



MANUAL DE TERMOFORMAGEM

UNIDADE I, MANAUS (AM)
Av. Torquato Tapajós, 5555 - Tarumã
69041-025 Manaus AM
Tel.: +55 (92) 3878-9000

UNIDADE II, TRIUNFO (RS)
BR 386, Km 419, Polo Petroq. do Sul
95853-000 Triunfo RS
Tel.: +55 (51) 3457-5800

UNIDADE III, BARUERI (SP)
Av. Tamboré, 25 - Alphaville
06460-000 Barueri SP
Tel.: +55 (11) 4197-7000

UNIDADE IV, MANAUS (AM)
Av. Abiurana, 1616 - Distrito Industrial
69075-010 Manaus AM
Tel.: +55 (92) 2101-7800



Termoformagem

Introdução:

A termoformagem é um modo de moldar lâminas dando forma ao contorno através da utilização de calor e pressão tanto positivas como a vácuo. As etapas do processo são: 1) fixação da lâmina; 2) aquecimento; 3) moldado; 4) esfriamento; 5) extração.

Na termoformagem, uma lâmina seca é aquecida a uma temperatura pré determinada na qual o material plástico amolece, mas de forma menor a sua temperatura de fusão. A mesma é esticada para cobrir o contorno do molde e logo é refrigerada na temperatura na qual o termoplástico passa a ser rígido, retendo assim a forma do molde.

A peça termoformada pode ser cortada para eliminar bordas desnecessárias, decorada e/ou convertida em artigos para diferentes aplicações.

Cada etapa do processo de termoformagem é vital na determinação da qualidade do produto final. Devem ser monitorados tanto a qualidade da lâmina utilizada, quanto os parâmetros de aquecimento, moldagem e esfriamento, para obtenção de peças de alta qualidade. A qualidade das estará dada pela uniformidade na espessura da parede, a aparência superficial, cor e aceitáveis propriedades físicas na aplicação final.

A termoformagem pode atingir uma ampla gama de espessuras desde as medidas finas utilizadas em containers de alimentos até lâminas mais grossas utilizadas na fabricação de interiores de geladeiras. O tamanho, desenho, e o tipo de peça, determinam a técnica de termoformagem e o equipamento a ser utilizado. Este informe cobre várias destas técnicas e o tipo de peças que melhor se amolda a cada uma.

A seguinte é uma guia de importantes fatores a considerar na correta eleição de uma equipe de termoformagem:

- 1) Capacidade
- 2) Custo (inicial e manutenção)
- 3) Tamanho (tamanho da peça e a capacidade da máquina)
- 4) Versatilidade
- 5) Tipo de aquecimento e esfriamento
- 6) Facilidade de mudanças de moldes
- 7) Construção de moldes
- 8) Fácil de reparar

Nesta publicação se tratarão temas gerais referentes ao processo de termoformagem, fazendo comentários específicos para o caso da utilização de poliestireno. Não se tratarão na mesma, detalhes mais específicos como, por exemplo, os materiais a serem utilizados para a construção de moldes, controladores de temperatura, desenho mecânico dos equipamentos, etc.

Termoformagem vs. Injeção

Muitas novas publicações requerem uma decisão prévia sobre qual processo deveria ser selecionado para converter *pellets* de matéria-prima numa peça final. Na maioria dos casos poderiam utilizar-se ambos os processos de forma satisfatória, baseando a escolha em uma precisa avaliação e estimativa do lucro potencial de cada alternativa.



Para isso deve-se ter em conta os seguintes importantes aspetos:

USO DA TERMOFORMAGEM:

VANTAGENS

- Menor custo de equipamento
- Possibilidade de menores espessuras de parede
- Capacidade de moldar peças de grandes superfícies
- Possibilidade de reduzir o tempo de desenvolvimento de um produto
- Menores custos nas mudanças na moldagem, motivado pelo menor custo ferramental
- Tempos de ciclo potencialmente menores

LIMITAÇÕES

- Maior geração de moagem
- Espessura de parede mais variável e menos controlável
- Menor brilho superficial
- Menor complexidade da peça
- Maior variação de peça a peça
- Processo nas duas etapas (Extrusão mais Termoformagem)

Alimentação

A termoformagem pode ser alimentada por lâmina continuamente proveniente diretamente do *extruder*, por lâmina bobinada ou por lâminas. Geralmente, a termoformagem de extrusão direta ou de bobina está limitada a uma espessura inferior aos 2,5 mm de espessura. As lâminas são cortadas usualmente em linha de processo de extrusão nas dimensões requeridas para uma determinada máquina termoformagem em espessuras que variam dos 760 micrones aos 11,5 mm dependendo dos requerimentos da peça.

O poliestireno Innova e o poliestireno biorientado Uniclear, podem ser termoformagens tanto em forma de bobina quanto de lâminas.

As lâminas podem, também, ser co-extrudadas laminadas e espumadas. As lâminas de poliestireno podem ser co-extrudadas para conferir-lhes propriedades diferentes à lâmina (maior brilho, camada barreira, como seladora, etc.). As películas laminadas costumam ser utilizadas como proteção, como decoração em aplicações de *packaging*. As lâminas espumadas oferecem menores custos e maior rigidez sobre a lâmina, embora é mais difícil de termoformar e usualmente a capacidade da termoformagem está limitada pela profundidade.

As seguintes propriedades têm importância significativa na termoformabilidade e qualidade da peça final: 1) dimensões (comprimento, largura, espessura); 2) tipo de superfície e cor; 3) orientação; 4) contaminação; 5) dureza; 6) conteúdo da umidade. Algumas destas propriedades se discutem em detalhe a continuação:

- 1) Uniformidade em espessuras: recomenda-se que seja aproximadamente 1,0% ou menos em ambas as direções, transversal à lâmina e longitudinal na direção da extrusão. Para aplicações comerciais mais críticas, a uniformidade requerida nas espessuras é da ordem do 0,5%. Isso é necessário com frequência quando a espessura da lâmina é menor a 2,5 mm. É difícil se obter esta tolerância durante o processo de extrusão, mas os benefícios nestes casos são significativos. Um adequado controle da espessura, como o descrito acima, pode se traduzir numa maior produção de peças, menor variação da espessura de peça a peça e menos *scrap*.
- 2) Orientação (alongamento interno): durante a extrusão, uma resina termoplástica pode ser esticada alinhando as moléculas do polímero mais na direção do alongamento que na outra direção. Isso geralmente ocorre na direção da extrusão e é descrito como uniaxialmente



orientado. A magnitude da orientação pode ser determinada pondo amostras de PS numa estufa, a 145°C, durante 30 minutos, entre duas folhas finas de papelão ou alumínio empoeirados com talco. A quantidade de contração representa a magnitude da orientação. Contrações da ordem do 10 ao 15% na direção da extrusão, é considerada normal, embora é desejável algo menos do que isso. As contrações na direção transversal são geralmente menores, normalmente da ordem do 5% ou menos. Uma grande orientação poderá causar um alongamento diferencial durante a termoformagem. A resistência ao alongamento é maior no sentido da orientação que no transversal à mesma. Para espessuras maiores a 4,5 mm, uma alta orientação (>15%) pode ocasionar que a lâmina se solte das correntes de sujeição, durante o processo de aquecimento. Para espessuras menores a 4,5 mm, uma alta (>25%) pode causar o mesmo fenômeno. Quando a lâmina é orientada em ambas direções (na direção à extrusão e transversalmente à mesma) se diz que está biaxialmente orientada. É o caso do nosso Uniclear, poliestireno cristal que possui as moléculas do polímero orientadas em ambas as direções, conferindo-lhe ao poliestireno melhores propriedades para o processo da termoformagem. Desta forma pode-se moldar um poliestireno transparente sem ter que se utilizar um poliestireno de alto impacto, que dado o seu conteúdo de polibutadieno o faz mais fácil para moldar, mas perdendo assim a sua transparência.

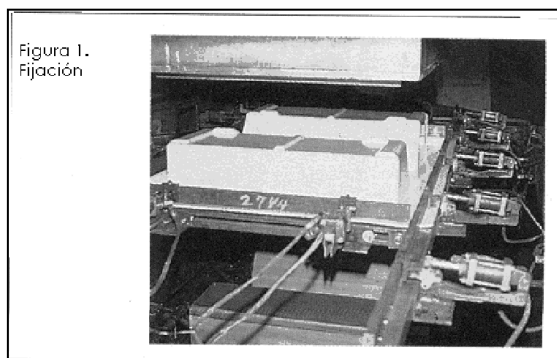
- 3) Dureza: a dureza (resistência ao impacto) de uma lâmina é a capacidade de resistir à ruptura quando bate com um objeto. A dureza pode afetar a performance da peça termoformada durante o ensablado, transporte ou em sua utilização final. A resistência ao impacto se determina comumente utilizando a prova de impacto ao dardo. A propriedade de impacto das lâminas de poliestireno Innova não é somente função das propriedades inerentes à resina virgem, se não da influência combinada da resina, condições de extrusão, qualidade superficial da lâmina e conteúdo de recuperado.
- 4) Outras análises: propriedades como a resistência à tração e à ruptura, alongamento à ruptura e módulo de elasticidade, podem ser avaliados em lâminas as peças moldadas, de acordo aos procedimentos ASTM.

As lâminas extrudadas geram freqüentemente carga estática. Isso provoca que a mesma tenda a atrair partículas do meio ambiente. Produtos termoformagens a partir de lâminas cobertas com pó ou sujas, exibirão defeitos superficiais (ver guia de resolução de problemas). Deveriam-se cobrir as mesmas com uma película de polietileno durante prolongadas paradas, como feriados ou fins de semana.

A produtividade da termoformagem pode se aumentar, ao mesmo tempo em que se minimizam problemas superficiais mediante o pré- da lâmina, antes de ser moldada. As lâminas de Innova PS e Uniclear BOPS podem ser aquecidas pondo elas em contato com ar forçado num forno de 50°C a 70°C no mínimo por 3 horas e de preferência durante a noite (8 horas).

Fixação da lâmina

Esta é a primeira etapa no processo da termoformagem. Requer-se que a lâmina ou lâmina esteja firmemente sujeita nas molduras do moldado. Embora exista uma grande variedade de mecanismos de feche, o requerimento principal é o de reter a lâmina plástica o suficientemente tensa para evitar que fique de fora da moldura de moldado durante o aquecimento e moldagem. Durante o aquecimento inicial de uma lâmina termoplástica, se libera uma significativa tensão na mesma. este nível de tensão está diretamente relacionado com a orientação na extrusão. Os sistemas de sujeição que podem ser encontrados no mercado são adequados para suportar espessuras de lâminas pesadas (>4,5 mm) e leves espessuras de lâmina (<4,5 mm) com orientações normais de lâmina (<15% e <25% respectivamente). Ver figura 1.



Aquecimento

Existem três formas de aquecer uma lâmina:

Condução, onde a lâmina se coloca em contato direto com uma fonte de calor, como uma placa quente.

Convecção, onde a lâmina se esquentava com o ar quente.

Radiação, onde o principal meio de calefação da lâmina é a emissão de radiação infravermelha proveniente de pratos cerâmicos, resistências metálicas ou queimaduras de gás.

As lâminas finas alimentadas em forma de bobinas se esquentam usualmente fazendo-as passar através de aquecedores radiantes infravermelhos. Também se utiliza uma combinação de aquecimento por radiação e convecção.

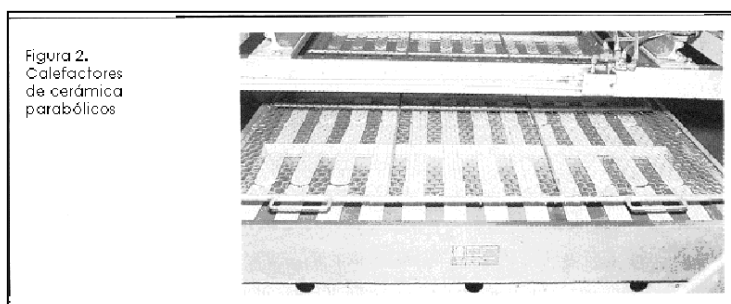
Para se obter uma ótima qualidade da termoformagem é muito importante ter um controle muito estrito da temperatura da lâmina antes dela ser moldada. O sistema mais comum é o aquecimento por radiação. Este requer exatidão e precisão nos instrumentos de controle da fonte de calor. A energia infravermelha irradiada desde uma fonte a uma temperatura de 425°C a 650°C na faixa de 3,0 a 4,0 microns de comprimento de onda, é o melhor para que a energia seja absorvida por uma lâmina plástica. Existem inclusive no mercado sistemas de aquecimento que utilizam queimaduras à gás natural. Estes, geralmente apresentam a vantagem frente aos elétricos de ser energeticamente mais econômicos. Os poliestirenos Innova PS e Uniclear OPS são bons isolantes, por este motivo os aquecedores devem ser localizados corretamente com respeito à localização da lâmina afim de não provocar super-aquecimento da mesma. Este efeito se caracteriza por uma mudança de cor (amarelamento) e a aparição de pressões superficiais. Normalmente as lâminas de grandes espessuras (>4,5 mm) acostumam ser sub-aquecidas causando normalmente o seu desprendimento das fixações no momento de serem moldadas. Este problema se vê incrementado quando a orientação da lâmina é alta (para uma espessura >4,5 mm : >15% e para <4,5 mm: >25%). Ainda que possa ser alcançadas uma boa uniformidade e precisão na temperatura do aquecedor, a temperatura da lâmina poderia não ser uniforme, dado que pequenas correntes de ar ocasionadas por janelas ou portas abertas, podem alterar drasticamente a temperatura da lâmina. Por este motivo, devem tomar-se as precauções pertinentes a fim de proteger o equipamento de correntes de ar.

Em algumas aplicações, a peça fundamental terá uma espessura de parede não uniforme, embora a lâmina tenha sido uniformemente aquecida. O desigual alongamento da lâmina deve-se ao desenho da peça. Nestes casos especiais, um aquecimento não uniforme e controlado da lâmina pode corrigir estes problemas, se obtendo uma maior uniformidade na espessura da parede da peça termoformada. Isso se consegue colocando um elemento não inflamável que atue filtrando ou deduzindo a quantidade de calor entre a lâmina e a fonte de calor. Isso diminuirá o fluxo de calor em certos setores da lâmina. Este procedimento pode ser eliminado incorporando elementos de calefação parabólicos de cerâmicas com controle elétrico de temperatura (ver Figura 2), que

permite aquecer adequadamente a lâmina para se obter uma melhor distribuição do material na peça que está sendo moldada.

Pode-se obter uma melhor qualidade da termoformagem e ciclos mais econômicos através do pré-aquecimento das lâminas de grossa espessura (maior de 3 mm) antes da moldagem. Se a lâmina é aquecida em ambas as faces, pode-se omitir o pré-aquecimento, exceto em espessuras maiores a 5,5 mm. Nestas espessuras é requerido aquecer em ambas as faces para evitar ciclos excessivamente longos e super-aquecimentos superficiais. Para uma ótima termoformagem das lâminas de Innova PS e Uniclear BOPS se deveria controlar a temperatura da lâmina em função dos valores indicados na Tabela 1.

Para lâminas de grande espessura (>4,5 mm) a temperatura mínima que se indica poderia chegar a ser demasiado baixa para uma correta termoformagem.



Moldagem

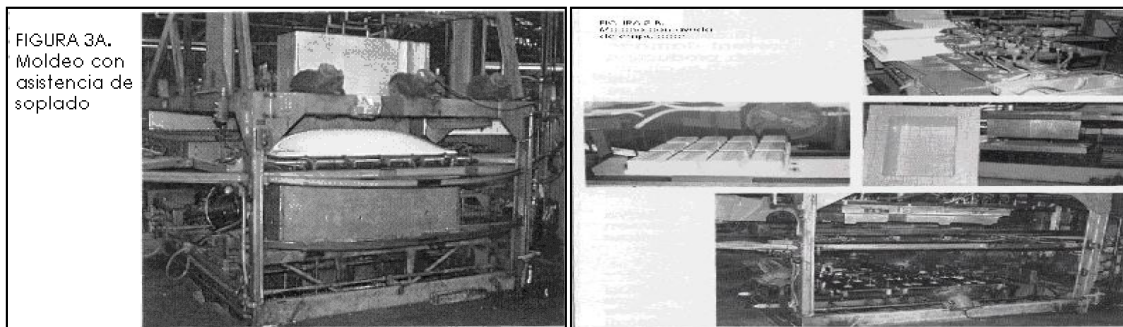
A moldagem é a etapa na qual a lâmina amolecida é forçada a cobrir o contorno de um molde. Existem basicamente três formas de operar: Primeiro, utilizando o vácuo para fazer com que a lâmina copie a forma do molde. Segundo, mediante a utilização da pressão de ar positiva, que empurra a lâmina até o molde. Terceiro, pode utilizar-se uma força mecânica. Também se pode realizar uma combinação de alguma destas, dependendo, claro, do desenho da peça

No primeiro caso, a lâmina já amolecida é transferida para o molde e o ar deixa tensa a lâmina sobre a superfície do molde. O vácuo pode logo ser utilizado para evacuar o ar que se encontra entre a lâmina e o molde. Isso faz com que a lâmina seja atraída e se mantenha firme contra a cavidade do molde.

A pressão de formagem empurra a lâmina e a segura contra o molde mediante ar e pressão. O que fica entre a lâmina e o molde se deixa escapar.

A utilização de forças mecânicas implica na utilização de sistemas com moldes gêmeos, que empurram e espaçam os bastidores. Os que empurram são componentes mecânicos utilizados para ajudar à lâmina a chegar as zonas mais profundas do molde.

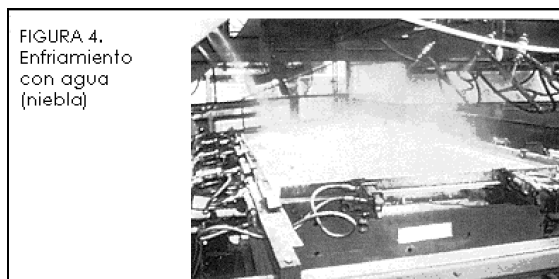
Outro mecanismo que pode ser utilizado para otimizar a distribuição do material é mediante um pré-alongamento da lâmina numa bolha com ar a pressão, antes da moldagem final, utilizando pressão e/ou vácuo. Isso é utilizado nos casos em que a peça é muito profunda e sempre utilizando o pistão (caso do interior de uma geladeira, Figuras 3 A e 3 B).



A utilização de forma conjunta de ar e pressão e vácuo, se traduz na superior qualidade nos detalhes da peça termoformada. A descrição de várias das técnicas comerciais utilizadas e as suas vantagens se descrevem no Agregado C.

Os parâmetros de controle para a moldagem a vácuo 1) o nível de vácuo e 2) o intervalo de tempo em que aplica a pressão. Os níveis de pressão podem variar entre 0 e 250 psi (17,5 kg/cm²) dependendo do desenho da peça e a técnica de moldagem utilizada. Os valores de vácuo estão normalmente entre 380 y 635 mm de Hg. O intervalo de tempo em que é aplicada a pressão é usualmente dada pela capacidade de esfriamento do molde.

Também existem parâmetros de controle adicionais como a temperatura de molde, temperatura do pistão e velocidade do pistão. Para o Innova PS e Uniclear BOPS as temperaturas de molde recomendadas beiram dos 40 aos 70°C. A temperatura dos pistões se baseia na técnica de moldagem e o desenho da peça. Nos casos em que a temperatura do molde não pode se ajustar, o tempo de moldagem usualmente é menor a fim de evitar superaquecimento do molde.



Esfriamento

Esta é usualmente a etapa controladora do tempo do processo de termoformagem. Isto é implementado mediante perda de calor por condução no molde e perda de calor por convecção do ar circundante.

É importante o controle da quantidade de calor eliminado já que isso por sua vez determina a contração da peça. Isso se realiza geralmente controlando a temperatura do molde. Pode se incrementar a quantidade de calor eliminado mediante a utilização do ar forçado sobre a fase exposta da peça. Algumas vezes se utiliza uma neblina aquosa conjuntamente com ar forçado para aumentar a capacidade de esfriamento do ar. (Ver figura 4). Também podem ser utilizados ventiladores a fim de melhorar ainda mais o requerimento de esfriamento. Para as lâminas feitas com Innova PS e as Uniclear BOPS, devem ser esfriados por baixo de 125°C para que a peça seja o suficientemente estável para evitar que se rompa no momento da extração. Para altas produções se utilizam moldes feitos de materiais com alta capacidade de condução do calor como os feitos em alumínio. A peça se seguirá esfriando até a temperatura ambiente logo de ser desmoldada. Desta forma, o lapso de tempo entre a extração e o corte deveria se manter constante para evitar introduzir erros nas dimensionais no momento do corte.

Extração

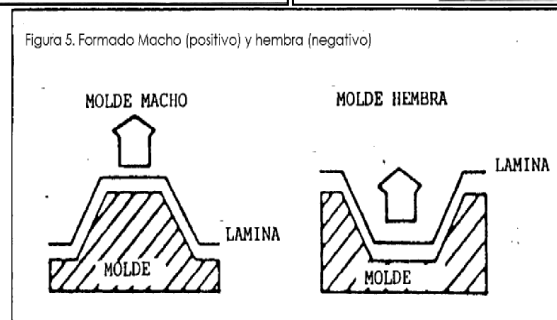
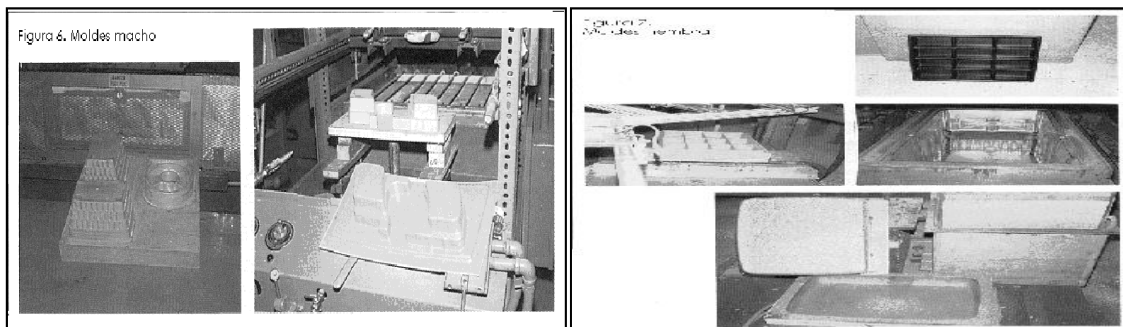
É a etapa final no processo da termoformagem. Uma vez que a peça é suficientemente esfriada para permanecer dimensionalmente estável, ela é removida do molde e moldura. Se a peça tende a ficar dar agarrada no molde se pode aplicar uma pressão positiva entre a peça e molde. Isso permitirá que a peça seja removida mais facilmente.

Técnicas da Termoformagem

A termoformagem tem evoluído através dos anos, de um relativamente simples processo de formagem em duas etapas (aquecimento/esfriamento), a um que envolve um grande número de sofisticadas etapas. Técnicas como enchimento por sopro (*billow blow*), utilização de pistões, utilização do vácuo e pressão tem-se incorporado para melhorar a distribuição do material, melhorar os detalhes da peça e incrementar a produtividade. A continuação se descreve um panorama referente a estas técnicas, enquanto que alguns detalhes se apresentam no Apêndice C.

1. Formagem, Macho e Fêmea (positivo / negativo)

A formagem Macho é aquela no qual a lâmina é formada "sobre" a superfície do molde e tem que se extrair no sentido de cima para ser removida. A formagem fêmea se produz quando a lâmina é formada "dentro" do molde e tem que ser tirada fora do mesmo para ser extraída. Pode ser utilizada qualquer de ambas as técnicas e o molde pode estar tanto acima com em baixo da lâmina durante a formagem, sendo este macho ou fêmea. (Ver figuras 5, 6 y 7).



Existem importantes considerações na eleição de moldes macho e fêmea.

2. Distribuição de material – Macho=Fêmea

Geralmente, pode se obter a mesma qualidade de distribuição de material com formagem macho e fêmea. No entanto, as variáveis de processo serão diferentes e estarão descritas mais embaixo, na seção (3). As seções dos cantos serão mais grossas para os moldes macho.

3. Aparência da peça – Vantagem Fêmea

Comumente, a fase em contato com o molde terá menor brilho logo da termoformagem. Quando se produzem peças mate ou de baixo brilho, este fato não de importância relevante. Sim é importante a aparência da fase que está em contato com o molde (macho ou fêmea), então os



defeitos como pó no molde ou imperfeições no molde, afetarão negativamente a qualidade superficial da peça. Marcas de molde, chamadas "linhas de esfriamento", aparecerão na peça formada em ambas as técnicas. Elas serão o resultado do contato da lâmina quente com o molde em diferentes momentos e temperaturas durante a moldagem. Estas marcas são mais difíceis de eliminar com o molde macho. São facilmente minimizadas através de ajustes nas temperaturas de lâmina e molde. Prefere-se a moldagem com macho quando se utilizam lâminas impressas ou decoradas. Pode-se obter melhor o detalhe de impressão quando esta não toca o molde.

A formagem fêmea se utiliza para peças nas quais a fase na qual é importante a aparência não está em contato com o molde onde também se lhe requer alto brilho. No entanto, como se explica no apêndice C, muitos moldes fêmeas profundos utilizam a ajuda de pistões, para melhorar a distribuição do material. O pistão se põe em contato com a parte interna (fase com necessidade de uma melhor aparência) resultando em marcas do pistão. Estas, como as marcas de molde, podem ser minimizadas, mas não eliminadas.

Tabela 1 – Variáveis da termoformagem

Macho	Fêmea
Temperatura de molde Tamanho da bolha	Temperatura de molde Tamanho de bolha Temperatura de pistão Velocidade de pistão Variação na manutenção do vácuo

Tabela 2 – Técnicas da termoformagem

Macho	Fêmea
Moldagem positiva Sopro a vácuo Sopro vácuo/pressão	Moldagem negativa(vácuo) Vácuo com pistão Pressão com pistão Sopro- pistão-vácuo Moldagem por contato

4. Resposta às variáveis de moldagem – Vantagem Macho

Existem mais variáveis potenciais que afetam a qualidade da peça na formagem fêmea do que na formagem macho. Cada peça e molde tem um equilíbrio destas variáveis através das quais se obtém uma qualidade desejada de peça. Este equilíbrio somente pode determinar-se experimentalmente. As descrições da cada variável se incluem no apêndice C.

5. Custo de equipamento – Vantagem Fêmea

Os custos da moldagem macho são usualmente maiores. Isso se deve a que os moldes macho requerem um maior e custoso controle de temperatura, precisão no desenho dos cantos para poder extrair a peça e o custo do acabado superficial necessário, a fim de realçar a aparência da peça se a fase que a necessita estiver em contato com o molde.

Adicionalmente, os moldes machos são mais susceptíveis a se danificar no manejo de planta.

6. Técnicas de Termoformagem.

As técnicas específicas de termoformagem na tabela 2 estão descritas no apêndice C.

Em todas estas, a ajuda de pressão pode ser agregada no lado oposto ao do vácuo. A utilização de pressão melhora a cópia de detalhes ou então permite que a lâmina seja formada a temperaturas mais baixas. Esta técnica se utiliza comumente na termoformagem para a indústria do *packaging* industrial.

EQUIPAMENTOS DE TERMOFORMAGEM

Introdução

As lâminas ou bobinas (provenientes de processos de extrusão, calandrado, etc.) feitas com Innova PS e Uniclear BOPS podem ser processadas utilizando alguma das técnicas que se descrevem no Apêndice C. Os equipamentos de termoformagem podem se classificar em função do tipo de alimentação. Segundo esta classificação existem dois tipos básicos. Um deles utiliza lâminas pré-cortadas; o outro parte de uma alimentação contínua (bobina) ou diretamente de uma linha de extrusão. Outra classificação que se pode fazer é em função do tipo de aquecimento utilizado para poder termoformar. Desta forma os equipamentos podem se agrupar principalmente em dois grupos. Um deles se vale da radiação emitida por uma fonte de calor; o outro utiliza uma placa quente que por contato com a lâmina transmite o calor necessário para o processo de termoformagem.

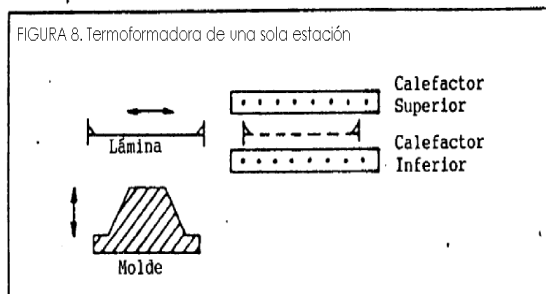
Máquinas alimentadas com lâminas

Estas máquinas se descrevem como:

1) Máquinas de estação única; 2) máquinas de quadro móvel; 3) máquinas rotativas.

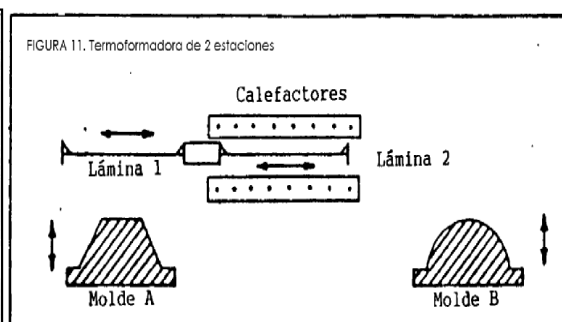
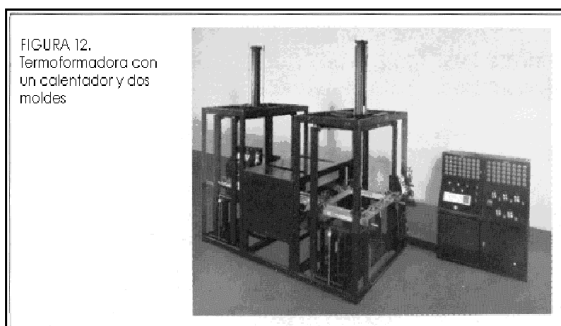
1. Termoformagens de estação única

Nestas máquinas a fixação da lâmina, o aquecimento, o esfriamento, o esfriamento e a expulsão se realizam numa única estação. Quando a lâmina é fixada, permanece estacionária. Os aquecedores se posicionam sobre e/ou embaixo da lâmina para elevar a sua temperatura para ser formada. Logo, os aquecedores são removidos, o molde e/ou o pistão é movido mecanicamente para se por em contato com a lâmina quente, seguindo por pressão e/ou pressão aplicada para formar a peça. A mesma é esfriada no lugar. O molde é retirado e a é peça extraída. (Ver as figuras 8, 9 e 10)



2. Termoformagem de quadro móvel

Nestas máquinas a lâmina é fixada em um quadro móvel localizado ao lado de um aquecedor estacionário. O quadro contendo a lâmina é mecanicamente movido até o aquecedor ou aquecedores. Quando a lâmina alcança a temperatura de formado, é retirada até a sua posição original. Ali, o molde se move mecanicamente contactando a lâmina quente, onde é formada e esfriada. Logo de se retrair o molde, se extrai a peça termoformada. Poderiam existir dois moldes, um a cada lado dos aquecedores, assim, uma lâmina é aquecida enquanto a outra é formada, esfriada e extraída. Neste caso, duas lâminas são transportadas ao mesmo tempo elevando a produtividade frente a um único molde de termoformagem. Isso se realiza sem o gasto de um segundo jogo de aquecedores. (Ver figuras 11 y 12)



Máquinas alimentadas em forma continua

Por sua vez, estes tipos de máquinas podem se descrever como: 1) máquinas em linha direta 2) máquinas tambor; 3) máquinas em linha (diretamente do extruder). (Ver figura 13)

1. Termoformagens lineares (*straight line thermoformer*)

Neste tipo de máquinas se alimenta em forma continua a lâmina proveniente de uma bobina e é sujeita a uma corrente transportadora que a leva até um banco de aquecedores. O comprimento desta zona de aquecimento é usualmente maior à subsequente estação de formado, o que permite um tempo suficiente de aquecimento. A lâmina quente continua até a estação de formado e logo sai. A lâmina pode se movimentar em etapas ou continuamente. Se o faz em forma contínua, a estação de formado deveria estar sincronizada a se movimentar com a lâmina. Este tipo de formado se utiliza em aplicações de baixa espessura como *packaging* (copos, bandejas, potes).

O corte é usualmente parte da operação e é realizado durante a etapa de esfriamento. Ao final do recorrido o recorte proveniente das peças extraídas é destinado à utilização no processo de extrusão. (Ver figura 19)

Dentro desta classificação também existe outro grupo de máquinas que utilizam alimentação contínua a partir de uma bobina mas diferem das anteriores pela maneira que utilizam para aquecer a lâmina e na forma de fixação da mesma. São as máquinas normalmente chamadas como de aquecimento por contato. Com este sistema a bobina se desenrola passando por uma zona de pré-aquecimento e em seguida a área de moldagem, onde a lâmina é manipulada por um mecanismo de pás duplas, que fecha a prensa formadora. Os passos que seguem no processo de termoformagem (aquecimento, moldagem, corte e expulsão) se realizam nesta mesma estação. Para tanto, mediante o uso de moldes fêmea (negativos) se faz passar ar comprimido através do molde assegurando assim o contato direto do material plástico com a placa de calefação aquecida. (Ver figura 20-a) Quando a lâmina alcança a temperatura adequada para ser formada elimina-se o ar fora do molde e se aplica ar sob pressão por centenas de pequenos orifícios da placa de aquecimento que faz com que o material rapidamente tome a forma dada pelo interior da cavidade do molde. (Ver figura 20-b) Enquanto se elimina o ar da formadora, o prato de aquecimento é movido para cima fazendo mover cunhas dispostas no contorno do molde as que penetram a lâmina deixando apenas material sem corte suficiente para manter as peças



conectadas ao resto da lâmina que está presa ao sistema de transporte do material. (Ver figura 20-c) A placa metálica se separa do molde e se produz a expulsão das peças termoformadas até abaixo por meio de ar comprimido. (Ver figura 20-d) As peças pré-cortadas, ainda ligadas à lâmina são transportadas ao local onde são separadas do recorte e empilhadas. (Ver figura 20-e)

Os dois sistemas descritos acima apresentam vantagens e inconvenientes e sua escolha dependerá das necessidades de cada aplicação. O texto a seguir é um resumo de alguns dos aspectos mais destacados na escolha de cada sistema.

a) Controle de temperatura – Vantagem contato

Mediante o uso da placa metálica se pode transferir calor de maneira uniforme e exata com uma máquina de aquecimento por contato. Isso é especialmente útil no caso de Uniclear BOPS onde a faixa de temperaturas de trabalho durante a modelagem é menor que quando se utiliza lâmina feita com Innova PS.

b) Produtividade – Vantagem radiação

Atualmente existem modernas máquinas de radiação que, por não necessitar estar em contato com a lâmina e a possuir uma grande superfície para termoformar, podem alcançar regimes muito bons de produção, enquanto as máquinas de contato estão mais limitadas.

c) Desenho de moldes – Vantagem radiação

As máquinas de radiação podem termoformar moldes com bordas negativas já que dispõem do contramolde que permite a operação. Por outro lado, as máquinas de contato formam contra a placa de aquecimento plana limitando dessa forma o desenho da peça.

d) Custo de sistema / matrizes – Vantagem contato

Em geral, o investimento para a aquisição de um sistema de contato é menor que uma máquina de radiação de alta produtividade. Da mesma forma o custo das matrizes é inferior devido a simplicidade dos moldes, o menor tamanho e o material utilizado na construção dos mesmos, pois não têm a exigência de uma máquina de radiação.

e) Velocidade de troca de moldes – Vantagem contato

As máquinas de contato possuem um desenho compacto e menores fixações que os de as máquinas de radiação, permitindo assim efetuar trocas de moldes com maior rapidez.

2. Termoformagens de tambor ou roda

São similares às termoformagens lineares, mas a passagem da lâmina se dá sobre um tambor ou roda em vez de um plano na linha de alimentação. Este tambor vai girando nas estações de aquecimento, moldagem e resfriamento. Este tipo de sistemas requer muito menos espaço que as máquinas lineares mas são mais difíceis para sua manutenção. (Ver figura 21)

3. Termoformagens em linha (*In – Line*)

Este processo surge para aproveitar a lâmina quente que sai do *extruder*. Desta forma, a lâmina não tem que ser re-aquecida. Transporta-se desde a extrusora diretamente até a estação de termoformagem. Usualmente existe suficiente distância entre o *extruder* e a termoformagem, o que permite que a lâmina vá se esfriando à temperatura de termoformagem. A etapa de termoformagem tem que estar sincronizada com a velocidade de saída da lâmina do *extruder*. Este tipo de termoformagem está usualmente limitado a uma espessura de lâmina menor que 3mm e aplicações não críticas de termoformagem. Este processo é mais difícil de controlar e sua maior desvantagem é que enquanto a termoformagem está trabalhando com a extrusora, uma falha em qualquer dos dois equipamentos causará a parada de ambos. (Ver figura 22)



Moldes para Termoformagem

A termoformagem permite o uso da mais ampla classe de materiais para moldes de qualquer processo de fabricação de plásticos.

Gesso, madeira, epóxi, poliéster ou combinações destes materiais podem ser usados para aplicações onde o volume a produzir não é suficiente para afrontar o custo de moldes de metal de temperatura controlada. O material mais utilizado para a confecção de moldes de alta produção é o alumínio fundido ou maquinado. As vezes se costuma aplicar coberturas fortes à superfícies dos moldes de alumínio para incrementar sua vida útil naquelas aplicações onde os moldes estão expostos à ação altamente abrasiva de algumas resinas termoplásticas.

Também se tem fabricado moldes de bronze e logo cromados em prata para adquirir uma maior vida útil.

Para fazer com que a lâmina termoplástica tome a forma do molde se emprega basicamente vácuo e ar comprimido. O vácuo se cria através de pequenos orifícios estrategicamente dispostos no molde de maneira a permitir que a lâmina consiga contato perfeito com a superfície do molde.

O uso de orifícios através do molde é o meio mais comum para distribuir a passagem de corrente de ar. Estas são usadas para extrair ar entre a lâmina quente e o molde e para gerar o vácuo para a moldagem.

Mesmo podendo usar vários materiais para a fabricação de moldes, se escolhe o alumínio para aplicações de alta produção. Para altos valores de produção, o molde deve ser esfriado para evitar a acumulação de calor no molde com temperaturas de superfície de molde excessivamente altas. As altas temperaturas de moldes fazem com que as peças fiquem grudadas nas cavidades, aumentando o tempo de esfriamento antes de remover a peça. O alumínio possui uma alta condutividade térmica, o que permite a incorporação de canais de água de esfriamento. Estes canais estão usualmente desenhados para fluxo turbulento, conferindo o controle necessário de temperatura de molde. Estes preferentemente deveriam ser desenhados com um valor de fluxo suficientemente alto para conseguir um diferencial de temperatura de no máximo 3°C entre entrada e saída.

Fatores de desenho de peças

O desenho de um produto geralmente determina a técnica de termoformagem a aplicar. Discutiremos alguns dos mais significativos fatores concernentes a princípio na peça e também a alguns desenhos de moldes.

1. Profundidade de estiramento (*Depth of Draw*)

Em geral, a resposta de um polímero à aplicação de uma tensão ou força é o alongamento ou estiramento. Com menores temperaturas o alongamento é menor a iguais cargas aplicadas. Durante o estiramento, a temperatura média da lâmina pode cair entre 6 a 15 °C. Desta forma, sob uma carga constante de estiramento, é mais difícil alongar a lâmina. Além de um máximo estiramento se necessita aumentar a temperatura do material ou a carga aplicada, ainda que os polímeros não possam ser esticados indefinidamente. Em um certo ponto, as forças que mantêm as moléculas juntas são excedidas e a lâmina se abre ou se desgarra.

Existem pelo menos três maneiras de definir o máximo estiramento de uma lâmina plástica:

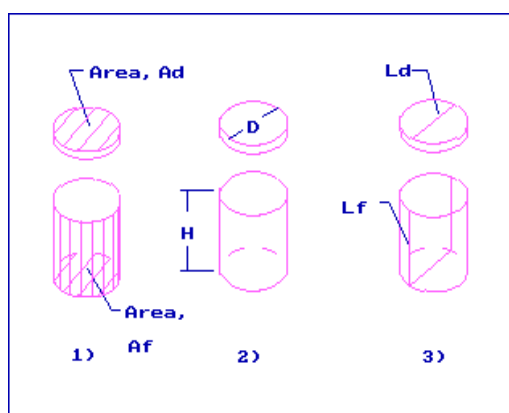
- 1) Relação de estiramento superficial (Areal draw ratio) RA: também chamada relação de estiramento. É a relação entre a área superficial da peça dividida pela superfície original de lâmina sem esticar (A_f/A_d). É relacionada com o grau de estiramento bidimensional da lâmina. Também é uma medida da redução média da espessura da lâmina: $t_f/t_o = 1/RA$, onde t_o e t_f são as espessuras originais e finais respectivamente.

- 2) Relação H/d: também chamada relação de profundidade de estiramento (*depth of draw ratio*). É a relação da profundidade máxima de estiramento, H, dividida pela dimensão característica sem

estirar da lâmina, d. Geralmente em moldagem negativa por vácuo, H/d deveria ser menor de 0,5 a 1. Normalmente é possível moldar com relações H/d maiores em moldagem positiva. Para incrementar a máxima relação H/d poderia ser utilizada a ajuda de pistões ou moldagem por estiramento de sopro de bolhas. Em alguns casos especiais se pôde moldar peças com relações H/d de 1/1 ou ainda 3/2. No caso do poliestireno biorientado Uniclear aconselha-se uma relação máxima de 0,1 para termoformagem por vácuo, menor que 0,3 se agregada pressão de moldagem e menor que 0,5 com pressão mais assistência de pistão.

- 3) Relação linear de estiramento (linear draw ratio) RL: é a relação da linha direta projetada sobre a superfície da peça dividida pela largura dessa linha na lâmina sem esticar ($RL = L_f/L_d$). Esta relação para uma esfera e um retângulo é de 1,57 e 2 respectivamente.

Para fins de desenho recomenda-se usar a relação de estiramento superficial ao invés da relação linear de estiramento dado que a primeira representa com mais exatidão o verdadeiro estiramento bi-axial da lâmina.



2. Reprodução de detalhes

Para a reprodução de detalhes nas peças, podem se alcançar resultados com termoformagem por vácuo negativo tanto quanto com moldagem positiva. Como a superfície da lâmina que está em íntimo contato com o molde recebe a impressão mais detalhada, é o desenho da peça que determina a técnica que deve ser usada. Como regra geral, se deveria usar molde positivo, para detalhes internos, e vácuo negativo, para detalhes externos.

No entanto, é importante lembrar que o grau de brilho produzido em uma superfície polida depende das propriedades do material usado; usualmente não está dado pela superfície do molde. Uma superfície de molde pobre pode prejudicar ou diminuir o acabamento da superfície da peça plástica que está sendo formada.

3. Desenho de costelas

É outra importante consideração para o desenho. As costelas podem ser localizadas de forma a dar rigidez a peça e também para ressaltar o aspecto do próprio desenho. Mediante uma adequada disposição de costelas, podem ser usados com sucesso espessuras finas de lâmina em um amplo intervalo de aplicações que requerem rigidez, reduzindo desta forma o custo do produto como também tempo de ciclo de aquecimento.

4. Moldura côncava

Para produzir peças com máxima resistência e boa performance na aplicação final, se deve usar raios adequados nas molduras côncavas. Este raio deve ser pelo menos igual ao da espessura inicial da lâmina. Um desenho fácil de termoformar deveria ter um raio quatro vezes maior que a espessura inicial da lâmina.



5. Aquecimento localizado do molde

Este tipo de aquecimento permite um melhor controle sobre a distribuição do material na peça. Isto pode ser conseguido mediante a inserção de aquecedores elétricos. Esta técnica é mais efetiva em moldes metálicos que nos não metálicos devido a melhor condutividade térmica.

As temperaturas mais elevadas nessas seções do molde permitem que a lâmina termoplástica continue se esticando sem esfriar-se ou endurecer-se.

6. Contração

Como todos os materiais, os plásticos aumentam seu volume específico (ou diminuem sua densidade) com um aumento da temperatura. A mudança volumétrica produzida em um polímero durante seu esfriamento desde a temperatura de moldagem até a temperatura ambiente se chama "contração". É um fator vital na moldagem de grande precisão e devem ser fixadas tolerâncias para esta propriedade no desenho de uma peça de moldagem por vácuo. A contração tem lugar em três formas básicas.

a) Contração no molde

É a contração do material registrada durante o ciclo de esfriamento no molde logo após a termoformagem. As dimensões da peça formada, depois que sua superfície alcança a temperatura na qual pode ser desmoldada, é escassamente menor às dimensões quando foi formada inicialmente. Esta diferença se chama contração no molde; geralmente expressada em "cm por cm". Varia com o processo e fatores de desenho e também com diferentes materiais.

A experiência indica que a contração é menos crítica com moldagem positiva. Isso porque, enquanto esfria, o material se contrai sobre o molde rígido, retardando assim a ação da contração. Mesmo que este fenômeno melhora as dimensões finais da peça, requer moldes com adequados ângulos, de maneira que possa extrair a peça do molde. Contrariamente, na termoformagem por vácuo negativo, o material se contrai para fora do molde contra a insignificante resistência do ar exterior.

b) Contração posterior à moldagem

Tão logo extraída, a peça se contrairá devido a perda de calor da temperatura de desmoldagem pela temperatura ambiente. A peça quente continua se contraindo até que a seção central da lâmina se esfrie. Esta contração cessa quando se alcança a temperatura de equilíbrio no material esfriado.

c) Contração e expansão no uso

Esta é a expansão normal ou contração nas dimensões de um objeto que ocorrem como resultado de mudanças de temperatura e umidade. É considerado um fator significativo só quando as tolerâncias são extremamente críticas, ou quando se fixa rigidamente a peça plástica formada a um material com uma notada diferença no coeficiente de expansão térmica. Cada tipo de material termoplástico tem um diferente coeficiente de expansão ou contração. Pode-se encontrar maior informação sobre este tema em qualquer bibliografia técnica, manuais sobre plásticos ou folhas técnicas de PS Innova e Uniclear. No entanto, em trabalhos que implicam especificações precisas, seria necessário complementar esta informação com testes reais na aplicação final.



GUIA DE RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Moldagem incompleta

Isto acontece quando a lâmina ou uma área da lâmina não conforma adequadamente o molde com um detalhe pobre de termoformagem.

Origem

1. Lâmina muito fria.

Ações corretivas

1. Aumentar o tempo de aquecimento
2. Incrementar temperatura de calefação
3. Melhorar a uniformidade do aquecimento

2. Vácuo insuficiente

1. Checar obstruções em orifícios de vácuo
2. Aumentar o número de orifícios de vácuo
3. Checar disposição correta de orifícios de vácuo
4. Incrementar tamanho de orifícios de vácuo

3. Vácuo não estica suficientemente rápido

1. Checar possíveis perdas de vácuo
2. Verificar se o desenho do sistema de vácuo satisfaz o valor de evacuação requerido
3. Aumentar o tamanho de orifícios de vácuo
4. Aumentar capacidade de bombeamento

4. Marco de fechamento frio

1. Pré aquecer marcos de vácuo

5. Relação profundidade de estiramento

1. Agregar pré-formador, pressão ou marco da peça muito alta

Lâmina chamuscada

Esta lâmina se torna amarelada. Isso usualmente fica evidente por uma mudança de cor.

Origem

1. Superfície superior o inferior de lâmina quente demais

Ação corretiva

1. Diminuir tempo do ciclo de aquecimento
2. Diminuir temperatura de calefação

Enrugamento ou formação de pontes, membranas ou teias de aranha

Origem

1. Lâmina quente demais

Ação corretiva

1. Diminuir tempo do ciclo de aquecimento

2. Não existe suficiente vácuo

2. Diminuir temperatura de calefação
1. Checar perdas em sistema de vácuo
2. Checar obstruções em orifícios de vácuo
3. Incrementar número de orifícios de vácuo
4. Checar disposição correta de orifícios de vácuo
5. Aumentar o tamanho de orifícios de vácuo

3. Desenho do *lay-out* pobre

1. Utilizar moldes negativos



Excessiva curvatura na lâmina

Origem	Ação corretiva
1. Lâmina quente demais	1. Diminuir tempo do ciclo de aquecimento 2. Diminuir temperatura de calefação

Variação do nível de curvatura de lâmina

Origem	Ação corretiva
1. Variações de temperatura	1. Correntes de ar indesejáveis através da seção de aquecimento 2. Lâmina não esfriada suficientemente rápido da extrusão
2. Uso de moagem não controlada	1. Controlar qualidade de moagem 2. Diminuir ou controlar o percentual de moagem

Marcas de esfriamento

Origem	Ação corretiva
1. O estiramento se detém quando a lâmina toca um molde ou pistão frios	1. Aumentar temperatura de molde 2. Aumentar temperatura de pistão
2. Desenho de molde ou pistão incorretos	1. Reparar molde / pistão nas áreas críticas

Marcas superficiais

Origem	Ação corretiva
1. Molde sujo	1. Limpar o molde ou realizar mais freqüentemente a limpeza
2. Molde quente demais / frio	1. Aumentar / diminuir temperatura de molde
3. Pobre qualidade superficial de molde para uma qualidade de aparência de peça	1. Melhorar acabamento superficial do molde
4. A superfície da lâmina está suja ou depósito	1. Melhorar técnicas de manipulação e avariada no limpeza para proteger a lâmina
5. Superfície de molde gasto	1. Usar o material correto do molde para os requerimentos de serviço futuros
6. Ar sobre a superfície de um molde polido	1. Reduzir polimento do molde 2. Agregar orifícios de vácuo na área afetada
7. Vácuo insuficiente	1. Checar obstruções em orifícios de vácuo 2. Checar perdas em sistema de vácuo 3. Aumentar o número de orifícios de vácuo 4. Checar disposição correta de orifícios de vácuo



8. Lâmina contaminada

1. Controlar qualidade e tipo de reciclagem
2. Checar no fornecedor de lâmina

9. Pó em suspensão

1. Reduzir pó em suspensão mediante uma melhor limpeza
2. Isolar área e fornecer ar filtrado

Peça dobrada, reforçada

Origem

1. A peça está quente demais mediante:

Ação corretiva

1. Aumentar esfriamento da lâmina quando é extraída

- a) aumento do tempo de esfriamento
- b) agregar capacidade de esfriamento utilizando ventiladores

2. Diminuir temperatura de molde

2. Desenho de peça incorreto

1. Redesenhar com ângulos, costelas

3. Esfriamento desigual na peça

1. Aumentar temperatura de molde ou uniformidade na temperatura
2. Checar sistema de esfriamento

4. Pouca distribuição de material

1. Checar variação em espessuras de lâmina
2. Aquecimento desigual de lâmina
3. Para termoformagem profunda use ajuda de pistão ou esteira

Desmoldagem pobre

Origem

1. Peça ou molde quente demais

Ação corretiva

1. Aumentar o tempo de ciclo de esfriamento
2. Diminuir temperatura de molde

2. Existência de cortes por baixo no molde (*undercuts*)

1. Usar marco de fechamento
2. Agregar ou incrementar pressão de desmoldagem ou sua duração

3. Orifícios inadequados de molde

1. Aumentar os orifícios
2. Converter moldagem macho em fêmea

4. Acabamento pobre na superfície do molde

1. Usar desmoldante
2. Melhorar acabamento superficial

Distorção da peça na extração

Origem

1. Peça não esfriada adequadamente

Ação corretiva

1. Checar se o sistema de esfriamento está funcionando
2. Aumentar o tempo de ciclo de esfriamento
3. aumentar a capacidade de esfriamento

Distribuição de material pobre

Também conhecido como controle de parede pobre

Origem	Ação corretiva
1. Grande variação na espessura de lâmina	1. Checar espessura de lâmina 2. Melhorar controle na extrusão da lâmina
2. Aquecimento de lâmina não controlado	1. Checar funcionamento de aquecedores 2. Controlar calefação com telas 3. Checar existência de correntes de ar na estação de aquecimento
3. Molde muito frio	1. Incrementar temperatura de molde 2. Checar uniformidade de esfriamento de molde 3. Checar sistema de controle de temperatura de molde
4. A lâmina desliza fora do marco de	1. Melhorar a capacidade do marco de fechamento 2. Pré-aquecer o marco à temperatura de operação 3. Checar funcionamento de aquecedores ao redor do marco de fechamento
5. Método de moldagem incorreto para o desenho de peça	1. Adequar o desenho da peça com os métodos de termoformagem disponíveis

Pré-estiramento / bolhas não uniformes

Origem	Ação corretiva
1. Aquecimento de lâmina não controlado	1. Checar funcionamento de aquecedores 2. Usar telas para controlar aquecimento 3. Checar existência de correntes de ar em estação de aquecimento
2. Pressão de ar não uniforme na bolha	1. Checar perdas no sistema de pressão de ar 2. Checar selagem da lâmina na caixa de bolhas 3. Redirecionar entrada de ar na caixa de bolhas

Afinamento nas esquinas com peças profundas

Origem	Ação corretiva
1. Aquecimento de lâmina não controlado	1. Checar funcionamento de aquecedores 2. Usar telas para controlar aquecimento 3. Checar existência de correntes de ar na estação de aquecimento



- | | |
|--|---|
| 2. Distribuição de material não controlado | 1. Considerar outras técnicas de moldagem como pré-estiramento ou ajuda de pistão |
| 3. Espessura de lâmina muito fina | 1. Aumentar espessura de lâmina |
| 4. Temperatura de molde não uniforme | 1. Checar funcionamento de esfriamento de molde
2. Redesenhar distribuição de calor do molde |

A lâmina adere ao pistão

- | | |
|---|---|
| Origem | Ação corretiva |
| 1. Temperatura de pistão
Lubrificar pistão | 1. Diminuir temperatura do pistão muito quente 2.

3. Mudar as características superficiais do pistão
a) pano cobertor
b) lubrificante aplicado permanentemente sobre a superfície |

A lâmina se desgarra no momento da moldagem

- | | |
|-----------------------------------|--|
| Origem | Ação corretiva |
| 1. Lâmina muito quente | 1. Diminuir tempo de ciclo de aquecimento
2. Diminuir temperatura de aquecedores
3. Pré-aquecer lâmina |
| 2. Distribuição pobre de material | 1. Checar variações de espessura da lâmina
2. Checar perfil de temperatura |
| 3. Pré-estiragem muito comprida | 1. Reduzir intensidade de sopro de bolha
2. Reduzir temperatura de estiramento |
| 4. Lâmina muito fria | 1. Aumentar tempo de ciclo de aquecimento
2. Aumentar temperatura de calefação |

Bolhas na lâmina

- | | |
|-----------------------------------|--|
| Origem | Ação corretiva |
| 1. Excessiva umidade | 1. Secagem previa da lâmina
2. Pré-aquecimento da lâmina
3. Aquecer ambos os lados
4. Proteger as lâminas da umidade até sua utilização |
| 2. Aquecimento muito rápido | 1. Usar um valor menor de aquecimento:
a) baixar temperatura de calefação
b) subir distância entre aquecedores e a lâmina |
| 3. Goteira de água sobre a lâmina | 1. Evitar perdas de fluídos que possam gotejar sobre a lâmina |



Elevações superficiais na lâmina do lado do molde

Origem	Ações corretivas
1. Lâmina muito quente	1. Diminuir tempo do ciclo de calefação 2. Diminuir temperatura de calefação
1. Orifícios de vácuo muito grandes	1. Diminuir tamanho dos orifícios

Perda de cor por degradação ou envermelhamento

Origem	Ações corretivas
1. Lâmina super aquecida	1. Checar aquecedor (es) de saída 2. Diminuir tempo de ciclo de aquecimento 3. Reduzir temperatura de aquecimento
2. Lâmina super esticada para uma dada profundidade de peça	1. Aumentar espessura de lâmina 2. Aumentar temperatura de lâmina 3. Distribuir pré-estiragem 4. Servir ajuda de pré-moldador para peças profundas
3. Molde muito frio	1. Incrementar temperatura do molde
4. pistão muito frio	1. Elevar temperatura do pistão
5. Uso descontrolado de moagem	1. Controlar qualidade de moagem 2. Diminuir percentual de moagem
6. A lâmina se esfria antes de ser termomoldada	1. Diminuir tempo de ciclo de aquecimento formada

A lâmina perde o ponto

Origem	Ação corretiva
1. Lâmina muito fria	1. Aumentar tempo de ciclo de aquecimento 2. Elevar temperatura de aquecimento
3. Estiramento além do ponto de fluência do material	1. Aumentar velocidade de estiramento

Perda de detalhe de impressão ou detalhes do molde

Origem	Ação corretiva
1. Profundidade de gravação baixa para uma dada relação de estiramento	1. Aumentar profundidade de detalhe/gravação 2. Diminuir estiramento
2. Estiramento não uniforme	1. Usar telas para controlar perfil de temperatura 2. Usar a ajuda de pistão ou pré-estiramento da lâmina

Ruptura da peça durante o uso

Origem	Ação corretiva
1. Peça formada com grande tensão moldagem	1. Aumentar temperatura de lâmina durante a



- | | |
|---|---|
| 2. Espessura de peça muito fina | 2. Usar uma temperatura apropriada de lâmina e um esfriamento adequado para moldagem profunda |
| 3. Aquecimento de lâmina fora de controle | 3. Incrementar costelas, filetes |
| | 1. Aumentar espessura de lâmina |
| | 1. Usar telas para controlar perfil de temperatura |

Apêndice A**GUIA PARA A TERMOFORMAGEM
DE POLIESTIRENO**

<u>Parâmetros de Processo</u>	<u>Poliestireno</u>
Temperatura de lâmina ⁽¹⁾	
Mínimo	93 °C
Máximo	177 °C
Normal	134 °C
Temperatura de aquecimento	
Intervalo	260 – 590 °C
Normal	425 °C
Temperatura pistão (Molde negativo)	82 – 138 °C
Temperatura de molde (Molde negativo)	49 – 104 °C
(Molde positivo)	49 – 104 °C
Velocidade de pistão	12 – 25 cm/s
Tamanho pistão (molde negativo)	80 – 90 % do molde
Distância entre aquecedor e lâmina	
Superior	15 – 30 cm
Inferior	30 – 45 cm
Velocidade máxima de aquecimento	
Aquecimento em uma só face	0,05 s/mm (de espessura de lâmina)
Aquecimento nas duas faces	0,075 s/mm (de espessura de lâmina)
Altura de bolha (de lâmina pré-estiramento)	
Molde negativo	½ profundidade para esticar
Molde positivo	¾ profundidade para esticar
Máximo esfriamento de lâmina	
Ar forçado	0,025 s/mm (de espessura de lâmina)
Neblina de água	0,013 s/mm (de espessura de lâmina)

⁽¹⁾ Para o aquecimento de lâminas de grande espessura (>4,5 mm) a temperatura mínima exposta poderia ser muito baixa para uma correta termoformagem.

Apêndice B

COMPARAÇÃO ENTRE TERMOFORMAGEM POSITIVA (MACHO) E NEGATIVA (FÊMEA)

Área a Comparar	Molde Positivo	Molde Negativo
Extração da peça	<ul style="list-style-type: none"> • Possível aderência da peça a temperaturas de molde menores que 70°C • Possível deformação da peça a temperaturas de molde maiores que 90°C 	<ul style="list-style-type: none"> • Não apresenta sérios problemas
Aparência da peça	<ul style="list-style-type: none"> • Algo menos de brilho • Não há presença de marcas de molde em superfície interior da peça • Contaminação no molde ou na lâmina causa defeitos superficiais na peça 	<ul style="list-style-type: none"> • Brilho melhor • Presença de marcas de molde e de pistão na superfície interior da peça
Distribuição do material	<ul style="list-style-type: none"> • Similar a molde negativo • Possível afinamento de espessura em esquinas 	<ul style="list-style-type: none"> • Similar a molde positivo
Resposta a variáveis de moldagem	<ul style="list-style-type: none"> • O pré-estiramento afeta a distribuição de material 	<ul style="list-style-type: none"> • O pré-estiramento afeta a distribuição do material • A temperatura do pistão afeta a distribuição do material • A velocidade do pistão afeta a distribuição do material • O vácuo afeta a distribuição de material
Custos	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos mais caros • Deve ser desenhado para obter uma efetiva desmoldagem • O transporte da peça é mais difícil 	<ul style="list-style-type: none"> • Menos custos que o molde positivo

Apêndice C

TÉCNICAS DE TERMOFORMAGEM

Este apêndice apresenta as seguintes técnicas:

Moldagem Positiva / macho (*drape forming / male forming*)

A lâmina é fixada e aquecida (A), em seguida é direcionada para baixo, onde se encontra com o molde macho ou o molde é levantado até a lâmina. O ar embolsado entre a lâmina e o molde é evacuado ao penetrar o molde esticando a lâmina contra as bordas do molde (B). Pode ser usado tanto vácuo como ar sob pressão para produzir a pressão diferencial necessária para forçar a lâmina contra o molde macho. Neste sistema, a peça formada tem fundo grosso e paredes delgadas (C).



Moldagem por vácuo negativo / fêmea (vacuum forming / female forming)

A lâmina é fixada e aquecida. Aplica-se vácuo por baixo da lâmina (A) gerando a depressão necessária para empurrar a lâmina para a superfície do molde. Quando a lâmina entra em contato com a parede do molde (B) se esfria. As áreas que demoram mais tempo em encostar o molde são as mais finas (C).

Formagem por pressão (pressure forming / box forming)

É similar a formagem por vácuo. Uma caixa de pressão é disposta sobre a lâmina sujeitando-a contra o contorno do molde. Injeta-se ar sob pressão para empurrar a lâmina nas esquinas do molde. A caixa de pressão deve servir como um selo contra a superfície livre da lâmina, já que se usa uma pressão de ar de uns 0.7 a 1.4 MPa.

Formagem por sopro ou com ajuda pneumática (billow forming)

A lâmina é fixada, aquecida e logo esticada com ar em uma bolha. A quantidade de ar sob pressão é controlada com uma fotocélula que monitora a parte mais alta da bolha. Esta é a primeira etapa na chamada formagem multi-etapa. Como o ar ambiente está sensivelmente mais frio que a lâmina, esta se esfria livremente na bolha, sem tocar uma superfície sólida durante o estiramento. Desta forma, a espessura da parede da bolha é bastante uniforme exceto perto da área de fixação da lâmina. A partir daqui existem algumas variações do método de formagem por sopro. Estas representam a segunda etapa de formagem:

- O molde macho é pressionado contra a parte superior da bolha pré-esticada (*billow drape forming*) (). As espessuras de parede são muito mais uniformes que as conseguidas por moldagem positiva (macho).
- Quando se usa um molde negativo (fêmea), a pressão diferencial que inflou a bolha se reverte. Isso faz com que a lâmina pré-esticada cubra as paredes do molde negativo (*billow vacuum forming*) (). De novo, a espessura de parede da peça é muito mais uniforme que a conseguida por moldagem a vácuo. A inversão da bolha pode ser complicada, o que dificulta muito o uso desta técnica.
- Se usamos vácuo para formar a bolha, necessita-se uma caixa de vácuo (). O molde se submerge dentro da lâmina pré-esticada, aplica-se vácuo e se injeta ar sob pressão. Então a bolha envolve a superfície do molde (*billow snap-back vacuum forming*)

Formagem com auxílio de pistão (plug assist)

A lâmina já aquecida também pode ser esticada mediante um pistão mecânico. Existem distintos métodos de formagem com pistão:

- Vácuo com auxílio de pistão (molde negativo): é o método mais comum dos que utilizam pistão. Assim que a lâmina é aquecida e fixada (A), um pistão pré-estica a mesma e a empurra para as paredes do molde negativo. Quando a placa do pistão chega a posição de fechamento (B) se aplica vácuo para completar a formagem da lâmina (C). Pode-se variar a espessura da parede modificando a forma do pistão (D). As áreas que primeiro entram em contato com a lâmina e o pistão formam áreas grossas devido ao efeito de esfriamento. Conseqüentemente, o desenho do pistão é um fator muito importante na precisa determinação da geometria da peça que está sendo produzida.
- Pressão com auxílio de pistão: é similar a vácuo com pistão (A y B), exceto pelo fato de que como o pistão entra até a lâmina, se ventila a atmosfera o ar que se encontra debaixo da lâmina. Quando o pistão termina seu deslocamento selando o molde, se aplica ar sob pressão desde o pistão. Este pode entrar através do pistão o detrás do mesmo (C). Aquelas áreas de lâmina que entram em contato primeiro com o ar se esfriam primeiramente. Em alguns casos se requer ar aquecido.

As temperaturas do pistão são também importantes.



Este método pode ser controlado para produzir uma uniforme distribuição de material em toda a peça como aparece em (D).

- Sopro com auxílio de pistão vácuo/pressão: assim que se aquece a lâmina e se sela na cavidade negativa (A), se introduz ar dentro da cavidade do molde soprando a lâmina para cima formando uma bolha uniformemente esticada (B). Normalmente, se usa uma fotocélula elétrica para controlar a altura da bolha. Um pistão com a forma aproximada do contorno da cavidade se submerge contra a lâmina (C). Quando este chega a seu topo inferior se produz vácuo dentro da cavidade para completar a formação da lâmina (D). Em alguns casos se usa também neste processo pressão de ar de formagem.

OUTRAS TÉCNICAS

Lâmina aquecida por contato / pressão:

Utiliza-se quando a lâmina está altamente orientada como o BOPS, ou uma face está metalizada, ou está laminada com adesivos sensíveis a temperatura.

Neste método se insere a lâmina entre a cavidade do molde e uma placa aquecida. A placa (A), plana e porosa, permite que se sopre ar através dela. A cavidade do molde sela a lâmina contra a placa aquecida. Aplica-se ar desde a cavidade negativa forçando a lâmina a entrar totalmente em contato com a placa aquecida. Também se pode produzir vácuo na placa aquecida (B). Logo após um aquecimento predeterminado, a lâmina plástica está pronta para ser formada. Ar sob pressão aplicada através da placa aquecedora forma a lâmina dentro da cavidade negativa. Pode-se usar uma ventilação (C) na face inferior do molde. Para selar a cavidade podem ser usadas placas de aço inseridas no molde. Pode-se empregar pressão adicional de fechamento após a formagem (D).

Formagem em fase sólida

Este processo usa um conjunto de dois moldes para dar a forma à peça. Não se utiliza vácuo. A pressão para formar a peça vem do fechamento mecânico de ambas metades em lugar de ar sob pressão. A lâmina é aquecida a uma temperatura significativamente menor que na termoformagem convencional.

Pode ser utilizados madeira, metal, gesso, epóxi, etc., para a confecção dos moldes. A lâmina aquecida é fixada sobre o molde negativo (A). Ao fechar o molde se dá forma à lâmina (B). O ar preso é expulso com ventilações efetuados no molde. A distância entre o molde positivo e a cavidade negativa do molde depende das tolerâncias requeridas da peça final. Com este método se pode conseguir uma excelente reprodução de detalhes do molde e uma boa precisão dimensional, incluindo superfícies rotuladas e texturizadas. A distribuição do material da peça formada (C) dependerá da forma da peça.

Esclarecimento:

A informação aqui fornecida é resultado do nosso melhor conhecimento teórico e empírico; é precisa, mas não podemos garantir o sucesso das nossas recomendações e sugestões, pois as condições de utilização das mesmas escapam ao nosso controle.

Absolutamente tudo o que foi exposto deverá ser assim interpretado, e nunca como uma recomendação para utilizar algum produto, infringindo as patentes e normas existentes que o amparam, tanto na sua composição como no seu uso.

Este manual foi elaborado com base em documento técnico emitido pela Monsanto.