

FERNANDO CAMPS  
ROBERTO LAKATOS

F.S  
GTHW

**ANÁLISE DE PROBLEMAS EM TERMOCONFORMAÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**

**Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do Título de  
Engenheiro Mecânico.**

**São Paulo  
2002**

**FERNANDO CAMPS  
ROBERTO LAKATOS**

**ANÁLISE DE PROBLEMAS EM TERMOCONFORMAÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS**

**Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do Título de Engenheiro  
Mecânico.**

**Área de concentração:  
Engenharia Mecânica**

**Orientador:  
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha**

**São Paulo  
2002**



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**PMC – 581 Projeto Mecânico II**  
**Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos**

---



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PMC – 581 Projeto Mecânico II  
Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

**FICHA CATALOGRÁFICA**

Camps, Fernando  
Lakatos, Roberto

Análise de problemas referentes à termoformação de materiais termoplásticos,  
São Paulo, 2002.  
48pp.

Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,  
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Processos de fabricação 2. Conformação plástica 3. Termoformagem

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia  
Mecânica.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PMC – 581 Projeto Mecânico II  
Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

---

**RESUMO**

O presente trabalho reúne elementos para a identificação de problemas que ocorrem na termoformação de polímeros plásticos e suas possíveis causas. Apresenta uma explanação sobre o processo de termoformagem e extrusão para que o leitor entenda claramente as falhas de processamento. Há também uma abordagem generalizada dos materiais mais utilizados na termoformagem e uma explanação das características dos grupos nos quais os termoplásticos se classificam. Por fim, apresenta-se tabelas e um caso prático para direcionar certos parâmetros inerentes ao processo de termoformagem de modo a direcionar os leitores que buscam esses dados.



## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>6</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>9</b>
1.1 Objetivo .....	9
1.2 Definições.....	9
1.3 Histórico.....	10
1.4 Utilização.....	11
<b>2. Descrição do Problema .....</b>	<b>13</b>
2.1 Problemas mais comuns.....	13
2.1.1 Problemas no processamento das chapas / filmes .....	14
2.1.2 Problemas de materiais .....	16
3. Elementos das máquinas termoformadoras que mais influem na qualidade final das peças termoformadas: .....	25
3.1 Plug .....	25
3.2 Balão .....	26
3.3 Controle de Temperatura do forno .....	27
3.4 Controle de Temperaturas da Chapa/ filme plástico: .....	28
4. Problemas mais comuns relacionados com a máquina termoformadora .....	29
4.1. Má distribuição de material .....	29
4.2. Má formação.....	29
4.3. Tensões internas .....	29
4.4. Rugas .....	30
4.5. Marcas na Superfície.....	31
4.6. Cantos finos.....	32
4.7. Chapa queimando (amarelamento).....	32
4.8. Produto contaminado.....	34
4.9. Corte irregular.....	35
4.10. Deformação na extração.....	36
5. Experimento .....	37
Conclusão experimental .....	41
6. Conclusão .....	43
<b>ANEXO A - TABELAS .....</b>	<b>44</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>47</b>



#### LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Histórico da evolução da termoformação	10
Tabela 2	Comparativo entre os processos de transformação de plásticos	12
Tabela 3	Relação dos plásticos amorfos e parte cristalinos para termoformação	18
Tabela 4	Variação da espessura em função da temperatura	40
Anexo A	Tabela Causas x problemas em termoformação	45
Anexo A	Tabela de propriedades de materiais	46



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**PMC – 581 Projeto Mecânico II**  
**Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos**

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>ABS</b>	Acrinolonitrila-Butadieno-Estireno
<b>PMMA</b>	Polimetilmetacrilato
<b>LDPE</b>	Polietileno de baixa densidade
<b>HDPE</b>	Polietileno de Alta densidade
<b>PP</b>	Polipropileno
<b>PS</b>	Poliesitereno
<b>HIPS</b>	Poliestireno de alto impacto
<b>PVC</b>	Cloreto de Polivinila
<b>APET</b>	Polietilenotereftalato - Amorfo
<b>CPET</b>	Polietilenotereftalato - Cristalizável
<b>GPET</b>	Polietilenotereftalato - Não Cristalizável



## 1. Introdução

## 1.1 Objetivo

Este projeto tem como objetivo tornar mais eficientes os processos de termoformagem de chapas ou filmes plásticos pela análise dos principais defeitos e problemas que ocorrem na implantação ou produção nas linhas de termoformagem.

## 1.2 Definições

A termoformagem atualmente pode ser definida como um processo de transformação plástica que consiste no aquecimento de uma chapa ou filme plástico, sua conformação utilizando um modelo (molde) e posteriormente seu resfriamento de modo a obter uma peça cujo formato é semelhante ao modelo utilizado. As propriedades mecânicas, elétricas e químicas, ao final do processo, devem ser satisfatórias à utilização dessa peça. Deve-se ressaltar que no processo de termoformagem, parte-se de uma geometria plana (chapa ou filme plástico) e deseja-se obter uma peça com características tridimensionais, sendo esta limitada por esse princípio (Fig. 1).

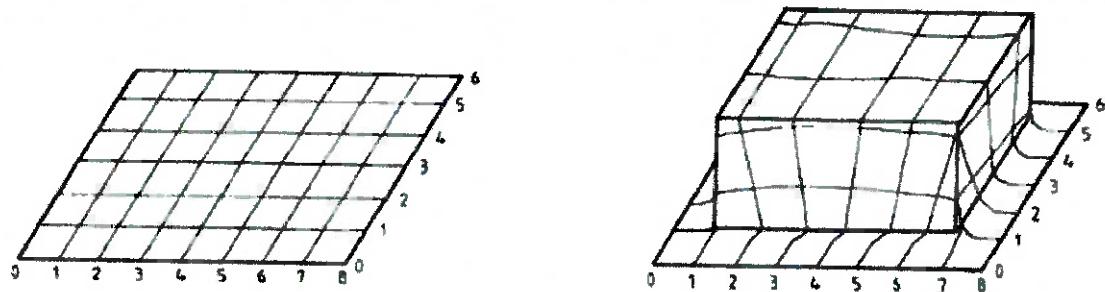


Fig. 1

A termoformagem, dependendo do foco estudado, pode ser dividida para melhor entendimento. Segundo o critério mercadológico, o processo é dividido em "cut sheet" (chapas grossas) ou "roll fed" (filmes – máquinas alimentadas por bobina). Se observada segundo o critério da atuação da força para causar a deformação no material aquecido, o princípio da obtenção das forças que movem o material plástico de encontro ao molde, pode-se utilizar a



divisão entre “pressure forming” (moldagem utilizando pressão positiva) ou “vacuum forming” (moldagem utilizando pressão negativa). No Vacuum forming, utiliza-se uma pressão negativa entre o molde e o material plástico. Isso faz com que a diferença entre as pressões atmosférica e essa outra pressão negativa empurre o material plástico de encontro ao molde. O foco de nosso estudo será o processo de termoformação à vácuo (vacuum forming).

### 1.3 Histórico

Os primeiros relatos da história remetem ao Egito antigo como a primeira utilização dos princípios de termoformação.

Os egípcios aqueciam a queratina da casca da tartaruga em óleo quente e em seguida moldavam para produzir recipientes para acondicionar alimentos.

No período entre os egípcios e o século XX houve muito pouco avanço na tecnologia de termoformagem. Toda tecnologia empregada atualmente foi desenvolvida ao longo do século XX. Esse avanço se deu graças à descoberta de materiais poliméricos termoplásticos que possuem características propícias para o desenvolvimento da tecnologia. Vide tabela 1:

Tabela 1: Histórico da evolução da termoformação

QUANTIDADE TERMOFORMADA (Milhões Kg)						
Polímero	1962	1969	1977	1983	1992	1995
ABS	NA	40	70	127	202	240
PMMA	NA	21	36	38	42	50
Celulose	8	5	8	4	5	5
PEBD	NA	0,7	0,4	0,6	0,7	0,8
PEAD	NA	7	10	26	59	87
PP	NA	1	8	22	72	115
PS	69	166	392	480	640	720
PVC	4	13	24	45	60	72
PET	NA	NA	NA	40	80	110
Outros	1	NA	NA	NA	20	50
<b>TOTAL</b>	<b>82</b>	<b>254</b>	<b>544</b>	<b>782</b>	<b>1181</b>	<b>1450</b>



## 1.4 Utilização

O processo de termoformagem é selecionado para a produção de determinado produto focando a viabilidade econômica e técnica frente aos outros processos de transformação plástica conhecidos (injeção, extrusão, sopro, rotomoldagem, etc). Comparando a outros processos apresenta menor custo de implantação ou produção quando é tecnicamente viável. Generalizando, pode-se afirmar que a termoformagem é empregada:

- Em produtos descartáveis com alto volume de produção e espessura de parede reduzida. (Nesse quesito foi desenvolvido o processo de injeção rápida, porém na maioria dos casos a termoformagem é mais eficiente); Exemplos são copos plásticos, embalagens blister e clamshell.
- Em produtos com área extensa (acima de 1m<sup>2</sup> que no processo de injeção exigiria uma força de fechamento muito elevado); Exemplos são peças como banco de ônibus, parte interior de geladeiras e armários, protetores de caçamba de caminhonetes.
- Em produtos de baixo volume de produção que não justificam gastos elevados no desenvolvimento de um molde de injeção.

Encontra-se abaixo uma tabela comparativa entre os principais processos de transformação plástica. O processo mais adequado a determinado tipo de produto varia com a aplicação. Os principais aspectos a serem analisados para a escolha são : custo, qualidade e produtividade.



## ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMC – 581 Projeto Mecânico II

Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

Tabela 2: Comparativo entre os processos de transformação de plásticos:

Característica	Termoformação	Injeção	Sopramento	Roto Moldado
Forma do polímero	Chapa	Grão	Grão	Pó
Variedade de polímeros	Bom-Excelente	Excelente	Bom	Escasso-Limitado
Custo do material	Polímero+extrusão	Padrão	Padrão	Polímero+
Variedade de materiais de moldes	Muitos	Muito limitado	Limitado	Muitos
Custo do molde	Baixo-Moderado	Altíssimo	Alto	Baixo-Moderado
Material de produção do molde	Alumínio	Aço	Alumínio	Alumínio/ Aço
Ciclo térmico do molde	Suave	Moderado	Moderado	Severo
Uniformidade da parede	Pobre-Fraco	Excelente	Pobre-Fraco	Bom-Excelente
Problemas de design	Uniformidade da espessura Cantos finos/ Micro fraturas			Porosidade Baixa resistência a tensão
Falha mais comum			Lado fino	
Pressão de operação	-1 a 5	100-1000	5-25	0-1
Temperatura de operação		200 150-300	100-250	200-350
Metodos de enchimento	Manual-Semi automático	Automático	Automático	Manual
Métodos de remoção	Manual-Semi automático	Automático	Automático	Manual
Enxerto	Possível	Factível	Factível	Factível
Orientação na peça	Máximo	Moderado a alto	Moderado a alto	Não orientado
Concentração de tensões	Máximo	Alto	Alto-Muito alto	Nulo-Baixo
Acabamento da superfície	Bom-Excelente	Excelente	Muito bom	Bom
Textura da superfície	Bom-Muito bom	Excelente	Muito bom	Fraco-Bom



## 2. Descrição do Problema

A seguir foram relacionados os principais problemas ocorridos na termoformagem e suas possíveis causas. Esses dados foram coletados de livros teóricos, experiências próprias e fontes relacionadas com a produção de termoformados. Em seguida, foram comentadas as principais causas que geram esses defeitos.

### 2.1 Problemas mais comuns

1. Má distribuição de material
2. Má formação
3. Tensões internas
4. Rugas
5. Marcas na superfície
6. Cantos finos
7. Chapa rasgando na formação
8. Chapa queimando (amarelamento)
9. Furos no produto acabado
10. Descoloramento
11. Produto quebradiço
12. Material aderido na parte interna da peça
13. Produto contaminado
14. Variação de peso das peças
15. Corte irregular
16. Deformação na extração



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**PMC – 581 Projeto Mecânico II**  
**Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos**

Os defeitos acima relacionados podem ser de origem diversa: Problemas na máquina ou processo de extrusão, problemas no processo, máquina ou operação na termoformagem ou ainda problemas técnicos de material plástico. Os itens freqüentemente mais observados foram destacados em laranja na tabela do anexo A.

Ao se deparar com um dos problemas acima relacionados e, desconhecendo-se o fator que está causando tal defeito no produto final, deve-se isolar cada um dos possíveis parâmetros. Nunca deve-se analisar mais de um parâmetro ao mesmo tempo. Isso causará confusão na solução do problema.

Outro aspecto importante é que deve-se tomar essa tabela somente como referência. A origem dos problemas pode ser outra que não relacionadas na tabela do anexo A, uma vez que esta somente tem a finalidade de indicar as causas e influências mais comuns em problemas de termoformagem. Deve-se ainda frisar que os aspectos influentes variam de máquina para máquina de termoformagem.

Neste trabalho foi feito um levantamento para estudo aprofundado dos defeitos mais comuns no processo de termoformação à vácuo. Alguns aspectos importantes não diretamente relacionados ao processo estão descritos abaixo:

### **2.1.1 Problemas no processamento das chapas / filmes**

Há várias maneiras para o processamento das resinas plásticas termoformáveis. Alguns dos processos são extrusão, film blowing (extrusão utilizando sopro) e calandragem. As figuras 2,3 e 4 abaixo ilustram esses processos:

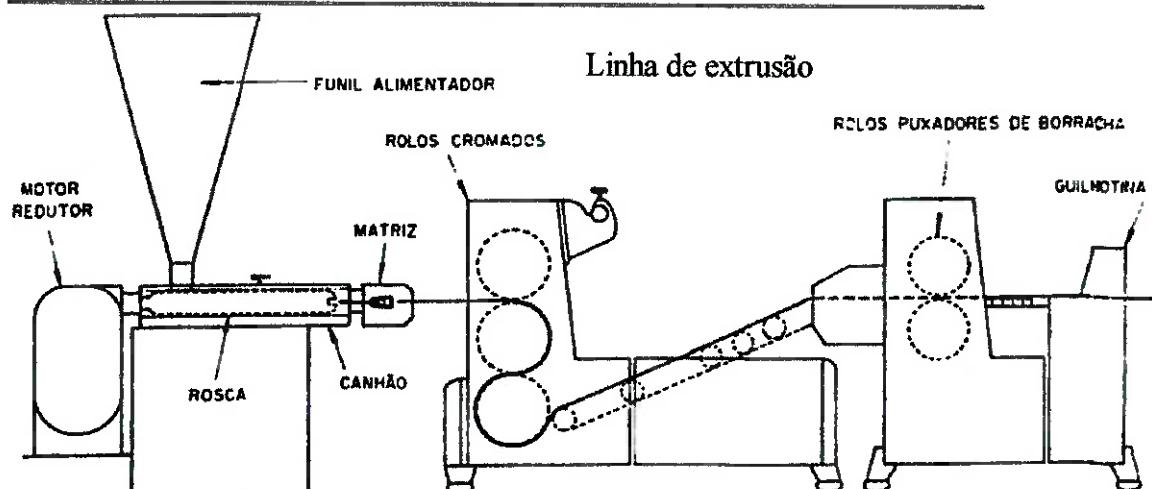
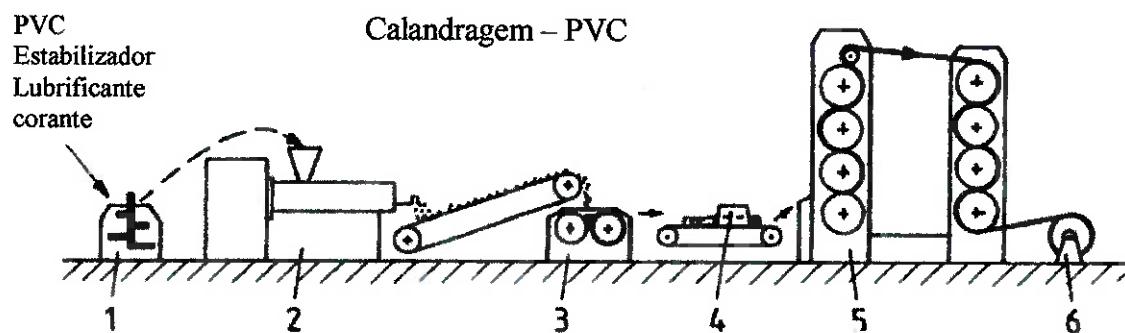


Fig. 2 - Linha de extrusão



PVC  
Estabilizador  
Lubrificante  
corante  
Calandragem – PVC  
1 misturador, 2 extrusora, 3-4alimentação, 5 calandra, 6 rolo de filme

Fig. 3 - Calandra de PVC

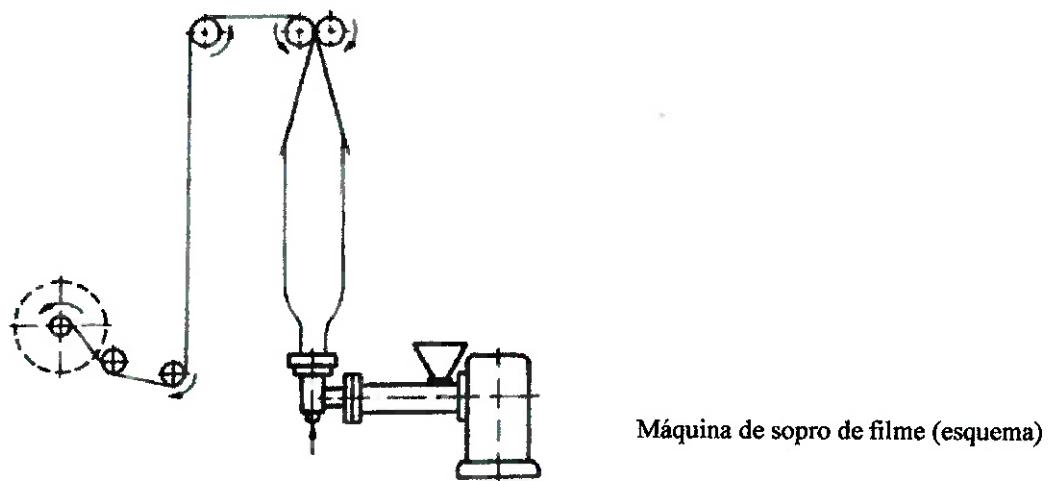


Fig. 4 – Extrusora balão



O processo calandras tem um custo maior no produto final e é utilizado largamente na produção de filmes de PVC. Pode-se utilizar também esse processo para a fabricação de filmes de ABS e PP. Destacando-se isso como exceção, os filmes e chapas são fabricados pelo processo de extrusão - que pode atingir, como nas calandras, tolerâncias de até 0,005mm na espessura.

O processo de extrusão tem vários fatores que influenciam no produto acabado. Entre eles pode-se destacar a alimentação (tipo de alimentadores e dosadores), a geometria da rosca, o fator L/d (comprimento do canhão pelo seu diâmetro), se o equipamento possui bomba de engrenagens, se o equipamento utiliza devolatilizadores no processo - apresentam mais de um estágio no processamento do material e, por fim a matriz utilizada.

Para a termoformagem, deve-se analisar o produto final da extrusão, e deve-se atentar aos seguintes fatores:

- Variação excessiva na tolerância da espessura da chapa  
Chapas extrudadas podem ter uma variação de até 5% sem comprometer o processo. Essa variação é dependente da espessura da chapa: até 2mm – 7% e acima de 5mm – 3% ( resultados empíricos).
- Se a temperatura atingida no canhão da extrusora (aquecimento devido ao atrito e forno) não atingir uma temperatura adequada (ficar abaixo da temperatura de derretimento do polímero) ou as calandras estiverem muito frias, a textura superfície da chapa ficará comprometida no processo de termoformagem, dependendo da aplicação do produto.
- Altas velocidades angulares nas calandras proporcionam filmes ou chapas demasiadamente orientadas, podendo prejudicar o processo de termoformação – aparecimento de rugas, por exemplo.

### 2.1.2 Problemas de materiais

Os materiais utilizados na termoformagem são os poliméricos pertencentes ao grupo dos termoplásticos. Deve-se ressaltar que quando se diz que se no processo não são utilizados somente as longas cadeias orgânicas seqüenciais dos monômeros que compõe o polímero, e sim uma série de aditivos - estabilizantes térmicos, anti-oxidantes, corretores de coloração, retardadores de chamas, corantes, estabilizadores UV e carga, entre outros. Isso faz com que o estudo fique complexo devido a cada resina plástica ter uma composição química diferente.

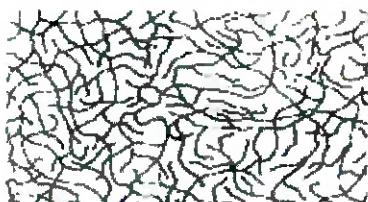


## ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMC – 581 Projeto Mecânico II

Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

Basicamente, os materiais termoplásticos, podem ser divididos em duas classes : amorfos ou cristalinos. O comportamento desses dois grupos de materiais são distintos diante do processo de termoformação. A figura baixo ilustra os dois grupos.



a)



b)

Fig. 5  
Estruturas de termoplásticos (diagrama esquemático)  
a) amorfó  
b) parte cristalino

Quando um material termoplástico é aquecido até uma determinada temperatura, seu comportamento mecânico passa de um estado rígido ( dentro do comportamento elástico linear) para um estado com comportamento semelhante a uma borracha ( em que predominam as deformações plásticas) . Ainda que essa transição ocorra numa larga faixa de temperatura, a literatura técnica aponta um único valor de temperatura como referência chamado "temperatura de transição vítreia". Acima dessa temperatura, os materiais denominados amorfos estão aptos a serem moldados.

Os materiais cristalinos, ao contrário dos materiais amorfos, apresentam duas fases: uma amorfá e outra cristalina. Os cristais desse arranjo molecular não se dissociam quando o polímero é aquecido na faixa da temperatura de transição vítreia e, portanto, não há uma alteração considerável na resistência mecânica do material. Aquecendo-se o material ainda mais, atinge-se uma outra faixa na qual a resistência mecânica dos materiais cristalinos tem uma queda acentuada e podem ser moldados. Essa segunda faixa, como no caso da temperatura de transição vítreia, tem um ponto determinado como referência chamado temperatura de derretimento cristalino. O gráfico abaixo ilustra o comportamento desses dois tipos de materiais.

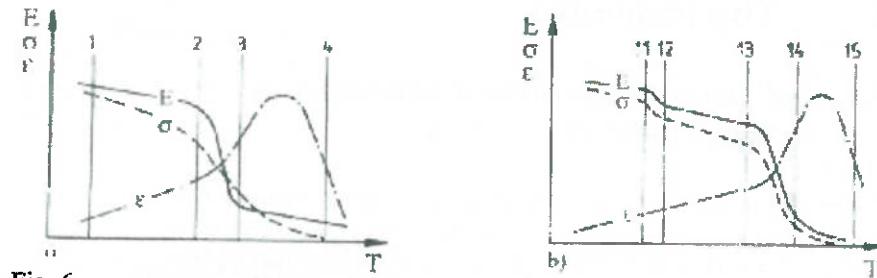


Fig. 6

Diagramas de estado dos termoplásticos (esquema)

a) amorfos b) parte cristalino

- 1-2 Temperatura de trabalho  
2-3 Ponto de amolecimento  
3-4 Temperatura de formação  
1-12 Amolecimento do conteúdo amorfos  
12-13 Temperatura de trabalho  
13-14 Derretimento da cristalita  
14-15 Temperatura de formação

Tabela 3: Relação dos plásticos amorfos e parte cristalinos para termoformação

Amorfos	Parte Cristalinos
PVC-U & PVC-P	HDPE
OS, SB, SAN, ABS, ASA	LDPE
PMMA	PP
PC	PA6, PA6, A11, PA12
PPE	POM
CA, CAB, CP	PET, PBT
PA 6-3-T	PFS
PSU	
PES	



**Materiais amorfos:** São aqueles em que as moléculas estão completamente desordenadas. As principais influências observadas pelo fato dessa característica de certos plásticos são:

1. Os plásticos transparentes são amorfos ou crystal clear . A recíproca não é verdadeira (por exemplo se o plástico for amorfó, porém misturado com corante ou carga).
2. São plásticos que trabalham abaixo da temperatura de transição vítreia.

**Materiais Cristalinos:** São aqueles em que parte das moléculas estão agrupadas em pontos do plástico chamados cristais. Os plásticos nunca são totalmente cristalinos, eles sempre apresentam uma parte amorfa, por isso o termo correto é parte cristalinos. As principais influências observadas nesse grupo são:

1. Os plásticos parte cristalinos são opacos ou translúcidos. A opacidade aumenta com o aumento do nível de cristalização e o tamanho dos cristais.
2. Os plásticos parte cristalinos podem trabalhar acima da temperatura vítreia e abaixo da de derretimento pois seus cristais não estão dissociados e o plástico possui ainda alta resistência mecânica nessa faixa de temperatura.
3. Certos plásticos cristalinos podem ficar transparentes se o processo de resfriamento for rápido o suficiente. Esse é o caso das garrafas de PET (plástico parte cristalino) que com o resfriamento rápido no processo de injeção e sopro impede a formação de cristais grandes e consequentemente as ondas eletromagnéticas da faixa do visível passam através do material.
4. Os plásticos cristalinos encolhem mais que os amorfos no processo de resfriamento.

### 2.1.2.1 Influência da temperatura

Cada material apresenta uma curva diferente do comportamento de suas propriedades em função da temperatura. No processo de aquecimento de cada material pode ser determinada empiricamente uma faixa na qual o material deve ser aquecido para que sua conformação seja possível. Essa faixa é chamada janela de temperatura e é especificada por dois valores: o mais baixo é aquele em que o material abaixo daquela temperatura é muito rígido e impossível de ser conformado; a mais alta é aquela em que acima dessa temperatura o material embarriga muito e fica próximo ao seu ponto de derretimento, comprometendo o processo de termoformagem.

Dependendo da extensão dessa faixa dessa janela do material, o torna mais fácil ou mais difícil de se termoformá-lo. Exemplos desses valores são:

Poliestireno : 150°C – 200°C

APET : 110°C – 120°C



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PMC – 581 Projeto Mecânico II  
Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

Isso deve-se as propriedades específicas de cada material, como calor específico, densidade, entalpia e condutividade térmica variarem em função da temperatura. Nas tabelas empregadas para cálculos são considerados os valores da propriedade específica nos extremos da janela de temperatura do material e um valor médio é considerado ( por exemplo a diferença de entalpia nesses dois pontos dividida pela diferença de temperatura). Sempre deve-se ter em mente que em polímeros cristalinos a curva é mais acentuada próxima á temperatura de derretimento dos cristais. Para cálculos mais precisos deve-se utilizar valores obtidos com as curvas e considerar essa variação das propriedades com a temperatura.

Valores das propriedades dois materiais podem ser encontrados no anexo A .

### 2.1.2.2 Fatores de materiais influentes no processo de termoformagem

**Composição** – Se o material estiver com muita carga ou for composto de muita porcentagem de material reciclado, isso pode ser um problema no processo de termoformagem. Deve-se saber a composição e quantidades de agentes que modifiquem as características da resina plástica.

**Coloração** – Se o pigmento utilizado na chapa plástica não for adequado ao estiramento, isso pode causar uma falha na coloração se o molde tiver um alto repuxo.

**Absorção de água** – Há plásticos que são higroscópicos e absorvem água comprometendo os parâmetros do processo de aquecimento e a qualidade final do produto. Para matérias altamente higroscópicos é necessário fazer uma pré-secagem antes do processamento. A estocagem deve ser feita em ambiente com umidade controlada.

**Contração e encolhimento do material** – Depois de resfriados, os materiais podem sofrer uma contração comprometendo as dimensões finais da peça. Materiais cristalinos são mais suscetíveis à contração. Ex: PP, HDPE ~2%.

**Orientação** – O comportamento do estiramento varia na direção longitudinal e transversal, ou seja, o material não é isotrópico. A principal consequência é o aparecimento de rugas na direção de orientação das moléculas.

**Eletricidade estática** – Como os plásticos são materiais isolantes e no desbobinamento (maquinas de alimentação por bobina) ocorre atrito durante o movimento pode ocorrer uma descarga elétrica.



**Fluidez do material** – Ocorre geralmente quando se utiliza um material com baixa viscosidade e alto índice de fluidez no processo de extrusão. Isso ocorre devido a ganhos de produtividade no processo de extrusão devido à adição de materiais (lubrificantes) de modo que fique mais rápido e rentável. No momento em que se realiza o processo de aquecimento para termoformagem, há um grande embarrigamento do material podendo causar variação na espessura ou rugas na peça final.

### 2.1.2.3 Relação entre tensão e deformação de um polímero termoplástico.

Soluções teóricas para previsão da distribuição de material de uma peça termoformada tem se tornado um dos principais objetivos da indústria de transformação plástica. Softwares de elementos finitos com uma base teórica adequada permitem projetos de moldes cujo produto final apresente dimensões que podem ser definidas antes mesmo da manufatura de um protótipo e teste do mesmo. Um desses softwares comerciais é o T-Sim. A partir de dados de entrada - desenho com três dimensões e as condições de contorno da situação (material plástico, temperaturas envolvidas, plugs,...) – pode-se obter uma resposta com precisão de até 85% da distribuição de material do produto. A base teórica é fundamentada no modelo B-BKZ – um dos modelos mais adequados para esse tipo de análise pois consegue-se, utilizando funções adequadas, repostas próximas às observadas na realidade.

Há três tipos de equações Kaye-Bernstein-Kearsley-Zapas B-BKZ envolvendo modelagens diferentes (WD, PSM e PSMTL) para a solução da deformação uniaxial, biaxial e planar. Deve-se ressaltar que para cada tipo de abordagem chega-se a respostas que podem distinhas dependendo do tipo de deformação estudada. Algumas dessas abordagens são melhores na descrição do fenômeno da deformação uniaxial e biaxial, enquanto outras são melhores na descrição da deformação planar (ex. modelo PSMTL).

A equação B-BKZ é dada por:

$$\sigma(t) = -pl + \int_{-\infty}^t \mu(t-t')h(I, II)[(1+b)C_i^{-1}(t') + bC_i(t')]dt'$$

onde:

((t) – é a matriz de tensão

t- tempo

p- pressão



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PMC – 581 Projeto Mecânico II  
Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

I – tensor unitário

((t-t')) – função de memória definida por:

$$\mu(t-t') = \sum_{i=1}^N \frac{G_i}{\tau_i} \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_i}\right)$$

onde:

$G_i$  e  $\tau_i$  são o espectro de relaxação

b – parâmetro definido pelo primeira e segunda tensões normais de referência :

$$b \equiv \frac{N_2}{N_1}$$

- Tensor Finger de deformação

- Tensor Cauchy de deformação

Para as deformações previamente descritas tem-se:

$$C_t^{-1}(t') = \begin{pmatrix} e^{2\varepsilon} & 0 & 0 \\ 0 & e^{(2m\varepsilon)} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-2(1+m)\varepsilon} \end{pmatrix}$$

$$C_t^{-1}(t') = \begin{pmatrix} e^{-2\varepsilon} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-(2m\varepsilon)} & 0 \\ 0 & 0 & e^{2(1+m)\varepsilon} \end{pmatrix}$$

onde:

$\varepsilon$  - deformação

m – parâmetro que descreve a deformação:

$m = -0,5$  (uniaxial)

$m = 1$  (biaxial)

$m = 0$  (planar)



$h(I,II)$  – função de amortecimento dependente da primeira e segunda tensões invariantes I e II.  
Essa função pode ser determinada experimentalmente pela medição do módulo de relaxação usando a seguinte equação:

$$h(I,II) = h_p(\varepsilon_p)$$

para os modelos acima descritos tem-se:

Para deformação no plano:

WD :

$$h(I,II) = \frac{l}{l} + \alpha^{-1}(I-3)^{\frac{1}{2}}(II-3)^{\frac{1}{2}} \quad c/ \quad b \neq 0$$

PSM:

$$h(I,II) = \frac{\alpha}{\alpha-3} + \beta I + (1-\beta)II \quad c/ \quad b=0$$

PSMTL :

$$h(I,II) = \frac{\alpha}{\alpha-3} + \beta I + (1-\beta)II \quad c/ \quad b \neq 0$$

O segundo termo da equação (6) é dado por:

$$h_p(\varepsilon_p) = \frac{\sigma_p(t)}{G^0(t)[\exp(2\varepsilon_p) - \exp(-2\varepsilon_p)]}$$

Para deformação biaxial:

$$h(I,II) = [l + b - b \exp(2\varepsilon_B)]^{-1} h_B(\varepsilon_B)$$

$$h_B(\varepsilon_B) = \frac{\sigma_B(t)}{G^0(t)[\exp(2\varepsilon_B) - \exp(-4\varepsilon_B)]}$$

Para deformação cisalhante:



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PMC – 581 Projeto Mecânico II  
Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

---

$$h(I, II) = h(\gamma)$$

$$h(\gamma) = \frac{\sigma_s(t)}{G^0(t)\gamma}$$

onde:

$\sigma_p$  – tensão de relaxamento em deformação no plano

$\sigma_b$  – tensão de relaxamento em deformação biaxial

$\sigma_s$  – tensão de relaxamento em deformação cisalhante

$G^0(t)$  – módulo de relaxação linear

$\epsilon_p$  – deformação no plano

$\epsilon_b$  – deformação biaxial

$\gamma$  – deformação cisalhante



### 3. Elementos das máquinas termoformadoras que mais influem na qualidade final das peças termoformadas:

#### 3.1 Plug

Essa tecnologia é empregada quando se utiliza moldes do tipo fêmea em que a profundidade da cavidade do molde é relativamente grande (profundidade maior do que uma vez a menor dimensão da área). O principal problema desse tipo de moldagem é que a peça terá uma espessura menor na parede, junto ao fundo da depressão. Isso ocorre porque a chapa plástica aquecida encosta primeiro na superfície superior do molde, fazendo com que o plástico resfrie e adquira a característica final da peça. Entretanto, à medida que o plástico penetra na cavidade para sua conformação, há um estiramento da chapa, fazendo com que cada vez mais a espessura reduza até que o plástico atinja o fundo da depressão. A solução para esse problema é a utilização do Plug, que empurra o plástico aquecido dentro da cavidade do molde antes da máquina ligar o sistema de vácuo/ar comprimido para efetuar a moldagem. Desse modo, quando a pressão é alterada para a realização da moldagem, todos os pontos atingem a superfície do molde quase que simultaneamente, fazendo com que a espessura da peça final seja uniforme.

O plug deve apresentar determinadas características para que a peça final esteja em conformidade com as especificações de projeto:

- Baixa condutividade térmica: O material do plug deve deformar mecanicamente o material plástico antes da moldagem mantendo sua temperatura. Caso isso não aconteça, o material plástico irá resfriar a uma temperatura na qual não será mais possível realizar a moldagem no pré estiramento. Valores comuns da condutividade térmica de Plugs são da ordem de  $4.10^3$  cal / cm.s. $^{\circ}$ C
- Baixa difusibilidade térmica: No início da operação o plug deve satisfazer a variação de temperatura em regime transitório.
- Geometria: O plug deve ter um formato adequado à cavidade a ser moldada. Essa geometria pode ser obtida empiricamente ou por softwares computacionais envolvendo o método dos elementos finitos. Deve-se ressaltar que os softwares existentes hoje no mercado se baseiam em modelos de equações e sua previsão de espessuras de parede chegam próximos a 85% do medido na peça fabricada.



## ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMC – 581 Projeto Mecânico II

Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

- Usinabilidade: O plug deve ser usinável de modo a deixar a superfície lisa e não afetar visualmente a peça moldada pelas imperfeições da superfície do plug.
- Fricção: O plug deve conduzir um atrito com o plástico de modo a empurrar uma determinada quantidade de massa plástica para a cavidade do molde. Se esse atrito for muito reduzido, a peça pode ficar com espessura de parede muito fina – o plug não “empurra” uma quantidade de material adequada para dentro da cavidade antes da realização da moldagem
- Temperatura: Materiais como o CPET requerem plugs com um controle preciso de temperatura. Para esses casos utiliza-se plugs manufaturados em alumínio com resistências elétricas e termopares com pirômetros. Os plugs geralmente devem ser capazes de resistir à temperaturas de 150°C a 200°C ( faixa de temperatura de moldagem da maioria dos materiais termoplásticos )
- Resistência mecânica: Os plugs devem ser capazes de resistir a uma força de compressão durante o pré estiramento. Apesar dessa força variar de acordo com o material a ser moldado, sua temperatura e a espessura do plástico, esse não é um dos fatores críticos na escolha do material. A ordem de grandeza da resistência a compressão de um plug syntactic é de 45 Mpa ( Syntactic – W. R. Grace Co.)
- Exemplos de materiais utilizados em plugs são: POM, PA 66, filtros, madeira e syntactic foams. Dependendo do material polimérico utilizado e da produção necessária deve-se escolher o material adequado levando-se em consideração a qualidade, produtividade e custo.

### 3.2 Balão

Essa tecnologia consiste em inflar pneumáticamente a chapa plástica aquecida presa ao quadro (assim como o plug é feita uma pré deformação na chapa antes da moldagem – o processo é chamado moldagem em mais de um estágio ). Esse recurso é empregado quando a moldagem é feita com um molde macho ou fêmea, cuja altura de moldagem é relativamente grande. O problema desse tipo de moldagem é que a parte do plástico aquecido que encosta primeiro no molde adquire a espessura final da peça; porém



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PMC – 581 Projeto Mecânico II  
Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

, a medida que o plástico vai encostando nas laterais do molde, a espessura vai diminuindo de forma gradativa até a base (no caso de molde macho) ou até o fundo (no caso de molde fêmea). A característica desse tipo de moldagem ineficiente é uma peça com espessura reduzida na altura em que o molde encosta por último na chapa plástica. Para solucionar esse problema, emprega-se o balão que forma uma bolha na chapa plástica antes que se realize a moldagem. Desse modo, o plástico no processo de moldagem, encosta no molde quase simultaneamente em toda sua extensão e portanto a peça final terá espessura mais uniforme.

Essa tecnologia pode ser utilizada também para moldes fêmeas para eliminar o efeito do embarrigamento causado pelo processo de aquecimento. A bolha formada pelo balão repuxa o material plástico antes da moldagem e faz com que o material concentrado no ponto central da chapa durante o processo de aquecimento (conseqüência do embarrigamento) se redistribua de forma uniforme, garantindo menores variações de espessura na peça final.

Uma grande vantagem no uso do balão é que se pode prender a chapa plástica próxima às extremidades do quadro, mesmo que a altura do molde próximas às bordas sejam relativamente grandes. Isso resulta numa perda menor de matéria prima pois o repuxo do plástico nessa região com o uso de balão é menor (usa-se uma área maior para o estiramento do plástico e, portanto, há uma menor redução de espessura do plástico nessa região).

O controle da altura do balão geralmente é feito por fotocélulas que detectam o balão e são responsáveis pelo controle da altura. Isso garante que durante a produção o pré estiramento das chapas plásticas seja uniforme.

### 3.3 Controle de Temperatura do forno

O controle perfeito da distribuição de temperaturas no forno é importante pois:

- permite ajudar a controlar a distribuição de espessura da peça final.
- moldagens de chapas mais grossas necessitam de temperaturas menores do que chapas mais finas para evitar queima da superfície.
- para redução da área de moldagem é necessário diminuir as temperaturas na área não utilizada, a fim de se economizar energia.



- para compensar a perda energética das extremidades do forno, pois essa região está menos exposta a energia irradiada dos elementos emissores do forno.

-para regular o forno com diferentes temperaturas ao longo de sua área, de modo a aquecer mais o plástico em determinadas regiões de acordo com a geometria do molde.

O forno é geralmente dividido em zonas. Cada uma dessas zonas compostas por um ou mais elementos emissores possuem um controle individual de temperatura para satisfazer as condições acima expostas.

Abaixo encontra-se o desenho esquemático da distribuição das zonas do forno superior de uma termoformadora de chapas.

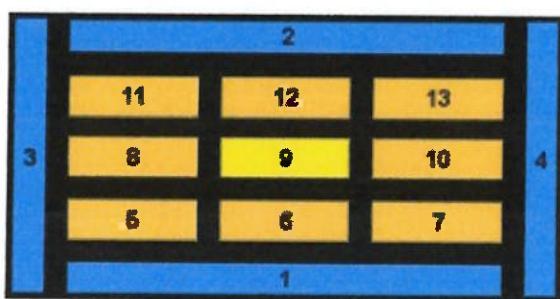


Fig.7 Distribuição das 13 zonas de aquecimento do forno superior da máquina modelo RV-2 da Eletro-Forming

### 3.4 Controle de Temperaturas da Chapa/ filme plástico:

A temperatura que deve ser considerada no ciclo da máquina é sempre temperatura medida do plástico. A medição de outra temperatura para comandar o ciclo como, por exemplo, a do forno para o aquecimento, acarretará em não uniformidade do produto final gerada por variações climáticas. Nesse caso, a temperatura de moldagem, no inverno (ou quando há uma corrente de ar) será maior que a temperatura no verão.

Para que isso não ocorra, empregam-se sensores de medição de temperatura por infra-vermelho em pontos distintos do material a ser moldado a fim de se obter uniformidade e perfeição das peças. Scaners que medem a temperatura do material podem também ser utilizados.



## 4. Problemas mais comuns relacionados com a máquina termoformadora

### 4.1. Má distribuição de material

Uma peça moldada de forma inadequada apresenta variação da espessura do plástico ao longo de sua altura. Desse modo, para que a peça atenda os requisitos de resistência mecânica (isto é, não fique com a parede muito fina) geralmente emprega-se o uso de chapas mais espessas, aumentando o custo de produção. Para evitar esse problema deve-se empregar contra-molde (Plug) e baião que permitem a confecção de peças com a espessura mais uniformes ao longo da sua altura.

A exposição da chapa (acima de 1mm de espessura) ao forno deve ser controlado pela temperatura do plástico, medido por um sensor infravermelho. Essa tecnologia é mais precisa do que a exposição controlada por tempo de aquecimento. Sendo mais precisa permite a obtenção de peças mais uniformes

### 4.2. Má formação

A má formação do moldado pode estar ligado à falta de potência da bomba de vácuo (pouca vazão x pressão). Neste caso, a máquina de termoformagem pode estar mal dimensionada para o tamanho do molde. Outra possível causa para má formação é a temperatura do molde. Um molde com temperatura mis elevada melhora a reprodução de detalhes no moldado.

### 4.3. Tensões internas

Tensões internas na termoformagem ocorrem em materiais de natureza cristalina. Isto ocorre pois para termoformar materiais dessa natureza deve-se atingir a faixa de temperatura de dissociação dos cristais. Dependendo do ponto de aquecimento nessa faixa de temperatura, nem todos os cristais se dissociaram, porém pode-se realizar a termoformagem. Quando há recristalização no resfriamento, surgem tensões internas devido aos cristais não dissociados no aquecimento. No caso de reaquecimento da peça



(Por exemplo um processo de esterilização), a parte amorfá do material amolecerá quando esse atingir um ponto superior à temperatura vítreia e, em seguida, devido às tensões internas, a peça se deformará. Para solucionar esse problema, deve-se realizar a termoformagem na temperatura mais alta possível na faixa admissível.

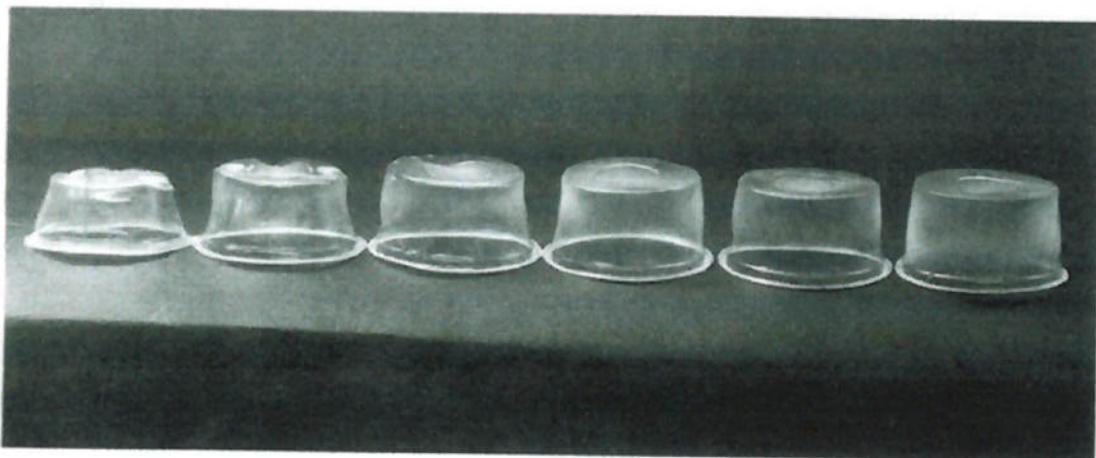


Fig. 8  
Exemplos de peças defeituosas termoformadas em PP  
Temperatura aumenta de 155°C à esquerda para 163°C à direita

#### 4.4. Rugas

Rugas formadas no plástico moldado são linhas na qual duas superfícies do plástico se encontraram. As rugas ocorrem entre moldes machos , entre um molde macho e o quadro ou ainda entre saliências de moldes fêmeas. O motivo do aparecimento de rugas é que a resultante da força da pressão atmosférica deforma o plástico perpendicularmente a superfície do mesmo e com força proporcional a área dessa superfície. Sendo assim, quando o plástico está aquecido e o molde o penetra, podem ocorrer dois planos formando um vinco entre eles. Como esse vinco terá área de superfície nula , o plástico não se moldará corretamente e os dois planos se encostarão formando a ruga. Uma possível solução é criar um outro plano entre esses dois planos concorrentes para eliminar esse vinco maior , criando dois vincos menores entre os três planos formados. Para isso, pode-



se utilizar um contra-molde com linha perpendicular ao vinco inicial ou criar no molde macho postiços que moldarão no retalho do plástico. Outra solução é modificar a temperatura do plástico no ponto onde iria formar o vinco. Existem plásticos orientados demasiadamente na direção da extrusão. As rugas tenderão a se formar nessa direção já que nesta direção o plástico estará mais resistente ao estiramento e consequentemente formação de embarrigamento.

Outro ponto crucial para o aparecimento de rugas são os moldes machos com quinas retas com ângulos próximos a 90° - deve-se evitar a fabricação de moldes machos altos, próximos um ao outro com essas características. Dependendo dos recursos da máquina termoformadora, esse problema poderá ser contornado.

Finalmente, podemos considerar que as rugas aparecem devido a um problema de áreas envolvidas: se a área aquecida da superfície do material plástico em uma determinada região for muito superior a área do molde nessa mesma região, haverá o potencial aparecimento de rugas.

#### 4.5. Marcas na Superfície

Marcas na superfície do plástico podem aparecer por excesso de temperatura na moldagem. Outros fatores causadores de marcas na superfície do material moldado são:

- Plug com mau acabamento superficial. Isso pode marcar a superfície durante o pré estiramento. Essas marcas permanecerão após a moldagem e podem ser notadas porque sempre aparecem surgindo dos centros das cavidades, uma vez que nessa posição que os plugs são fixados.
- Marcas dos buracos de vácuo que aparecem na superfície do plástico. Isso pode ser minimizado diminuindo o tamanho dos furos de vácuo – os diâmetros dependem basicamente da espessura do material a ser moldado. Outro recurso para eliminar esse problema é o uso de material sinterizado no fundo das cavidades do molde permeáveis ao ar. Isso evita a furação de canais de vácuo impedindo as marcas causadas por eles.



#### 4.6. Cantos finos

Esse problema pode ser devido ao design inadequado do molde. Deve-se utilizar raios de curvatura maiores em determinados pontos críticos. Outro problema pode ser inerente ao uso do plug (contra-molde). Material do Plug inadequado ao plástico utilizado, temperatura do plug inadequada, velocidade de entrada do plug inadequada podem causar afinamento demaisado do moldado.

Outro recurso para melhorar os cantos finos é o uso de balão para redistribuir melhor o material.

A utilização de moldes machos ou fêmeas deve ser analisada para favorecer os pontos onde é necessária uma maior resistência mecânica (por exemplo nos cantos). Isso favorecerá a deposição de mais material nesses cantos onde o material atinge o molde primeiramente.

#### 4.7. Chapa queimando (amarelamento)

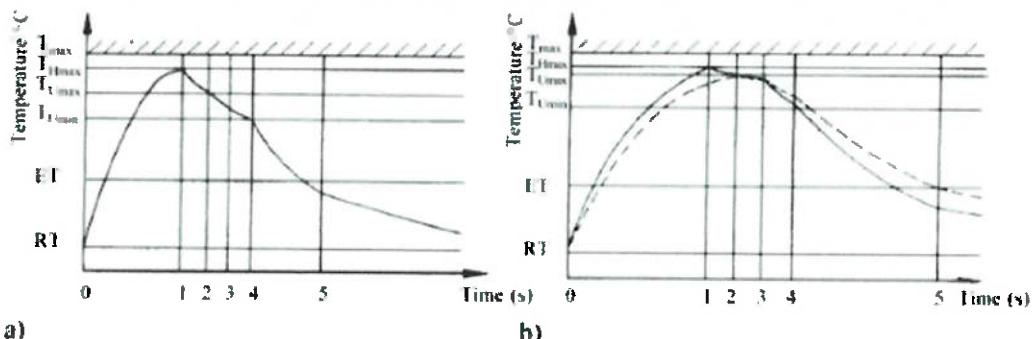
Ocorre freqüentemente em chapas espessas (acima de 5mm). Isto porque pelo fato do plástico ser uma material isolante térmico, a transmissão de calor por condução da superfície da chapa para seu interior é de forma lenta. Para sanar esse problema, deve-se preferencialmente, esquentar a chapa plástica pelos dois lados, com temperaturas dos fornos mais baixas e tempo de exposição da chapa à irradiação mais elevado. Isso evita com que a superfície da chapa amarele enquanto que o meio ainda não atinja a temperatura de termoformabilidade. A figura abaixo exemplifica isso.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMC – 581 Projeto Mecânico II

Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos



- a) Perfil de temperaturas durante termoformação em função do tempo para chapa fina para a qual a temperatura é considerada constante em sua espessura.
  - b) Perfil de temperaturas durante termoformação em função do tempo para chapa grossa para a qual a temperatura na superfície (linha contínua) é diferente da temperatura no centro (linha pontilhada).
- 1 Final do processo de aquecimento  
2 Começo da formação (pré esticamento, sopramento)  
3 Começo da formação  
4 Chapa em contato total com com a ferramenta  
4-5 Tempo de resfriamento  
5 Demoldagem

Fig 9. Evolução da temperatura em diferentes espessuras de chapa



Abaixo encontra-se o desenho esquemático de uma termoformadora para chapas grossas de três estações:

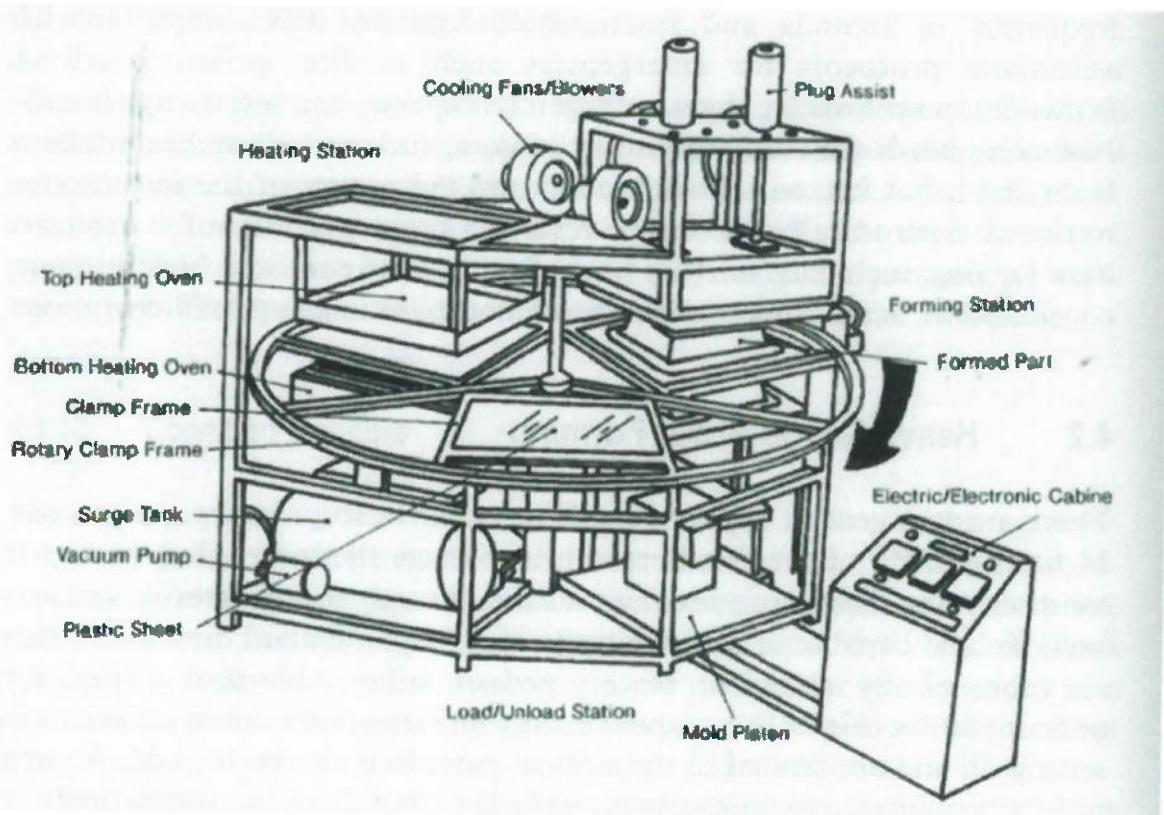


Fig. 10 Desenho esquemático de máquina termoformadora de 3 estações

#### 4.8. Produto contaminado

A contaminação do produto pode ocorrer no manuseio ou estocagem da matéria prima para a termoformagem: bobinas ou chapas plásticas. A presença de vapor d'água no ar pode contaminar materiais higroscópicos (aqueles que absorvem água com maior facilidade). Isso pode gerar problemas posteriores na termoformagem. Para esse tipo de material pode-se utilizar um processo de secagem em estufas antes da realização da termoformagem. Deve-se tomar cuidado com poeira no armazenamento do material. É conveniente o uso de capas protetoras para proteger a matéria-prima.

No manuseio, deve-se tomar cuidado para não sujar ou contaminar a superfície com agentes estranhos como óleo, graxa ou qualquer outra substância que possa comprometer a qualidade final do produto.



#### 4.9. Corte irregular

O corte das peças geradas por máquinas termoformadoras que moldam e cortam pode ter um formato irregular quando esta apresentar a estação de moldagem diferente da estação de corte. Apesar dos avanços controlados por servomotores de alta precisão, há o encolhimento do plástico no período de resfriamento que prejudica a precisão do corte. Esse problema é minimizado em máquinas onde a moldagem e o corte são realizados na mesma estação. Abaixo se encontra o desenho esquemático de uma termoformadora com estações distintas de moldagem e corte:

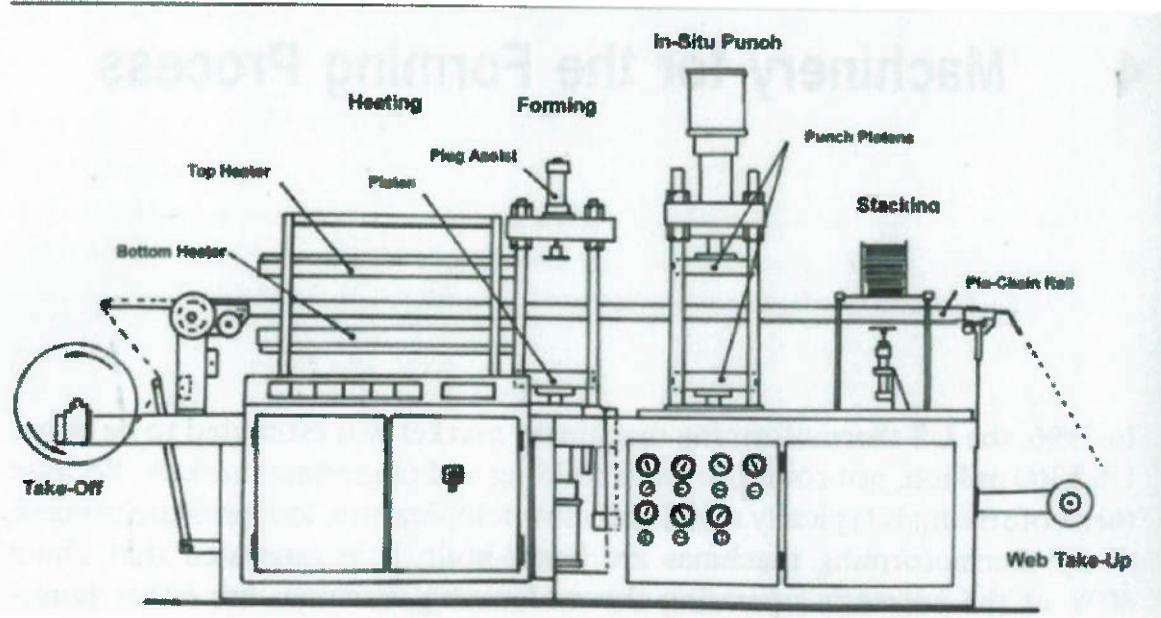


Fig 11. Desenho esquemático de uma máquina termoformadora do tipo roll fed Kiefel

Para máquinas termoformadoras de chapas grossas, os cortes que, na maioria das vezes é um processo manual com o uso de serras circulares e guilhotinas, pode ser substituído por robôs de 5 eixos (que utilizam ferramentas rotativas especiais para o corte de plástico) ou, em casos mais simples em máquinas de corte a laser ou jato d'água (para cortes em 2 dimensões). Isso garante uma perfeição da geometria final da peça. Uma das desvantagens é o elevado custo de implantação desses processos automatizados.



#### 4.10. Deformação na extração

Para a realização da extração das peças do molde existem dispositivos como extratores com molas e sopradores pneumáticos. Quando a pressão de regulagem dos extratores á base de pressão for muito elevada e a espessura das peças termoformadas forem reduzidas (abaixo de 0,3mm), isso pode causar deformação no fundo das peças originadas pelo dispositivo de extração.



## 5. Experimento

Realizou-se uma pequena experiência para se determinar a influência da temperatura e a influência de alguns parâmetros geométricos na distribuição de material na termoformagem. A seguir segue a descrição do experimento realizado e algumas conclusões.

Equipamento:

Para realizar a experiência utilizou-se uma máquina termoformadora manual modelo Vacunet/2 da Eletro-Forming. Deve-se ressaltar que esse equipamento não possui contra-molde (plug) nem balão.



Fig. 12 Máquina utilizada no experimento (Vacunet2 fornecida pela Eletro-Forming)



## ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMC – 581 Projeto Mecânico II

Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

O aquecimento da chapa plástica é feito por duas resistências elétricas tubulares (figura 13) controladas por dois pirômetros digitais. O vácuo é fornecido por uma bomba de vácuo de 1,5 HP modelo Paem de palheta seca.

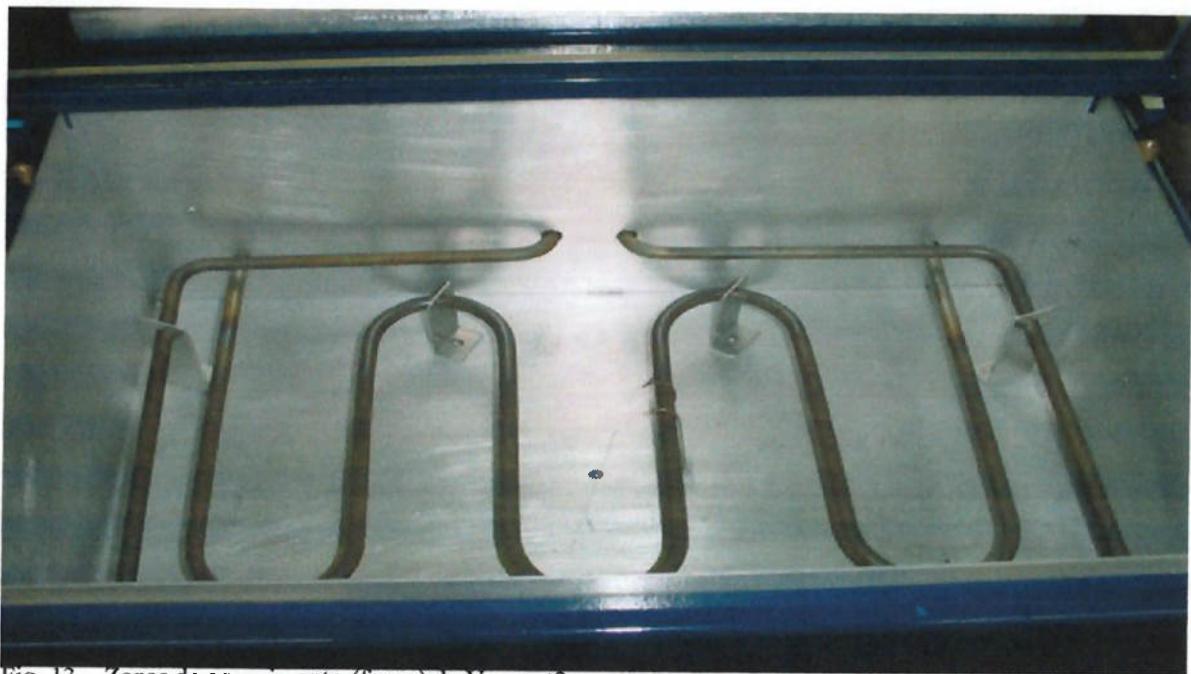


Fig. 13 – Zonas de aquecimento (forno) da Vacunet2

O molde utilizado foi um bloco de alumínio usinado contendo 54 cavidades (molde fêmea) de dimensões 50 x 49mm (na secção superior) e 22 mm de profundidade. As paredes laterais tem um ângulo de 4º de inclinação em relação a uma linha vertical e a concordância entre as paredes laterais e o fundo tem um raio de concordância de 4mm.

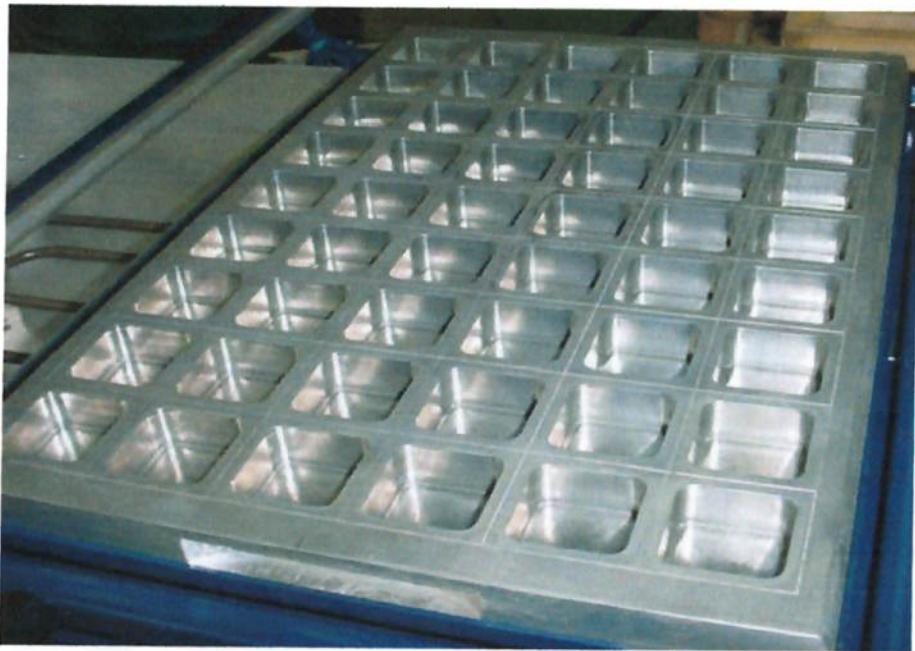


Fig. 14 – Molde preso ao quadro



Além disso, foi utilizado um micrômetro de marca Starrett para a medição da espessura em cada um dos pontos pré determinados.

Para a medição de temperatura da chapa plástica, utilizou-se um sensor infra-vermelho marca Raytek.



Fig. 15 - Instrumentos de medição

Para a moldagem utilizaram-se chapas de 450 x 650 mm de PVC com espessura de 0,4mm.

#### Procedimento

A máquina é ligada e programada para operar com as duas resistências elétricas a temperatura de 450 oC. Espera-se o equipamento entrar em regime permanente.

Em seguida, as placas a serem moldadas foram cortadas em tamanho adequado às dimensões do quadro da máquina ao qual a chapa é fixada de maneira que possa ir em direção do forno para aquecimento e voltar sobre o molde para sua posterior conformação.

Para a determinação da temperatura de moldagem, as chapas foram marcadas em determinados pontos onde depois foram realizadas as medições de temperatura durante o processo de aquecimento com o auxílio do sensor infra vermelho portátil descrito acima. No momento em que o filme atinge a temperatura desejada, leva-se o quadro com a chapa do forno ao molde e o vácuo é acionado automaticamente quando o quadro atinge a posição correta. Finalmente, depois de moldada, a peça é retirada do quadro para posterior análise dos resultados.



### Análise dos resultados

As chapas moldadas em temperaturas distintas foram numeradas . De cada chapa foram extraídas (separadas) duas cavidades ( peças) de onde anteriormente foram realizadas as medições de temperaturas. Em cada uma dessas peças , foram realizadas 3 medições da espessura em pontos distintos.

A tabela abaixo, cuja figura 16 ilustra as posições, mostra a variação da espessura em função do ponto medido e da temperatura.

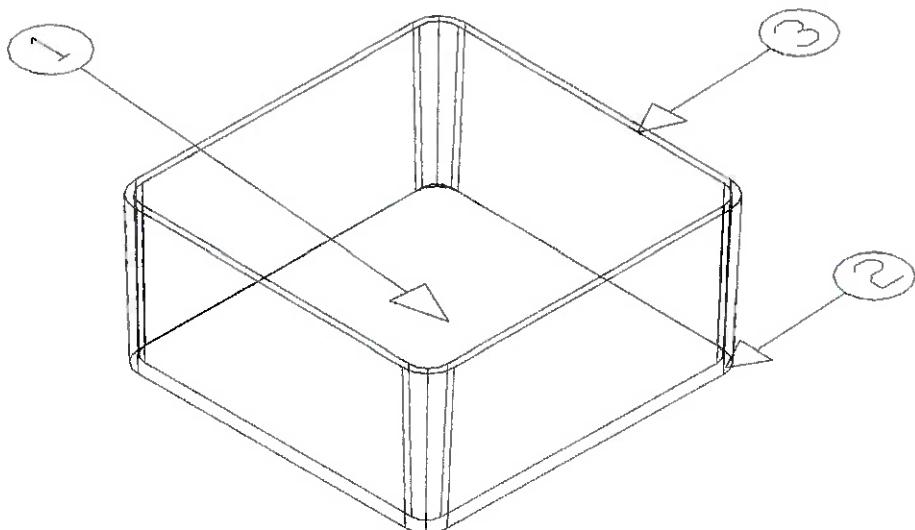


Fig. 16 - Ilustração de uma cavidade do molde com os pontos de medição de espessura

Tabela 5 – Variação da espessura em função da temperatura

Amostra	Meio(°C)	Canto(°C)	Espessura 1 meio	Espessura 2 canto inferior	Espessura 3 borda superior
1	150		0,15	0,12	0,23
1		153	0,13	0,08	0,28
2	163		0,12	0,075	0,22
2		168	0,15	0,085	0,21
5	168		0,17	0,1	0,2
5		170	0,14	0,08	0,215
3	183		0,15	0,075	0,21
3		184	0,13	0,07	0,25
4	189		0,1	0,14	0,19
4		190	0,12	0,07	0,24



## Conclusão experimental

Pôde-se verificar que a variação da espessura em relação a temperatura de moldagem foi pouco expressiva frente a localização do ponto medido. Deve-se ressaltar que a faixa de temperatura nas quais foi realizado o experimento estão dentro da faixa adequada para moldagem de PVC e não foi utilizado nenhum recurso para pré estiramento do material ( ex. plug ) com intuito de melhorar a distribuição de espessura na peça.

Como esperado, pôde-se verificar que a menor espessura encontrada (0,07mm) foi em um ponto próximo à quina da peça. A redução de espessura é considerável ( diminuição de 80 % da espessura original).

Para validação dos dados experimentais, seria necessário uma amostragem maior e utilização de métodos estatísticos com o intuito de se obter numericamente valores confiáveis que permitam uma análise mais detalhada da influência da temperatura na variação de espessura da peça.

Outro aspecto importante a ser frisado é que foi observado experimentalmente a existência da faixa útil de termoforagem. Isso pôde ser constatado quando foi feito o experimento com temperatura do plástico de 190 °C que causou um embarrigamento do plástico demasiado no processo de aquecimento e consequente má formação da peça com aparecimento de rugas e ruptura em uma das cavidades.

Esses pontos foram selecionados de modo a verificar a influência da presença de cavidades vizinhas àquele ponto medido. Desse modo, mediu-se a temperatura da chapa plástica onde seria moldada uma peça no centro do molde e outra na lateral, próximo ao quadro da máquina.

Fotos do experimento:

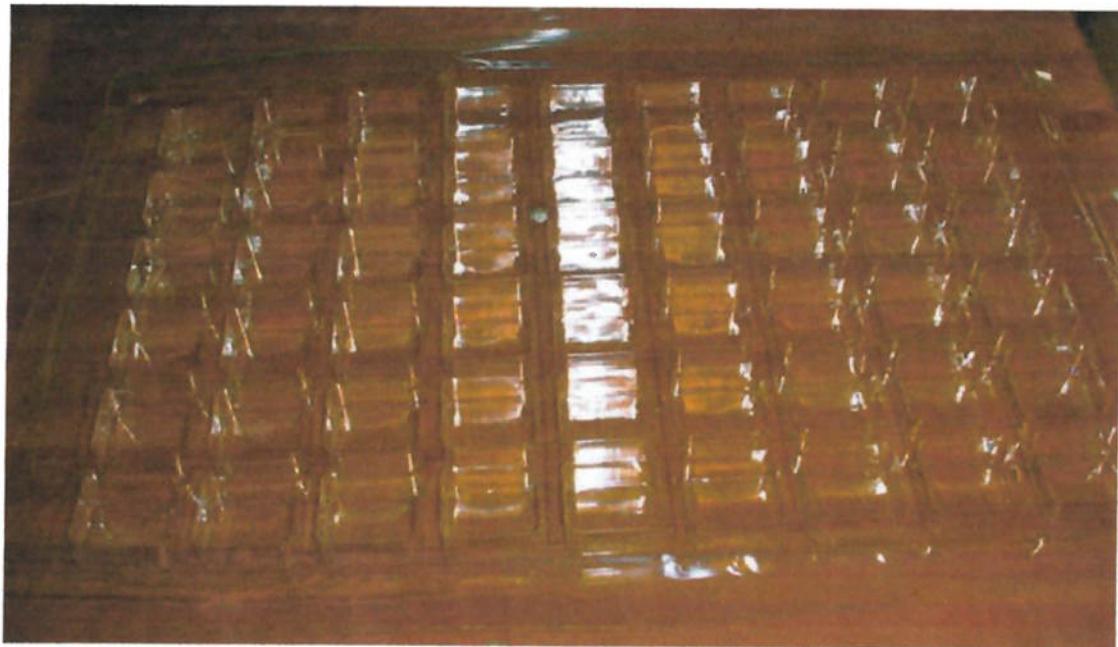


Fig. 17 – Peça moldada



Foi feito também um experimento para exemplificar o comportamento de um filme plástico termoformado, conforme proposto no item 1.2 do trabalho que consiste em desenhar uma malha de tamanho adequado sobre o filme plástico antes de efetuar o processo. Após a conformação pode-se observar as distorções causadas pelo processo.

As fotos abaixo ilustram como ocorre o estiramento da placa em condições ideais de temperatura para o filme de PVC utilizado.



Fig. 18 – Malha em chapa plástica durante o período de aquecimento

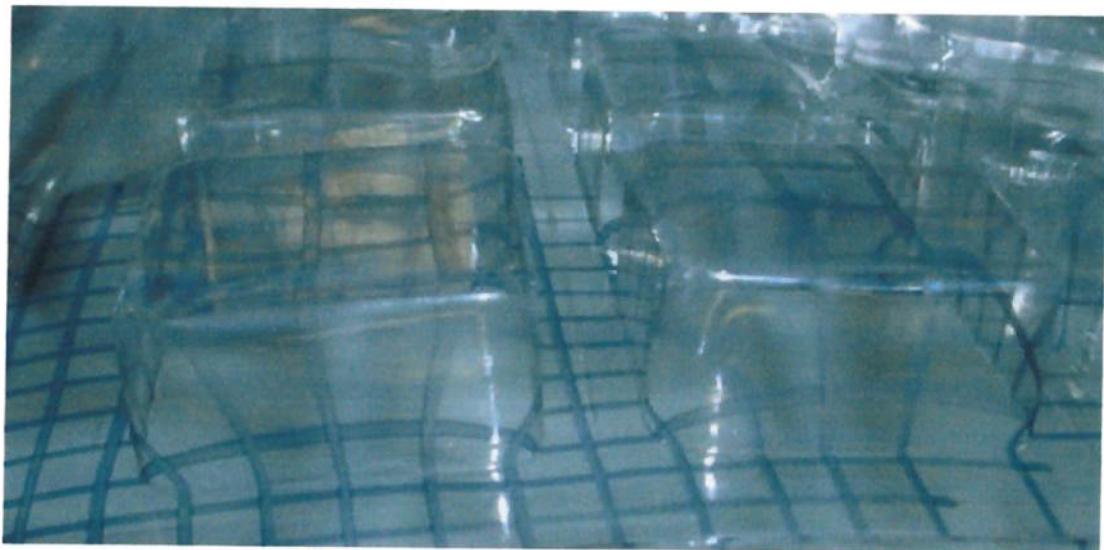


Fig. 19 – Malha distorcida após a moldagem



## 6. Conclusão

Esse relatório tem como objetivo fornecer uma base fundamentada na experiência prática aliada a uma base teórica para explicitar os principais problemas encontrados no processamento de termoplásticos por termoformagem.

O trabalho tem grande importância na elucidação de problemas referentes à termoformagem com suas possíveis soluções para a indústria plástica. Podemos citar a importância da utilização de recursos já conhecidos no processamento por termoformagem como o plug (contra-molde) e o balão no tocante a a uniformidade da distribuição de material ao longo do sentido do repuxo do material.

Como pôde ser verificado no experimento, a variação da distribuição de espessuras é muito mais dependente da geometria do que da temperatura do polímero. Pode-se chegar a essa mesma conclusão analisando outros parâmetros de termoformagem que são mais influentes na distribuição de espessura do que a temperatura do próprio plástico: Geometria e material do plug, geometria do molde, uso de balão e a distribuição de temperaturas na mesma superfície do plástico (uma chapa aquecida de forma irregular). Isso pode ser explicado considerando que se o material plástico foi aquecido como um todo tentando-se atingir uma temperatura uniforme em toda sua extensão e, considerando que as alterações reológicas do material em questão são pequenas dentro da janela de termoforabilidade, a distribuição de espessuras será pouco afetada pela variação da temperatura da chapa na banda considerada.

Esses softwares de elementos finitos tem o intuito de realizar uma previsão de distribuição de espessuras nas peças antes da manufatura do molde. Portanto, uma vez estabelecida a geometria, a temperatura da chapa como um todo (se aquecida de forma uniforme) na otimização e minimização da diferença de espessuras entre os pontos não repuxados e os pontos críticos.

O conteúdo desse trabalho foi extraído de uma base teórica de palestras, conferências, livros e feiras relacionadas ao tema. Podemos citar também que esse trabalho foi utilizado como base para uma aula expositiva sobre termoformagem ministrada para graduação na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para engenharia de materiais na matéria de processamento de materiais poliméricos no ano de 2002.



---

## ANEXO A - TABELAS

Para referência geral dos parâmetros de termoformagem para os diversos materiais pode-se utilizar a tabela abaixo. Deve-se ressaltar que os valores abaixo servem somente como uma referência e dependem da máquina termoformadora bem como outras variáveis de processo. Os valores dos fatores dos diversos materiais estão relacionados com o medido para o HIPS( Poliestireno de alto impacto) pois este é um material muito fácil de se termoformar.



#### **Tabela de Causas x Problemas em Termoformação**



**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**PMC – 581 Projeto Mecânico II**  
**Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos**

**Tabela - Principais Materiais termoformáveis e suas características**

Termoplástico	Densidade g/cm <sup>3</sup>	Tensão de escoramento N/mm <sup>2</sup>	Modulo de elasticidade N/mm <sup>2</sup>	Calor específico KJ/Kg.K	Temp. serviço : min/máx °C	Temp. derretimento dos cristais °C	Janela de temp. de transformação de processo ( Vácuo) °C	Temp. ótima do molde ( Vacuum - Roll Fed) °C	% Encolhimento	Material p/ Plugs	segundo leg.
PS	1,05	55	3350	1,3	-10/70	-	165 a 190	-	0,5	1,2	
HIPS	1,05	32	2150	1,3	-40/70	-	150 a 200	25	0,5	1,2,5	
SBS	1,03	31	1800	1,3	-20/70	-	140 a 170	25	0,5	1,3,5	
ABS	1,05	50	2500	1,3	-45/85	-	160 a 220	35	0,6 a 0,7	1,2,4,5	
SAN	1,08	73	3700	1,3	-40/75	-	165 a 190	-	0,4 a 0,7	1,2,4	
PVC	1,39	58	2900	0,9	até 65	-	155 a 200	25	0,4 a 0,5	1,2,5	
HDPE	0,95	28	1100	2,1/2,7	-50/95	125 + 15	170 a 200	50	1,2 a 7	1,4,5	
PP	0,92	30	1200	2	-30/110	158 + 10	160 a 200	25	1,5 a 1,8	1,3,4,5	
MA - extrud	1,18	72	3300	1,47	-40/70	-	160 a 190	-	0,5 a 0,8	-	
POM	1,41	66	3000	1,5	-40/100	165 + 10	170 a 180	-	1,5 a 2,5	-	
PC	1,2	61	2300	1,17	-100/130	-	180 a 220	-	0,9 a 1,1	-	
PA12	1,02	60	1600	1,6	-70/80	175 + 10	170 a 180	-	1,2 a 1,8	-	
PET G	1,27	49	1720	1,1	até 63	-	110 a 180	35	0,4 a 0,5	1,2,3,5	
PET A	1,34	30	2200	1,05	-40/70	-	110 a 120	35	0,4 a 0,5	1,2,3,5	
PET C	1,37	47	2600	1,1	-20/220	255 + 3	-	-	0,5 a 2,0	-	

Legenda:

- 1 - Madeira laminada
- 2 - Filtro
- 3- POM
- 4- PA 6 GGK
- 5 - Syntactic foam

Traços representam indeterminação/ não aplicabilidade



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMC – 581 Projeto Mecânico II

Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

---

## Bibliografia

Throne, J. L. , *Technology of Thermoforming* (1996), Hanser / Gardner, Munich and Cincinnati

Illig, A., *Thermoforming – A Practical Guide* (2001), Hanser / Gardner, Munich and Cincinnati

Throne, J. L. , *Understanding Thermoforming* (1999), Hanser / Gardner, Munich and Cincinnati

Apostila Extrusão e Termoformagem , EDN Estireno do Nordeste S.A

Apostila *Tecnologia Moderna de Extrusão de Chapas e Termoformação*, IAP – Instituto Avançado do Plástico



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PMC – 581 Projeto Mecânico II  
Propostas de Melhorias em Máquinas de Termoformação de Plásticos

---