade dos valores escolhidos e se tais valores seriam capazes de reproduzir embalagens de boa qualidade. Os pontos determinados são mostrados no GRÁF. 5. Os valores são apresentados na TAB. 13 assim como o tempo X

temperatura a partir dos quais foram termoformadas as peças com boa qualidade (resultados).

TABELA 13 - Estimativas com base nas curvas do GRÁF. 5

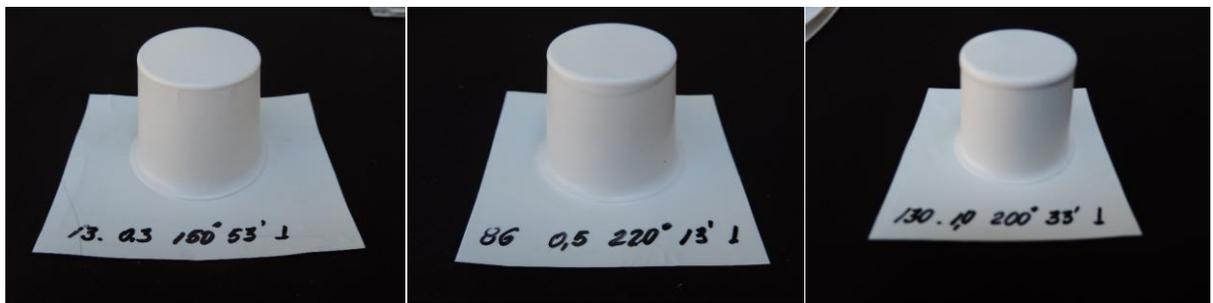
Molde Material	Nº Ensaio	Espes PS (mm)	Valor na Curva		Regulagem máquina (Seg)	Resultado	
			Temp. (°C)	Tempo (Seg)		Temp. °C	Tempo (Seg)
Molde Positivo Material PS	A	0,3	151	53	148 a 152	150	53
	B	0,5	221	13	218 a 222	220	13
	C	1,0	189	33	189 a 200	200	33

GRÁFICO 5 - Pontos analisados no gráfico



Com base nesses valores foram termoformadas cinco peças de cada espessura (0,3; 0,5; e 1,0 mm).

FIGURA 38 - Peças conformadas com base nas estimativas



a - PS 0,3 mm 150 °C 53"

b - PS 0,5 mm 220 °C 13"

c - PS 1,0 mm 200 °C 33"

Constatou-se que para o ponto A (PS 0,3 mm 150°C 53'') a margem para regulagem da máquina seria entre 148°C e 152°C, com o tempo fixo de 53''. Conseguiu-se uma peça de boa qualidade com a temperatura de 150°C e com o tempo de 53'' (FIG. 38a).

Para o ponto B (PS 0,5 mm 220°C 13''), a margem de regulagem foi de 218°C a 222°C com o tempo fixo de 13 segundos. A peça de boa qualidade foi termoformada em 220°C com o tempo de 13'' (FIG. 38b).

Para o ponto C (PS 1,0 mm 200°C 33''), a margem de regulagem foi de 189°C a 200°C e o tempo fixo em 33 segundos. A peça de boa qualidade foi termoformada em 200°C com o tempo de 33'' (FIG. 38c).

Os resultados revelaram que as curvas podem ser utilizadas como referência para estabelecer adequada combinação entre a temperatura de trabalho para termoformagem e o tempo requerido de aquecimento da câmara de resistência elétrica e para a conformação de uma embalagem de boa qualidade.

## 5 CONCLUSÕES

Pela termografia foi possível selecionar o material e o tipo de moldes de melhor dissipação térmica (molde de alumínio positivo). Pôde-se também constatar por termografia que o molde de MDF reteve mais calor do processo do que o de alumínio, o que poderia ser a causa de mais degradação do material. Ao mesmo tempo, comprovou-se pela termografia o que é evidenciado na literatura no tocante à seleção de um material ou outro, ou seja, o alumínio apresentou melhor dissipação térmica em ambos os moldes e espessuras de material.

Os ajustes do modelo de regressão logística obtidos para cada uma das espessuras avaliadas na primeira fase não tiveram significância estatística. O modelo proposto não apresentou capacidade de predição na termoformagem de uma embalagem adequada para qualquer combinação de temperatura e tempo dentro das faixas de estudo.

A técnica da termografia permitiu selecionar, com base nas temperaturas registradas e nas peças com boa conformação, uma faixa de temperatura de referência (tempo X temperatura) para condução dos testes na segunda etapa de experimentos, o que garantiu a confiabilidade dos dados obtidos e a análise estatística dos mesmos.

Tornou-se possível estabelecer curvas de associação entre essas variáveis para cada espessura dentro das faixas estudadas, podendo esses dados subsidiar a seleção de chapas de PS em espessuras dentro dos limites estudados, permitindo-se promover a alteração da espessura dos produtos industrialmente processados.

Os resultados alcançados nos testes mostram que tais valores podem ser usados para reduzir o *set-up* de máquina, melhorando a produtividade dentro dos limites estudados.

Espera-se que a partir da espessura de embalagem que se deseja produzir esta possa ser interpolada em um valor entre 0,3 e 1,0 mm. Caso o valor seja diferente dos estudados, com a combinação de temperatura e tempo estimada, será possível chegar aos parâmetros de produção de peças de qualidade em poucos testes de calibragem do equipamento.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme proposta apresentada neste trabalho e as disponibilidades de recursos para realização, ficam evidentes o desejo de mais aprofundamento e a realização de novos estudos, baseados nos resultados encontrados. Portanto, fazem-se algumas sugestões para pesquisas futuras:

- a) Estudo da termoformagem com outros polímeros e moldes fabricados em outros materiais;
- b) uso da termografia para detectar a influência do ambiente externo nos processos de termoformagem;
- c) estudo da forma e do *design* de embalagens com compostos de materiais alternativos e biodegradáveis;
- d) a análise comparativa do processo de desenvolvimento das embalagens com a utilização dos *softwares* de simulação computacional que possam comparar o tempo de desenvolvimento e a performance de recursos demandados e a interferência destes na qualidade do produto final;
- e) o binômio temperatura x tempo é específico para cada espessura, podendo interpolar ser previsto para outra espessura entre 0,3 e 1,0 mm com base nas coletas e análises estatísticas dos dados;
- f) análise da fabricação de peças termoformadas a vácuo utilizando moldes de diversas matérias-primas, com o intuito de mapear a qualidade do produto, comparando os parâmetros e suas restrições, fornecendo um quadro comparativo para consulta e seleção técnica aplicada ao processo.

## REFERÊNCIAS

AKATU INSTITUTO. Produção de lixo no Brasil aumentou em 60 mil toneladas desde 2007. **Diário de Notícias**. Disponível em: <http://www.akatu.org.br/Institucional/SalaDeImprensa/Akatu-na-Midia/Diario-de-NoticiasProducao-de-lixo-no-Brasil-aumentou-em-60-mil-toneladas-desde-2007>. Acesso em: 12 de jul. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM. ABRE. **Embalagens**. Disponível em: <http://www.abre.org.br/setor/apresentacao-do-setor/a-embalagem/>. Acesso em julho de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS. ABRE. **Setor**: dados de mercado. Disponível em: <http://www.abre.org.br/setor/dados-de-mercado>. Acesso em: 12 de jul. 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS FLEXÍVEIS. ABIEF. **Dados do setor**. Setembro de 2009. Disponível em: [www.abief.com.br](http://www.abief.com.br). Acesso em: 12 jun. 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS FLEXÍVEIS. ABIEF. **O marketing da contribuição social da embalagem mundo do marketing**. RJ - Artigos - 21/09/2009. Disponível em: [www.abief.com.br](http://www.abief.com.br). Acesso em: 26 jun. 2014.

BARREIRA, E.S.B.M. **Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios**. Dissertação (Mestrado em Construção de Edifícios) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal 2004. 196 f.

BOSER, L.M. **Thermoforming manual and trouble-shooting guide**. Disponível em: <http://www.plastimach.com/pmblog/wp-content/uploads/2013/04/VACUUM-FORMING-MANUAL.pdf>. Acesso em: 15 julho de 2014.

BOUZIDA, N.; BENDADA, A.; MALDAGUE, X. P. Visualization of body thermoregulation by infrared imaging. **Journal of Thermal Biology**, v. 34, pp. 120-126, 2009.

BRASKEM. **Embalagens termoformadas e descartáveis**. 2014. Disponível em: <http://www.activas.com.br/fichas/braskem/pp/homopolimero/ph0141.pdf>. Acesso em: 12 de julho de 2014.

BUSS, C.O.; CUNHA, G.D. Análise de marketing no desenvolvimento de produtos. *In*: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO. Florianópolis, SC. **Anais...**, 25-27 de setembro. 2001.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 6. ed., São Paulo: Saraiva, 2010.

CALLISTER, W.D. **Fundamentals of materials Science and Engineering: An integrated approach**. 2.ed. John Wiley & Sons, 2002.

CASTANEDO, C.I. **Quantitative subsurface defect valuation by pulsed phase thermography**: Depth retrieval with the phase. Thèse (obtention grade de Philosophiae Doctor Ph.D). Faculté des Sciences et de Génie Université Laval – Québec. Octobre 2005.

CENSUS. United States Census Bureau. **Statistical information the US**. Disponível em: <http://www.census.gov/>. Acesso em 10 abr.2015.

CHABOT, J.F. **The development of plastics processing machinery and methods**. Joseph Fred Chabot Jr. (ed). Wiley-Interscience, 1992.

CHAMBERS, A.; FITCH, R.K.; HALLIDAY, B.S. **Basic vacuum technology**. 2. ed., Philadelphia: IOP, 1998. 189 p.

CHANG, Y.Z.; WEN, Y.Z.; LIU, S.J. Derivation of optimal processing parameters of polypropylene foam thermoforming by an artificial neural network. **Journal of Polymer Engineering and Science**, v. 45, n. 3, pp. 375- 384. 2005.

CHENG, L.C.; MELO FILHO, L.D.R. **QFD**: desdobramento da função qualidade na gestão de desenvolvimento de produtos. São Paulo: Blucher, 2010.

CORTIZO, E.C. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações**: ênfase em edificações do patrimônio histórico. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, 2007. 178 f.

DANESE, M. *et al.* Investigating material decay of historic buildings using visual analytics with multi-temporal infrared thermographic data. **Archaeometry**, v. 52, 3, p. 482-501, 2010.

DEGASPERI, F.T. **Modelagem e análise detalhadas de sistema de vácuo**. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2002.

DEVORE, J.L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 1. ed., São Paulo: Thomson Heinle, 2006.

DOLAN, R.J. **Managing the new product development process**. Boston: Addison Wesley. 1993.

ENGELMANN, S. **Advanced thermoforming methods, machines and materials, applications and Automation**. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2012.

EVANGELISTA, J. **Tecnologia de alimentos**. São Paulo: Atheneu, 1998.

FACCA, C.A. Investindo em design do produto no setor de embalagens. **Revista Embalagem & Tecnologia**, nov. 2010.

FERNÁNDEZ-CUEVAS, I. *et al.* Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans, **Infrared Physics & Technology**, v. 71, p. 28-55, 2015.

FLIR. **Manual do utilizador**. Publ. n° 1558561, Rev. A321- Portuguese (PT). Disponível em: [http://support.flir.com/DocDownload/Assets/44/Portuguese/1558640\\$a362.pdf](http://support.flir.com/DocDownload/Assets/44/Portuguese/1558640$a362.pdf). Acesso em: 14 agost. 2014.

FORMECH. **A vacuum forming guide**. 2011. Disponível em: <[www.formech.com](http://www.formech.com)>. Acesso em: 24 abr.2014.

GRUENWALD, G. **Thermoforming a plastics processing guide**. 2. ed., A Technomic Publishing Company Book, p. 231, 1998.

HERMAN, C.; CETINGUL, M.P. Quantitative visualization and detection of skin cancer: Using Dynamic Thermal Imaging. **Jove-Journal Of Visualized Experiments**, Issue 51, May 2011.

HOLST, G.C. **Common sense approach to thermal imaging**: Spie Optical Engineering Press. A Publication of Spie. The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington USA, 2000. Disponível em: <http://www.electroforming.com/html/por/index.htm>. Acesso em: 12 mai. 2014.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. INMETRO. **Programa de análise de produto**: relatório da análise em embalagens individualizadas do tipo blister manteiga, margarina, geleia e creme. Disponível em: <[www.inmetro.gov.br](http://www.inmetro.gov.br)>. Acesso em: jun. 2015.

INNOVA. **Manual de termoformagem**. 2011. Disponível em: <[www.innova.com.br](http://www.innova.com.br)>. Acesso em: abril, 2014.

KARJUST, K.; KÜTTNER, R.; PONLAK, M. The design and production technology of large composite plastic products. **Journal of Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Engineering**. v. 13, n. 2, pp. 117-128. 2007.

KAROGLOU, M. *et al.* Reverse engineering methodology for studying historic buildings coatings: The case study of the Hellenic Parliament neoclassical building. **Progress in Organic Coatings**, v. 72, p. 202-209, 2011.

KAZAZIAN, T. **Haverá a idade das coisas leves**: design e desenvolvimento sustentável. São Paulo: Senac, 2005.

KLEIN, P.W. **Fundamentals of plasticsthermoforming**. Synthesis lectures on materials engineering. Morgan & Caypool Publishers 2009.

KREITH, F. **Princípios de transmissão de calor**. São Paulo 1977, Blücher.

LANGE, J.; WYSER, Y. **Recent innovations in barrier technologies for plastic packaging**: a review. Packaging Technology and Science. John Wiley & Sons Ltd, v. 16, p. 149-158, 2003.

- LEÃO, A.R. **Termoformagem**: estudo de conformação de chapas termoplásticas por vácuo com auxílio de contramolde. Monografia do curso de tecnologia de produção de plásticos. FATEC São Paulo, SP. 2009. 46 f.
- LEITE, W.O. *et al.* Correcting geometric deviations of CNC machine-tools: an approach with artificial neural networks. **Journal Applied Soft Computing**, nov. 2013.
- LÖBACH, B. **Design industrial**: bases para configuração dos produtos industriais. São Paulo: Blücher, 2001.
- MANRICH, S. **Processamento de termoplásticos**. 1 ed, São Paulo: Artiliber, 2005. 431 p.
- MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis**. Os requisitos ambientais dos produtos industriais. São Paulo, SP: Edusp, 2005.
- MESTRINER, F. **Design de embalagem**: Curso Básico. São Paulo: Makron Books, 2002. 138 p.
- MICHAELI, W. *et al.* **Tecnologia dos plásticos**. Tradução de Christian Dihlmann. São Paulo: Blücher, 1995.
- MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed., Wiley, NY, 2013.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- MORAES, M.F.V. **Produção e caracterização da blenda polimérica biodegradável poli (hidroxibutirato) [PHB]**: copoliéster alifático aromático [Ecoflex] para aplicações em embalagens, Dissertação mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais. 2004.
- MOUTINHO, A.M.C.; SILVA, M.E.S.F.; CUNHA, M.A.C.M.I. **Tecnologia do vácuo**. Lisboa, Portugal: Universidade Nova de Lisboa, 1980.
- MURALISRINIVASAN, N.S. **Update on troubleshooting in thermoforming**. 1. ed., United Kingdom, EUA: Smithers Rapra, 2010.
- OLIVEIRA, R.D. **Design Industrial e empresas de pequeno porte: interações, benefícios e estratégias**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia de Produção - UFMG. Belo Horizonte. Dezembro de 2000.
- PADILHA, G.M.A.; BOMTEMPO, J.V. A inserção dos transformadores de plásticos na cadeia produtiva de produtos plásticos. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 9, n. 3, p. 86-91, 1999.
- PAPPALETTERE, C. **Corso di Meccanica Sperimentale Seminario sulla**: termografia. Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale Bari, Itália. 2004.
- PEDRA, S.A. **Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural** [manuscrito]. 2011. 100 f. : il.

PEREIRA, R.R. **Características térmicas de assento de cadeiras escolares por termografia** [manuscrito]. 2013. 89 f. il.

PRECONIZ. Indústria e prestação de serviços em embalagens. **O que é blister?** Disponível em: [www.preconiz.com.br/conteudo.php?id=3](http://www.preconiz.com.br/conteudo.php?id=3). Acesso em: 15 jun. 2014.

QUARANTE, D. **Éléments de design industriel**. 2 ed., Paris: Polytechnica, 1994.

ROSEN, S.R. **A history of the growth of the thermoforming industry**. Chapter I Thermoforming Pioneers 1930-1950. [on line], 2002. Disponível em: [http://thermoformingdivision.com/wp-content/uploads/History\\_of\\_thermoforming\\_chap1.pdf](http://thermoformingdivision.com/wp-content/uploads/History_of_thermoforming_chap1.pdf). Acesso em: jul. 2015.

ROSEN, S.R. **Thermoforming: improving process performance**. By the Society of Manufacturing Engineers, 2002.

RYANS, J.L.; ROPER, D.L. **Process vacuum system design and operation**, New York McGraw-Hill 1986, 356 p.

SALA, G.; LANDRO, L.D.; CASSAGO, D. A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies: polymers thermoforming. **Journal of Materials and Design**, v. 23, pp. 21-39, 2002.

SALES, R.B.C. **Estudo de compostos de cimento Portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia**. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SALES, R.B.C. *et al.* Concrete study using infrared thermography and forced resonant frequency. **Advanced Materials Research**, v. 168, n. 170, p. 778-786, 2011.

SLACK, N.; CHAMBERS, S. **Administração da Produção: compacto**. São Paulo: Atlas, 1999.

SORS, L.; BARDÓCZ, L.; RADNÓTI, I. **Plásticos moldes e matrizes**, Tradução: Luiz Roberto de Godoi Vidal Curitiba: Hemus, 2002.

SPIEGEL, M.R.; SCHILLER, J.J.; SRINIVASAN, R.A. **Probabilidade e estatística**. 2. ed., Porto Alegre: Bookman, 2004.

STRONG, A.B. **Plastic: materials and processing**. New Jersey, Pearson Prentice Hall, 1996.

THOMAZI, E. **Moldes de injeção**. Disponível em: <[www.thomazi.net](http://www.thomazi.net)>. Acesso em: abr. 2014.

THRONE, J.L. **Technology of thermoforming**. 1. ed., Estados Unidos: Hanser Gardner, 1996.

THRONE, J.L. **Understanding thermoforming**. 2. ed., ISBN-10: 1569904286, 2008.

ULRICH, K.; EPPINGER, S. **Product design and development**. New York: McGraw-Hill, 1995.

VAN VLACK, L.H. **Princípios de ciência dos materiais**. 11. ed. Tradução de Eng. Luiz Paulo Camargo Ferrão. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

WALPOLE, R.E.; MYERS, R.H. **Probabilidade e estatística para Engenharia e Ciências**. 8. ed., São Paulo: Prentice Hall Brasil, 2009.

WWF. Planeta vivo relatório 2010. **Global footprint Network**. Disponível em: [http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/08out10\\_planetavivo\\_relatorio2010\\_completo\\_n9.pdf](http://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/08out10_planetavivo_relatorio2010_completo_n9.pdf). Acesso em: 14 fev. 2014.

YAM, K.L. **The Wiley encyclopedia of packaging technology**. 3. ed., John Wiley & Sons, United States of América, 2009.

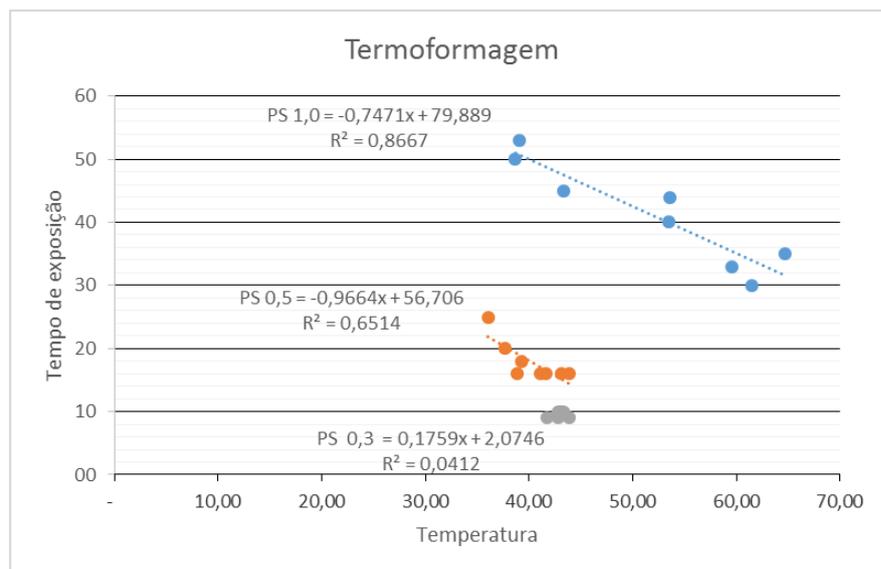
YANG, C.; HUNG, S.W. Optimising the thermoforming process of polymeric foams: an approach by using the Taguchi method and the utility concept. **International Journal Adv Manufacturing Technology**, v. 24, p. 353-360, 2004.

## APÊNDICES

### Apêndice A - Molde positivo de alumínio

M	ZQA	ZQB	ZQC	MZQ	ZFA	ZFB	ZBC	MZF	PS	TET	R
ALUMÍNIO	150,20	149,30	150,20	149,90	41,10	39,80	36,30	39,07	1.00	53	0
ALUMÍNIO	148,20	142,70	150,20	147,03	41,80	37,80	36,40	38,67	1.00	50	0
ALUMÍNIO	150,20	58,40	113,20	107,27	43,30	45,30	41,30	43,30	1.00	45	0
ALUMÍNIO	150,20	150,20	150,20	150,20	53,70	55,80	51,20	53,57	1.00	44	0
ALUMÍNIO	147,10	95,90	145,50	129,50	53,10	55,90	51,30	53,43	1.00	40	0
ALUMÍNIO	150,20	150,20	150,20	150,20	72,50	63,00	58,50	64,67	1.00	35	0
ALUMÍNIO	150,20	150,20	150,20	150,20	60,70	60,70	57,20	59,53	1.00	33	1
ALUMÍNIO	150,20	150,20	150,20	150,20	66,00	52,20	66,30	61,50	1.00	30	0
ALUMÍNIO	141,70	45,00	98,60	95,10	37,80	36,00	34,30	36,03	0.50	25	0
ALUMÍNIO	133,20	39,90	104,40	92,50	38,30	38,40	36,30	37,67	0.50	20	0
ALUMÍNIO	112,00	53,80	107,50	91,10	39,80	40,30	37,80	39,30	0.50	18	0
ALUMÍNIO	83,70	46,80	98,00	76,17	38,30	40,30	37,90	38,83	0.50	16	1
ALUMÍNIO	139,30	53,60	122,70	105,20	41,10	41,90	40,20	41,07	0.50	16	1
ALUMÍNIO	134,20	50,80	108,80	97,93	41,00	42,30	41,50	41,60	0.50	16	1
ALUMÍNIO	138,00	48,10	96,90	94,33	42,30	46,90	42,40	43,87	0.50	16	1
ALUMÍNIO	129,60	44,20	106,90	93,57	42,10	44,70	42,40	43,07	0.50	16	1
ALUMÍNIO	132,60	48,20	79,10	86,63	41,10	45,70	41,45	42,75	0.30	10	1
ALUMÍNIO	116,90	52,00	75,40	81,43	41,70	44,90	42,40	43,00	0.30	10	1
ALUMÍNIO	118,30	54,40	94,10	88,93	40,00	47,20	42,00	43,07	0.30	10	1
ALUMÍNIO	132,60	48,20	79,10	86,63	41,10	45,70	41,45	42,75	0.30	09	1
ALUMÍNIO	116,90	52,00	75,40	81,43	41,70	44,90	42,40	43,00	0.30	10	1
ALUMÍNIO	118,30	54,40	94,10	88,93	40,00	47,20	42,00	43,07	0.30	09	1
ALUMÍNIO	132,60	48,20	79,10	86,63	41,10	45,70	41,45	42,75	0.30	09	1
ALUMÍNIO	116,90	52,00	75,40	81,43	41,70	44,90	42,40	43,00	0.30	10	1

ZQ: zona quente - antes da termoformagem quando a peça toca no molde; ZF: zona fria - depois da termoformagem e descida do molde; MZQ: média da zona quente; MZF: média da zona fria.

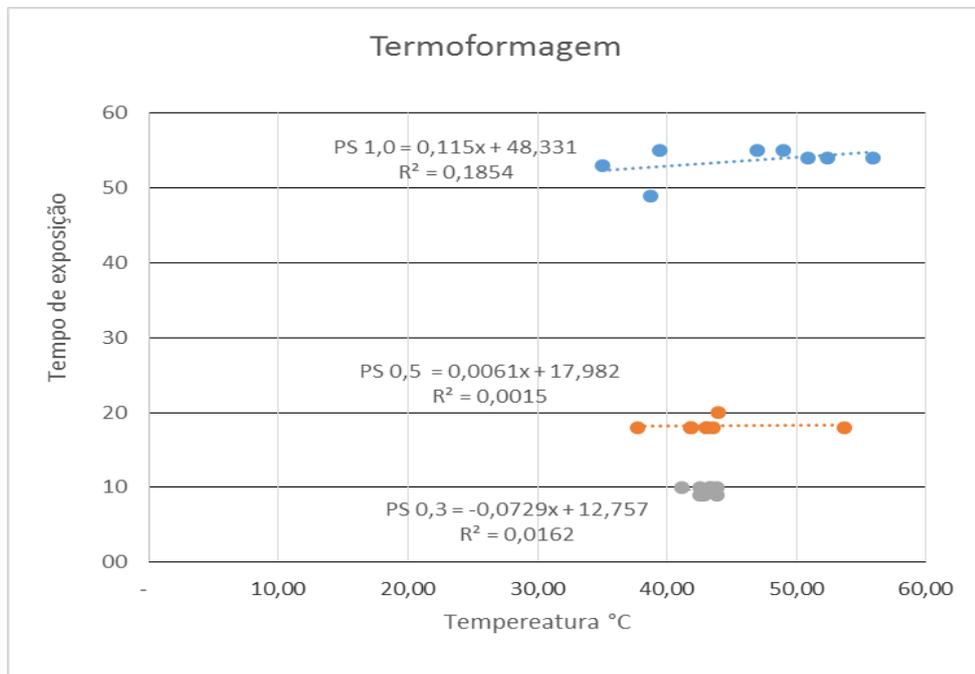


Quanto mais próximo de zero R<sup>2</sup> se encontra, mais fraco é o coeficiente de determinação e fraca é a correlação.

**Apêndice B - Molde negativo de alumínio**

M	ZQA	ZQB	ZQC	MZQ	ZFA	ZFB	ZBC	MZF	PS	TET	R
ALUMÍNIO	150,20	121,40	46,30	105,97	35,10	33,70	36,20	35,00	1.00	53	1
ALUMÍNIO	150,20	107,90	44,00	100,70	41,90	36,50	37,70	38,70	1.00	49	0
ALUMÍNIO	150,20	150,20	150,20	150,20	40,10	38,20	39,90	39,40	1.00	55	0
ALUMÍNIO	150,20	93,20	45,20	96,20	53,90	55,10	43,70	50,90	1.00	54	0
ALUMÍNIO	150,20	132,10	73,70	118,67	56,10	44,40	46,40	48,97	1.00	55	0
ALUMÍNIO	150,20	148,30	59,90	119,47	48,00	44,00	48,90	46,97	1.00	55	0
ALUMÍNIO	150,20	129,20	58,90	112,77	57,10	47,30	52,80	52,40	1.00	54	0
ALUMÍNIO	150,20	142,20	60,10	117,50	60,60	53,30	53,80	55,90	1.00	54	0
ALUMÍNIO	146,50	53,20	36,60	78,77	44,00	45,00	43,00	44,00	0.50	20	0
ALUMÍNIO	134,20	45,90	38,40	72,83	39,90	36,70	36,50	37,70	0.50	18	1
ALUMÍNIO	121,30	49,60	38,20	69,70	44,80	40,00	40,60	41,80	0.50	18	1
ALUMÍNIO	150,20	44,40	40,50	78,37	49,70	39,50	39,80	43,00	0.50	18	1
ALUMÍNIO	146,90	60,80	45,20	84,30	51,50	39,10	39,90	43,50	0.50	18	1
ALUMÍNIO	121,30	49,60	38,20	69,70	44,80	40,00	40,60	41,80	0.50	18	1
ALUMÍNIO	150,20	44,40	40,50	78,37	49,70	39,50	39,80	43,00	0.50	18	1
ALUMÍNIO	150,20	44,40	40,50	78,37	51,00	54,00	56,00	53,67	0.50	18	1
ALUMÍNIO	100,80	41,40	41,50	61,23	43,50	39,90	40,00	41,13	0.30	10	0
ALUMÍNIO	113,60	45,30	43,00	67,30	49,40	41,10	41,10	43,87	0.30	09	1
ALUMÍNIO	119,10	46,10	43,70	69,63	47,40	40,30	39,90	42,53	0.30	10	0
ALUMÍNIO	127,50	44,80	43,60	71,97	46,80	42,20	41,10	43,37	0.30	10	0
ALUMÍNIO	137,40	121,10	134,20	130,90	42,70	44,40	41,40	42,83	0.30	10	0
ALUMÍNIO	113,60	45,30	43,00	67,30	49,40	41,10	41,10	43,87	0.30	09	1
ALUMÍNIO	119,10	46,10	43,70	69,63	47,40	40,30	39,90	42,53	0.30	10	0
ALUMÍNIO	127,50	44,80	43,60	71,97	46,80	42,20	41,10	43,37	0.30	10	0

ZQ: zona quente - antes da termoformagem quando a peça toca no molde; ZF: zona fria - depois da termoformagem e descida do molde; MZQ: média da zona quente; MZF: média da zona fria.

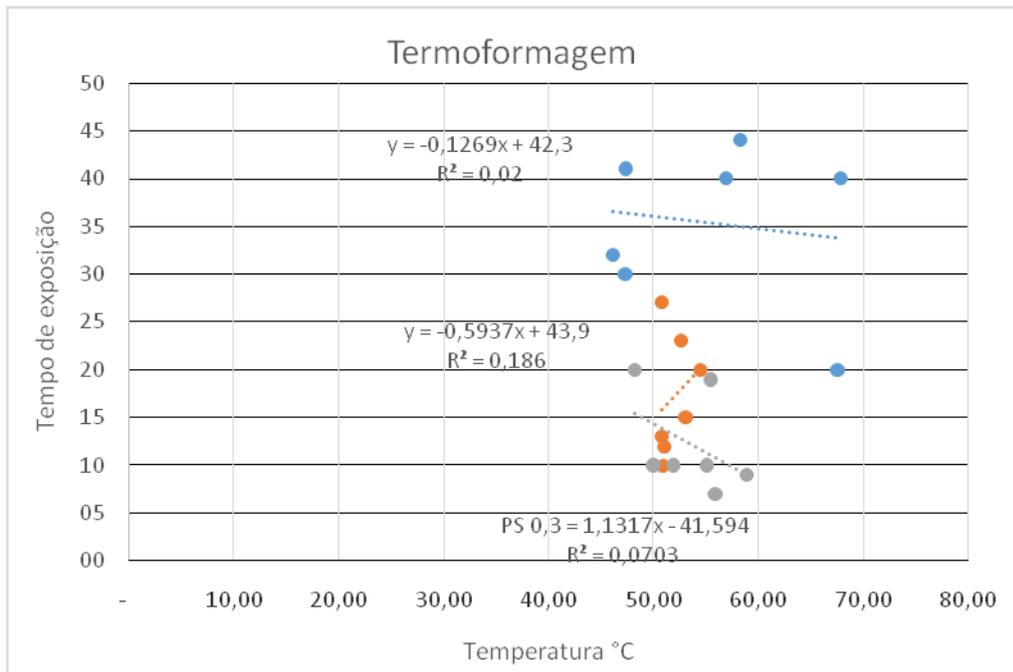


Quanto mais próximo de zero  $R^2$  se encontra, mais fraco é o coeficiente de determinação e fraca é a correlação.

**Apêndice C - Molde positivo de madeira**

M	N	ZQA	ZQB	ZQC	MZQ	ZFA	ZFB	ZBC	MZF	PS	TET	R
MADEIRA	17	150,20	135,20	150,20	145,20	63,80	52,20	54,80	56,93	1.00	40	0
MADEIRA	18	150,20	143,00	150,20	147,80	49,60	48,20	43,90	47,23	1.00	30	1
MADEIRA	19	150,20	150,20	150,20	150,20	65,30	53,10	56,40	58,27	1.00	44	0
MADEIRA	20	150,20	141,30	150,20	147,23	70,60	67,20	65,70	67,83	1.00	40	0
MADEIRA	21	147,30	99,20	150,20	132,23	71,20	66,30	65,10	67,53	1.00	20	0
MADEIRA	22	134,90	104,50	150,20	129,87	49,20	45,20	43,90	46,10	1.00	32	0
MADEIRA	23	150,20	139,10	148,20	145,83	48,90	48,70	44,30	47,30	1.00	41	0
MADEIRA	37	119,00	101,10	150,20	123,43	54,50	45,60	52,10	50,73	0.50	27	0
MADEIRA	38	111,10	96,60	147,30	118,33	51,30	52,60	53,80	52,57	0.50	23	0
MADEIRA	39	91,40	81,90	122,40	98,57	56,40	46,80	60,20	54,47	0.50	20	0
MADEIRA	40	82,30	74,10	93,80	83,40	51,50	50,60	57,00	53,03	0.50	15	1
MADEIRA	41	92,80	77,60	121,10	97,17	50,30	49,00	53,10	50,80	0.50	10	0
MADEIRA	42	93,20	97,70	118,60	103,17	49,30	50,90	52,10	50,77	0.50	13	0
MADEIRA	43	98,10	85,10	116,90	100,03	50,10	50,40	52,30	50,93	0.50	12	0
MADEIRA	73	76,10	67,70	98,60	80,80	44,40	57,60	42,70	48,23	0.30	20	0
MADEIRA	74	82,10	80,80	105,50	89,47	61,30	58,10	57,30	58,90	0.30	09	0
MADEIRA	75	78,20	71,50	98,80	82,83	59,00	57,50	51,20	55,90	0.30	07	0
MADEIRA	76	79,50	69,30	103,30	84,03	48,20	52,30	49,50	50,00	0.30	10	0
MADEIRA	77	92,00	76,00	126,70	98,23	57,90	57,70	50,80	55,47	0.30	19	0
MADEIRA	78	84,60	77,30	112,10	91,33	54,60	56,40	54,40	55,13	0.30	10	0
MADEIRA	79	77,70	69,90	98,80	82,13	49,90	54,60	51,20	51,90	0.30	10	0

ZQ: zona quente - antes da termoformagem quando a peça toca no molde; ZF: zona fria - depois da termoformagem e descida do molde; MZQ: média da zona quente; MZF: média da zona fria.

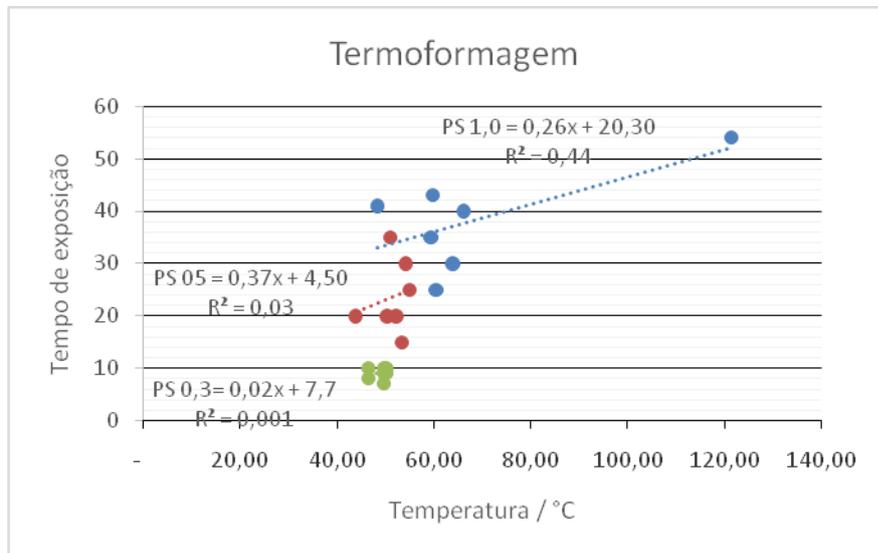


Quanto mais próximo de zero  $R^2$  se encontra, mais fraco é o coeficiente de determinação e fraca é a correlação

**Apêndice D - Molde negativo de madeira**

M	N	ZQA	ZQB	ZQC	MZQ	ZFA	ZFB	ZBC	MZF	PS	TET	R
MADEIRA	30	150,20	150,20	112,60	137,67	143,30	139,70	81,00	121,33	1.00	54	1
MADEIRA	31	150,20	150,20	101,30	133,90	59,20	69,10	50,90	59,73	1.00	43	0
MADEIRA	32	150,20	150,20	103,70	134,70	66,90	75,10	56,40	66,13	1.00	40	0
MADEIRA	33	150,20	150,20	99,80	133,40	59,80	63,50	54,70	59,33	1.00	35	0
MADEIRA	34	149,10	136,90	95,60	127,20	66,90	67,60	56,80	63,77	1.00	30	0
MADEIRA	32	150,20	150,20	103,70	134,70	66,90	75,10	56,40	66,13	1.00	40	0
MADEIRA	35	150,20	150,20	94,40	131,60	56,90	64,20	59,80	60,30	1.00	25	0
MADEIRA	36	147,10	112,30	79,90	113,10	46,50	49,60	48,80	48,30	1.00	41	0
MADEIRA	44	131,30	119,70	78,80	109,93	53,10	53,60	56,20	54,30	0.50	30	0
MADEIRA	45	150,20	131,40	88,20	123,27	60,40	51,30	53,20	54,97	0.50	25	1
MADEIRA	46	127,50	112,40	81,40	107,10	52,70	52,40	51,80	52,30	0.50	20	0
MADEIRA	47	150,20	124,60	83,00	119,27	57,00	52,20	51,50	53,57	0.50	15	0
MADEIRA	48	135,10	111,50	77,60	108,07	51,60	48,80	52,90	51,10	0.50	35	0
MADEIRA	49	144,00	121,10	84,40	116,50	50,90	49,20	51,00	50,37	0.50	20	0
MADEIRA	50	150,20	150,20	150,20	150,20	45,20	43,90	42,80	43,97	0.50	20	0
MADEIRA	51	114,30	94,80	69,10	92,73	54,20	45,50	47,20	48,97	0.50	17	0
MADEIRA	81	94,70	73,40	62,60	76,90	52,10	48,60	48,30	49,67	0.30	10	0
MADEIRA	82	111,00	91,30	69,50	90,60	44,50	48,00	47,00	46,50	0.30	07	0
MADEIRA	83	118,10	91,40	66,10	91,87	49,70	48,00	52,60	50,10	0.30	09	1
MADEIRA	81	94,70	73,40	62,60	76,90	52,10	48,60	48,30	49,67	0.30	10	0
MADEIRA	82	111,00	91,30	69,50	90,60	44,50	48,00	47,00	46,50	0.30	09	0
MADEIRA	83	118,10	91,40	66,10	91,87	49,70	48,00	52,60	50,10	0.30	10	1
MADEIRA	81	94,70	73,40	62,60	76,90	52,10	48,60	48,30	49,67	0.30	08	0
MADEIRA	82	111,00	91,30	69,50	90,60	44,50	48,00	47,00	46,50	0.30	07	0

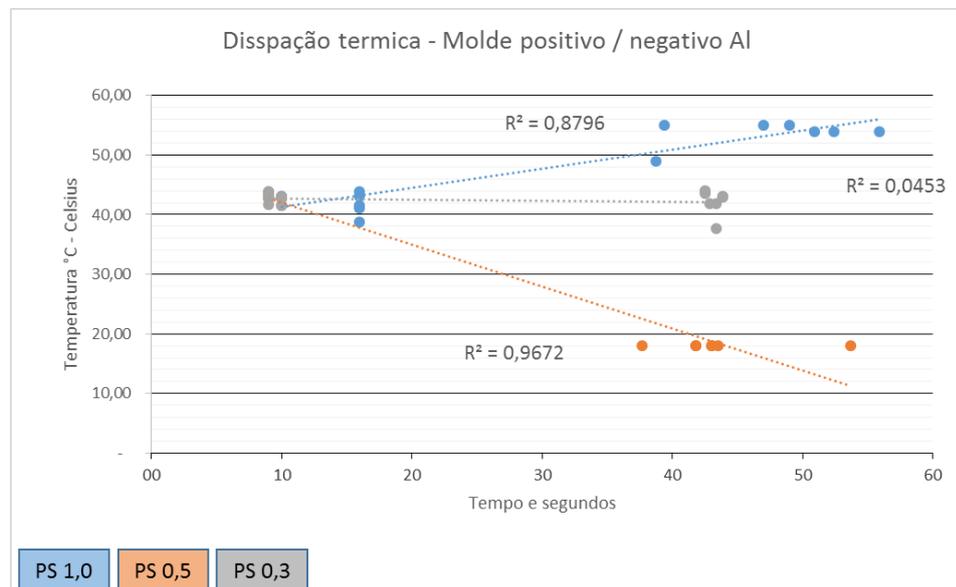
ZQ: zona quente - antes da termoformagem quando a peça toca no molde; ZF: zona fria - depois da termoformagem e descida do molde; MZQ: média da zona quente; MZF: média da zona fria.



Quanto mais próximo de zero  $R^2$  se encontra, mais fraco é o coeficiente de determinação e fraca é a correlação.

## Apêndice E - Gráfico de coeficiente de determinação

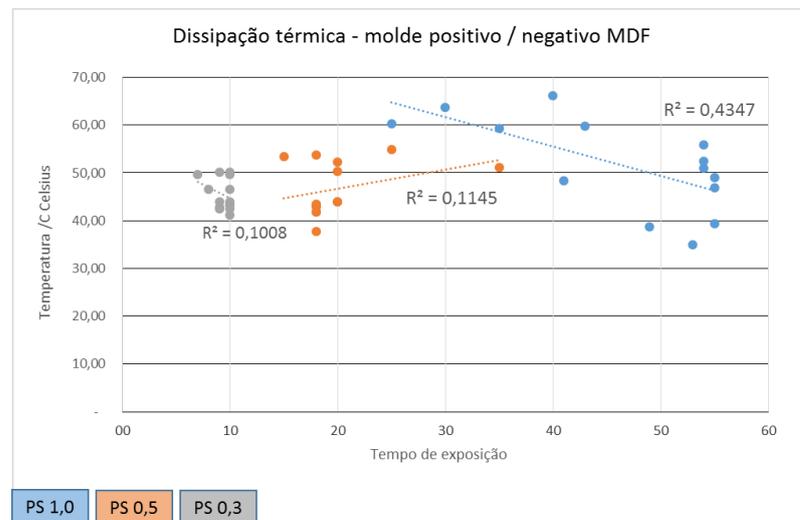
Molde positivo e negativo - alumínio					
1.0 mm		0.5 mm		0.3 mm	
16	38,83	09	42,75	10	42,75
16	41,07	10	43,00	10	43,00
16	41,60	09	43,07	09	43,07
16	43,87	09	42,75	9	41,75
16	43,07	10	43,00	10	43,00
10	42,75	10	41,60	9	43,87
10	43,00	09	43,87	9	42,75
10	43,07	09	43,03	10	41,60
39	49,00	38	18,00	44	43,03
39	55,00	42	18,00	43	44,00
51	54,00	43	18,00	43	37,70
49	55,00	44	18,00	43	41,80
47	55,00	42	18,00	44	43,00
52	54,00	43	18,00	43	43,50
56	54,00	54	18,00	43	41,80



Quanto mais próximo de zero  $R^2$  se encontra, mais fraco é o coeficiente de determinação e fraca é a correlação.

## Apêndice F - Gráfico de coeficiente de determinação

Molde positivo e negativo - MDF					
1.0 mm		0.5 mm		0.3 mm	
53	35,00	20	44,00	10	41,13
49	38,70	18	37,70	09	43,87
55	39,40	18	41,80	10	42,53
54	50,90	18	43,00	10	43,37
55	48,97	18	43,50	09	42,83
55	46,97	18	41,80	10	43,87
54	52,40	18	43,00	09	42,53
54	55,90	18	53,67	10	43,37
43	59,73	25	54,97	10	46,50
40	66,13	20	52,30	9	50,10
35	59,33	15	53,37	10	49,67
30	63,77	35	51,10	8	46,50
25	60,30	20	50,37	10	50,10
41	48,30	20	43,97	7	49,67



Quanto mais próximo de zero  $R^2$  se encontra, mais fraco é o coeficiente de determinação e fraca é a correlação.