

*Handbook of Plastic Processes - Charles A. Harper - Timonium, Maryland  
Wiley Interscience - A John Wiley & Sons, Inc., Publication  
Copyright © 2006 by John Wiley & Sons, Inc.  
Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey  
Stephen Ham - Consultant, Highlands, North Carolina*

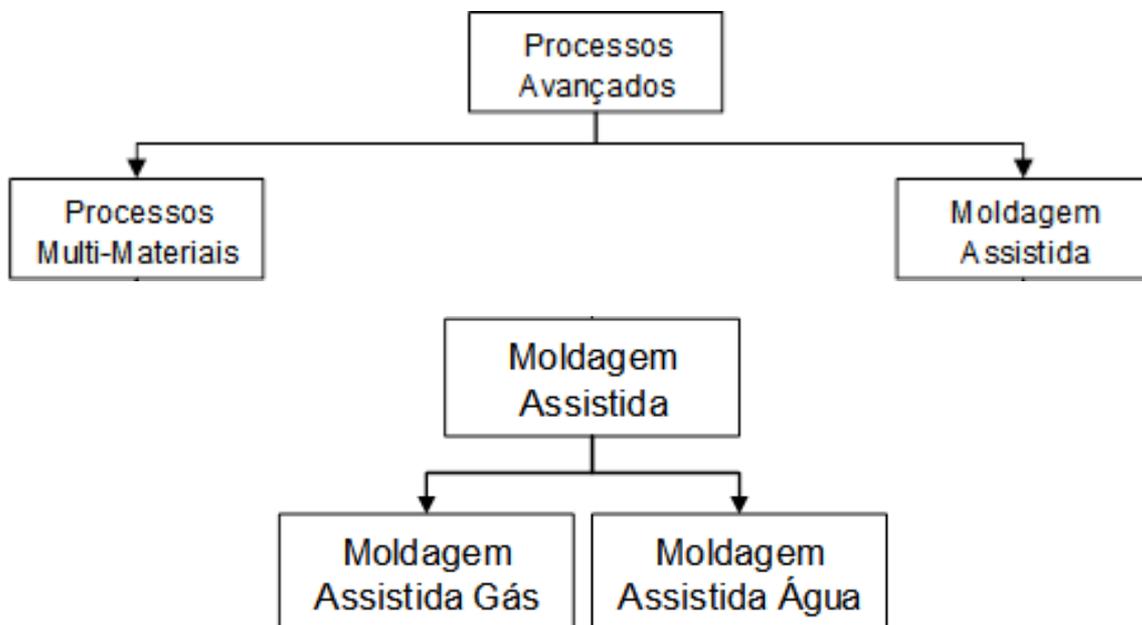
---

## 2. Processos de Moldagem Assistida

- 2.1. Moldagem por Injeção Assistida - Introdução
  - 2.1.1 Por que considerar a opção de baixa pressão?
  - 2.1.2 Considerações gerais do projeto da peça
  - 2.1.3 Limitações cosméticas
  - 2.1.4 Seqüência do projeto
  - 2.1.5 Considerações do fluxo plástico e da contração
  - 2.1.6 Considerações do comprimento de fluxo
- 2.2 Espuma estrutural: moldagem por injeção com agentes expansores
  - 2.2.1 Equipamento para espuma estrutural a baixa pressão
  - 2.2.2 Equipamento para espuma estrutural a alta pressão
- 2.3 Co-injeção de espuma estrutural
- 2.4 Espuma estrutural a contra pressão
- 2.5 Espuma estrutural com expansão (abertura) do molde
- 2.6 Moldagem por injeção assistida a gás
  - 2.6.1 Equipamento da moldagem assistida a gás
  - 2.6.2 Injeção do gás através do bico
  - 2.6.3 Injeção de gás no molde
- 2.7 Moldagem a gás externa
- 2.8 Materiais, gás, e expansores
  - 2.8.1 Agentes expansores
  - 2.8.2 Tipos e fontes de gás
- 2.9 Aplicações
- 2.10 Moldes e ferramentas
  - 2.10.1 Portas
  - 2.10.2 Ventagem
  - 2.10.3 Resfriamento
  - 2.10.4 Ejeção
  - 2.10.5 Textura
  - 2.10.6 Detalhes da contra pressão
  - 2.10.7 Lista de verificação do ferramental
- 2.11 Projeto da peça
  - 2.11.1 Importância do raio nos cantos
  - 2.11.2 Ângulo
  - 2.11.3 Projeto de reforço: conheça seus processos
    - 2.11.3.1 Os reforços são críticos
    - 2.11.3.2 Vigas de reforço e prolongamentos

- 2.11.3.3 Controle de marcas
  - 2.11.4 Sequência do projeto
  - 2.11.5 Saliências e inserções
  - 2.11.6 Grelhas e linhas de solda
  - 2.12 Pesquisa de defeitos básica
  - 2.13 Moldagem por injeção assistida a água
  - 2.14 Moldagem por micro-injeção
    - 2.14.1 Desafios Técnicos
    - 2.14.2 Materiais Aplicáveis
- 

## Resumo dos processos



### 2.1. Moldagem por injeção assistida - Introdução

A moldagem por injeção a baixa pressão é praticada na indústria desde os anos 50. Não era raro para o moldador adicionar uma pequena quantidade de bicarbonato de sódio para eliminar marcas de rechupes. Durante os anos 60 e os anos 70, a moldagem por injeção com espuma estrutural se tornou um método padrão para grandes aplicações e naquelas que exigem seções de parede mais espessas. Durante o final dos anos 80 o processo de injeção assistida a gás e água emergiu como um novo método de moldagem de injeção de grandes peças sob baixa pressão. A moldagem por injeção assistida a gás igualmente possibilitou a confecção de peças com seções ocas. A adição de agentes expansores e a injeção assistida a gás são métodos que auxiliam o processo em dois de seus maiores problemas: o preenchimento do molde com o plástico fundido, e a compensação da contração do plástico quando de seu resfriamento. Os métodos assistidos variaram do uso do bicarbonato de sódio durante os anos 50, ao gás nitrogênio usado como um agente expensor (isto é, injeção de gás), e de uma larga escala de aditivos químicos de expansão. A injeção assistida por água é o desenvolvimento mais recente. A moldagem por injeção assistida é empregada tradicionalmente em aplicações com uma ou mais das seguintes características:

- Envolve geralmente resinas termoplásticas
- Processo de injeção
- Alternativa para preenchimento e/ou empacotamento do plástico no molde
- De uso geral para aplicações estruturais ou suporte de carga
- De uso geral para componentes plásticos maiores

Peças menores podem ser produzidas em máquinas que variam de 300 a 500 toneladas. A indústria tem capacidade substancial nesta escala de tamanho. As técnicas de baixa pressão associadas com a moldagem assistida têm uma melhor resposta nas peças grandes. A economia da taxa de hora máquina de 1000 a 1500 toneladas é bem mais significativa do que nas de 300 a 500 toneladas. A moldagem por injeção assistida é definida como um processo de moldagem de injeção de termoplásticos que possibilita um artigo moldado sob menores pressões de injeção e fechamento, tendo por resultado um menor esforço residual. O artigo resultante tem uma elevação de força relacionada ao peso e pode ser considerado estrutural. Os seguintes processos da moldagem por injeção são considerados assistidos e vistos neste capítulo:

- Espuma estrutural a baixa pressão
- Espuma estrutural a alta pressão
- Espuma estrutural com expansão (abertura) do molde
- Co-injeção de espuma estrutural
- Espuma estrutural a contra pressão
- Moldagem por injeção assistida a gás
- Moldagem de artigos estruturais
- Moldagem externa a gás
- Moldagem por injeção assistida a água

### **2.1.1 Por que considerar a opção de baixa pressão?**

No ambiente competitivo de hoje, os fabricantes estão procurando maneiras de melhorar o desempenho e reduzir o custo. Estes objetivos podem ser alcançados investindo inicialmente no bom trabalho feito com ferramentas e com as variações do processo de moldagem por injeção assistida. A aplicação apropriada destes processos oferece aos projetistas uma oportunidade de aperfeiçoar seus produtos com vantagens competitivas. O objetivo fundamental da aplicação destes processos é obter peças moldadas rígidas com características interiores funcionais e um exterior cosmeticamente aceitável. A consolidação das peças é um benefício considerando a redução de custo associada à economia de trabalho. Conseguir o grau desejado de rigidez é normalmente um desafio para o projetista. Há diversas opções para considerar, como a espessura de parede especificada, enchimentos tais como vidro adicionado ao polímero, o projeto de reforços, e os reforços externos.

A espessura de parede é a espinha dorsal de uma peça. Afeta a rigidez num exponencial de 3. Portanto, paredes duplas alcançam oito vezes a rigidez ( $2^3$ ). A rigidez inerente da resina é um fator. Adicionar cargas tais como vidro ou minerais podem aumentar o baixo módulo de flexão da resina. O projeto da peça é determinado baseado em exigências de rigidez e no módulo da resina. Reforços maiores devem ser especificados para resinas de módulos mais baixos. O processo assistido a gás em alguns casos exigirá reforços adicionais, que igualmente aumentam a rigidez total. O reforço externo é, portanto, uma solução prática quando a rigidez do conjunto é

exigida e os projetos funcionais de peças simples, que levam a uma grande rigidez, são normalmente melhores nos materiais totalmente compactos tais como o aço e a madeira, oferecendo uma melhor relação de rigidez versus custo. Os materiais plásticos devem fornecer características adicionais para oferecer uma vantagem no custo total. A tabela 2.1 mostra a espessura de parede empregada normalmente para cada processo comparativamente com as exigências da pressão de fechamento da máquina. As injetoras com uma pressão de fechamento mais elevada carregam um custo maior por hora, aumentando desta maneira o consumo de energia e o custo da peça.

**TABLE 2.1 Wall Thickness and Clamp Tonnage**

Process	Typical Wall (mm)	Typical Clamp Tonnage (tons/in <sup>2</sup> )
Injection molding	3	3
Structural foam	6	0.25
Co-injection SF	5	0.50
Counterpressure	5	0.50
Expanding mold SF	3/6	3
Gas assist thin wall	3	1
Structural web	6	0.50
External gas molding	3	0.75–1
Water-assisted molding	5/3	1–2

### 2.1.2 Considerações gerais do projeto da peça

Os desenvolvedores de produto e os projetistas de peças devem ter a habilidade de controlar o sucesso do produto final. O objetivo não deve ser meramente projetar um produto que vá de encontro a demanda do mercado, mas também, criar um produto que derrote a competição. Gastar bem, em um orçamento de trabalho feito com boas ferramentas, pode alcançar este objetivo, aperfeiçoando o projeto para encontrar exatamente as necessidades de aplicação ao menor custo de produção possível. A seleção de um processo para uma aplicação específica tem que estar de acordo com a especificação da resina. As centenas de opções de resinas, em conjunto com dúzias de tecnologias de conversão, conduzem a uma imensa lista de opções. Na realidade, uma análise do mercado mostra que determinadas resinas ligadas a determinados processos estão no topo de todo este mercado. O projetista ou o engenheiro de desenvolvimento de produtos deve avaliar as opções de prevalência da resina - processos empregados em produtos similares como um ponto de partida. Deve considerar então as opções de resina - processos usados em outros mercados, onde uma ligeira mudança na formulação ou no processo poderia estender a opção à sua aplicação. Considerar as opções de resina e as novas melhorias de processo que podem não ter estado disponíveis quando a competição projetou a sua peça. Uma vez que a lista de opções foi diminuída, avaliar mais de perto o projeto. A aplicação da geometria e da utilização final da peça ditará às vezes claramente o melhor processo. Quando um material composto é desejado, a co-injeção permitirá a fabricação em operação única. Seções ocas são formadas facilmente pela injeção de gás ou de água. Variações extremas na seção das paredes são obtidas com um molde de expansão (abertura). Diversos fatores devem ser considerados:

1. Espessura da parede. Os processos são melhores quando uma espessura de parede uniforme é empregada (o molde de expansão acomodará mais transição).

A espinha dorsal de todo o projeto é a espessura de parede da peça. Isto determina a força, o custo total, e a flexibilidade do projeto. Geralmente, quanto mais espessa a parede, maior a flexibilidade do projeto, mas igualmente seu custo. Paredes mais espessas permitem reforços mais profundos e saliências maiores e igualmente fornecem melhor força na linha de solda. Com assistência a gás, paredes mais finas são permitidas, impedindo a formação de “dedos viscosos” de gás nos reforços. Cada processo tem sua espessura de parede otimizada.

2. Reforços e saliências. A funcionalidade de um projeto dita o uso característico de moldagem, que deverá ser realizado com reforços e saliências. Os reforços exigem um desenho que causa um acúmulo de espessura na base do reforço. Os reforços profundos exigem seções de parede mais espessas observando o seu prolongamento. A exceção é na assistência a gás, que oferece reforços desproporcionados quando conectados a uma passagem do gás.

3. Grelhas e aberturas. Quando a frente de fluxo é cortada por um pino do núcleo ou por outra obstrução de fluxo, a área da retomada de fluxo se torna uma linha de solda. A força é diminuída nesta área. Cada um dos processos tem uma consideração especial para linhas de solda.

4. Comprimento do fluxo. Os projetos de grandes peças devem considerar o melhor processo a ser utilizado para aperfeiçoar o projeto. Isto significa geralmente encontrar o mais baixo custo de fabricação possível. Desde que o material significa aproximadamente a metade do custo da peça, o objetivo é aplicar o mínimo possível de material (o mais fino possível). A tabela do comprimento do fluxo pode estreitar as opções.

5. Outras condições de moldagem. Estas incluem o desenho, raios, faixas, previsões do tipo de porta, plano de ejeção, linha divisora total, porta exposta da injeção de gás, porta de difusão, e a aparência exigida (cosmética).

### **2.1.3 Limitações cosméticas**

Devido a seus níveis de esforços de dilatação e contração não uniformemente correspondentes, a moldagem por injeção é notória para marcas de rechupes. Muito do problema vem da pele que congela na frente de fluxo e isola a pressão desta parte dianteira do fluxo de injeção. Nas espumas estruturais de baixa pressão (SF) a pressão de formação de espuma interna libera o esforço e a contração, mas introduz redemoinho de superfície causado pelos agentes de sopro do gás que escapam na borda de ataque durante o estágio de enchimento. A espuma estrutural a contra pressão supera o problema do redemoinho ao se opor ao escape na borda de ataque com moldagem de pressão oposta. Entretanto, esta borda de ataque congela fora da parte dianteira do fluxo e causa linhas de solda exageradas. Na moldagem por injeção assistida a gás as estruturas de reforço utilizam os canais internos de gás para transportar a pressão à borda de ataque. Os problemas de aparência ocorrem quando há uma textura diferente mostrada dentre as áreas de uma pressão mais elevada adjacentes aos canais do gás. Na moldagem externa a gás, igualmente se aplica o gás ao injetado plástico, mas externamente, em uma das metades do molde. Embora fornecendo a aparência exterior excelente, as superfícies interiores são onduladas e irregulares. Na moldagem assistida à água, utiliza-se a água em vez do gás para preencher e empacotar o plástico. A água é menos compressível do que o gás, gerando

um melhor núcleo e a diminuição de peso, mas as linhas de hesitação são visíveis em moldagens rápidas.

O avanço atual destes processos é menor do que a expectativa. Tipicamente, alguns projetos são melhores para paredes mais espessas, como a espuma estrutural ou com reforços estruturais. Alguns projetos têm áreas naturalmente espessas, possibilitando a retirada do núcleo (injeção com núcleo perdido). Quando a transição da parede excede o dobro, as técnicas assistidas a gás devem ser consideradas. Além disso, o tamanho total é uma consideração, devido ao tamanho das exigências de fechamento e do molde da máquina.

Cada um dos processos de moldagem de injeção assistidos oferecem problemas de aparência devido a sua própria natureza:

- Moldagem por injeção: marcas de rechupes
- Espuma estrutural: redemoinho
- Moldagem de expansão de espumas SF: linhas testemunhas do molde, rechupes
- Co-injeção de espumas SF: rechupes ou redemoinho
- Contra pressão de espumas SF: linhas de malha
- Moldagem assistida a gás: variação do brilho, linha de hesitação
- Moldagem de reforço estrutural: linhas de fluxo, rechupes, brilho
- Moldagem externa à gás: superfície desuniforme em um lado
- Moldagem assistida à água: hesitação, variação do brilho

#### **2.1.4 Seqüência do projeto**

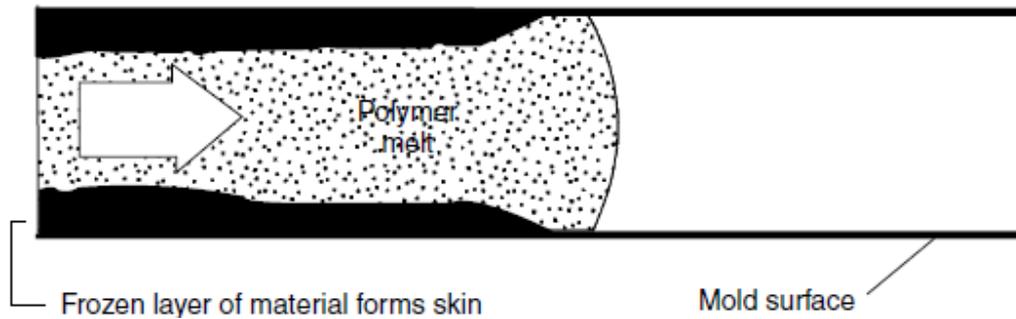
Ao tratar um projeto altamente funcional, uma seqüência diferente de eventos do projeto deve ser considerada. Para obter a função determinante do projeto, desenhe primeiramente os padrões de reforços e foque então sobre a seção da parede (e conseqüentemente o processo):

1. Projete a função máxima para o artigo moldado.
2. Determine reforços e saliências para obter a função desejada.
3. Use prolongamentos de relação concordante do reforço/parede para determinar a espessura de parede.
4. Lembre que a espessura de parede indicará o processo e a resina.
5. Avalie as posições potenciais das portas.
6. Considere comprimentos do fluxo para o tamanho da peça e a espessura de sua parede.
7. Determine linhas de solda e a correspondente perda de força.
8. Considere as exigências cosméticas.

#### **2.1.5 Considerações do fluxo plástico e da contração**

O projetista do produto não necessita se interessar tanto nos detalhes do processamento atual tanto quanto sobre o conhecimento dos parâmetros de projeto do processo. A espessura de parede uniforme é sempre o ingrediente essencial no bom projeto de produto. A espessura de parede desuniforme somente adiciona mais uma variável ao processo. O projetista tem influência no processo, e isto é particularmente verdadeiro nos processos de moldagem por injeção assistida. Para o projetista, o estágio de preenchimento do molde deve ser considerado como o ponto de partida. É o ponto onde o espaço vazio se transforma no artigo moldado. Aqui é onde a espessura de parede uniforme é muito importante. Variações na espessura causam a variação da taxa de preenchimento e conseqüentemente um aumento em problemas de esforço e de efeito cosmético. Com esta perspectiva, nós podemos visualizar cada um dos processos assistidos

durante o estágio crítico de preenchimento. Desde que a espuma e os processos a gás não são nada mais do que os processos híbridos da moldagem por injeção, torna-se lógico que a moldagem por injeção seja o ponto de partida para compreender os princípios básicos do processo.



**FIGURE 2.1** Injection molding flow front.

A figura 2.1 representa uma seção transversal do molde no estágio de preenchimento. O plástico fundido está fluindo da esquerda para a direita, do ponto de injeção, que é chamado de porta, para o fim de fluxo. Esta borda de ataque dá forma à parte dianteira do fluxo. O ponto essencial nesta ilustração é que a pele se forma na superfície fria do molde, encapsulando assim o fluxo de fundido. Na moldagem por injeção contínua é necessário injetar toda a resina até o ponto final do fluxo antes do congelamento da pele.

Outro conceito importante que se deve entender é o de contração da resina. A transformação da temperatura da massa fundida ao ambiente causa que o espaçamento das moléculas das cadeias poliméricas se tornem mais próximas ou empacotados. Em polímeros de cadeias moleculares altamente simétricas ou cristalinas, esta contração volumétrica pode ser de 20% ou mais. Em cadeias orientadas aleatoriamente ou em resinas amorfas, esta contração está na ordem de 5%. Na moldagem por injeção deve-se estar atento a isto e compensar com uma fase prolongada de empacotamento, que introduza mais resina no molde compensando esta contração. O problema óbvio é o congelamento da pele, que isola áreas distantes da porta. Nós podemos então entender porque a injeção contínua apresenta freqüentemente peças com sinais de tensão elevada.

A figura 2.2 ilustra como a espuma estrutural compensa o fluxo e a contração com duas mudanças importantes. Há uma seção de parede mais espessa (freqüentemente duas vezes mais espessa) e um agente de sopro que é adicionado a massa polimérica na máquina injetora. A parede mais espessa permite um fluxo mais fácil, a baixa pressão, de injeção incompleta. Nos próximos estágios de preenchimento, o agente de sopro fornece realmente a pressão de injeção na parte dianteira do fluxo. A espuma serve como um amortecimento interno para a contração e como um atenuador de esforços.

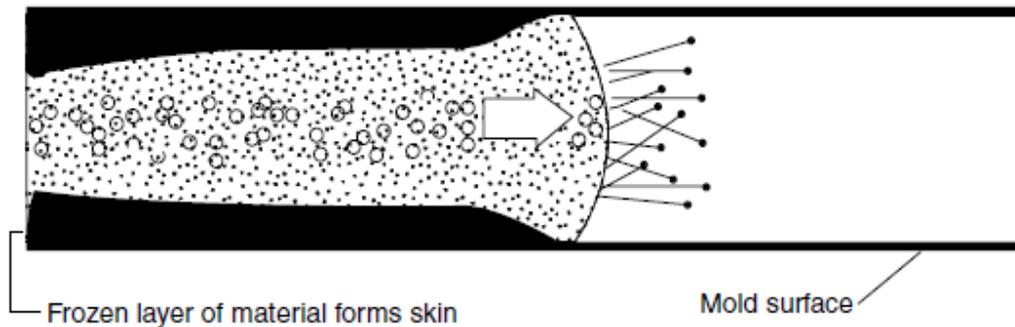


FIGURE 2.2 Structural foam flow front.

O inconveniente à espuma estrutural é o acabamento de superfície do artigo moldado. Durante o estágio crítico de preenchimento, o agente de sopro escapa através da parte dianteira do fluxo, ficando aprisionado entre a superfície do molde e a pele da peça que está se formando, resultando numa situação chamada de redemoinho. A figura 2.3 ilustra a espuma estrutural à contra pressão, que foi inventada como um método para eliminar o redemoinho. Este objetivo é realizado aplicando uma pressão de resistência (gás nitrogênio) de encontro à parte dianteira do fluxo que é o suficiente para manter o agente de sopro em solução na massa polimérica fundida e atrás da parte dianteira do fluxo. Isto é obtido por um molde de compressão, pressão específica do gás e o sincronismo seqüencial na máquina injetora. A espuma estrutural à contra pressão elimina o redemoinho e ainda mantém baixa a tensão com a formação de espuma interna, mas a custo de parede mais espessa da espuma estrutural e conseqüentemente de um peso mais elevado. Isto é compensado obtendo-se maiores propriedades físicas.

A figura 2.4 mostra como a moldagem por injeção assistida a gás é capaz de produzir peças de paredes finas com baixas tensões incorporando um canal de gás (geralmente nitrogênio) dentro do polímero fundido para otimizar o fluxo e compensar a contração. Com este processo, o projetista da peça transforma-se também em engenheiro de processo. A colocação de projeto dos reforços e da espessura de parede determina a posição das passagens do gás, que são como os distribuidores internos para o fluxo do material.

O correto projeto dos reforços pode facilitar paredes finas de peças assistidas a gás (metade de uma similar em espuma estrutural) de duas maneiras. Os reforços transformar-se-ão em facilitadores do fluxo, e quando retirado fora o núcleo de gás, se transformam em compensadores de empenamento. Os reforços adicionam então rigidez à peça, superando a perda de rigidez das paredes finas.

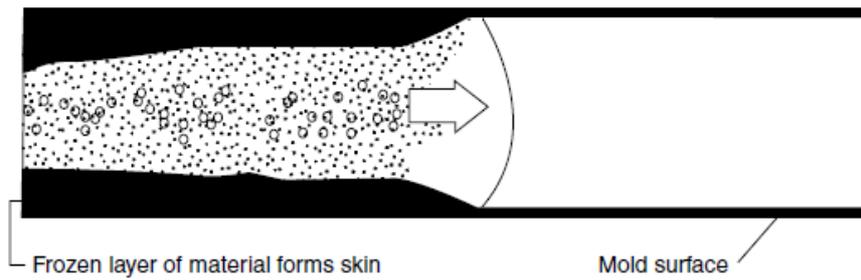


FIGURE 2.3 Counterpressure flow front.

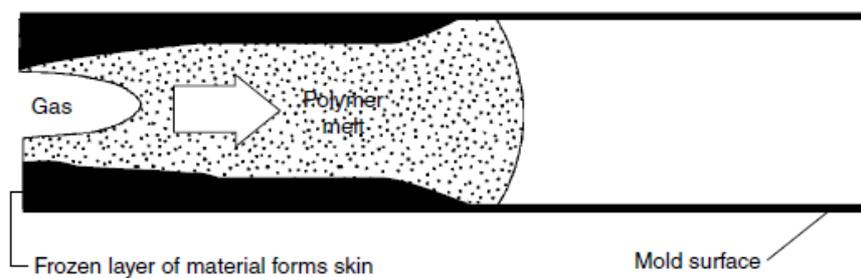


FIGURE 2.4 Gas-assisted flow front.

### 2.1.6 Considerações do comprimento de fluxo

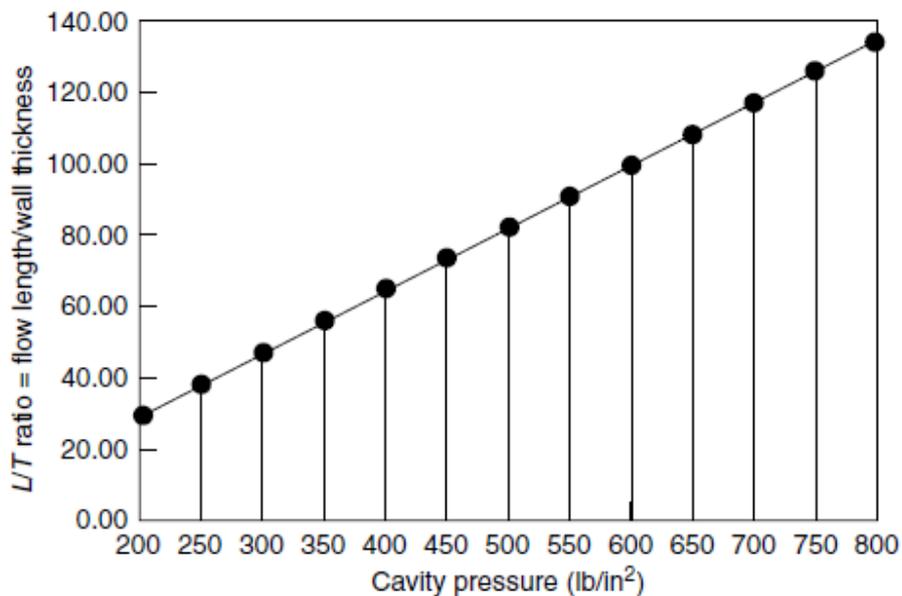
Os dados na tabela 2.2 dão uma noção do fluxo relativo de cada processo. A taxa de comprimento do fluxo dependerá das condições de processo e da geometria da peça e é utilizada para análise comparativa e como regra geral. A relação mostra o comprimento de fluxo dividido pela espessura da parede. A figura 2.5 mostra os cálculos para prever a pressão da cavidade com espuma estrutural a baixa pressão.

- Exemplo:
  - 12.5pol. de comprimento de fluxo do bico / 0.250pol. de espessura da parede = 50:1 de relação de fluxo.
  - 50:1 = 300 lb/pol<sup>2</sup> de pressão média da cavidade.
- Manter a relação L/T de fluxo tão baixa quanto possível.
- Problemas de processo aumentam quando L/T aumenta.
- 140 L/T é praticamente o limite superior.

Este é um exemplo de como aplicar a relação de L/T para determinar necessidades de força de fechamento. Os limites práticos podem ser determinados para cada tipo de máquina. Os dados são baseados no fluxo de um bico de injeção. Os pontos múltiplos de injeção diminuirão o comprimento de fluxo e a relação L/T e conseqüentemente a pressão da cavidade. Dependendo do processo e do equipamento, pode haver uma necessidade de um sistema de câmara quente nos canais do molde.

**TABLE 2.2 Comparative Flow Length-to-Wall Thickness Ratios**

Process	Wall (mm)	Polypropylene	HIPS	ABS	Polycarbonate
Injection molding	3	130	100	85	75
Low-pressure SF	6	200	160	140	120
Co-injection SF	5	185	145	125	105
USM/expanding mold SF	3/6	130	100	85	75
Counterpressure SF	5	175	150	130	90
Gas assist/Thin wall	3	175	150	130	90
Structural web	6	200	160	140	120
External gas	3	195	157	138	118



**FIGURE 2.5** Cavity pressure versus flow length table. Information is approximate and to be used for estimation and example only. (Courtesy of Uniloy/Milicron.)

## 2.2 Espuma estrutural: moldagem por injeção com agentes expansores

O processo de espuma estrutural a baixa pressão pode ser dividido em quatro estágios de preenchimento. Estes quatro estágios aplicam-se a todos os processos de espuma estrutural nos termos do preenchimento de injeção incompleta e em pressões internas do molde. A figura 2.6a mostra a secção transversal de um molde fechado e de um bico de injeção. O molde fechado tem uma cavidade vazia pronta para a injeção incompleta de massa plástica pré blendada de polímero e agente expansor. O bico de injeção está na condição fechada ou recuada, e uma carga do material está sendo mantida sob pressão atrás do bico de injeção. A redução da densidade da peça é determinada pela quantidade de material injetada versus o volume total da cavidade do molde.

Na figura 2.6b a haste do bico de injeção retrai e imediatamente a carga de plástico começa a entrar na cavidade do molde. Há um pico de pressão quando o material entra na cavidade do molde aberta devido a que o agente expansor começa a se expandir. A ventagem do molde é diferente da dos moldes padrões de injeção, por diversas razões. Visto que a espuma estrutural

tem uma grande parede, há naturalmente mais ar na cavidade a ser deslocado assim que a resina flui. O agente expensor que escapa fora da borda de ataque da parte dianteira do próprio fluxo transforma-se em mais gás a ser deslocado antes do preenchimento completo do molde. Esta fase aberta do bico de injeção durará de 1 segundo até 15 a 20 segundos. A viscosidade do material, a espessura de parede da peça, as limitações de fluxo, e a pressão de injeção, todas têm efeito no tempo da injeção. Tipicamente, o tempo longo de injeção conduz a mais redemoinhos. A máquina está no estágio de alta pressão de fechamento nesta fase.

A figura 2.6c ilustra o terceiro estágio, onde a carga do material foi injetada e a haste do bico de injeção se fecha, isolando a cavidade do molde de toda a pressão de injeção. Neste momento, a pressão do agente expensor está enchendo o restante da cavidade do molde. A ventagem é particularmente crítica durante este estágio do enchimento do agente expensor. O gás não deslocado da frente de fluxo causará limitações. A ventilação apropriada no final do fluxo melhorará a resistência da linha de solda e reduzirá rejeições de injeção incompleta. Uma referência pode ser efetuada anotando-se o tempo de ventagem após o fechamento do bico de injeção. Isto deve continuar por alguns segundos até que as cavidades se tornem empacotadas sob a pressão do agente expensor. O travamento do molde continua durante este estágio.

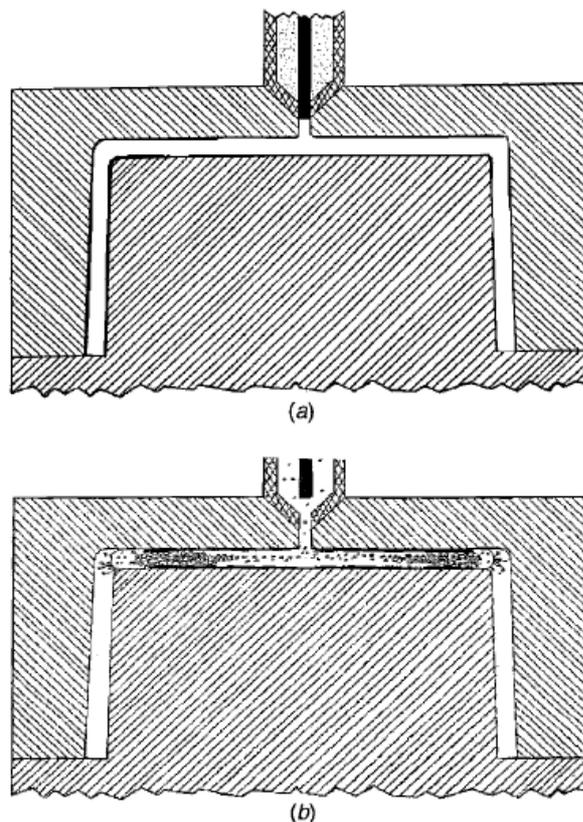


FIGURE 2.6 Structural foam filling stages.

A figura 2.6d mostra a cavidade do molde após o enchimento completo. O agente expensor continua a exercer a pressão, criando desse modo um amortecimento interno. Este amortecimento compensa a contração da resina e contrabalança as tensões internas. Neste momento cessa a ventagem do gás e se forma a pele contínua por fora do amortecedor de espuma. Segue um ciclo de resfriamento de 30 a 300 segundos, dependendo da espessura da parede e dos pontos mais

espessos. A tabela 2.3 mostra um guia prático do tempo total de ciclos por hora para a espuma estrutural a baixa pressão.

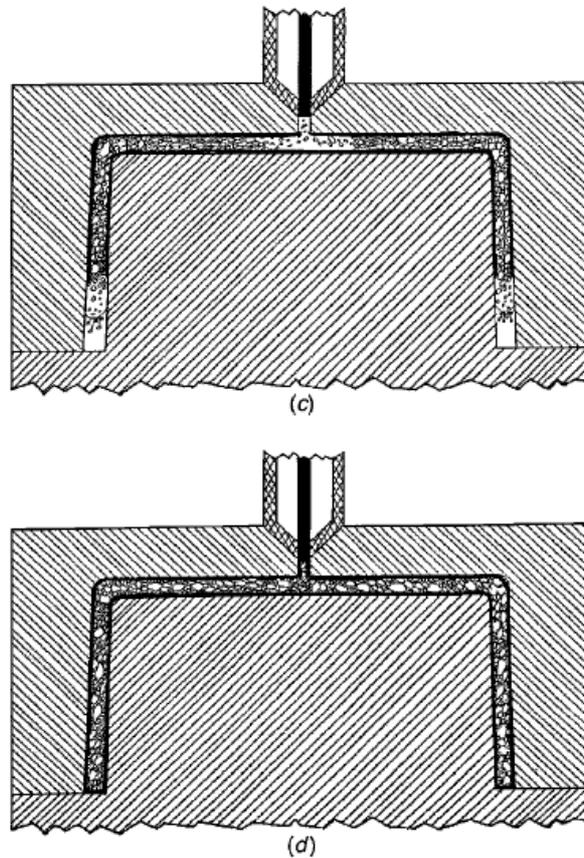


FIGURE 2.6 (Continued)

TABLE 2.3 Wall Thickness versus Cycle Time

Wall Thickness (in.)	Cycles/hr
0.125–0.157	30–40
0.157–0.187	25–35
0.187–0.196	20–30
0.196–0.236	15–25
0.236–0.275	12–24
0.275–0.314	10–18
0.275–0.393	5–12

Source: Data from Uniloy/Milicron.

O inconveniente principal da espuma estrutural é o acabamento da superfície de uma peça moldada. Isto ocorre porque a pressão do agente expensor, prevista para a moldagem a baixa pressão e amortecimento interno faz com que a superfície tenha uma aparência corada (queimada) referida como um redemoinho, que é o resultado do gás do agente expensor que escapa da borda de ataque da parte dianteira do fluxo da resina, durante o estágio de preenchimento. A condição de baixa pressão dentro do molde é necessária para que ocorra o

espumar, mas permite que bolhas escapem do plástico e fiquem presas entre a superfície do molde e a pele da peça. Este redemoinho se parece com uma queimadura de sol que segue traçando o fluxo do material. A figura 2.7 ilustra a formação de redemoinho na superfície da peça. O acabamento da superfície com redemoinhos freqüentemente restringe o uso da espuma estrutural aos tipos de aplicações que não exigem acabamento visual ou de maneira que o preço do produto final permita o custo de uma operação posterior de pintura. Nos últimos anos a tecnologia de moldagem se desenvolveu, produzindo peças de espuma estrutural livre de redemoinhos na superfície de acabamento. Esta tecnologia pode ser dividida em três tipos: (1) molde de expansão (abertura) a alta pressão, (2) espuma estrutural de co-injeção, e (3) espuma estrutural à contra pressão.

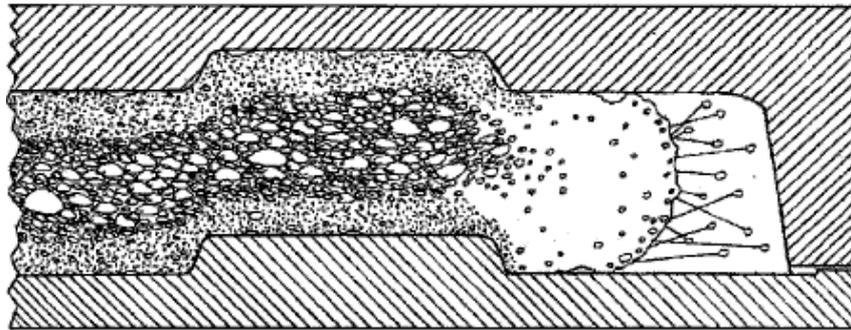


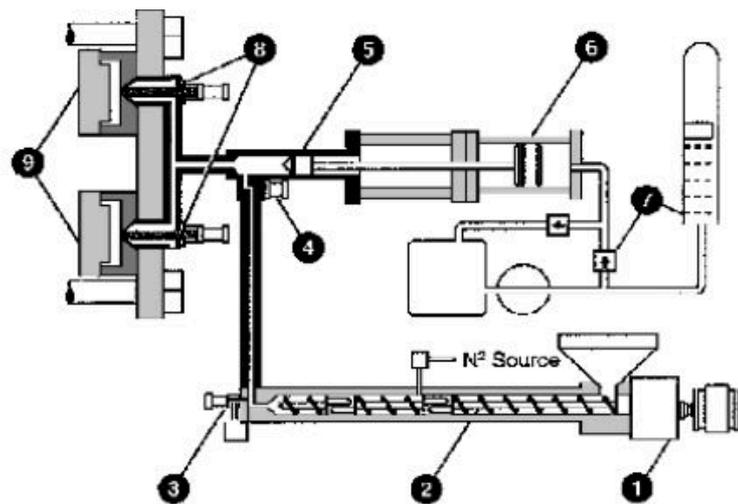
FIGURE 2.7 Swirl formation.

### 2.2.1 Equipamento para espuma estrutural a baixa pressão

A espuma estrutural foi concebida inicialmente como um método para produzir grandes peças termoplásticas com as mesmas vantagens que a moldagem por injeção oferece às peças menores. Muito da tecnologia do equipamento é a mesma que a de moldagem por injeção. A indústria da espuma estrutural teve um início humilde usando máquinas de construção de múltiplos bicos com injetoras de dois estágios. Estas máquinas se caracterizavam por placas super dimensionadas, pelos acumuladores de alimentação de materiais, com múltiplos bicos, canais de distribuição internos aquecidos, pela baixa pressão de fechamento, e pela baixa pressão de injeção. Uma das vantagens deste equipamento é a sua habilidade de moldar simultaneamente peças muito grandes ou diversas peças menores nas grandes placas originais de moldagem. No decorrer dos anos, esta família de equipamentos evoluiu para seguir os avanços de tecnologia da espuma estrutural. Os refinamentos de hoje incluem ainda a injeção de dois estágios através dos bicos de bloqueio múltiplos, mas agora com os bicos sendo controlados seqüencialmente. Pressões mais elevadas de injeção estão disponíveis para assegurar a injeção rápida do material. Controladores lógicos programáveis (CLPs) controlam agora a temperatura de injeção, as pressões de fechamento, o sincronismo, o curso das placas, e a operação da injetora. A figura 2.8 ilustra uma disposição típica do acumulador de materiais, dos distribuidores, e dos bicos.

Na figura 2.9a o estágio de pré-injeção tem o molde na posição fechado e bloqueado, no acumulador material carregado, e a haste do bico de injeção na posição fechado. O molde é bloqueado com a pressão máxima de fechamento o mais rapidamente possível após o estágio precedente da remoção da peça. O acumulador de material foi pré-carregado durante o estágio de resfriamento do ciclo precedente. A tabela 2.4 fornece uma regra empírica geral para exigências da força de fechamento para a espuma estrutural a baixa pressão. O comprimento de fluxo, o tipo

da resina, e as condições de processamento, todos têm um efeito óbvio na exigência da força de fechamento, assim que a tabela 2.4 é apresentada para comparação. O ponto é aquele em que a redução da espessura da parede tem um efeito direto nas pressões de enchimento e conseqüentemente em exigências crescentes de fechamento da máquina. As seções de parede reduzidas possuem um ciclo mais rápido, entretanto refira-se a tabela 2.3 para tempos estimados de ciclo.



1. Variable speed electric motor and gear reducer for efficient screw rotation.
2. Two (2) stage extruder screw and barrel with N<sub>2</sub> gas port and dynamic mixer.
3. Purge valve for color and material change.
4. Shut off/non return valve.
5. Injection accumulator with plunger.
6. Injection hydraulic cylinder.
7. Gas over oil accumulator system with proportional control valves.
8. Multiple injection nozzles with individual controls.
9. Molds can be filled sequentially.

FIGURE 2.8 Multi-nozzle manifold. (Courtesy of Uniloy/Milicron.)  
**TABLE 2.4 Structural Foam Wall Thickness and Tonnage**

Wall Thickness (in.)	In-Mold Pressure (lb/in <sup>2</sup> )	Clamp Pressure (tons/in <sup>2</sup> )
0.150	2000	1.0
0.200	1200	0.6
0.250	500	0.25
0.300	400	0.20

Durante o estágio de preenchimento (figura 2.9b), o molde permanece bloqueado sob alta pressão; o acumulador de material começa a descarregar o material porque o bico está na posição aberta com a haste do bico retraída. A ação da haste do bico é coordenada com o curso do acumulador de material. Isto permite volumes precisos de injeção e a abertura seqüencial dos bicos. A injeção seqüencial tem duas vantagens potenciais. Nas grandes peças multi bloqueadas é possível ter um efeito de moldagem em cascata onde o material injete atrás da parte dianteira do fluxo. Isto aumenta a força da linha de solda e permite comprimentos maiores de fluxo. Além disso, as cavidades múltiplas podem ser moldadas em família, com cada cavidade tendo sua injeção própria e precisa de plástico. Na moldagem em família é comum o molde em torno de 10 cavidades de peças menores. Algumas máquinas especialmente construídas têm unidades múltiplas de extrusão, cada uma alimentando seu próprio distribuidor e fabricando peças de materiais diferentes no mesmo ciclo de máquina.

Na figura 2.9c o estágio é mostrado no começo de empacotamento, o bico é mantido fechado após o volume preciso haver sido injetado. A pressão do agente de expansão empurra a parte dianteira do fluxo para o final do fluxo. Na figura 2.9d os gases do agente de expansão terminam o preenchimento do molde e continuam a exercer pressão enquanto resfria. O estágio de resfriamento que segue é determinado em maior parte pela espessura da parede da peça ou, sendo mais exato, pela seção individual mais espessa da peça. Há duas considerações do tempo de ciclo com a espuma estrutural. É primeiramente entender a necessidade de que para suportar a força da ejeção, as peças devem estar perfeitamente sólidas. A segunda consideração é original à espuma estrutural, se a peça é removida demasiado rápido, a pressão interna do agente de sopro pode ser maior do que aquela das peles que tentam contê-lo. O resultado, chamado sopro posterior, assemelha-se a uma protuberância ou a um nó na superfície da peça. Este é único modo para definir a área mais espessa da peça. Infelizmente, o molde já está pronto neste momento e é caro de corrigi-lo. Durante o estágio de resfriamento há uma redução na força de fechamento da máquina, porque as pressões de injeção e do agente de expansão já não são mais um fator. Depois, a máquina recarregará seu acumulador de material antes do ciclo seguinte.

A fase final é o estágio da ejeção, quando as placas da máquina abrem, abrindo por sua vez o molde, e o sistema de ejeção do molde empurra a peça livre. Uma vez que a peça é removida, a máquina é fechada pelas placas que progridem à posição fechado, e a pressão necessária de fechamento é retornada então às exigências da pré-injeção.

A moldagem a baixa pressão explica o defeito mais comum de moldagem de injeção incompleta de espuma estrutural. Quando cada peça de espuma estrutural começa como uma injeção incompleta deliberada na extrusora da máquina, deve-se supor determinada expansão com conseqüente preenchimento completo do molde pela ação do agente de expansão. Entretanto, este não é um sistema de malha fechada e depois que a quantidade é injetada, não há geralmente nenhuma maneira de compensar uma área não preenchida. Além disso, as pressões no final distante de fluxo são reduzidas a menos de 25% devido à dependência total da pressão do agente de expansão movimentar a parte dianteira do fluxo.

A baixa pressão de enchimento na frente de fluxo é igualmente uma explicação para o desenvolvimento muito lento da simulação computadorizada do fluxo para a espuma estrutural. Quando um engenheiro de processo experiente puder usar programas de moldagem por injeção, melhores resultados virão do uso pesado da experiência precedente (experimentação e erro). O processo de espuma estrutural é dependente da tentativa e erro, devido às seções de parede mais espessas empregadas. A posição da porta e a integridade da linha de solda são importantes parâmetros para o projetista do molde, o engenheiro de processo, e o projetista da peça. As

posições das múltiplas portas tornam-se vantajosas quando as grandes peças são projetadas com características de delimitação de fluxo.

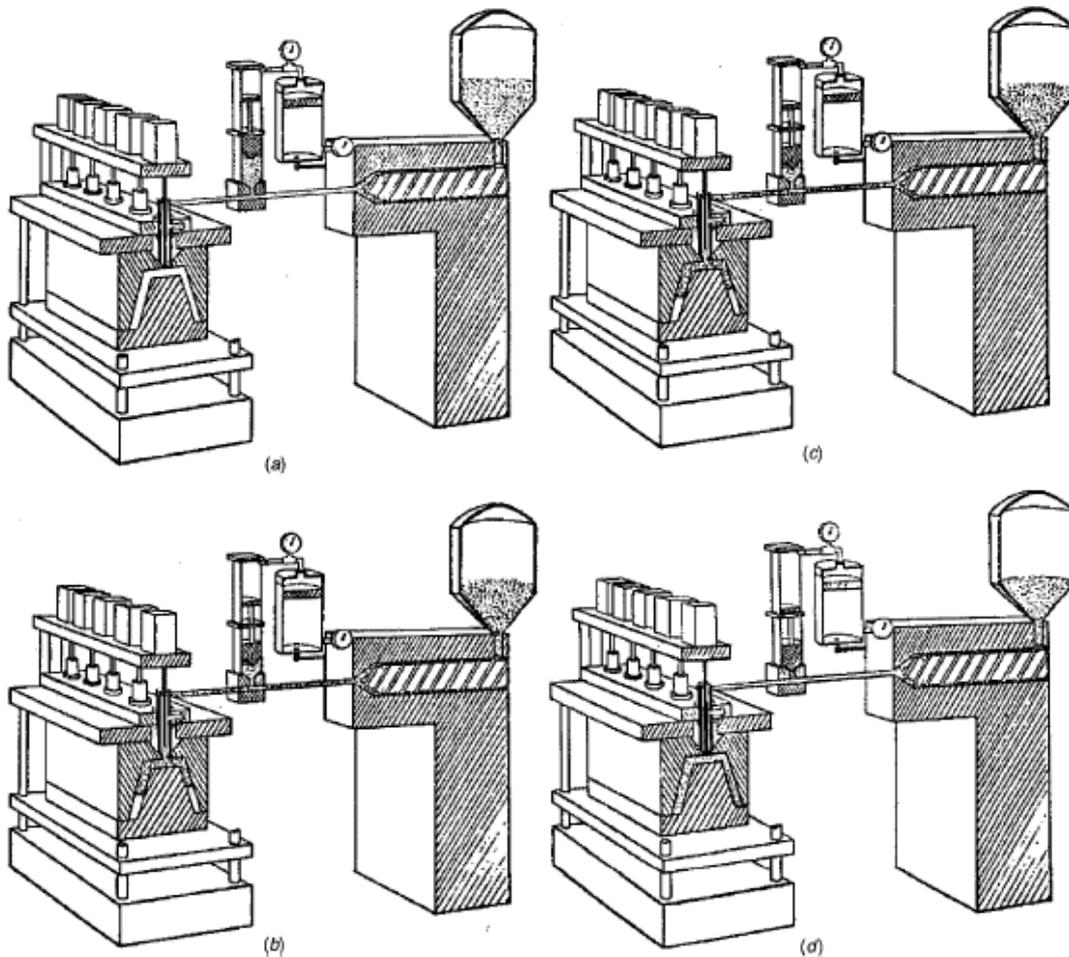


FIGURE 2.9 Multi-nozzle machine operation stages.

FIGURE 2.9 (Continued)

Os mesmos estágios básicos se mostram verdadeiros quando uma máquina de injeção de bico único é usada. Nestas aplicações, algumas modificações especiais são benéficas. Um bico de fechamento automático impede a expansão causada pelo agente de sopro com espumagem na extrusora. Igualmente, fornece um pico de pressão mais controlado de injeção incompleta.

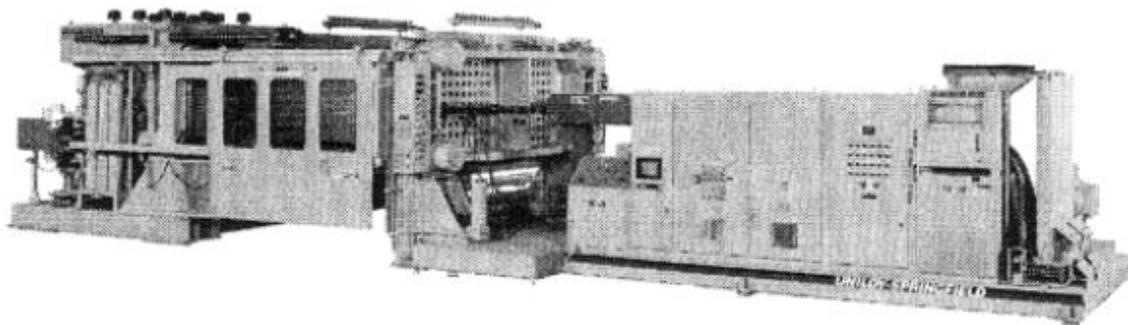


FIGURE 2.10 Multi-nozzle Uniloy machine. (Courtesy of Uniloy/Milicron.)

Refinamentos posteriores do equipamento de moldagem de espuma estrutural incluem velocidades mais rápidas de injeção, que produzem revestimentos de superfície melhorados. A maioria de teorias de espumas estruturais supõe que menos redemoinho pode se formar se o tempo de injeção é diminuído. A velocidade aumentada de injeção é igualmente útil em peças com uma seção de parede reduzida, onde mais pressão de empacotamento seja exigida. Velocidades mais rápidas de injeção, entretanto, tendem a produzir pressões mais elevadas na cavidade, e conseqüentemente maiores esforços de moldagem devem resultar (e pressão mais elevada de fechamento, em oposição à pressão aumentada de injeção). A figura 2.10 mostra uma máquina multi propósito de espuma estrutural a baixa pressão.

### 2.2.2 Equipamento para espuma estrutural a alta pressão

Uma alternativa a uma máquina de espuma estrutural de múltiplos bicos é uma máquina de alta pressão adaptada da moldagem por injeção. Uma máquina padrão de moldagem de injeção de alta pressão é apropriada para a moldagem de espuma estrutural com a adição de um bico de fechamento automático. O conceito é isolar a cavidade do molde da extrusora para impedir que o agente de expansão escape. Isto é igualmente uma realidade com o processo assistido a gás. Em ambos os processos é necessário que a cavidade se torne pressurizada pelo gás ou pelo agente de expansão. Adaptando um distribuidor interno à máquina, não é necessário colocar um sistema de câmara quente nos canais de cada molde. Um projeto sábio incorpora os padrões industriais de 6pol. de afastamento padrão. Isto gera bons resultados com uma máquina recíproca de bico único.

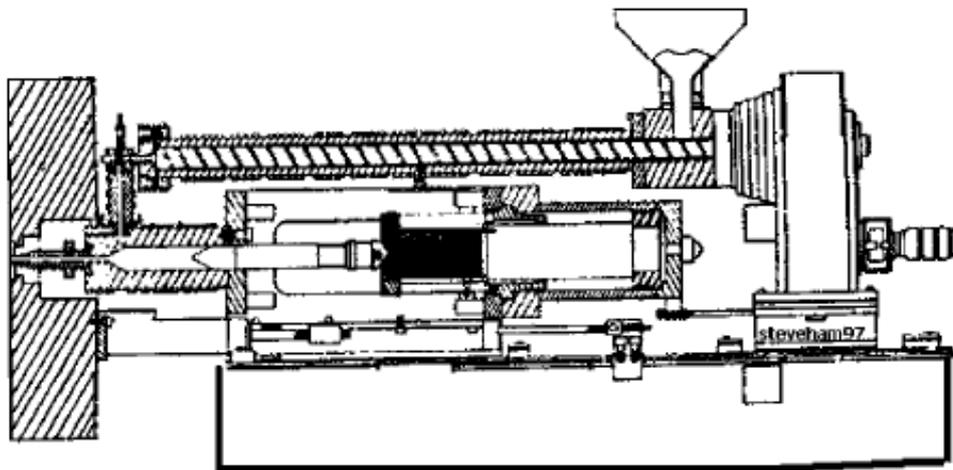


FIGURE 2.11 Two-stage injection machine.

Outra categoria especial de equipamento é um híbrido dos dois primeiros. Estas são máquinas estruturais construídas para a finalidade de espuma com bico único. Geralmente, estas são máquinas de dois estágios com um acumulador de material que alimenta um único bico, tendo a capacidade do fechamento automático (veja figura 2.11). Velocidades rápidas de injeção são obtidas e placas sobre dimensionadas são utilizadas.

### 2.3 Co-injeção de espuma estrutural

Assim como o nome indica, a co-injeção de espuma estrutural é o produto de uma injeção quase simultânea de dois materiais distintos, mas compatíveis. O objetivo é produzir uma peça com o núcleo de espuma encapsulada dentro de uma pele contínua. O coração desta tecnologia encontra-se no molde do equipamento, que é desenvolvido particularmente híbrido. Há três tipos de equipamento para a produção de co-injeção. As máquinas multi propósito de co-injeção utilizam duas extrusoras separadas, uma que produz o componente da pele, que é um material sem agente de expansão, e outra que fornece o material da espuma com um agente de expansão químico. O agente de expansão é ativado por calor, mas permanece encapsulado sob pressão. Reciprocamente as extrusoras, que alimentam um bico especial de canal duplo, fornecem a pressão de injeção. O bico possui dois canais de fluxo concêntricos para os respectivos materiais, o que permite que a pele encapsule o núcleo. O bico hidráulico é controlado eletronicamente para permitir uma velocidade variável de injeção de cada canal de fluxo. Os distribuidores dos canais de câmara quente podem ser projetados com características especiais para a co-injeção. Duas extrusoras são geralmente utilizadas nestes sistemas. O desenvolvimento atual adapta uma extrusora especial ao equipamento com dois trajetos de materiais, permitindo materiais separados.

Em todos estes desenvolvimentos de equipamento, o mesmo conceito básico é seguido. A primeira fase (figura 2.12a) é somente a injeção da pele contínua. Esta é a formação da frente de fluxo e da pele exterior inteira. A segunda fase (figura 2.12b) segue quase simultaneamente com a injeção da pele contínua, uma injeção incompleta do núcleo espumado. A frente de fluxo da pele contínua torna-se menos espessa enquanto é alongada até o final do fluxo. A fase final (figura 2.12c) é o fechamento automático do bico de injeção em um momento predeterminado no qual a cavidade do molde não está completamente cheia. O núcleo espumado responde ao pico de pressão expandindo para completar a cavidade do molde. A frente de fluxo da pele contínua impede que a espuma a rompa completamente; assim o encapsulamento ocorre.

A vantagem principal do processo de co-injeção de espuma estrutural é o acabamento da superfície, que é quase como a aparência da injeção, quando um material clássico de injeção é usado para o componente da pele. O núcleo espumado oferece as vantagens similares a da espuma estrutural a baixa pressão. Nenhuma mistura dos materiais ocorre embora o material do núcleo esteja distribuído completamente. Uma das características originais do processo é a capacidade de ter materiais diferentes para a pele e o núcleo. Isto pode ser benéfico quando um material não consiga fornecer todas as propriedades exigidas. É igualmente concebível usar um material barato de núcleo e o material principal para a pele, mas isto não é aconselhável para as aplicações que exigem materiais aprovados e assegurados por laboratórios certificadores.

A co-injeção de espuma estrutural terá um perfil de enchimento variável dependendo da pressão do componente do núcleo. Tendo em vista que a co-injeção de espuma estrutural é um processo de injeção incompleta, o perfil de enchimento variará de acordo com a distância da porta, entre outras variáveis. A tabela 2.5 mostra a compatibilidade dos materiais para a co-injeção de espuma estrutural. Devido à ligação mecânica que ocorre entre a pele e o material do núcleo, deve haver a compatibilidade física. Também, a contração da resina é um fator onde a contração desuniforme possa causar uma delaminação.

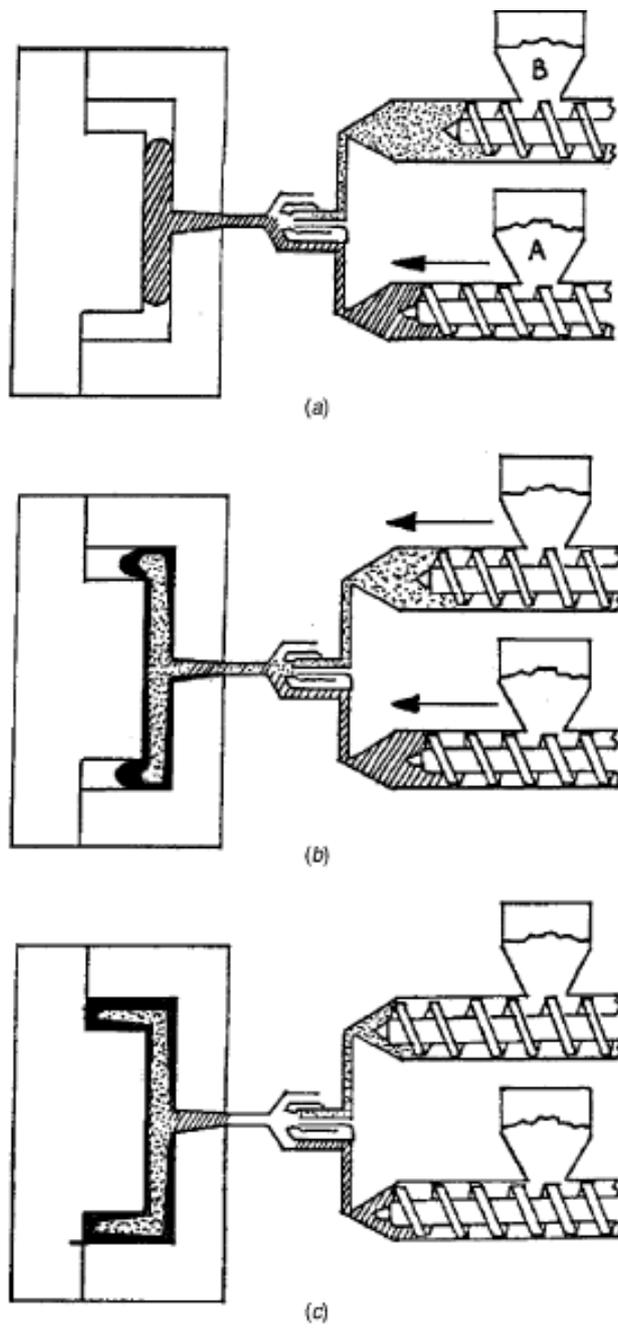


FIGURE 2.12 Co-injection structural foam molding stages.

## 2.4 Espuma estrutural a contra pressão

A próxima técnica de moldagem livre de redemoinho é o uso da espuma estrutural a contra pressão, um processo anteriormente denominado de gás a contra pressão. Com o advento da moldagem por injeção assistida a gás havia demasiado gás na terminologia para estes dois processos muito diferentes. O conceito da contra pressão é utilizar um molde pressurizado a gás, que, com ventagem controlada, permita que a expansão da espuma no ciclo ocorra depois que uma superfície lisa se forma. O gás de uso geral é o nitrogênio com pureza de pelo menos 98%. A finalidade é melhorar o acabamento da superfície moldada impedindo a formação do redemoinho. A contra pressão mantém o agente de sopro comprimido até que a pele contínua tenha se formado. Os numerosos esforços de desenvolvimento começaram em meados dos anos 70, produzindo diversas tecnologias diferentes de contra pressão na Europa, nos Estados Unidos, e no Japão.

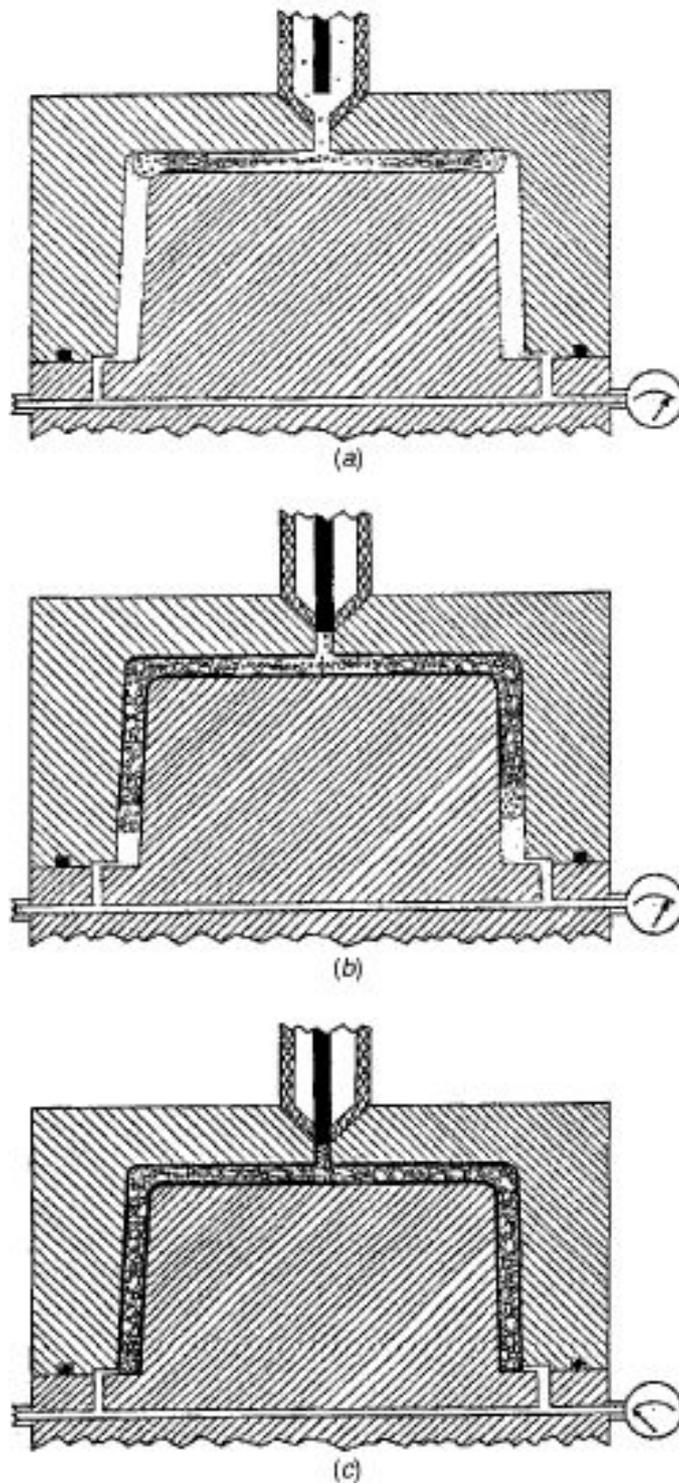
O processo inicia com um molde fechado a pressão (figura 2.13a), que é carregado com a pressão de gás antes da injeção do plástico. Para manter a pressão, a linha divisória do molde, as correções dos bicos injetores, os braços de movimentação e o assento do bico devem ser selados de alguma maneira. As técnicas da selagem variam consideravelmente, mas o conceito da selagem é o mesmo. Quando a apropriada contra pressão é obtida, uma injeção incompleta predeterminada que contém dispersado o agente de expansão comprimido é injetada no molde (veja a figura 2.13b). Durante a seqüência da injeção, a ventagem controlada deve ocorrer para permitir a consistência da contra pressão enquanto o volume não preenchido do molde está sendo reduzido. A contra pressão impede que o agente de expansão atue, eliminando assim o redemoinho, que é causado normalmente pelas bolhas de gás que ficam presas entre a superfície moldada e a pele da divisória. Além disso, muitas técnicas são praticadas, mas o conceito é o mesmo. A extensão da injeção incompleta está aberta à discussão. Bons resultados são obtidos com contra pressão contrária de injeção completa, onde a cavidade é preenchida, mas não empacotada. Um pico de pressão da cavidade é causado pela retração volumétrica da resina. O agente de expansão, comprimido até este ponto, sente a redução da pressão e expande-se para completar os vazios e manter as paredes empacotadas de encontro à cavidade do molde durante o estágio de resfriamento.

Após um tempo predeterminado (figura 2.13c), a contra pressão no molde é liberada através dos vents de exaustão. Este processo de ventagem causa um pico de pressão dentro da cavidade do molde, permitindo desse modo a expansão instantânea do agente de expansão, empacotado agora pela pele contínua. Os ciclos normais de resfriamento e de ejeção da peça do molde seguem, e a seqüência é repetida. As peças produzidas pela contra pressão do gás têm a redução de densidade de 5 a 10%, comparada a de 15 a 20% para a espuma estrutural a baixa pressão. Isto é devido à formação de uma pele mais grossa. As peças de espuma estrutural a contra pressão, mais densas, conduzem a uma estrutura celular mais uniforme de toda a peça, com a conseqüente otimização de suas propriedades físicas.

TABLE 2.5 Co-injection Materials Compatibility\*

Material	PPO																PCR PC&									
	ABS	ASA	CA	EVA	PA.6	PA.66	PC	PE-HD	PE-LD	PMMA	POM	PP	PP mod.	PS-GP	PS-HI	PBT	TPU	PVC-W	SAN	TPR	DET	PWA	PPS	PBT	ABS	
ABS	G	G	G	G	G	G	G	N	N	G	N	N	N	N	N	N	G	G	G	G	G	G	B	B	G	G
ASA	G	G	G	G	G	G	G	N	N	G	N	N	N	N	N	N	G	G	G	G	G	G	B	B	G	G
CA	G	G	G	B	G	G	G	N	N	G	N	N	N	N	N	N	G	G	G	G	G	G	B	B	G	G
EVA	G	B	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
PA.6					G	G	B	B	B	N	B	N	N	N	N	N	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
PA.66					G	G	B	B	B	N	B	N	N	N	N	N	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
PC	G	G	G	G	G	G	B	B	B	N	B	N	N	N	N	N	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
PE-HD	N	N	N	G	B	B	N	G	G	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PE-LD	N	N	N	G	B	B	N	G	G	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PMMA	G	G	G	G	G	G	B	B	B	G	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
POM	N	N	N	N	N	N	N	B	B	G	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PP	N	N	N	N	N	N	N	N	N	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PPO mod.	N	N	N	N	N	N	N	N	N	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PS-GP	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PS-HI	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PBT	G	G	G	G	G	G	G	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
TPU	G	G	G	G	G	G	G	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PVC-W	G	G	G	G	N	N	G	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
SAN	G	G	G	G	G	G	G	N	N	G	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
TPR	G	G	G	G	G	G	G	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PETP	G	G	G	G	G	G	G	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PVAc	B	B	B	B	B	B	B	B	B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PPSU																										
PC&PBT	G	G	G	G	G	G	G	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
PC&ABS	G	G	G	G	G	G	G	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

\*G, good bonding; B, bad bonding; N, no bonding.



**FIGURE 2.13** Counterpressure mold-filling stages.

A técnica de contra pressão a gás exige máquinas com maior capacidade de fechamento do que aquelas para a espuma estrutural a baixa pressão, devido ao aumento da pressão interna do molde causada pela contra pressão do gás. O gás de uso geral para a contra pressão é o nitrogênio, mas outros gases inertes podem produzir os resultados desejados. A quantidade de pressão adicional de fechamento exige variações de 25 a 100%, dependendo da técnica de

vantagem usada durante a injeção do plástico no molde. Isto igualmente explica porque os moldes de aço são geralmente exigidos para este processo. A vantagem desta tecnologia é a habilidade de produzir acabamentos de superfície melhorados nas peças produzidas em máquinas convencionais de espuma estrutural. Tudo que é exigido é um molde especialmente projetado e uma fonte de pressão controlada seqüencialmente. O acabamento da superfície é melhorado a ponto de a pintura secundária poder ser eliminada em muitas aplicações. Em aplicações altamente cosméticas, o custo da pintura é reduzido significativamente, de 33 a 50% daquele da espuma estrutural a baixa pressão. O processo de contra pressão é capaz de produzir peças moldadas com uma superfície próxima a da moldagem de injeção, reduzindo consideravelmente os custos do acabamento.

Há dois tipos de espuma estrutural a contra pressão assim como para a contra pressão não espumada. A espuma estrutural a contra pressão de injeção completa é similar à moldagem por injeção contínua, mas sem o amortecimento. O agente de expansão serve como um amortecedor interno para a contração. De fato, a redução da densidade iguala a contração volumétrica da resina dentro da cavidade do molde fechado. A contra pressão de injeção incompleta é realmente um processo a baixa pressão onde os dispositivos automáticos de entrada do agente de expansão auxiliam na pressão de enchimento. Mais duas considerações são: que as pressões de empacotamento para a moldagem por injeção são mais elevadas do que as pressões de preenchimento, sendo assim a contra pressão de injeção completa pode ainda ter uma redução nas exigências de força para fechamento; a outra consideração é que a adição do agente de expansão muda a viscosidade dos materiais proporcionando acréscimo no comprimento de fluxo da massa fundida. A contra pressão contínua não envolve nenhum agente de expansão, e é uma ferramenta para a pressão da parte dianteira do fluxo uniforme e o controle do processo de circuito fechado. A espuma estrutural a contra pressão existe desde 1977 e em produção desde 1983. Até recentemente, o processo foi uma tecnologia de moldagem em desenvolvimento. Nenhum padrão industrial foi estabelecido. As adaptações da contra pressão envolvem duas áreas principais, os controles da máquina e a construção do molde. O molde da máquina é modificado para proporcionar o controle do perfil da injeção. Uma fonte de contra pressão de gás é integrada ao sistema. Esta fonte de gás precisará criar 200 a 500 lb/pol<sup>2</sup> por aproximadamente 1 minuto. O volume de gás necessário estará de acordo ao volume da cavidade do molde mais aquele do sistema de ventagem e das linhas de conexão. Controles externos ou internos são adicionados para monitorar e controlar o arranjo em seqüência da contra pressão. Ar comprimido ou nitrogênio foram usados com sucesso. Os melhores resultados são conseguidos com nitrogênio na pureza de pelo menos 98%. Um molde multi propósito é empregado sendo selado completamente e equipado com sistema de ventagem e transdutores de pressão. Ao especificar as exigências de força de fechamento é necessário incluir a área interna do anel de vedação. A figura 2.14 é um diagrama esquemático básico do processo.

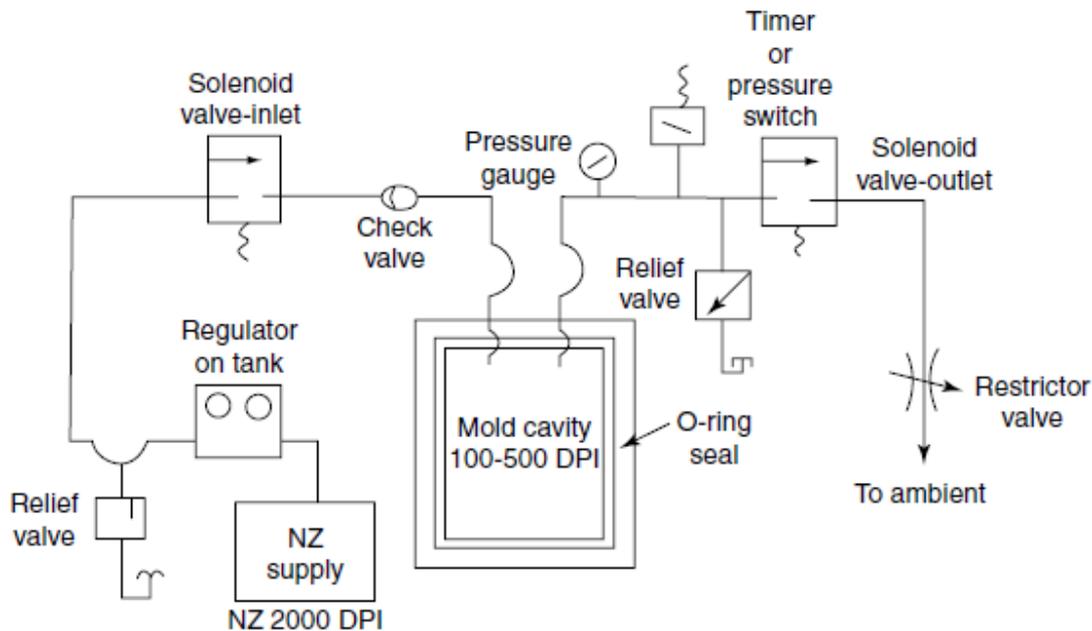


FIGURE 2.14 Counterpressure process.

## 2.5 Espuma estrutural com expansão (abertura) do molde

A empresa United Shoe Machinery (USM) patenteou um processo de expansão (abertura) do molde, que é uma combinação única da moldagem de injeção e de espuma estrutural. O equipamento usado é uma máquina de alta pressão da moldagem de injeção de rosca recíproca. Este é o processo mais próximo à espuma estrutural a alta pressão verdadeira, mas mesmo assim tem uma fase a baixa pressão para permitir a expansão do agente de expansão. O processo foi licenciado para a Farrell Machine nos anos 70, mas poucas máquinas foram construídas, e estas foram raramente usadas exclusivamente para este processo. Tentativas posteriores do processo foram bem sucedidas no nível de processadores. O projeto do molde é um dos aspectos mais importantes do processo. A figura 2.15a mostra a primeira etapa, injetando uma quantidade pré-estabelecida do material e do agente de expansão no molde sob alta pressão e com enchimento completo. O molde é fechado sob placas à alta pressão, como na moldagem por injeção. A elevada pressão interna no molde impede a expansão do agente de expansão, e nenhum redemoinho é assim criado.

Uma vez que a pele se estabelece numa estadia predeterminada, uma ação de retração (abertura) do molde ocorre, aumentando o volume na cavidade do molde e reduzindo assim pressões e permitindo a expansão do agente de expansão. A figura 2.15b ilustra o molde retraído e a atuação do agente de expansão. A expansão do molde controla onde ocorre o espumar. A pele, que foi formada antes da expansão do agente de expansão, não está sujeita a redemoinhos. Níveis elevados de redução da densidade são praticáveis baseados no aumento do volume da cavidade. As áreas sem a expansão do molde permanecem contínuas. Este é um processo praticável para as peças que exigem grandes variações na espessura de parede.

As desvantagens incluem limitações de projeto por causa de confinamentos nos moldes causados pela expansão. Há uma linha testemunha visível em uma peça no ponto de movimentação do molde. A força de fechamento do molde da máquina é similar a da moldagem por injeção. O custo do molde é substancialmente mais elevado, devido à ação de movimento e às exigências aumentadas de pressão.

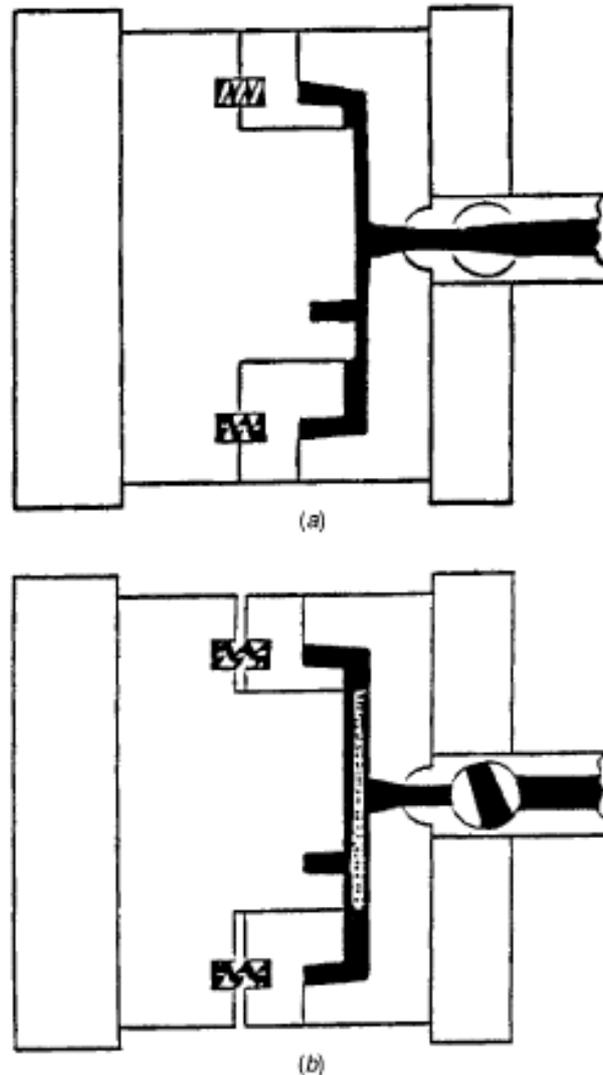


FIGURE 2.15 Expanding structural foam mold-filling stages

## 2.6 Moldagem por injeção assistida a gás

A moldagem por injeção assistida a gás é um processo em que o gás (nitrogênio) é injetado junto com o plástico fundido para produzir uma peça que tenha pelo menos algumas seções ocas. A finalidade é ajudar nos problemas normais da moldagem por injeção, relacionados ao fluxo do fundido e da contração. Há diversas categorias de aplicações assistidas a gás.

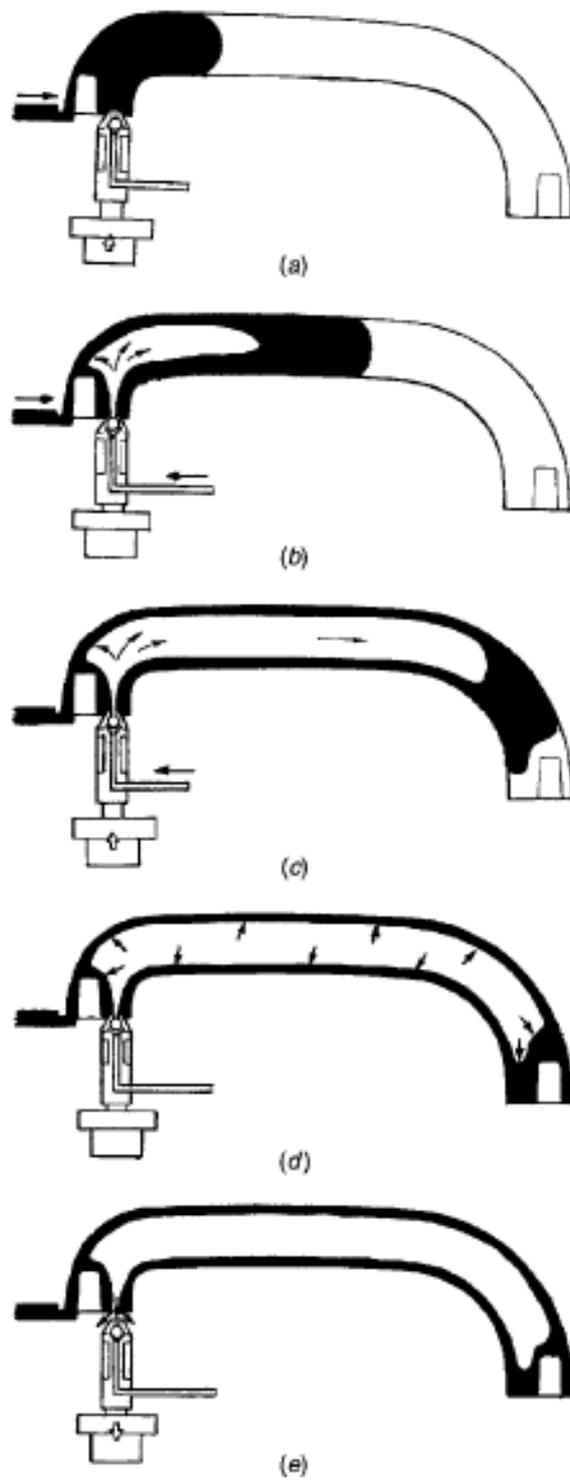
Parece natural aplicar este processo à produção de peças ocas. Embora esta seja uma área de aplicação possível, não é tão eficaz para grandes diâmetros quanto a moldagem por sopro. Tipicamente, o molde de sopro produzirá uma perda de peso de até 75%. A assistência a gás conseguirá uma perda de peso de 30 a 40% com áreas ocas. A assistência a gás fará sentido nestas aplicações quando há alguns detalhes de moldagem por injeção que vão além do permitido pela moldagem por sopro. A vantagem principal da assistência a gás no que diz respeito às peças ocas é a possibilidade de combinar uma peça oca com uma peça de outro modo compacta, ou de adicionar detalhes que se assemelham àqueles da moldagem por injeção.

A assistência a gás tem sua própria aplicação com as peças estruturais de parede dupla. O projetista terá a possibilidade de criar peças a custo de paredes finas com a força de paredes

espessas. Esta é uma técnica de injeção incompleta, onde reforços desproporcionados de núcleos perdidos são formados por canais de gás. Os tubos ocos resultantes dentro da peça moldada proporcionam uma relação incrível de força versus peso. Comparado a uma peça com grandes reforços como meio de proporcionar rigidez, neste caso há um aumento de 25 a 40%. Conter a bolha dentro dos reforços estruturais é a preocupação essencial do projetista e do processador. Um projeto aperfeiçoado não terá margem de erro para permitir que a bolha penetre a seção das paredes, o que é chamado de “dedos viscosos”. As peças estruturais de paredes finas compreendem uma classe de peças que podem ser imaginadas como semelhantes às peças de espuma estrutural, onde a espuma é substituída por reforços interconectados de seções ocas. O conceito é que as peças de espuma estrutural obtêm a força primeiramente da pele contínua. Eliminando o agente de expansão e substituindo a injeção incompleta por uma injeção de gás, não há nenhum redemoinho, e os reforços estruturais dos canais de gás fornecerão um amortecedor interno da mesma maneira que a espuma faz. É difícil conseguir a mesma redução de densidade do que se consegue com a espuma, e de um ponto de vista estrutural, a parede tem que ser projetada para a pior das hipóteses das estruturas de reforço dos canais de gás. A espuma estrutural terá propriedades físicas mais uniformes. Paredes finas duplas assistidas a gás tomam sentido para as peças obterem a rigidez de reforços desproporcionados, tanto quanto o que o aumento da espessura de parede conseguiria, embora com o benefício de peso inerente. A parede fina dupla assistida a gás faz sentido quando a aplicação exige simplesmente uma parede mais grossa, tal como em um molde existente ou devido a ergonomia.

A moldagem por injeção completa utiliza-se de um amortecedor de gás em vez do amortecedor plástico usual. Com este propósito o gás é injetado após a injeção completa da resina e compensará a contração desta. Frequentemente, o gás é injetado diretamente na peça em uma área espessa ou problemática. O gás injetado na resina fundida procurará imediatamente o trajeto de menor resistência. O gás fluirá para a área mais espessa da peça e encontrará sempre a maneira mais fácil de acomodação em torno de um canto, numa circunstância referida como caminho de fluxo. A bolha de gás formará um perfil de seção consistente através de onde possa fluir. Isto é, a bolha de gás começará grande e se reduzirá em diâmetro enquanto se aproxima do final de fluxo.

O processo pode melhor ser descrito nas cinco etapas de um molde de injeção incompleta. Na figura 2.16a o plástico fundido é injetado em um molde fechado sob alta pressão. Na figura 2.16b o processo de injeção do gás é ativado e o gás e o plástico fundido fluem junto na cavidade. Na figura 2.16c, a injeção plástica para enquanto o gás continua a fluir na cavidade. O gás empurra o plástico na frente dele para terminar de preencher a cavidade. Mover-se-á para as áreas de maior temperatura e de menor pressão. Na figura 2.16d, uma vez que a cavidade é preenchida, o gás continuará a empurrar o plástico de encontro às superfícies frias da cavidade. Esta ação encurta o ciclo de resfriamento, elimina as marcas de rechupes, e melhora a reprodutibilidade dimensional. Na figura 2.16e a peça plástica esfriou suficientemente para reter sua forma, o bico de gás é retraído para exalar o gás, e a peça pode ser ejetada. De todos os processos plásticos estruturais, o assistido a gás é o de maiores possibilidades para um projetista de processos de moldagem. O projetista transforma-se em projetista do molde e o engenheiro de processo responsável por controlar o fluxo de plástico e de nitrogênio.



**FIGURE 2.16** Gas-assisted mold-filling stages. (Courtesy of Cinpres Gas Injection Ltd.)

Os reforços são os elementos do projeto que estabelecerão a passagem do gás. O gás seguirá o curso de menor resistência. As áreas mais espessas da peça têm o maior volume e conseqüentemente as mais baixas pressões, atraindo assim a bolha de gás. O modo eficaz de estabelecer estas áreas espessas é com a concordância relacionada à espessura da parede. De fato, estas áreas espessas transformar-se-ão em distribuidores ou passagens do gás conectadas a um ponto comum da injeção do gás. As passagens do gás devem ser de três a seis vezes a espessura da seção da parede. Relações de concordância pequenas mostram-se ineficazes e produzem “dedos viscosos”; relações de concordância grandes tornam-se suscetíveis ao rompimento do gás, onde a passagem do gás inicia antes da parte dianteira do fluxo da resina durante o preenchimento.

Estas passagens do gás ficam enclausuradas nos reforços do canal do gás. Variações deliberadas da espessura das paredes, que se estendem como um reforço, são consideradas igualmente projeções. As passagens do gás devem se estender à extremidade final da peça. Reforços rígidos sobre dimensionados tornam-se a geometria básica para a passagem do gás. Muitas variações de projeto do reforço são praticáveis. Uma decisão prática para um reforço efetivo é fixar um reforço convencional em um reforço da passagem do gás, com raio de concordância apropriado. Esta é uma boa solução para o problema de desenho de reforço profundo, demasiado fino na parte superior e demasiado espesso na parte inferior. Diversas variações de reforço são mostradas na figura 2.17. Uma chave para o sucesso de um programa de desenvolvimento de produtos é fazer uso completo de componentes moldados. O projeto da peça é mais importante do que nunca com a moldagem por injeção assistida a gás. O padrão do reforço transforma-se no curso de menor resistência e conseqüentemente em um distribuidor para ambos, plástico e gás (durante o preenchimento). A localização do reforço é otimizada com a simulação computadorizada de preenchimento do molde. O restante do projeto da peça segue as práticas estabelecidas de projeto, particularmente observando uma seção de parede uniforme, permitindo desta maneira uma modelagem computadorizada exata. O projetista da peça controla finalmente o sucesso de qualquer programa assistido a gás. Seguindo regras estabelecidas de projeto, muitas variáveis desnecessárias são eliminadas.

A etapa final no controle da bolha de gás é através de difusores ou cavidades sobre dimensionadas. A expulsão do plástico é um deslocamento do volume do gás injetado. Isto se considera uma otimização no processo básico de moldagem por injeção assistida a gás. A tecnologia pode ser licenciada de muitos dos fornecedores de equipamento de assistência a gás. As vantagens incluem o controle exato do volume de gás que está sendo injetado e conseqüentemente do perfil da passagem de gás. O enchimento inicial do molde é uma injeção completa de plástico e é controlada mais facilmente do que uma injeção incompleta.

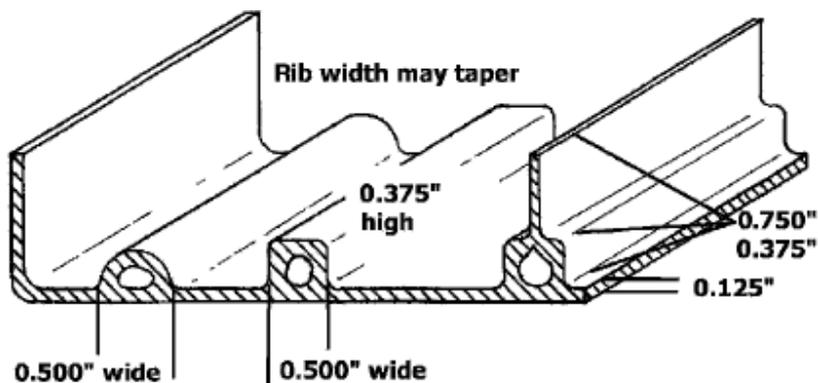


FIGURE 2.17 Rib design.

### 2.6.1 Equipamento da moldagem assistida a gás

Quase todos os fornecedores de equipamentos de assistência a gás usam o mesmo conceito de processo básico; seguindo a uma injeção incompleta de resina, de uma injeção de gás (nitrogênio) que desloca o plástico para as áreas mais espessas, de preenchimento mais fácil do artigo moldado. O resultado é a possibilidade de criar uma série interconectada de canais ocultos em uma peça. Estes canais são contidos no padrão de reforço, que para o projetista da peça é a base das exigências funcionais do projeto. Entretanto, para o engenheiro de processo estes canais representam um sistema de câmara quente a ser construída no artigo moldado. O desafio é determinar qual a tecnologia de gás é a mais adequada para uma aplicação específica. Diversas considerações são necessárias. Uma pergunta comum é: A tecnologia da injeção de gás está controlando o gás pela pressão ou pelo volume? Ambos os tipos são usados com sucesso. As exigências de aplicação podem ditar a resposta. A injeção do gás é controlada monitorando o volume do gás ou sua pressão. Para o controle de volume, um volume fixo de nitrogênio é pressurizado previamente antes da injeção. O gás é introduzido de seu reservatório no molde. A pressão na peça depende da relação do volume versus o volume do cilindro, sincronizando, pressão de gás, e o controle do perfil de velocidade da injeção de gás. Os sistemas de pressão utilizam um reservatório fornecendo pressão às válvulas proporcionais. Os perfis da pressão são conseguidos controlando a pressão de gás de cada válvula. O custo é geralmente um fator de decisão na seleção do processo.

Outra pergunta é: O processo será adaptado de uma máquina existente da moldagem por injeção ou uma máquina nova será adquirida? Diversos fabricantes de equipamentos ofertam máquinas de moldagem por injeção assistida a gás com instrumentação integrada na máquina e nos controles. A situação mais desejável para a produção é especificar o equipamento novo que tem as características ótimas para uma dada aplicação. Isto inclui a tecnologia correta de gás para a configuração da peça. As placas originais da máquina podem ser especificadas ao tamanho pretendido de molde, e a unidade de fechamento pode ser combinada às necessidades da geometria da peça. Usar máquinas existentes de injeção para a assistência a gás (ou para a espuma, quando usar esse material) conduz geralmente a um excesso das placas originais da máquina com relação aos moldes, ainda mais, a unidade de fechamento funciona na capacidade de 25 a 35%. Embora isto não seja necessariamente prejudicial ao molde, é prejudicial ao custo. Isto é especialmente verdadeiro nas peças grandes, onde a diferença entre 1000 e 3000 toneladas produzem um custo elevado no orçamento. A harmonização do tamanho da extrusora da máquina a capacidade de injeção exigida é igualmente crítica. Para obter a produção ótima, a injeção deve ser de 70% da capacidade da extrusora. O equipamento novo pode ser especificado

com a capacidade ótima de plastificação. As máquinas existentes de moldagem por injeção tem extrusoras pequenas para a assistência a gás. O resultado poderia ser um projeto de peça assistida a gás com a espessura de parede aperfeiçoada para ciclos rápidos, mas a máquina incapaz de produzir a plastificação adequada para prosseguir. O custo do equipamento novo não consegue se justificar se máquinas injetoras já existem. Os milhares de programas bem sucedidos a gás foram produzidos em equipamentos existentes, assim que esta é geralmente uma adaptação aceitável.

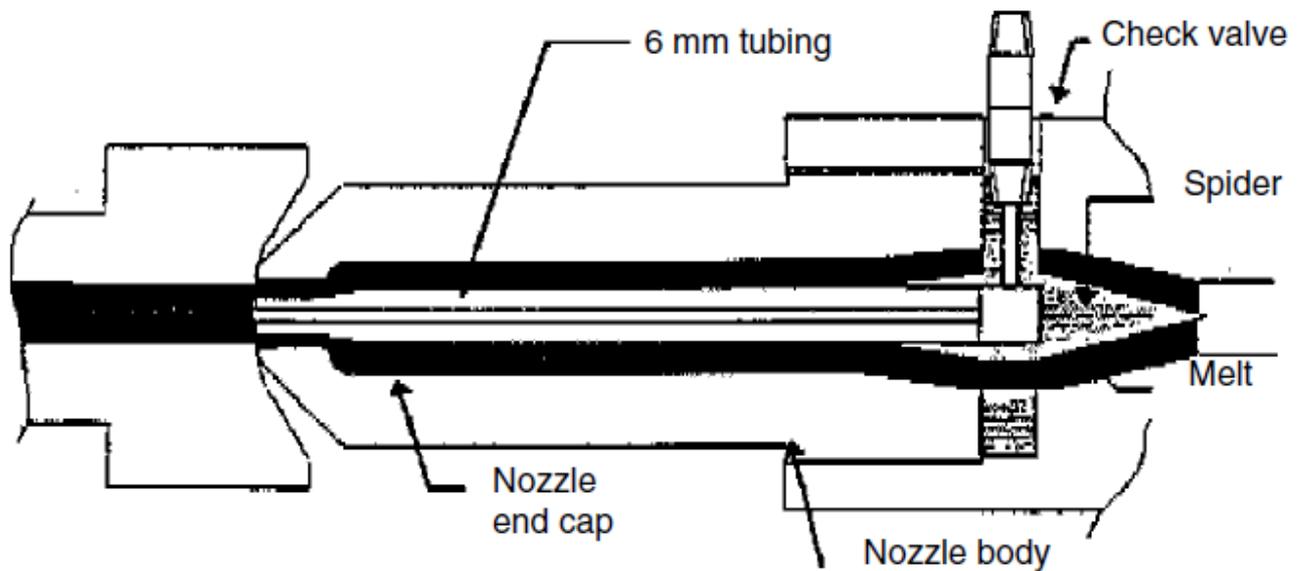
Ao selecionar fornecedores de equipamento, as considerações incluem o direito às patentes e às licenças. Possui o serviço técnico disponível em termos de treinamento, da assistência ao projeto, e de reparo de defeitos? Há um fórum para a atualização da tecnologia? Que confiança se pode depositar no equipamento?

### **2.6.2 Injeção do gás através do bico**

A figura 2.18 ilustra uma combinação de bico de fechamento automático instrumentado para injeção de gás. Este é o modelo original da assistência a gás, retornando a uma patente europeia de 1978. Hoje, diversas tecnologias são empregadas para o bico da máquina a gás. Isto significa que a resina e o gás têm o mesmo ponto de entrada. Este método limita a pressão e o tempo de sincronismo de gás. O preenchimento equilibrado tem que ser projetado nos canais da peça moldada, no projeto do reforço, e na espessura de parede. O melhor é quando usado nas aplicações com preenchimento simétrico ou equilibrado. O gás é exalado através de um bico de duas vias antes da abertura do molde ou com ruptura do canal de injeção quando da abertura do molde. O canal de injeção e os distribuidores são ocos e conectados aos canais do gás em toda a peça. Injeção de gás pelo bico não é usada com sistemas de câmara quente nos canais, porque a pressão de gás desloca a resina no ponto de injeção. A prática comum é diminuir custos eliminando o sistema de câmara quente dos canais, projetando um reforço padrão na peça moldada.

### **2.6.3 Injeção de gás no molde**

Os pinos especiais da injeção de gás são colocados no molde para injetar o gás no sistema de canais ou diretamente na peça. A figura 2.19 mostra o gás que está sendo injetado no plástico fundido entrando na cavidade do molde. Os pinos podem ser com o projeto em dois sentidos do fluxo do gás ou com uma válvula de retenção de sentido único. A válvula em dois sentidos permite que o gás passe através da resina fundida quando entra no molde. O pino permite a injeção e também a ventagem do gás antes da abertura do molde. Os canais do gás na peça permanecem abertos desde o ponto de injeção até o ponto mais distante de penetração do gás. O gás exalado é coletado e reciclado, ou liberado à atmosfera. As válvulas em dois sentidos às vezes tornam-se obstruídas pelos voláteis, pelas fibras de vidro, e pela resina fundida que entram durante a ventagem e se transformam em obstruções nas pequenas folgas do mecanismo do pino.



**FIGURE 2.18** Gas injection through the machine nozzle.

O desenvolvimento continua. Os controladores de gás terão também uma característica de remoção do gás. A figura 2.20 ilustra o tipo da válvula de uma via ou de bloqueio (retenção). Este tipo exige que o pino seja removido da cavidade antes da abertura do molde e da ejeção da peça. A válvula de retenção libera o gás exalado quando o pino é retraído pelo movimento hidráulico ou por um núcleo de movimentação do molde. Não obstante o tipo de pino, bem mais importante é sua posição no molde. Os pinos colocados demasiado próximo ao ponto de injeção da resina conduzirão ao plástico fundido ser forçado no pino. O pino de injeção do gás padrão posiciona o gás no centro do canal de fundido. Os melhores resultados são conseguidos com uma saliência no projeto da peça para servir como um apoio para a estabilidade do pino. Projetos para alta pressão tem um tampão traseiro atarraxado e uma torre mais longa para conter o pino quando este se encontra na posição adiantada, protegendo-o da pressão do plástico. Um pino a 90° está disponível para impedir defeitos de aparência devido a sopro de gás de encontro a uma superfície. A injeção do gás pode estar no mesmo sentido do fluxo plástico. A ventagem ocorre quando o bico de gás retrai da peça antes da abertura do molde.

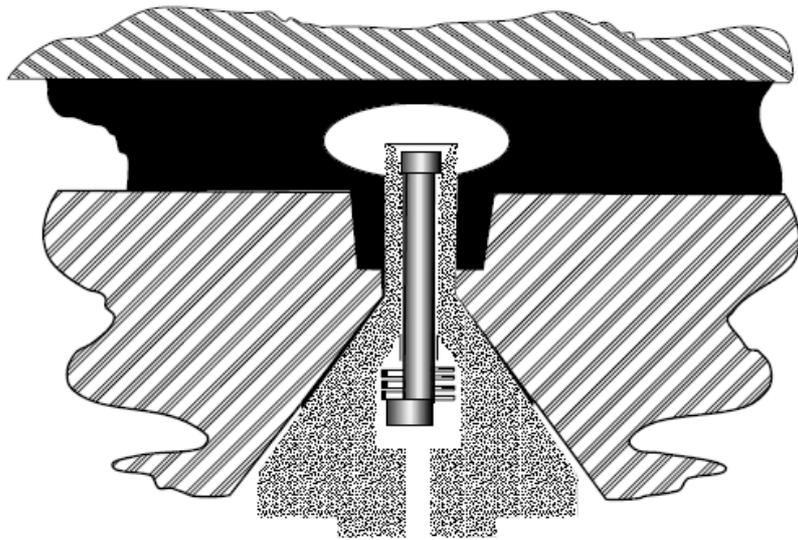


FIGURE 2.19 Gas injection pin mounted in the mold cavity.

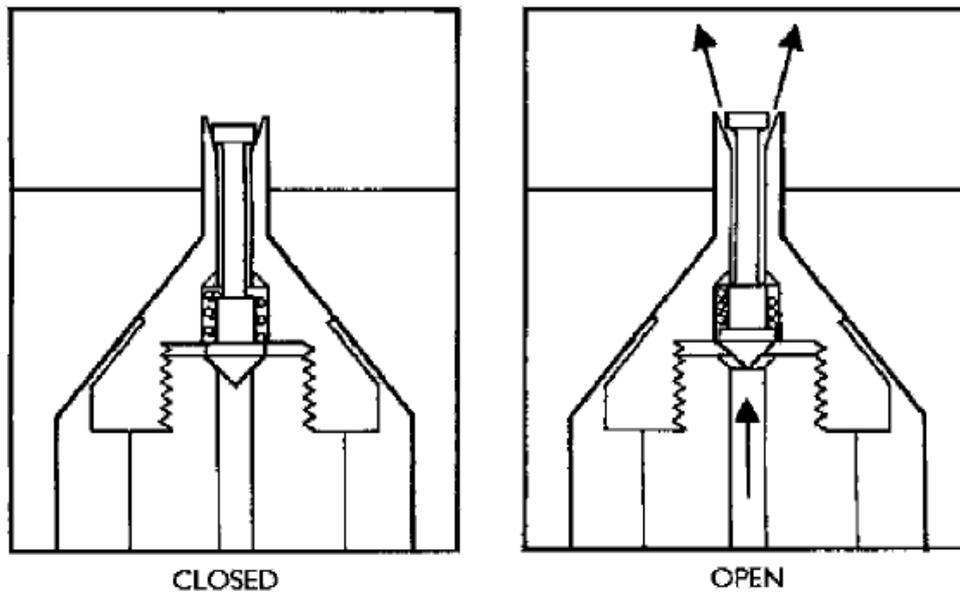
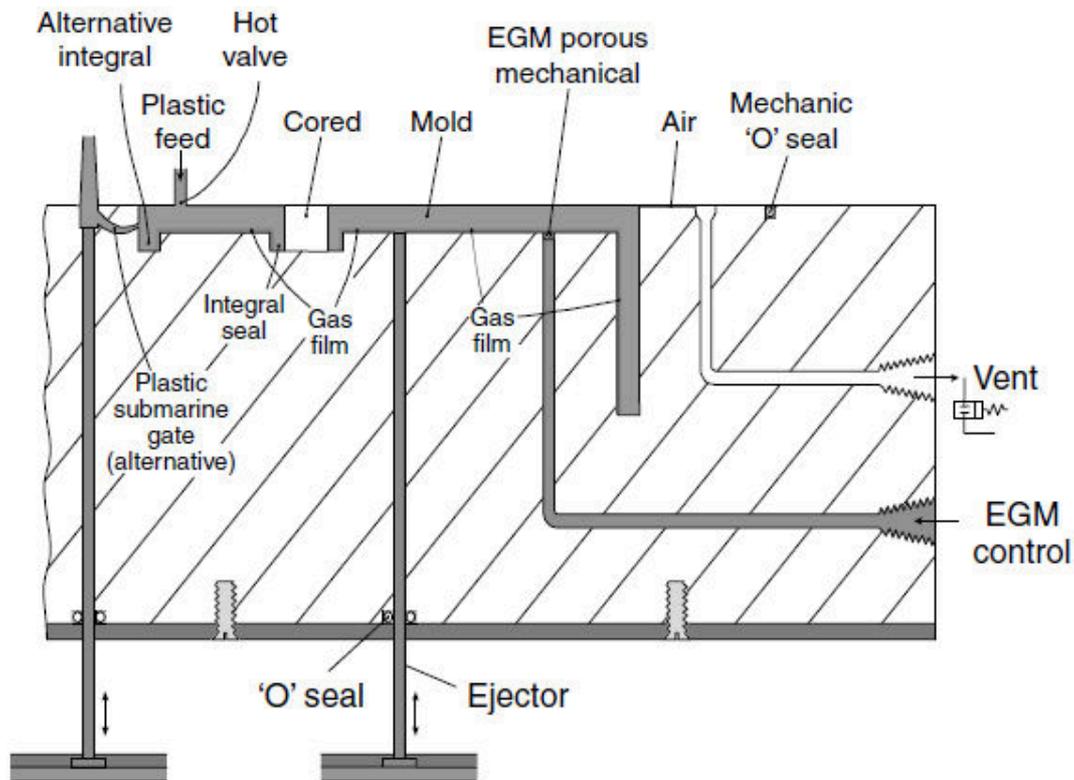


FIGURE 2.20 Gas injection pin operation. (Courtesy of Cinpres Gas Injection Ltd.)

## 2.7 Moldagem a gás externa

O processo de moldagem a gás externa (EGM) está baseado em injetar o gás a pressões e tempo controlados em uma superfície de um molde depois que o plástico foi injetado completamente. O gás forma uma barreira muito fina entre o plástico e a superfície adjacente do molde. O gás é usado desse modo como um meio aplicando uma pressão uniforme ao plástico, forçando-o de encontro à superfície oposta do molde enquanto resfria, contrai e solidifica, replicando precisamente a superfície do molde. A moldagem livre de tensões é conseguida permitindo que mais contração ocorra dentro do molde fechado. Com a moldagem convencional muito desta contração ocorre depois que a peça foi removida do molde. Imagine uma caixa de cinco lados de 1ft<sup>2</sup> com 1pol. de espessura das paredes. Mesmo com uma resina de baixa contração, tal como o policarbonato, 0.062pol., ou 1.5mm de contração devem ocorrer na peça. De acordo com as leis da física, a maioria desta contração ocorrerá após a ejeção do molde. Com a moldagem a gás externa, muito da contração ainda ocorre fora do molde, mas não há nenhum esforço de tensões de orientação, assim a peça ficará uniforme e plana. Isto esclarece uma melhoria típica do tempo de ciclo de 15% na moldagem externa a gás, as peças moldadas têm muito pouco esforço, sendo assim o ciclo de resfriamento não tem que ser prolongado em projetos de empenamento orientados. A moldagem externa a gás é uma tecnologia de real baixa pressão da moldagem por injeção. A força de fechamento raramente excede 1ton/pol<sup>2</sup>. Desde que não há quase nenhuma fase de alta pressão de empacotamento, ocorre economia de energia de duas maneiras. A hidráulica da máquina tem que trabalhar menos para conseguir o fechamento de alta pressão, porque o plástico está em uma pressão mais baixa. Em segundo, as pressões mais baixas de injeção exigem menos trabalho no lado da injeção do sistema. A mesma lógica é verdadeira para as máquinas de moldagem elétricas porque a quantidade de trabalho também é reduzida.

Os métodos alternativos da selagem para impedir o escape do gás são necessários com selos integralmente moldados (como mostrado na figura 2.21) ou selos mecânicos. Assim como a faixa de gás introduzida separa a pele plástica moldada da superfície do molde em um lado deste, o plástico é empurrado contra a metade oposta do molde. A faixa de gás move-se para a linha divisora do molde, que também deve possuir selagem para evitar a perda de pressão. Previsões especiais foram planejadas para selar a cavidade do molde, tal como o uso de selos integrais (figura 2.22) e de selos de anel. A perícia de selagem patenteada é incluída no pacote da tecnologia que vem com a compra da licença da moldagem a gás externa. O gás é injetado em uma ou várias posições dos injetores de gás. Tipicamente, os injetores de gás se situam no lado da ejeção do molde e podem ser incorporados sem interferir com as linhas de água ou os pinos do ejetor.



**FIGURE 2.21** External gas molding tool details. (Courtesy of Cinpres Gas Injection Ltd.)

O processo pode ser usado com a maioria das tecnologias e os materiais da moldagem por injeção como um acessório autônomo à máquina básica. A moldagem externa a gás pode ser usada como um método de injeção incompleta para o molde de baixa pressão. Pode ser usada para o molde de injeção completa com ou sem empacotamento. Nas aplicações com reforços excessivamente espessos (por exemplo, na relação de 3 a 10), a moldagem externa a gás pode ser usada em conjunto com a injeção interna a gás. Trabalha muito bem com a moldagem a contra pressão, espumada ou sólida. Há uma adicional capacidade com a moldagem externa a gás. No momento da abertura do molde, um segundo sopro de gás pode ser injetado para ajudar no processo da ejeção. Como muito das aplicações da moldagem externa a gás são para as peças cosméticas, esta ejeção, auxiliada pelo sopro do gás, reduz possíveis defeitos às vezes ocasionados pelo pressionamento dos pinos de ejeção. Redução nos esforços de tensão interna do molde é obtida devido as menores pressões de empacotamento. As vantagens da moldagem a baixa pressão são de há muito tempo conhecidas; menor força de fechamento do molde da máquina permitem taxas menores a cada hora da máquina, metais mais macios para o ferramental de trabalho, consumo de menor potência e custos de manutenção reduzidos. O peso menor da peça resulta do menor empacotamento. O tempo menor de ciclo de moldagem para as peças de moldagem externa a gás é possível, porque nenhum esforço interno tem que ser superado com tempo maior de resfriamento (fixação da geometria no molde).

A universidade de Bradford no Reino Unido realizou uma extensiva pesquisa no consumo de energia de vários processos plásticos de moldagem. Os resultados deste trabalho indicam que a moldagem assistida a gás interna rendeu uma economia de energia de 5% sobre os métodos convencionais de injeção. A moldagem externa a gás rendeu uma melhoria de 8% sobre os

métodos convencionais. Isto acontece em ambos os extremos da máquina de moldagem por injeção. Obviamente há menos força de fechamento, mas também menor é a energia usada pela unidade de injeção durante a fase de recalque do molde convencional. O estudo determinou a real produção comparando lbs/h de produto especificado. A moldagem externa a gás surpreendeu com uma melhoria de 18% sobre a moldagem por injeção convencional. O Dr. Dawson, da universidade de Bradford concluiu que a economia de energia pode aparentar ser pequena, mas no decorrer do tempo é muito significativa. Igualmente, sentiu que a economia de energia da moldagem externa a gás ultrapassa ainda mais pela redução de material e, mais significativamente, pela redução do tempo de ciclo. A universidade de Manchester no Reino Unido construiu moldes de teste para avaliar o processo de moldagem externa a gás, e há uma pesquisa em curso em suas instalações. A escola tem um programa de instrução em andamento, específico para este processo, incluindo máquinas de moldagem dedicadas para a instrução e a pesquisa.

O processo de moldagem externa a gás esta sujeito às patentes pertencentes a Asahi Corporation e Cinpres Gas Injection.

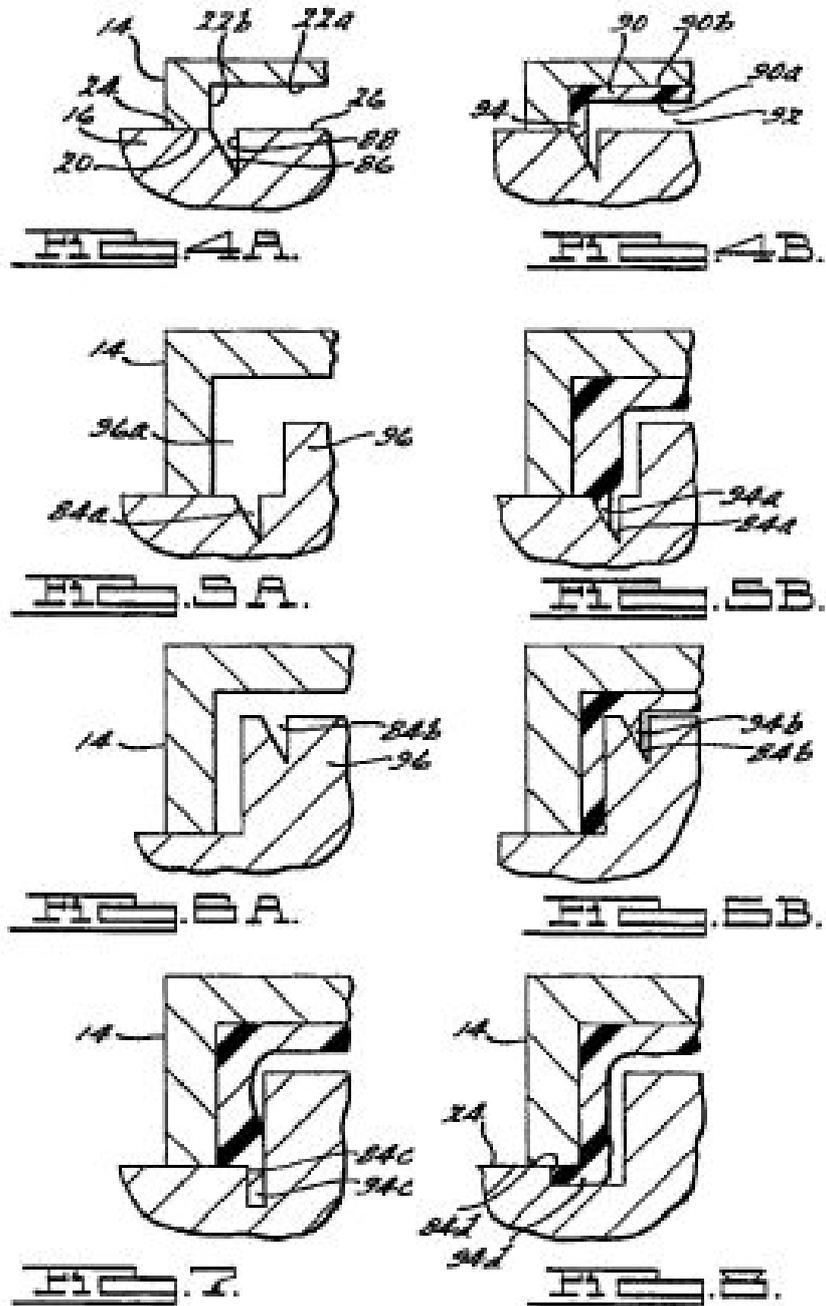


FIGURE 2.22 Integral seals for external gas molding.

## 2.8 Materiais, gás, e sopradores

Os plásticos, ou polímeros, são cadeias moleculares longas, baseadas na molécula de carbono com as quatro ligações, interligadas muito próximas entre si. Baseado no tipo de polímero, estas cadeias são simétricas ou assimétricas. As cadeias simétricas permitem grande afastamento ou empacotamento entre si, tornando-se assim mais cristalinas em estrutura. Os exemplos destes materiais semi-cristalinos são o polietileno, o polipropileno, o nylon, e o poliéster termoplástico. Uma contração maior e a boa resistência química caracterizam estes materiais. O outro tipo de formação molecular é mais aleatório ou assimétrico, formando as resinas amorfas. Os exemplos incluem o poliestireno, o policarbonato, o acrílico, e as diversas ligas, tais como o acrilonitrilo-butano-estireno (ABS) e o estireno-acrilonitrilo (SAN). Estes materiais contraem menos do que os materiais semi-cristalinos e têm uma resistência mais baixa ao ataque químico. Em resumo, esta é a maneira usual de classificar os termoplásticos.

Além dos tipos básicos de polímeros, existem numerosas cargas e aditivos para realçar o desempenho ou a aparência da peça moldada. Os exemplos incluem o vidro para a rigidez ou a substância corante para a aparência. Todas as aplicações estruturais de espuma têm o aditivo próprio para sua natureza – o agente de expansão. Diversas considerações entram na especificação do material pelo projetista. As especificações devem ser destacadas claramente no desenho e devem ser concisas. Quase todo termoplástico pode ser, e provavelmente já tenha sido, espumado, em produção ou em teste de laboratório. Os agentes de expansão usados são da faixa dos gases inertes, como referidos no processo físico, ou como concentrados ativados por calor, termo usado pelo processo químico. Estes são adicionados à resina de moldagem durante o estágio de massa fundida. A mesma indicação poderia provavelmente ser feita para a maioria dos tipos de materiais usados com sucesso na assistência a gás.

O polietileno de alta densidade (PEAD) é provavelmente a resina comercial mais desenvolvida. Seu baixo custo, a facilidade de processamento, a resistência química, e a resistência ao impacto a baixa temperatura, a tornam natural para aplicações da manipulação de materiais. Hoje, este mercado e esta resina levam o setor a ser o maior da indústria plástica estrutural. O polipropileno é outro material semi-cristalino, muito similar ao polietileno. É igualmente uma resina barata com características de processamento excelentes e boa resistência química devido a sua estrutura cristalina. Este material tem propriedades excelentes de alongamento como demonstrado pelo fato de que faz uma dobradiça viva excelente. As dobradiças vivas são difíceis de obter na espuma estrutural, devido à espessura de parede e à linha de solda existente, mas são muito práticas com assistência a gás, embora a posição da passagem de gás e as linhas de solda tenham que ser consideradas com cuidado. A pintura é difícil com os materiais semi-cristalinos, devido a sua resistência química inerente, que faz da adesão da pintura um problema. Acabamentos especiais de barreira da primeira demão de pintura (*primers*) foram desenvolvidos para sanar esta situação.

O poliestireno de alto impacto é uma resina comum da espuma estrutural. Usado freqüentemente em aplicações do mobiliário, é um plástico mais duro, mas mais frágil. Sua estrutura amorfa permite a fácil pintura. Várias categorias de borracha são combinadas pelo fornecedor da resina para dar mais resistência ao impacto, mas com sacrifício da rigidez. O material é de uso geral para os grandes painéis que exigem rigidez e baixo custo. O poliestireno aceita muito bem os aditivos retardantes de chama. Diversas petroquímicas fornecem o poliestireno para as indústrias produtoras de televisão e de eletrônica, reconhecido pelos laboratórios das seguradoras. Estes materiais são usados para gabinetes e peças internas. O poliestireno ou o monômero de estireno são de uso geral como um ingrediente para produzir

resinas de ligas poliméricas tais como ABS, SAN, ou PPE [conhecido às vezes como polióxido fenol (PPO)]. Estes materiais caem em uma família dos polímeros chamados de materiais de engenharia, que têm uma combinação de propriedades desejáveis, tais como a rigidez, a resistência a temperatura, ao impacto, e a aparência, mas a custo mais elevado.

O policarbonato é outra resina amorfa. É um material de engenharia verdadeiro, com rigidez mais elevada e resistência ao impacto melhorada. As *commodities* deste produto podem ser modificadas através de aditivos para conseguir uma destas propriedades em sacrifício de outra. O policarbonato consegue ambos através da estrutura de sua cadeia molecular. O processar é crítico para obter a capacidade plena da resina. A umidade ou a termo degradação causam uma perda de resistência ao impacto. Muitas misturas tornaram-se populares onde os atributos de duas resinas diferentes podem ser combinadas para propriedades melhoradas. Os exemplos incluem policarbonato - ABS, as poliolefinas termoplásticas, e os produtos GTX.

As peças produzidas por contra pressão típica mostram de 5 a 10% de redução de densidade que o esperado com as convencionais espumas estruturais a baixa pressão. Isto se explica pela formação de paredes espessas. As peças de espuma estrutural a contra pressão, além da densidade mostram estrutura celular mais uniforme ao longo de toda a peça. Isto resulta em acréscimo das propriedades físicas.

Espumas estruturais oferecem uma melhor relação de força x peso e níveis de tensão reduzidos no moldado. Um conceito errôneo comum é de que as espumas estruturais possuem maior força do que uma parede similar de material sólido. Esta simplificação não está correta, com a exceção das de saliências ocas, onde o núcleo espumado absorve o esforço de choque exercido no diâmetro interno. Geralmente, a perda de propriedades físicas é diretamente proporcional à porcentagem de redução da densidade.

A espuma estrutural exibe muitos benefícios, como uma técnica de processamento para resinas termoplásticas. Uma relação elevada de rigidez x peso é um benefício natural de uma estrutura de favo de mel. A espuma estrutural oferece a habilidade de produzir peças muito grandes com baixa pressão de fechamento usando o equipamento de moldagem de multi bicos de injeção com placas originais sobre dimensionadas. A natureza de baixa pressão da espuma estrutural torna isto possível. O benefício mais importante, entretanto, é o de baixo nível de esforços residuais encontrados nas peças de espuma estrutural. Isto também é proporcionado em sua maior parte à natureza de baixa pressão da espuma estrutural.

Os esforços residuais são aquelas forças na estrutura molecular interna de uma peça, que estão presentes na ausência de carga externa. Estes esforços surgem devido a contração da resina. Embora as diferenças na expansão térmica que ocorre para os vários componentes em materiais multi-fase, isto resultará em quantidades menores de esforço, haja visto que a fonte principal de esforço para todos os tipos de materiais resulta do fluxo não uniforme durante o estágio de preenchimento e também a um não uniforme resfriamento. Os efeitos dos altos níveis de esforços são mostrados pela contração não uniforme, no empenamento, nas marcas de rechupes, na perda de resistência química, e em tolerâncias dimensionais pobres. O projetista deve estar ciente do potencial de esforços residuais. Por exemplo, a manutenção da espessura da parede uniforme contribui a um mesmo fluxo e conseqüentemente para baixar os esforços residuais. O projetista deve também reconhecer processos diferentes ao especificar as tolerâncias dimensionais.

A espuma estrutural exibe níveis muito inferiores de esforço residual do que aqueles da injeção contínua na moldagem de peças, por duas razões. Primeiramente, a baixa pressão de enchimento permite que a peça tenha um fluxo mais relaxado. Em segundo, uma camada interna

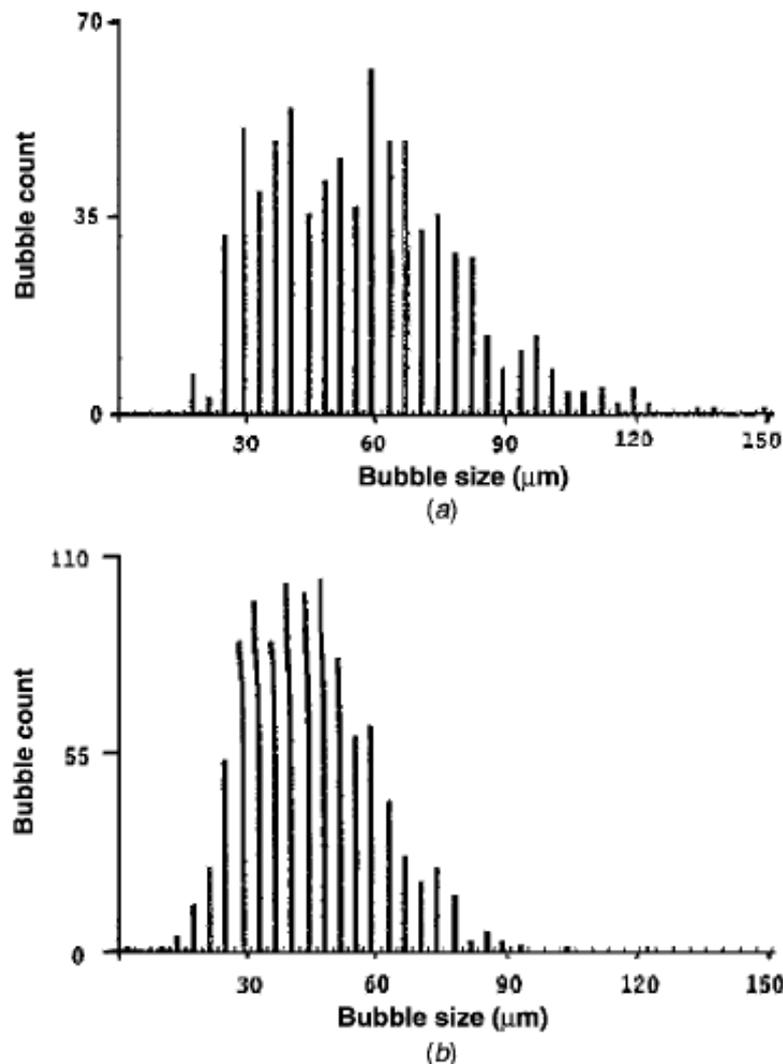
de espuma no perfil composto transforma-se em um equalizador do esforço. O resultado deste baixo esforço residual é a habilidade de moldar as peças com dimensionais exatos que exibem poucas tendências para marcas de rechupes na superfície oposta aos reforços e às saliências. A combinação destes dois fatores faz da espuma estrutural uma escolha natural para combinar diversas peças. Isto consolida a redução de custo das peças ofertadas aos usuários finais.

### **2.8.1 Agentes de expansão**

O aditivo mais comum para os processos da espuma estrutural é o agente de expansão. Este componente da mistura do material é dividido em duas categorias, no gás físico e no gás gerado quimicamente. Considere o efeito do tamanho e da quantidade de bolhas que dão forma à espuma, como ilustrado na figura 2.23. As variações no processo e no agente de expansão mudarão o tipo de espuma ou a estrutura celular. Geralmente, os agentes de expansão químicos produzem células menores. Uma velocidade mais rápida da injeção produz bolhas menores. Superfícies mais resfriadas do molde induzem à peles mais espessas.

O gás inerte de uso geral para a espuma estrutural é o nitrogênio. Os equipamentos modernos multi propósito, de bicos múltiplos, utilizam o nitrogênio comprimido como agente de expansão, assim como para a pressão da injeção. Como um agente de expansão, ele é injetado na extrusora quando a resina alcança o estágio de massa fundida. O nitrogênio é um agente de expansão muito barato, mas é limitado pela baixa dispersão do gás, exigindo um período longo de degaseificação de até 14 dias antes da pintura.

Os agentes de expansão químicos foram desenvolvidos para permitir que as máquinas de alta pressão de moldagem por injeção moldem as peças de espuma estrutural. Estes agentes de expansão químicos são os concentrados ativados por calor que são adicionados à resina antes da etapa da plastificação. Os agentes de expansão químicos estão disponíveis em diversas fórmulas. As dispersões líquidas são bombeadas diretamente na garganta de alimentação da extrusora através de um dispositivo dosador. Os agentes de expansão químicos em pó ou peletizados podem ser blendados com a resina antes da plastificação. Os agentes de expansão químicos podem igualmente ser medidos diretamente no sistema de alimentação (equipamentos gravimétricos de preferência). Os agentes de expansão químicos em *flakes* ou reciclados exigem equipamento especial de medição. Geralmente, os agentes de expansão químicos, produzem melhores acabamentos de superfície propriedades físicas melhoradas, devido à melhor dispersão do gás e à melhoria celular resultante. Os agentes de expansão químicos igualmente exigem menor tempo de degaseificação para as peças antes da pintura. Estes agentes de expansão são usados agora extensivamente em máquinas de baixa pressão multi propósito assim como em máquinas de alta pressão convertidas da moldagem por injeção.



**FIGURE 2.23** Bubble size and population considerations: (a) wide profile; (b) narrow profile.

O azodicarbonamida (AZO) foi o agente de expansão químico de maior utilização desde o princípio dos anos 70, mas isto está mudando. Enquanto a tecnologia de controle melhorou e as resinas do processo tornaram-se mais refinadas, há uma necessidade para um agente de expansão químico mais sofisticado. O AZO é um agente de expansão exotérmico, assim que significa que desprende calor quando reage, junto com alguns subprodutos. O gás gerado desta reação é o nitrogênio, que tem diversos benefícios, incluindo a segurança. A molécula do nitrogênio é grande e leva mais tempo para dissipar-se através da pele contínua. Esta liberação do agente de expansão preso é chamada desgaseificação. A água, um dos subprodutos, é um problema grave para algumas resinas de engenharia, tais como o policarbonato. O tetrazol 5-fenil é um agente de expansão químico que foi desenvolvido especificamente para evitar este problema da umidade.

Há um crescimento dos agentes de expansão endotérmicos, que tem o benefício imediato do reduzido calor e de tempos de ciclo mais rápidos. O bicarbonato de sódio e o ácido cítrico são os dois produtos mais comuns. Agentes de expansão químicos endotérmicos podem atuar em uma reação atrasada que trabalha diretamente atrás da parte dianteira do fluxo, reduzindo desse

modo o redemoinho. Adicionar um agente de expansão a uma resina, muda sua viscosidade significativamente e trabalha freqüentemente como um auxiliar de fluxo, junto com sua força de expansão. Isto ajuda a explicar a relação do comprimento do fluxo da espuma estrutural de até 200:1. Os subprodutos da reação de agentes de expansão químico são de interesse em algumas aplicações. Por exemplo, a água é um subproduto comum, que influi adversamente nos materiais sensíveis à umidade. A experiência mostrou que alguns destes subprodutos conduzem à corrosão de moldes de aço quando acoplados com determinadas resinas, tais como o ABS. O niquelamento foi empregado em cavidades de moldes de aço para impedir a corrosão da superfície. As cavidades de moldes de aço inoxidável igualmente impedem esta corrosão. As formulações recentes de agentes de expansão de ácido cítrico com pH neutralizados resolvem este problema.

Olhar agentes de expansão de um ponto de vista científico traz dois conceitos importantes. Primeiramente, pense nos termos da solubilidade dos dois gases mais comuns como agentes de expansão. O nitrogênio tem pobre solubilidade, exigindo 3000 lb/pol<sup>2</sup> para entrar na solução, e o dióxido de carbono, exige somente 750 lb/pol<sup>2</sup> para as mesmas circunstâncias. Os sistemas de moldagem a baixa pressão são possíveis com gás de dióxido de carbono encontrado nos agentes de expansão endotérmicos. Estas diferenças em pressões do gás estão sendo empregadas em uma nova família dos sistemas de agentes de expansão endotérmicos e exotérmicos, com um melhor controle do tamanho das bolhas. Em segundo, considere a acidez da massa fundida. Além da resina principal, há uso de aditivos para impacto, calor e processamento. Filtros de UV e pigmentos são adicionados. Os materiais retardantes de chama incluem alguns ingredientes agressivos. Esta mistura de material entra então na extrusora a várias centenas de graus, tanto quanto com 20.000 lb/pol<sup>2</sup> de pressão por um período prolongado. Em laboratórios isto é chamado de reator; na indústria de plásticos nós chamamos como uma máquina de categoria nove. Estudos recentes mostraram que o pH da massa fundida pode ser tão baixo quanto 1,5, que está na escala dos ácidos fortes. Isto tem uma influência negativa para as superfícies metálicas, afetando extremamente as propriedades físicas da peça moldada.

A entrega de agentes de expansão químicos a uma massa fundida da resina é similar àquela usada por moldadores de injeção com outros aditivos. Isto inclui a mistura dos *pellets* ou do pó com o material que entra na extrusora. Alguns dispositivos de dosagem são usados para dispersar o líquido do agente de expansão químico diretamente em um dos estágios avançados do fluxo de massa fundida na extrusora. Um custo típico para os tipos exotérmicos e endotérmicos é U\$2,50 a U\$5,00 por libra, com uma relação de mistura de 1 a 2%.

Os agentes de expansão físicos estão em sua forma natural quando são introduzidos no processo, geralmente em estado gasoso. O gás nitrogênio é o mais comum deste tipo. Fornece uma opção inerte, limpa e barata. O processo de espuma estrutural tem suas raízes históricas com o nitrogênio como agente de expansão. Transformou-se no padrão industrial avançado com as máquinas de baixa pressão de espuma estrutural, que constituem a maior capacidade da indústria. O gás é misturado com a massa fundida do polímero na extrusora, no acumulador, ou através de um bico especial. Tem-se tornado nos últimos anos praticável ter um gerador próprio de nitrogênio. Um mercado foi criado para os geradores de nitrogênio com o uso difundido da moldagem por injeção assistida a gás. Desta maneira o moldador da espuma estrutural tem benefício contra seu competidor no mercado. A fonte convencional de nitrogênio foram os cilindros de gás comprimido ou de nitrogênio líquido. Esta é a opção mais barata, com custos médios de U\$0,0025 por libra de resina processada.

### **2.8.2 Tipos e fontes de gás**

As peças moldadas por injeção assistida a gás exigem obviamente algum tipo de gás, nitrogênio na maioria dos casos. Não é acidental que este é o mesmo tipo de gás que é usado em muitas aplicações da espuma estrutural. O nitrogênio é um gás limpo, barato, relativamente seguro, e de uso geral. Tem uma taxa elevada da expansão de 696 : 1 ao mudar da fase líquida a uma fase gasosa (a - 320°F). Tradicionalmente a indústria de moldagem por injeção utiliza o nitrogênio líquido em cilindros ou em sistemas maiores de armazenagem. Com uma necessidade de crescimento para taxas de fluxo mais elevadas torna-se econômico investir em um sistema de geração do nitrogênio.

Cada processo terá suas próprias exigências de taxa de fluxo. Ao servir como um agente de expansão há uma taxa de fluxo relativamente pequena. A moldagem assistida a gás tem uma exigência mais elevada de fluxo. A espuma de contra pressão e a moldagem estrutural externa a gás podem ter exigências mais elevadas de taxa de fluxo ao usar o nitrogênio como a fonte de contra pressão. O volume inteiro da cavidade do molde, todas as linhas de conexão, e às vezes o sistema da ejeção devem ser pressurizados.

Os cilindros oferecem o menor investimento e o mais elevado custo por unidade. Há exigências de segurança aumentadas com a mera manipulação dos recipientes de 2600lb/pol<sup>2</sup>. Os típicos cilindros de 55pol. com diâmetro de 9pol. tem uma tara de 19% com 500 lb/pol<sup>2</sup> (padrão cheio de 304ft<sup>3</sup> e vazio de 57ft<sup>3</sup>). É comum utilizar um distribuidor com diversos cilindros juntos criando um reservatório maior. A pureza do nitrogênio é de pelo menos 99.99%, que é bem distante do que é realmente necessário para a moldagem por injeção.

O armazenamento em tanques exige o investimento em um reservatório de 600 a 13,000 galões para que possa manter a fase líquida a -320°F. O nitrogênio líquido é convertido em gasoso através de um vaporizador na saída. O nitrogênio estocado possui capacidade de taxas de fluxo elevadas. O nível de pureza é de 99.99%.

Um gerador de nitrogênio é realmente um dispositivo a parte. O ar exterior é extraído através de um filtro e de um compressor de entrada. O ar comprimido passa por uma série de filtros e de uma torre de carvão ativado para remover a umidade e o óleo residuais. Como o ar puro é aquecido a uma temperatura controlada e alimentado através de um separador, o nitrogênio flui em canal e todos os gases restantes em outro canal. Este processo de separação usa a diferença em taxas de permeabilidade para segregar os vários componentes. O nitrogênio flui através de uma válvula de controle, que controla a taxa de fluxo. Um tanque amortecedor é colocado em linha para amortecer picos de cargas. Os subprodutos são exalados à atmosfera. Os separadores de membrana exigem a substituição periódica das membranas. Os separadores de peneira de carvão ativado mantêm a eficiência executando troca constante das peneiras. Quando uma unidade da peneira estiver em operação, outra está sendo limpa. A pureza varia entre 98 e 99.5%, que é geralmente adequada para as demandas da moldagem por injeção. A opção do gerador exige uma grande despesa em investimento, mas depois é a mais barata por pé cúbico de nitrogênio. Não obstante o tipo de fonte do gás haverá uma necessidade de compressores e unidades de controle de alta pressão na distribuição.

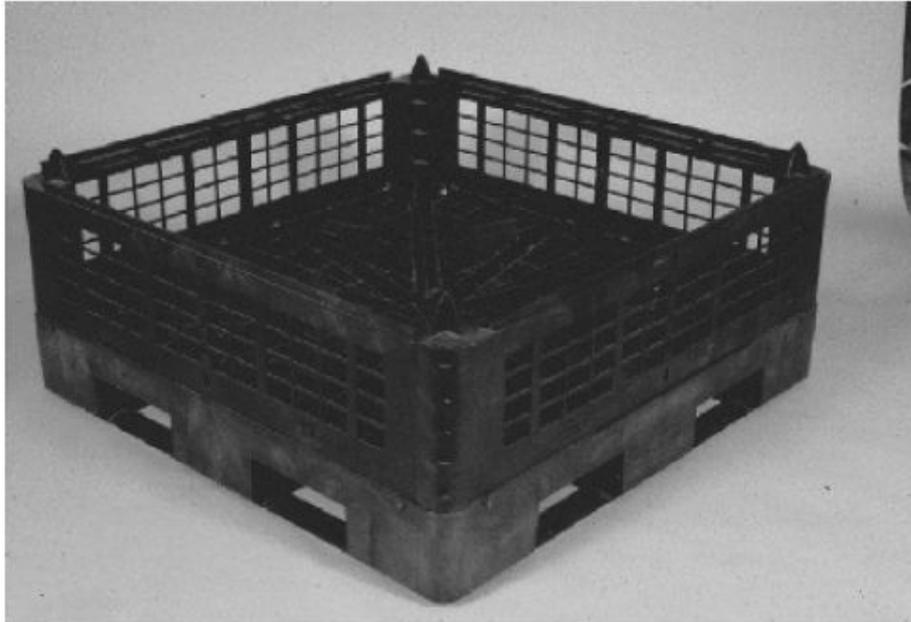
### **2.9 Aplicações**

A variedade de processos de plásticos estruturais combinados com as centenas de resinas disponíveis produz um número infinito de combinações. As aplicações mais avançadas tais como as da espuma estrutural a baixa pressão demonstram as combinações previamente provadas. A

espessura da parede foi padronizada uniformemente no ideal de 0.25pol. quase desde o início. O PEAD foi empregado através da gama de materiais manipulados. O estireno PPO - modificado (Noryl FN-215) encontrou sua aplicação nos computadores e no crescimento rápido da indústria de eletrônica, devido à sua aceitação por laboratórios de seguradoras. O copolímero de polipropileno foi usado em assentos, alto-falantes, e nas baterias. O ABS foi o padrão dos transportes. Devido à sua grande variação no desempenho devido aos processos e à resina, este desvio fez com que os projetistas sobre especificassem o desempenho. Os projetistas tiveram um grave problema para predição do desempenho da carga e do impacto por causa da falta de dados de confiança das propriedades físicas e de procedimentos de teste relevantes em determinar os dados. Passados 30 anos quantidades incríveis de dados tornaram-se disponíveis, junto com os computadores capazes de processar as informações a um nível aplicável. Enquanto a indústria de plásticos estruturais amadureceu, tornou-se especializada em termos de serventia das indústrias de processos especializados, da seleção precisa da resina, do controle do processo, e da otimização total.

O mercado da manipulação de materiais é uma aplicação natural a examinar. Inicialmente, os containeres plásticos eram oferecidos em tamanho padrão de uma base disponível imediatamente. Era difícil para que os utilizadores finais combinassem suas exigências de carga com os produtos ofertados. No melhor caso isto conduzia a uma desvantagem de custo comparado a madeira de 4 por 1. O mais comum era uma fórmula de cálculo de gastos com containeres plásticos de seis a oito vezes maior que os da madeira. A indústria da manipulação de material tirou proveito das melhores opções de projeto com os dados relevantes da resina e dos processos e resinas aperfeiçoados. Um exemplo é a comparação do container de espuma estrutural com parede de 0.25pol. mostrado na figura 2.24 contra aquele assistido a gás com parede de 0.12pol. mostrado na figura 2.25. O projeto de espuma estrutural tem que possuir mais que o dobro de espessura nos cantos para ganhar resistência. O projeto com assistência a gás desenvolve um canal grosso de gás como colar de um projeto de uma peça só. O projeto assistido a gás tem mais força, com paredes nominais mais finas e com custos menores.

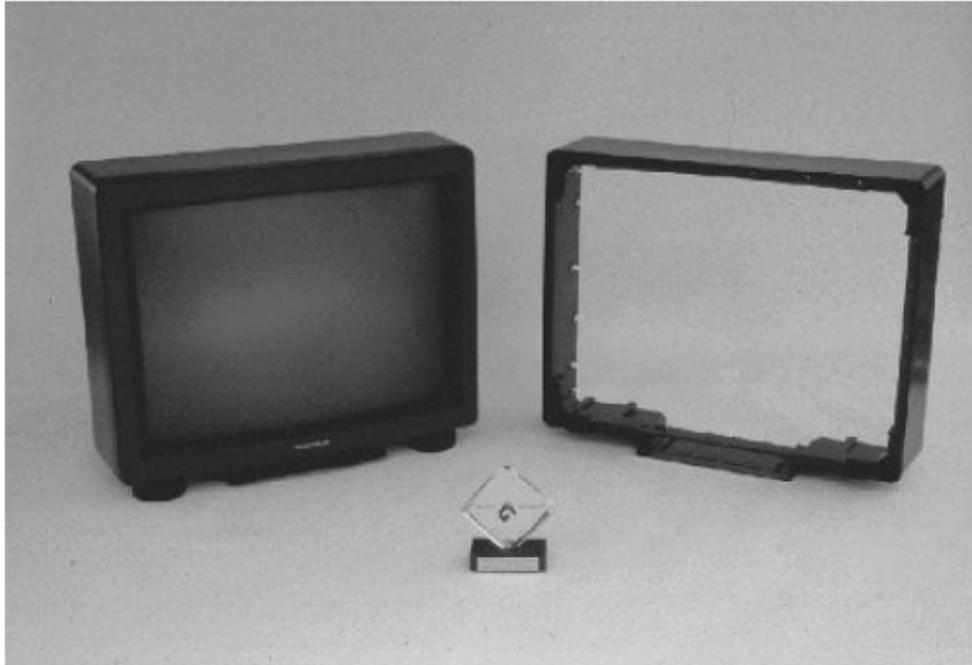
Outra introdução no mercado digna de uma revisão da tendência de projeto é a indústria da televisão. Esta é uma área de alto volume de consumo, onde uma espiral descendente de 30 anos nos preços ao consumidor baixou os custos de fabricação. Com os volumes elevados de produção, o trabalho feito com ferramentas novas é justificado a cada um ou dois anos. Os projetistas do produto estão esforçando-se constantemente para reduzir custos e aperfeiçoar o projeto.



**FIGURE 2.24** Structural foam collapsible container.



**FIGURE 2.25** Gas-assisted shipping container.



**FIGURE 2.26** Counterpressure structural foam television cabinet wrap.

Uma das aplicações desenvolvidas foi na substituição dos gabinetes de madeira. Espuma estrutural a baixa pressão HIPS (poliestireno de alto impacto) foi moldada em moldes com as cavidades de berílio simulando a madeira. Os gabinetes foram acabados com um sistema de uma demão de laca alto brilho. Os gabinetes menores foram moldados por injeção, mas os de tamanho maior utilizam a moldagem por injeção assistida a gás. A figura 2.26 mostra um envoltório de gabinete de tevê de 35pol. que suporta o peso de um tubo de vidro de 0.25pol. com espuma estrutural a contra pressão de poliestireno espessa com aditivo retardante de chama. O gabinete foi pulverizado com a laca preta perolada de alto brilho. Uma das últimas versões foi projetada com espessura de parede mais fina de 0.125pol. e reforços estruturais sobre dimensionados. O processo assistido a gás injeta o nitrogênio nas seções de reforço grossas.

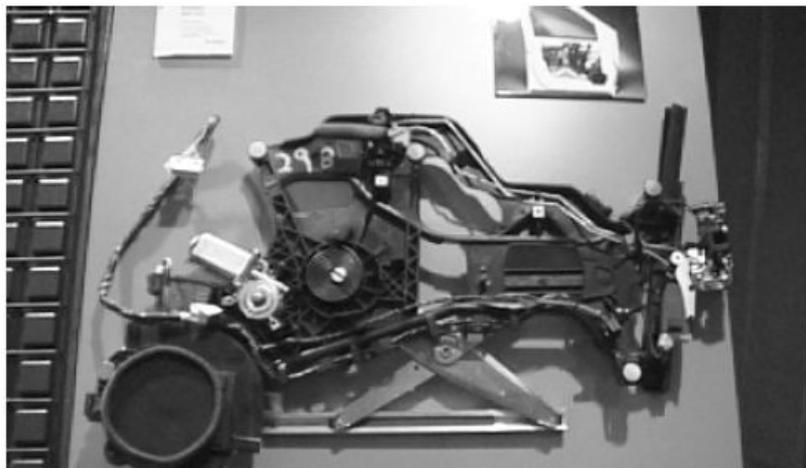
Um dos campeões de conceito foi o armário unicelular (figura 2.27), moldado em espuma estrutural de polipropileno a baixa pressão com cargas minerais. Produzido em uma máquina de bicos múltiplos com moldes de alumínio, representa o mobiliário como um dos mercados originais. O veículo de transporte público da Grumman, do começo dos anos 90, se caracterizou pelo projeto de revestimento da parte superior em policarbonato carregado com 10% de fibra de vidro moldado através da espuma estrutural a baixa pressão em máquinas de bicos múltiplos. O assento suporta a carga de dois passageiros sem os pés apoiados. O assento é totalmente suportado na barra lateral do ônibus para facilidade de montagem. Os processos de moldagem por injeção assistida foram amplamente utilizados em aplicações de assentos. Os quadros de assento internos, os assentos de estádios, os assentos comuns e as mesas, e as cadeiras decorativas de alto acabamento são exemplos. A figura 2.28 ilustra a prestigiada cadeira da Steelcase Cachet, moldada com injeção assistida a gás, empregando um único encosto sobrepassado de cavidades com excesso de material para controlar a orientação do polímero.



**FIGURE 2.27** Unicell medical cabinet in structural foam.



**FIGURE 2.28** Steelcase cachet chair: example of gas-assisted injection molding. (Courtesy of Cinpres Gas Injection.)



**FIGURE 2.29** Delphi super plug: gas-assisted application.

A General Motors especificou a moldagem por injeção assistida a gás para seu grande trunfo, a estrutura interna de porta Super Plugue (figura 2.29). A resina é uma blenda de policarbonato-polibutileno tereftalato reforçado com fibra de vidro. As funções múltiplas do Super Plugue são descritas a seguir. O projeto de parede fina prevê os canais de fluxo que alimentam os

reforços. O gás desloca então o plástico para encher a peça. Sessenta e uma peças individuais são consolidadas neste projeto. O trabalho de montagem foi reduzido de 5 para 1 minuto.

A indústria de piscinas tem utilizado há muito tempo plásticos estruturais por suas vantagens óbvias de resistência a corrosão, do peso leve, e do baixo custo. Os equipamentos de *playgrounds* tal como a gangorra e os assentos de balanços são aplicações aceitas. As aplicações subterrâneas aproveitam-se das resistências a corrosão e química do plástico. As caixas de serviço público, os painéis de piscina e os abrigos de tempestade são exemplos.

Uma das aplicações adiantadas da assistência a gás é no mercado dos equipamentos eletrônicos de escritório, talvez o mais desafiador. O uso da simulação de fluxo para estabelecer a posição e a adesão dos reforços dos canais do gás foi utilizado com sucesso. A aplicação foi no painel frontal e na seção de alimentação do papel de uma copiadora de modelo novo que estava sob desenvolvimento (veja figura 2.30). Tradicionalmente, esta tinha uma aplicação com chapa metálica; entretanto, a Xerox modificou o projeto da chapa metálica e do acumulador através de uma única peça moldada com assistência a gás que permitiu dois grandes entalhes para o trajeto do papel, resolvendo uma seção central de considerável complexidade. O calor igualmente fornecia um desafio, porque o papel morno estaria em contato com a seção de saída da peça, e o ar quente sairia pela abertura, empenando assim pelo esforço residual.



**FIGURE 2.30** Xerox blueprint copier: example of gas-assisted injection molding.

## 2.10 Moldes e ferramentas

Os processos de moldagem por injeção assistida, discutidos, são técnicas de molde fechado, que possibilitam o controle do processo a ambos os lados da peça. Tipicamente, um molde consiste em uma metade da cavidade (placa A), que produz as superfícies exteriores da peça moldada, e na outra metade o núcleo (placa B), que produz as superfícies interiores da peça. O plano onde estas duas placas se juntam é referido como a linha divisora. Além da definição da peça, o molde dirige o fluxo de material e controla o resfriamento. O molde igualmente tem um sistema interno de ejeção para facilitar a remoção da peça moldada. O projetista da peça deve considerar aspectos do trabalho feito por ferramentas como a inclinação, as superfícies de ejeção, e a posição da porta. A figura 2.31 mostra um molde típico para a indústria de moldagem de peças grandes. Sendo de baixa pressão, os processos cobertos têm a capacidade de usar técnicas mais simples de construção para os moldes. No princípio da indústria era muito comum o uso dos moldes de ligas de alumínio. Estes moldes eram fundidos para dar forma a um protótipo e montados à uma base de molde de aço. As jaquetas de resfriamento eram usinadas ou fundidas. Entretanto, os moldes fundidos são menos desejáveis porque a contração, no processo da fundição se soma a contração da moldagem, fazendo que tolerâncias justas da peça sejam quase impossíveis de moldar sem muito retrabalho no molde. O controle da expansão térmica é um fator a mais com os moldes da liga fundidos que afetam a repetibilidade dimensional das peças. Além disso, o processo de fundição tem uma porosidade inerente, criando imperfeições na superfície e limitando o acabamento das peças moldadas. As ferramentas baratas de moldagem são consideradas freqüentemente como protótipos na espuma estrutural. Um tempo de troca de moldes menor é praticável em peças de extração mais profundas onde a usinagem das cavidades seja muito demorada. Os atalhos obtidos com moldes fundidos não são tão prejudiciais quando a prototipagem para o molde é removida de serviço no intervalo planejado. Mais de um programa já falhou devido à tentativa de estender a vida de um molde além de seu ciclo de vida previsto.

Os moldes de alumínio usinados substituíram moldes de alumínio fundidos e são mais usados geralmente na indústria da espuma estrutural. Estes moldes de alumínio têm as bases de aço, a ejeção guiada, e inserções de aço em áreas de desgaste. Os melhores resultados são conseguidos dos cortes de tarugos. Um grande tamanho de peça ditará às vezes o tipo de fabricação das cavidades de alumínio. Este conjunto pode ser deslocado por placas de sustentação apropriadas, bom projeto de molde, e previsão das linhas testemunha nas peças moldadas. Tolerâncias justas podem ser usinadas diretamente no molde. A repetibilidade peça a peça é excelente. As superfícies do molde podem ser polidas para conseguir a fácil ejeção e o melhor acabamento da superfície da peça moldada. Estas ferramentas são consideradas úteis geralmente para até 50.000 moldagens de peças, quando a restauração da linha divisora é geralmente necessária. Entretanto, as marcas de redemoinhos causadas pelo agente de sopro e pelo molde de baixa pressão, limitam o tipo de textura de moldagem que pode ser definido na superfície da peça. O alumínio é superior ao aço em termos de transferência térmica, assim que os tempos de ciclo favorecerão os moldes de alumínio. Um dos melhores aspectos de um molde de alumínio usinado é justamente o fato de ser usinado. Isto proporciona ao molde a reprodução precisa do que foi projetado para a peça. Esta prática pode igualmente ser aplicada aos moldes fundidos. Um exemplo pôde ser uma peça de extração profunda, com as tolerâncias justas, exigindo a entrega rápida do molde. Neste caso, o tempo exigido para usinar a cavidade profunda é evitado moldando uma cavidade profunda com metal extra que permita a usinagem final das superfícies. Embora esta aproximação resolva alguns dos problemas dimensionais, ainda conduz

a uma cavidade de molde muito macia com muitos dos mesmos problemas. Faz sentido investir tudo o que é usinado em um metal macio? Somente em alguns casos.

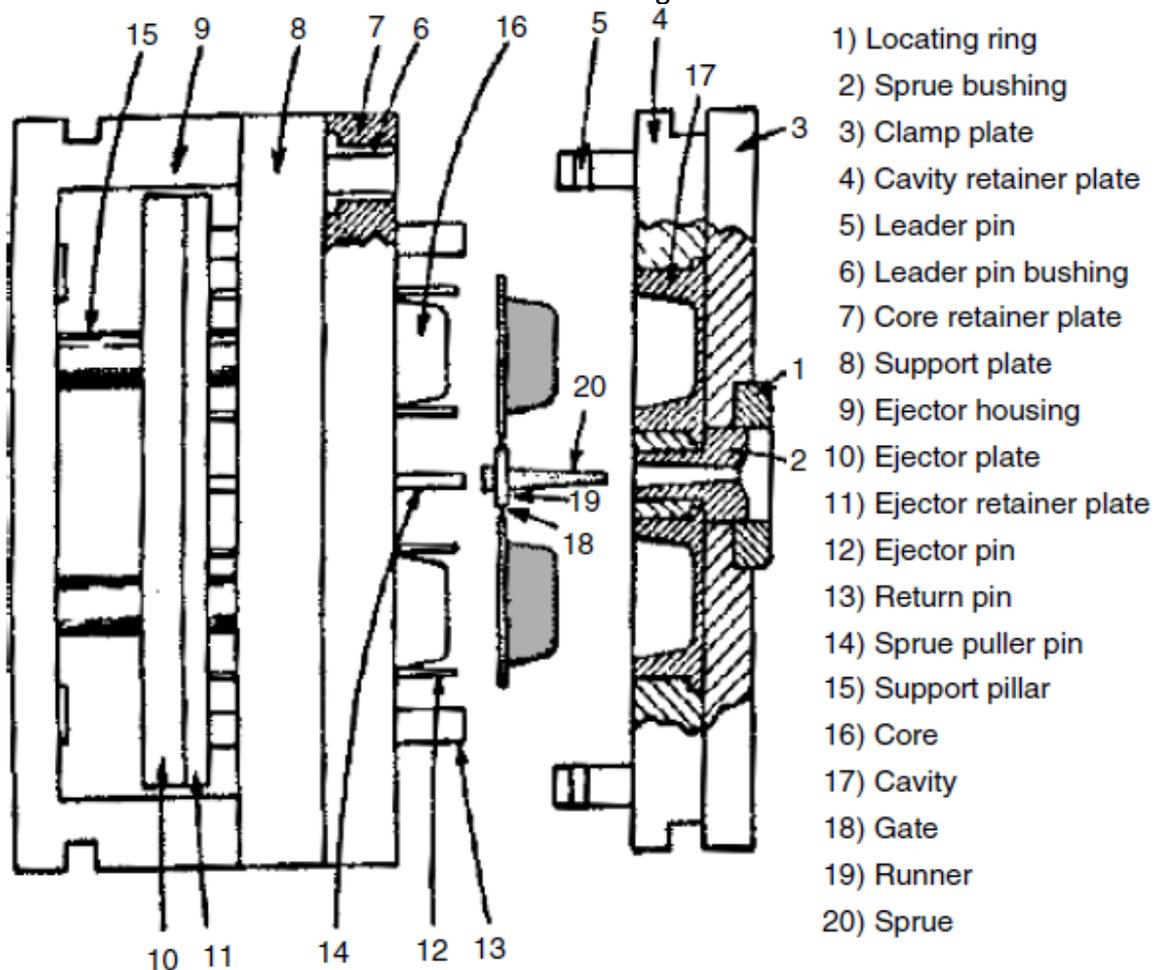


FIGURE 2.31 Basic mold.

As aplicações de grande volume com texturas moldadas exigem geralmente materiais mais elaborados do aço do molde, tais como aço 4140, P-20, ou HR-13. Preferivelmente, estes moldes são cortados igualmente de tarugos ao contrário das peças fundidas. Os novos sistemas de espuma estrutural de moldagem livre de redemoinhos também exigem geralmente moldes de aço para obter a melhor superfície possível da peça e para lidar com pressões mais elevadas, que às vezes são utilizadas. Programas que exigem um nível elevado de repetibilidade de peça a peça (por exemplo,  $CP_k = 1.33$ ) são freqüentemente melhor prescritos em moldes de aço. Um novo tipo de aço para molde poroso foi desenvolvido nos últimos anos para as ferramentas de moldagem por injeção. Este aço poroso permite ventagem de áreas que de outra maneira seriam de difícil ventagem. Estes aços novos tornam-se proeminentes, lentamente, na espuma estrutural por causa de suas baixas pressões e maiores espessuras de parede. Com seções de parede mais grossas é um pouco difícil o preenchimento das áreas.

É habitual na estrutura da indústria de plásticos que o moldador compre moldes feitos sob encomenda de um fabricante de moldes externo; entretanto, ocasionalmente, há uma capacidade interna de fabricação dos moldes. Há obviamente prós e contras em ambos os casos. Em um

determinado evento, um jogo de desenhos detalhados do molde deve ser gerado. O procedimento começa realmente na fase de cotação, quando o moldador fornecerá um esboço ou uma descrição detalhada ao fabricante do molde para finalidades de uma cotação exata. Quando a ordem é liberada ao fabricante de molde selecionado, está acompanhada da base de dados ou dos desenhos do projetista da peça e de alguma informação muito importante do engenheiro do processo de moldagem. Esta informação inclui o fator de contração da resina, a posição e o método da porta, a disposição do resfriamento, e as exigências de ventagem. O fabricante do molde gerará um projeto de molde preliminar para a aprovação do cliente. Esta aprovação permite de serem requisitados o molde de aço e outros materiais, simultaneamente com a programação assistida a computador do projeto do molde. Os desenhos finais do molde e o orçamento de materiais devem ser esperados para o ponto médio do programa de construção do molde.

Amostras de avaliação são exigidas antes da aprovação do molde e da liberação da produção. Tornou-se comum na indústria de moldagem por injeção que os grandes fabricantes de molde tenham os padrões disponíveis de amostras moldadas. Isto é raro para as grandes peças da espuma estrutural, onde as grandes máquinas e os arranjos especiais do bico são freqüentemente empregados. Mesmo se o fabricante do molde tem uma máquina de injeção de 3000 toneladas, as amostras produzidas não são do mesmo processo que aquelas de uma máquina de múltiplos bicos. É sempre uma boa prática usar amostras do fabricante do molde para erros óbvios, mas confiar em amostras finais do processo para a documentação final das medidas e dados. A divisão dos fabricantes de moldes SPI fornece um formulário, que é um bom exemplo do tipo de informação esperado para a cotação de um fabricante de molde.

### **2.10.1 Portas**

Há uma necessidade óbvia de prever os testes padrões de preenchimento plástico e de arranjar de acordo a posição da porta. A posição da porta é de importância crítica para o projetista da peça e para o engenheiro do processo de moldagem. O projetista deve estar ciente destes interesses.

A porta de bicos múltiplos fornece soluções a muitos aspectos da linha de solda, posição e comprimento do fluxo. A porta do canal de alimentação direta da peça é a preferida para fluxos mais densos, marcados, ou de grandes áreas. Os canais diretos que alimentam as portas laterais ao longo da lateral da peça ou em uma abertura são maneiras de evitar áreas de aparência. A ejeção reversa é outra solução. Isto envolve porta para a peça não aparente ou traseira ao molde. Significa que a peça será injetada e ejetada do mesmo lado. Esta será a metade estacionária do molde, então há necessidade de adicionar a ejeção hidráulica ou mecânica. Igualmente exigirá prolongamento de bico aquecido através do acréscimo adicionado ao molde.

Corredores em áreas abertas devem ser abertos ao seu redor em 1/2 pol. ou mais em diâmetro. É igualmente uma boa idéia ter os pinos do ejetor do canal de alimentação sob os canais. Em alguns casos uma porta submarina pode ser usada, mas um diâmetro mínimo de 0.12 pol. é necessário para permitir o fluxo adequado da resina.

### **2.10.2 Ventagem**

A moldagem de peças grandes envolve sempre uma atenção especial à ventagem. Com as tecnologias avançadas, a ventagem já não deve ser vista como o deslocamento necessário do ar pelo plástico. Os transdutores e os controladores modernos de pressão permitem que o processo da ventagem seja uma maneira de controlar o preenchimento do molde. As variações de canais finos seguirão a filosofia tradicional da ventagem. Na ventagem da espuma estrutural, que tem

uma parede maior, há naturalmente mais ar na cavidade a ser deslocado assim como o fluxo da resina. O agente de sopro que escapa fora da frente de fluxo da própria parte dianteira do fluxo transforma-se em mais gás a ser deslocado antes do preenchimento completo do molde. Tipicamente, os vents são localizados nos cantos, em áreas de difícil preenchimento, e no final de fluxo. Estes vents são cortados em estágios. Devem medir 1/2pol. de largura. e 0.002 a 0.003pol. de profundidade adjacente à cavidade e então aberto de 0.010 a 0.015pol. sobre o primeiro 1/4pol. do corte. São cortados geralmente na metade da cavidade do molde.

### **2.10.3 Resfriamento**

O ciclo de resfriamento para a espuma estrutural é crítico, bem como esta é a parte mais longa do ciclo total de moldagem. A posição da linha de resfriamento, e seu projeto tem um grande efeito no custo total. Reflexão prudente deve ser dada à geometria dos canais de resfriamento, à colocação, e aos circuitos. A falta de resfriamento adequado é exibida geralmente através do pós-sopro, sob pressão do agente de sopro que sobressai da pele após a ejeção. Outra consideração é que os pinos do ejetor devem ser de diâmetro maior para evitar penetrar a pele.

### **2.10.4 Ejeção**

A ejeção segue regras normais salvo que os diâmetros dos pinos do ejetor não devem ser menores do que metade da espessura de parede. Isto é para evitar perfurar através da pele e na camada de espuma. Deve geralmente haver pelo menos oito pinos. Devido ao tamanho de muitas peças de espuma estrutural, os sistemas guiados de ejeção são necessários para impedir qualquer emperramento do movimento, que pode causar um aumento na instabilidade e na geração de resíduos do processo. O padrão deve ser determinado conjuntamente com o planejamento da máquina de moldagem.

### **2.10.5 Textura**

Ao usar a espuma estrutural de baixa pressão, há três razões para reconsiderar a textura normal do molde. O problema mais óbvio é a superfície em redemoinho, que torna impossível demarcar texturas finas. Somente texturas pesadas são recomendadas (0.003 a 0.005 pol.). As pressões de empacotamento são muito mais baixas mesmo com os processos avançados que têm boa capacidade de superfície. Para compensar, a mesma gravação mais profunda da mesma textura conseguirá bons resultados. Por exemplo, com contra pressão, adicione 0.0005pol. ao valor desejado de 0.0015pol. A terceira consideração está com a pintura, que é uma operação secundária comum para as peças cosméticas de espuma estrutural. Ao tentar reduzir etapas de pintura para apenas um revestimento de cor sobre a textura, adicione mais 0.0005in à profundidade da textura para compensação da pintura.

### **2.10.6 Detalhes da contra pressão**

A espuma estrutural de contra pressão existe desde 1977 e em produção desde 1983. Até recentemente o processo era uma tecnologia de moldagem em desenvolvimento. Nenhum padrão industrial foi estabelecido. As adaptações da contra pressão envolvem duas áreas principais, controles da máquina e construção do molde. O molde multi propósito é construído com os seguintes detalhes adicionais:

- Um sistema de ventagem é usado alimentando um sistema interno selado de canais de ventagem. O sistema de ventagem deve seguir a filosofia tradicional de ventagem da sua colocação no final de fluxo e em linhas de solda. Os vents generosos trabalham melhor. Os protegidos com tela melhoram a confiabilidade.
- É exigida selagem na linha divisora. Um exemplo simples é a adição de 0.25pol. x 0,25pol. de sulco em torno da cavidade do molde e externo à trilha de ventagem. O selo deve ser instalado na metade do molde, geralmente na metade da cavidade. Um anel de vedação de borracha é instalado. Uma linha divisora lisa trabalha melhor. Se isto não é possível, uma inclinação gradual da superfície do selo ajudará a reduzir o desgaste do anel de vedação.
- O sistema inteiro do ejetor deve ser selado. Uma solução prática para os pinos do ejetor é usar as mesmas técnicas de selagem que os cilindros hidráulicos empregam. O volume de ar dentro da porção selada do sistema de ejeção é um interesse por razões de controle e de custo.
- Os assentos do bico de injeção devem ser selados.
- Os acionamentos e os movimentos laterais devem ser selados.

O fabricante do molde tem uma ligação crítica no sucesso da moldagem a contra pressão. Com a necessidade de um sistema de ventagem e uma linha divisora selada exteriormente a ela, ocorrerá um sobre dimensionamento do molde. Para um acabamento de superfície melhorado, a cavidade do molde deverá ser mais polida do que com espuma estrutural a baixa pressão. Os moldes de contra pressão terão custos adicionais, geralmente de U\$2500 a U\$5000, para cobrir estas exigências.

### **2.10.7 Lista de verificação do ferramental**

São listas de verificação de itens a considerar durante a fase de desenvolvimento do molde.

#### *Lista de verificação impressa de revisão da peça*

1. Tamanho total e configuração
2. Resina/processo
3. Moldabilidade (desenho e linha divisora)
4. Espessura de parede
5. Exigências de pressão
6. Previsão do ciclo de vida do molde
7. Data de entrega necessária
8. Simulação do preenchimento/empacotamento
9. Simulação de resfriamento do molde
10. Tipo de base de dados e de compatibilidade com moldes comerciais (isométrico)

#### *Lista de verificação do projeto do molde*

1. Processo do molde (sólido, espuma, contra pressão, gás)
2. Material do molde (alumínio, aço, fundido)
3. Tipo de construção (placa dupla, canais aquecidos, ejeção reversa, de corrediças, de tirantes, de luva ejetora, de extratores)

4. Textura
5. Classe da ferramenta (usinada de base sólida, fabricada, base de moldagem padrão)
6. Protótipos necessários
7. Corrediças (material, chapeados, água, fechamentos, retornos, fonte do movimento, inclinação do ângulo lateral)
8. Tirantes (espaço do movimento no molde e na peça, material do molde e do tirante, água)
9. Tamanho do molde (profundidade, 4 a 5pol. da borda de aço, 3pol. de profundidade da beira, moldagem a pressão, contra pressão)
10. Colunas de sustentação (número máximo)
11. Linhas de água (linhas retas, cavidade paralela/núcleo, zonas; laços evitados, capacidade de troca térmica)
12. Portas.

### **2.11 Projeto da peça**

A espuma estrutural, a assistência a gás, e os processos híbridos são variações da moldagem por injeção. A completa compreensão do projeto da peça da moldagem por injeção é um ponto de partida excelente e permite que a discussão focalize em o que é diferente e o por que. As etapas para o projetista da peça são vistas com a mesma importância pelo engenheiro de processo que será realmente o responsável pela produção de boas peças. Os pontos de foco são o fluxo e a contração. O molde tem que ser preenchido com o material antes das peles congelarem-se e o material contrairá durante o resfriamento. A espessura de parede determina o fluxo da resina injetada. Toda irregularidade de espessura da parede causa o desigual congelamento da pele. Com espuma estrutural o núcleo da espuma é elástico, preenchendo as seções mais espessas e assim se complementa. De outro modo, suas baixas pressões de preenchimento podem causar rejeições excessivas com seções de parede restritivas e não uniformes.

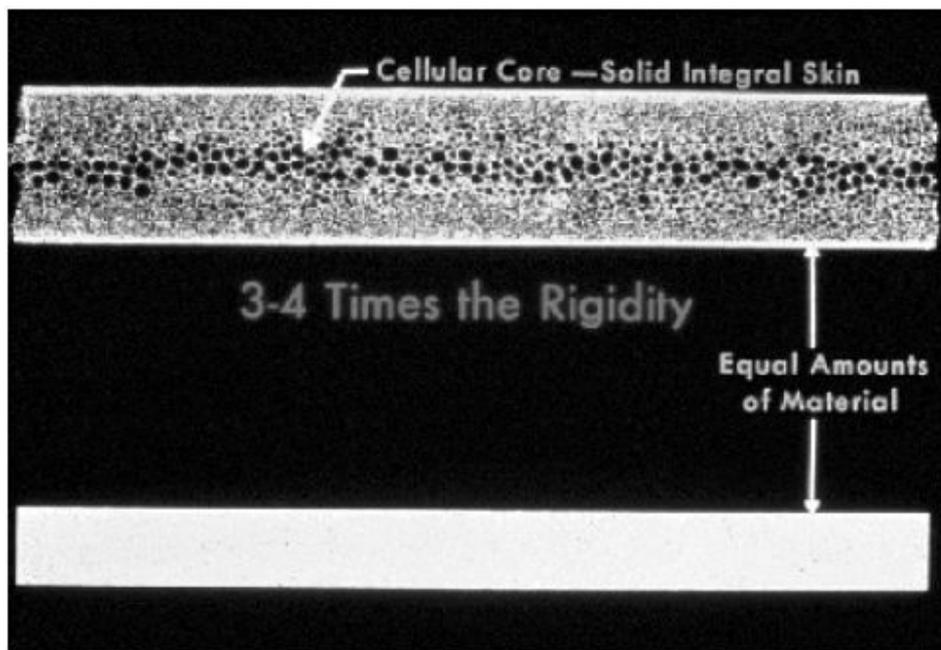
Conseguir a estrutura é uma exigência óbvia de um processo de plástico estrutural. Assim como a espessura de parede é a espinha dorsal do projeto, é também o ponto de partida para aumentar a estruturação. O problema é que a espessura de parede igualmente dita os custos e não pode ser o único modo eficaz para aumentar a estruturação. Considere alguns elementos do projeto que afetam a estrutura:

- Módulos de flexão da resina
- Espessura de parede, que aumenta a rigidez na potência 3
- Estruturas de reforço
- Configuração da peça
- Acessório de reforço
- Perfis de harmonização de desempenho

Geralmente, o bom projeto inclui características e funções de moldagem que não são práticas em outros materiais. Se o objetivo do projeto é substituir uma peça de aço ou de madeira, o termoplástico moldado por injeção não terá custo competitivo. De outra forma, se a chapa de aço tem que passar por diversas moldagens e operações secundárias, a moldagem de uma só peça pode ter vantagens em custos da peça, na consistência dimensional, e nos custos do

conjunto. Deixe-nos considerar como diversos dos processos devem aproximar esta questão estrutural.

Para a moldagem por injeção convencional a escala na espessura de parede tem variado de 0.009 a 4.5pol.; os limites práticos são de 0.035 a 0.25pol. As peças retas moldadas por injeção confiam basicamente na resina e na geometria da peça para obter a estrutura. O acréscimo acentuado da espessura da parede não é uma boa opção. Os reforços extensivos são limitados pela altura e largura. Geralmente, a injeção de peças de paredes duplas é anexada a outras peças de acoplamento antes do conjunto tornar-se estrutural.



**FIGURE 2.32** Structural foam vs. solid wall.

A espuma, a contra pressão, a co-injeção, e a injeção estrutural a gás, de paredes espessas, têm a opção de paredes mais espessas com densidade reduzida. Para estes processos é praticável confiar no efeito cúbico do aumento da seção de parede. Na teoria, se a densidade pode ser reduzida por 50%, rendendo duas vezes a espessura com o mesmo peso, a rigidez calculada seria oito vezes maior (veja figura 2.32). Na realidade isto não se comprova na prática e a densidade mais baixa produz propriedades físicas reduzidas. O resultado é que rigidez total por unidade de material tem de ser acrescida de três a quatro vezes. Reforços estruturais são muito práticos nos processos de parede mais espessas. As regras do projeto permitem uma relação maior, a largura do reforço na base é maior, e menor inclinação é exigida. A co-injeção de espuma estrutural tem dois componentes materiais a considerar. O perfil de carga da viga I mostra que a maioria da rigidez vem do componente da pele do composto. Refira-se a tabela 2.5 para a compatibilidade dos materiais da co-injeção.

As paredes finas com assistência a gás tem a óbvia vantagem da força dos reforços deliberadamente desproporcionados. O processo oferece a opção de colocar os reforços exatamente onde é necessário. Para determinar a espessura de parede, a estratégia total a gás tem que ser considerada.

- A configuração da peça é crítica.
- Os canais do gás devem se estender às extremidades da peça moldada.
- Os canais do gás devem ser bem separados e não devem cruzar-se.
- O fluxo total determina o tamanho da passagem de gás.
- A viscosidade da resina tem que ser considerada.
- Regra geral: diâmetro do canal = 3 x a espessura da parede.

### 2.11.1 Importância do raio nos cantos

Quando uma parede uniforme tiver que fazer uma curvatura (por exemplo, para as paredes laterais), um raio no canto é essencial. O esforço causado pela contração da resina nas duas direções acumulará nos cantos, e pode ser distribuído com o raio correto. Cada material e processo terá a melhor fórmula de um raio apropriado. Em regra geral, o raio interno deve ser de 25% da espessura da parede. O raio externo deve ser ainda maior, pela adição da espessura da parede ao raio interno (0.060 pol. de raio interno + 0.125 pol. da parede do raio interno = 0.185 pol. de raio externo). Isto é para assegurar o fluxo uniforme durante o estágio de preenchimento. Desde que a espessura de parede para a espuma estrutural é maior, o raio do canto deve concordar (figura 2.33). As exigências de ângulos para a espuma estrutural são ligeiramente menores do que aquelas para a moldagem por injeção, primariamente devido às paredes mais espessas e aos esforços menores. Tipicamente, 1.5° de ângulo é o mínimo permitido para as paredes laterais. Menor angulo pode conduzir a problemas de ejeção. Alguns materiais naturalmente lubrificadas tais como o polietileno, podem ter ângulo um pouco menor. Além disso, áreas planas tais como cartões de crédito podem ser projetadas com quase nenhum angulo. A ejeção é sempre uma consideração ao tomar estas decisões. Um ângulo maior melhora a qualidade da peça moldada, facilita a ejeção, melhora o tempo de ciclo, e reduz o custo.

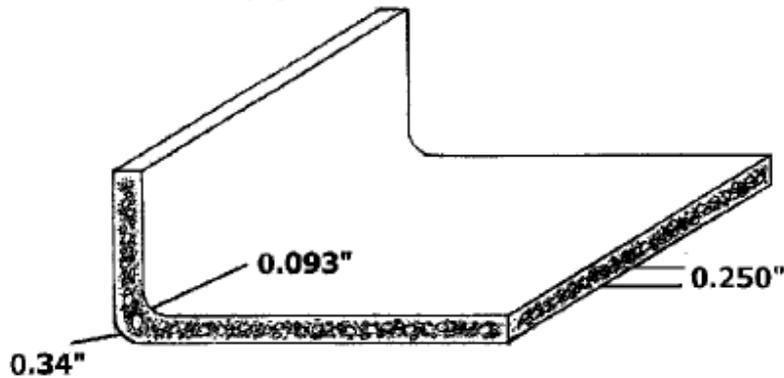


FIGURE 2.33 Low-pressure structural foam wall thickness and corner radius details.

### 2.11.2 Ângulo

Artigos produzidos em moldes fechados de materiais que contraem devem ter inclinação no plano perpendicular a extrair. O grau do ângulo tem efeito principal no tempo de ciclo e conseqüentemente no custo. O tempo maior de ciclo do molde é devido ao resfriamento do plástico fundido até uma temperatura que permita que o artigo suporte a força de ejeção. Os projetos com maiores ângulos exigirão menor força de ejeção e as peças podem ser removidas do molde mais quentes e mais rapidamente. As peças de paredes mais espessas possuem um ciclo maior, mas podem suportar mais força na ejeção. A regra empírica geral para as peças de paredes espessas é que 1.5° de ângulo é o mínimo. Para os processos de paredes finas, 2° é o mínimo. Projetar peças com ângulo mínimo causará um tempo de ciclo mais longo e maior rejeito de moldagem. A resina selecionada tem influencia definitiva nas exigências de ângulos. Resinas de contração elevada geralmente necessitam maior ângulo, em especial no lado do núcleo. O vidro e outras cargas reduzem a contração e podem suportar uma maior força de ejeção, mas há menos flexibilidade da peça, assim que mais força às vezes é exigida para ejetar. Algumas resinas (por exemplo, polipropileno) são naturalmente mais lubrificadas e terão um menor arrasto, exigindo menor força de ejeção.

Os moldes texturizados exigirão ângulo adicional além do nominal. Frequentemente, o ângulo é especificado pela textura. Muitas vezes o problema só é verificado após o molde ter sido construído. O tipo e a profundidade da textura podem ser limitados por este motivo. Uma regra empírica para a profundidade da textura é de 1° para cada 0.001 pol. de profundidade da textura. É praticável ter uma profundidade ligeiramente mais rasa da textura na parede lateral com transição da textura no canto.

Antecipando o efeito de contração no artigo moldado, é praticável projetar maior ângulo em uma superfície que está sujeita a mais arrasto de contração. Um exemplo é uma caixa de cinco lados, onde a peça contrai no núcleo. As paredes de cavidade poderiam ter ângulo muito menor porque o plástico está realmente contraído, afastado da superfície. No caso do polipropileno em 0.25 pol. da parede, esta contração pode alcançar 0.005 pol. A tendência então é minimizar o ângulo externo e acima do dobro sobre o ângulo interno. A variação resultante na espessura da parede pode ser inaceitável para peças profundas. Seções de parede não uniformes mostrarão diferenças em taxas de contração, tendo por resultado a tensão e o empenamento. Uma técnica mais aceitável é não projetar ângulo fora de padrão para que o ângulo não cruze com o plano da superfície superior. O percentual de parede lateral afetada por este projeto deve ser menor do que 10% do total da parede lateral. Ejeção adicional pode ser necessária nestas áreas para colocar força de ejeção diretamente sobre a área afetada.

A solução final para a inexistência de ângulo é colocar ação de movimento lateral no molde. A parede lateral do molde deve ser mecanicamente retrátil nas áreas sem nenhum ângulo. Esta solução tem diversas desvantagens. Obviamente, o preço do molde será maior em milhares de dólares. O tamanho da base do molde aumenta para acomodar as exigências do movimento perpendicular. Em algumas situações isto pode significar mudar para uma máquina maior apenas para obter a área de placa adequada. Os custos da unidade são assim afetados. A máquina de placas maiores deverá ter uma extrusora maior, causando uma combinação inadequada de volume de injeção. Quando existe peça móvel de aço no molde, haverá uma marca testemunha na linha divisora. Isto pode ser cosmeticamente inaceitável em superfícies externas.

### 2.11.3 Projeto de reforço: conheça seus processos

Considerando que a espessura de parede estabelecerá o custo de um artigo moldado, é o projeto do reforço que determina sua funcionalidade. Frequentemente, as exigências do reforço ditarão a espessura da parede. A largura e a altura do reforço são relacionadas com a espessura da parede. Tipicamente, reforços mais profundos exigem paredes mais grossas a menos que a aplicação permitia as adversidades causadas pelo fluxo não uniforme e contrações. As peças moldadas por injeção são limitadas para reforços com relações de larguras de 0.5 a 0.75. A altura do reforço é de três vezes a espessura da parede. O caminho para deslocar reforços curtos é aumentar suas quantidades. Para melhores resultados, o raio de canto na base do reforço deve ser 50% da espessura da parede; 25% é o mínimo.

Os reforços estruturais de espuma devem seguir relações prescritas, mas devem prever folga devido à natureza de expansão do material. Isto é ilustrado na figura 2.34. Isto compensa a contração volumétrica da resina. Baixos esforços conduzem a planicidade e a peças mais repetíveis. O projetista da peça tem uma influencia maior no padrão de preenchimento baseado no projeto do reforço. A largura do reforço na base pode ser tão elevada quanto a espessura da parede, mas uma relação de 0.75 é preferida se as marcas de rechupe são um problema. O padrão do reforço é um detalhe de menor custo, para adicionar mais tarde se for necessário refazer, porque envolve remover metal do molde. De outra forma, os reforços são caros de eliminar após a conclusão do molde, porque metal tem que ser adicionado ao molde. Se mudanças atrasadas dos reforços são antecipadas, o projetista do molde deve ser avisado para que as linhas de ejeção e resfriamento sejam projetadas adequadamente.

Paredes espessas de projetos assistidos a gás encontram frequentemente sua origem como espuma estrutural a baixa pressão. Frequentemente, a assistência a gás é a substituta para eliminar o redemoinho ou a necessidade do agente de sopro. A redução da densidade resulta em redução das propriedades físicas. Uma peça espessa a gás com resistência ao impacto melhorada pesará provavelmente mais do que uma similar em espuma estrutural.

Na aplicação ilustrada na figura 2.35, o reforço de endurecimento também fornece uma superfície de ligação para a parte de enchimento, que é colada com solvente. A espuma estrutural a baixa pressão permite um perfil de reforço 1:1. A resina HIPS moldada com textura de madeira é pintada com laca acrílica.

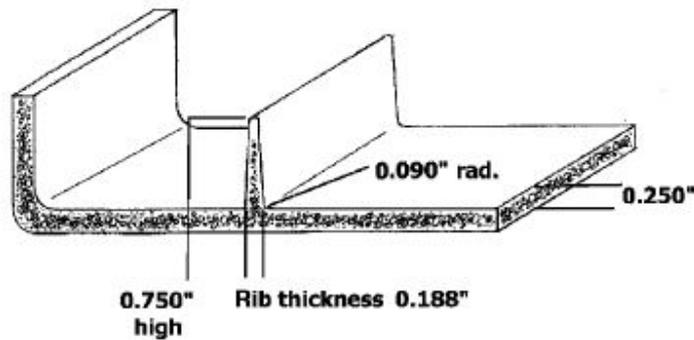


FIGURE 2.34 Low-pressure structural foam rib design details.

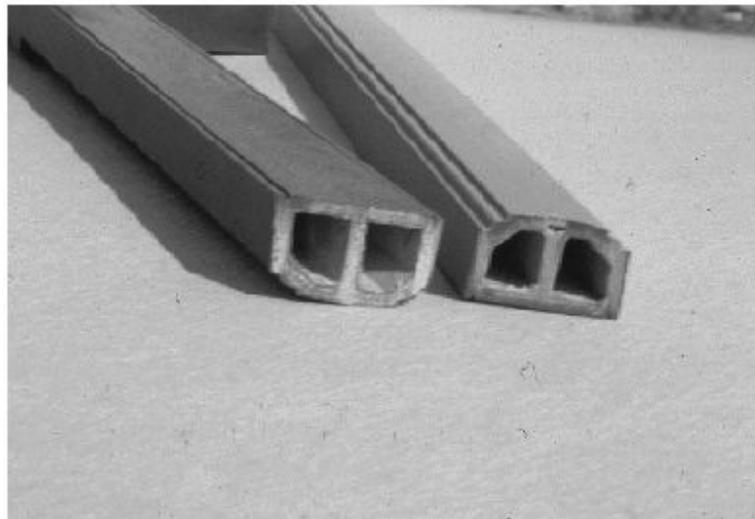


FIGURE 2.35 Low-pressure structural foam rib.

Com assistência a gás de parede fina, muitas configurações de reforço são praticáveis (veja figura 2.17). O tamanho do reforço é crítico ao sucesso do artigo moldado. A fuga de gás através do fundido e os dedos viscosos são as possibilidades preliminares. Os moldes de assistência a gás são de três tipos. O projetista precisa reconhecer que tipo de peça esta projetando, porque há regras especiais para cada tipo.

1. Moldes ocos: projetos com paredes não padronizadas exceto as de seção em torno da passagem de gás. Geralmente, o volume do gás é pelo menos 30% do volume total. O núcleo do gás é restringido à maior área circular da seção transversal, com uma relação de comprimento por largura de pelo menos 10. O diâmetro máximo é de 30mm.

2. Moldes sólidos: projetos de moldagem por injeção com problema ou uma seção espessa. Com este tipo de molde, o gás é injetado após a resina, como um amortecedor para compensar a contração volumétrica.

3. Moldes de injeção incompleta: especificamente projetado para conseguir um maior núcleo perdido para a redução de peso e a melhoria do tempo de ciclo. Estes moldes são produzidos com um estágio simultâneo de injeção do gás e da resina, com o gás impulsionando o

fluxo da resina. A otimização do projeto da peça, especificamente um reforço do perfil de espessura da parede, é essencial para o sucesso. O restante desta discussão de projeto conduzirá esta otimização para moldes de injeção incompleta.

Projetar a espessura de parede uniforme torna-se desafiante quando há uma mudança nos planos. As paredes laterais são uma continuação da parede uniforme com um ponto de interseção nos cantos. Os cantos estarão sujeitos a contração que puxa em sentidos diferentes; conseqüentemente, um raio substancial é exigido para distribuir a tensão. Do ponto de vista do fluxo, uma seção uniforme é exigida para toda a peça manter uma taxa de preenchimento de vazão constante. A consideração final para paredes laterais é o ângulo de inclinação, que é uma matéria da física e do ferramental. Tem que haver bastante estruturação em uma peça para ejetá-la de seu molde.

Os reforços são o elemento do projeto que estabelecem a passagem do gás. Nós temos que recordar leis da física enquanto determinamos a estratégia da passagem de gás. O gás irá pelo curso de menor resistência. Áreas mais espessas da peça têm maior volume e conseqüentemente menores pressões, assim atraindo a bolha de gás. O modo eficaz de estabelecer estas áreas espessas é com a relação relativa da espessura das paredes. De fato, estas áreas espessas transformar-se-ão em distribuidores ou passagens de gás conectadas a um ponto de injeção comum. Estas passagens de gás devem ser de duas a quatro vezes a espessura da seção da parede. Relações menores tornam-se ineficazes e permitem a formação de dedos viscosos; relações maiores tornam-se suscetíveis ao escape do gás, onde o fluxo do gás começa antes da parte dianteira do fluxo da resina durante o preenchimento. Estas passagens de gás são abrigadas em reforços dos canais do gás. As variações deliberadas da espessura de parede que se estendem como um reforço é considerada igualmente projeção. As passagens do gás devem se estender até o final da peça. Reforços desproporcionados de estruturação da peça transformam-se na geometria básica para a passagem do gás. Uma área linear de espessura de parede aumentada pode ser considerada como um reforço. Uma transição abrupta na seção ajudará a reduzir os dedos viscosos.

Áreas múltiplas do aumento linear da parede podem ser projetadas para obter bordas ergonômicas e seguir o estilo projetado de linhas do produto. A colocação das projeções nos cantos reduz o risco de variação de brilho. As passagens múltiplas devem ser conectadas de volta ao ponto da injeção do gás e devem se estender às extremidades da peça. O acúmulo natural da espessura nos cantos é uma posição óbvia de uma passagem do gás. Além disso, as variações de brilho ficam disfarçadas nos cantos. Relações mais justas aplicadas nos cantos levam a um acúmulo natural de espessura. Muitas variações do projeto de reforço são praticáveis. Uma adequação prática para um reforço mais profundo é juntar um reforço convencional com um reforço da passagem de gás com prolongamentos apropriados.

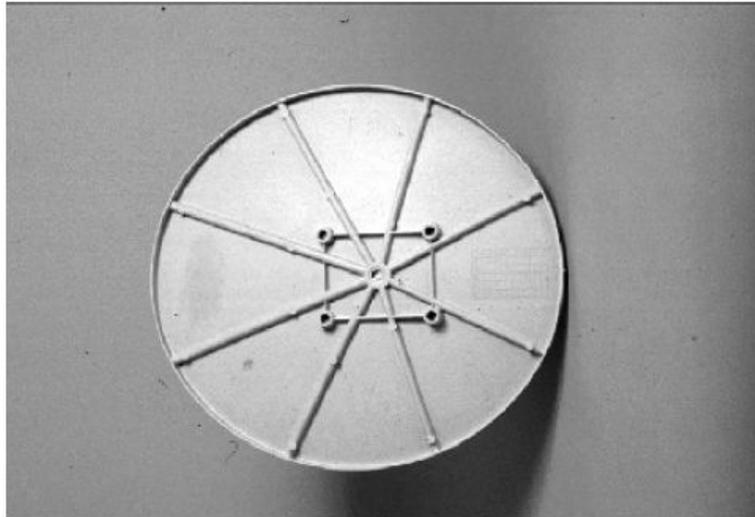


FIGURE 2.36 Gas-assisted injection molding rib pattern.

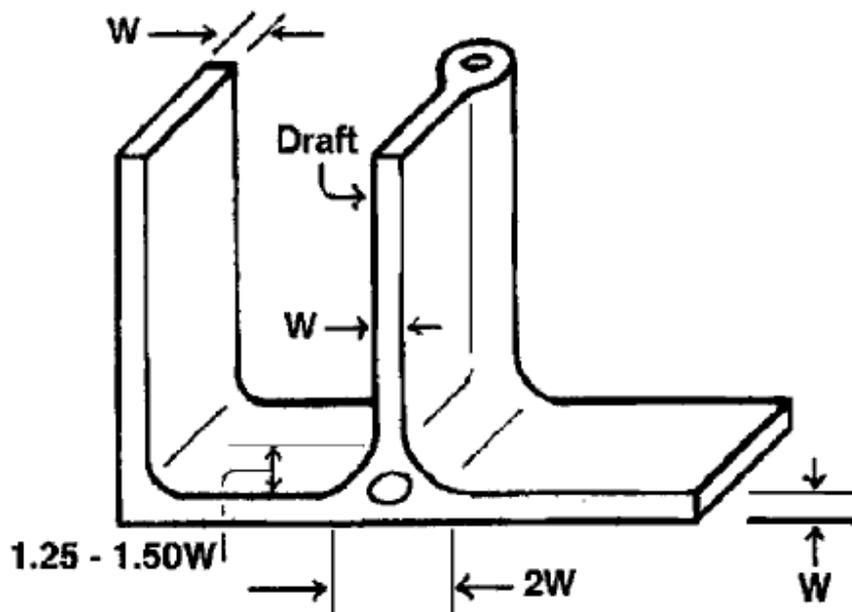


FIGURE 2.37 Gas-assisted injection molding rib and boss design guidelines.

Conectar a saliência com um reforço evita o aprisionamento do gás (figura 2.37). As passagens do gás que contêm projeções devem se estender ao fim do fluxo e devem ter continuidade de volta ao ponto de injeção do gás. Dedos viscosos é a penetração da camada do gás na área contínua da parede. Esta deve ser evitada, porque reduz a integridade e a força da seção de parede. Alguns projetos ditam a diminuição da espessura de parede no fim do fluxo, que ajuda a manter a velocidade constante de penetração do gás. Por isso é importante controlar os dedos viscosos. Os dedos viscosos indicam um problema: geralmente com o processo, mas às vezes com o projeto. Uma taxa de penetração uniforme do gás é uma consideração importante para determinar a espessura de parede correta. O projetista deve pensar nisto como um padrão de velocidade da bolha, onde manter uma velocidade constante ao fim do fluxo seja o objetivo. Os

fatores preliminares da taxa de penetração são o tamanho da passagem do gás e a posição relativa da espessura da parede.

Outra consideração importante do quebra-cabeça do preenchimento da injeção incompleta é a do deslocamento do plástico. Para que uma bolha de gás penetre após algum ponto, tem que haver um lugar para onde o plástico se mova. O projeto apropriado terá alguma seção de parede ou uma previsão de sobre fluxo deste plástico. Para determinar a espessura de parede, a estratégia total do gás tem que ser considerada. Desde que a passagem do gás é controlada pela relação e pela taxa de penetração do gás, tem menos controle dimensional do que característica de “ferramental”. Adicionalmente, o diâmetro do núcleo perdido será reduzido continuamente até o final do fluxo. O projetista precisa pensar na passagem de gás como um perfil em mudança constante.

### **2.11.3.1 Os reforços são críticos**

Quando tudo mais é igual, um produto mais barato conseguirá geralmente uma parte maior do mercado e um sucesso comercial maior. O processo da moldagem por injeção e suas variações têm sido considerados por muito tempo as melhores para muitas aplicações. Considere os elementos de custo de um componente moldado por injeção. O único grande elemento de custo é o da matéria- prima. Uma análise adicional mostra que a maioria da resina (peso) está na pele ou na parede da peça, visto que a maioria da força é fornecida pela estrutura de reforço. Este fenômeno resulta das formulações que formam as peles (uma seção de parede uniforme) servindo como uma plataforma para a estrutura de reforço como meios da fabricação em forma fundida. Para olhar a estrutura de uma maneira nova, considere a força de uma placa lisa contra aquela de um feixe de reforço. A rigidez é uma função direta (no expoente 3) para ambos, espessura ou profundidade. Entretanto, o feixe do reforço, sob a forma de um reforço estrutural, é um uso potencial bem mais eficiente do material e com algumas vantagens competitivas se explorado inteiramente. Uma comparação da relação da força versus peso entre uma parede uniforme padrão contra uma com reforço revela uma vantagem exponencial para reforços. Se o conceito do reforço estrutural é aumentar a força com menos quantidade de peso, não há nenhuma finalidade para a seção de parede nominal padrão, exceto pela aparência e para preencher os furos entre os reforços estruturais. Permitindo um prolongamento maior da parede reforçada, os processos assistidos a gás internos e externos permitem que os projetistas reduzam o peso e aumentem a relação de força versus peso (vantagens competitivas).

### **2.11.3.2 Vigas de reforço e prolongamentos**

Mesmo que cada tipo de processo de moldagem tenha suas próprias diretrizes de projeto de reforço, assim influenciando a força do reforço, o principal está na profundidade do reforço que estabelece finalmente a força. O projeto de reforço é um acordo das limitações de ângulos, de prolongamento, da ejeção, e do preenchimento material. O resultado está numa altura um pouco limitada do reforço para a moldagem por injeção a alta pressão. Reforços mais altos exigem umas seções de parede mais espessas em sua base.

Há realmente uma diferença muito pequena no desempenho (menos de 4%) entre os tipos do processo. É a configuração do reforço (profundidade) que estabelece sua força. A profundidade do reforço determina a força, mas tem uma largura que possa ser ditada pela espessura da parede. A largura de uma estrutura de reforço é uma combinação do preenchimento do plástico, da força de ejeção, e do ângulo de inclinação, todos procurando um reforço mais largo versus a prevenção de marcas de rechupes e um reforço mais fino. Na maioria dos casos, algum ângulo

será necessário (0.5 a 2° por lado), e quando acoplado com ejeção mínima ou com restrições de preenchimento, transforma a largura do reforço em mínima. As diretrizes de projeto úteis foram desenvolvidas centrando-se sobre o prolongamento da largura do reforço à seção de parede (veja a tabela 2.2).

### 2.11.3.3 Controle de marcas

O prolongamento da largura do reforço à seção de parede é uma ferramenta útil em controlar as marcas de rechupe, limitando a massa no ponto de interseção. As áreas de massa elevada contrairão de modo diferente do que as áreas mais finas. O prolongamento da espessura de reforço à espessura de parede variará de 0.5 a 5.0, dependendo do processo de moldagem.

O conceito de centro de massa traz uma luz adicional à contração da resina e às marcas de rechupe resultantes (figura 2.38). Considere uma linha central que funciona através do plano da seção mestra, da seção de parede exterior da pele ou do substrato. Toda a orientação do molde é uniformemente dividida entre as duas metades, e a contração será uniforme. Quando um reforço cruza a seção da parede original, há uma mudança na concentração do centro de massa e conseqüentemente da contração. O resultado são marcas de rechupe. No processo de moldagem estrutural a gás o centro da massa é colocado mais próximo do plano central da seção da parede. Freqüentemente, o plástico na base do reforço é deslocado no vácuo da contração. Dependendo da geometria da peça, a economia do tempo de ciclo de 15% foi experimentada com o processo de moldagem estrutural a gás.

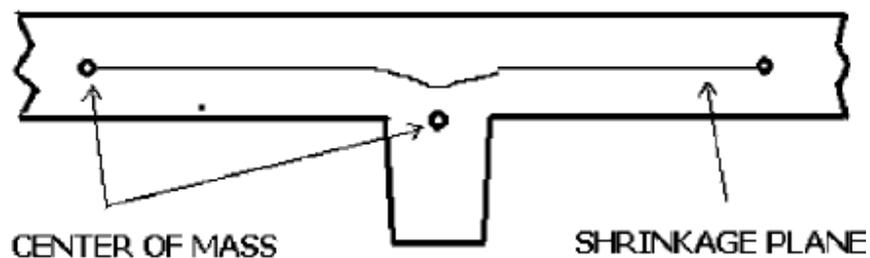


FIGURE 2.38 Center of mass. Mass = shrinkage = sinks.

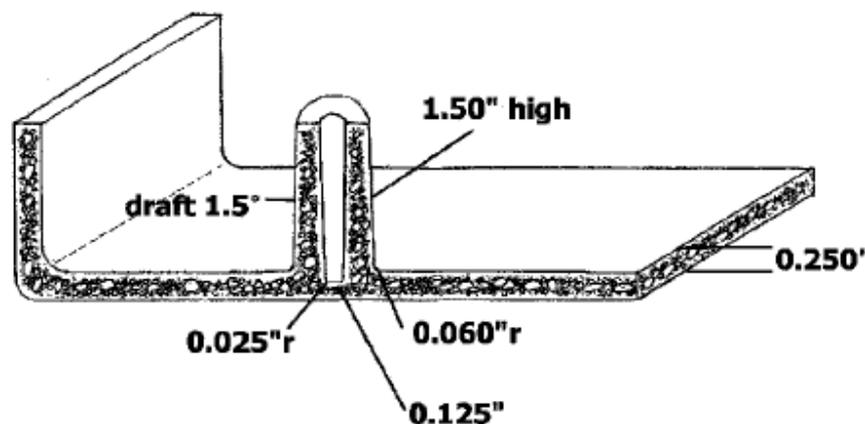


FIGURE 2.39 Low-pressure structural foam boss design.

#### **2.11.4 Seqüência do projeto**

A nova seqüência do processo dos eventos de projeto de seleção da peça tem sido a seguinte:

1. Conduza uma análise de valor.
2. Determine as exigências funcionais.
3. Projete as características nos reforços e nas saliências.
4. Determine a espessura de parede, o processo de moldagem, e a resina.
5. Finalize o projeto e os detalhes.

O procedimento é o melhor para novos projetos ou para o re-projeto total do produto onde “uma folha limpa” ou “a tela em branco” não são restritivos. Este projeto para a função segue um procedimento lógico para coletar e analisar os dados, que conduzem a produtos que são altamente funcionais e projetados com objetivo de valor. Analisando as necessidades da aplicação, os detalhes funcionais são determinados. Os reforços e as saliências dão forma a uma plataforma funcional, que seja unida então ao melhor da seção de parede determinada. Usando relações de prolongamentos e dados do comprimento de fluxo, a espessura de parede e a resina são determinadas. Os detalhes finais do projeto tais como aparência, tolerâncias, e especificações terminam a tarefa do projeto. Esta seqüência difere das normas da indústria, mas é a melhor inserida para projetos de inovação.

#### **2.11.5 Saliências e inserções**

A moldagem por injeção tem regras estritas para que o projeto da saliência evite as marcas de rechupes e os outros problemas relativos ao fluxo e a contração. A espessura do reforço é limitada, o que também significa que a altura do reforço é limitada. Isto pode conduzir a uma pequena saliência após o acoplamento. Uma das melhores soluções é adicionar um rebaixo ou um reforço à saliência para manter a força. O projeto da saliência é mais flexível com espuma estrutural. A seção de parede mais grossa dá um ponto de partida maior. Os prolongamentos permissíveis são igualmente maiores. Outra consideração é que a tensão do aro, associada normalmente às saliências ocas, será minimizado pela camada de espuma, que isola a pele interna da pele exterior. Mesmo as paredes reduzidas da saliência do perfil terão pelo menos uma camada microscópica de espuma, devido à contração volumétrica da resina. A espuma estrutural de co-injeção segue as diretrizes de saliências da espuma estrutural. Para a assistência a gás de finas paredes, as regras para o projeto de saliências seguem aquelas da moldagem por injeção convencional. Saliências isoladas terão problemas com preenchimento, ventagem, e ejeção, do mesmo modo como na moldagem por injeção. As saliências isoladas unidas a um reforço ou em um rebaixo para evitar ejetores de luva no molde são outra solução, mas são mais caras e exigem manutenção regular para evitar sua obstrução. Se uma saliência desproporcionada é necessária, deve ser conectada a um reforço de passagem do gás de modo que a contração volumétrica possa ser compensada. A assistência a gás de parede espessa seguirá as diretrizes da espuma estrutural salvo que o pino do núcleo não deve ultrapassar a parede nominal sob a saliência. O conceito é o dos dedos viscosos, que podem conduzir a uma saliência fraca.

Uma aplicação preliminar de uma saliência é aceitar o metal como parte do processo de montagem. Todos os processos de moldagem de injeção a baixa pressão primam em fornecer detalhes funcionais para facilitar as etapas de montagem. O parafuso auto atarrachante é um bom exemplo desta habilidade (figura 2.40). A espuma estrutural tem a habilidade de produzir

saliências excepcionalmente fortes. A tensão do aro associada normalmente com a ferragem metálica em saliências plásticas é absorvida no núcleo de espuma. A assistência a gás tem a facilidade de aceitar inserções rosqueadas maiores devido a sua característica de ter saliências desproporcionadas. O tamanho dos furos é crucial. Para o maior desempenho com a ferragem de acoplamento, as inserções rosqueadas devem ser instaladas.

### 2.11.6 Grelhas e linhas de solda

Quando o fluxo do plástico é separado durante o enchimento por uma abertura ou uma característica de projeto tal como uma grelha, resulta numa linha de solda (figura 2.41). A linha de solda terá menor resistência, devido a uma falta de continuidade da estrutura molecular. O fluxo e a contração também devem ser considerados. Grelhas causam limitações ao fluxo, tendo por resultado menor pressão exatamente onde é necessário. Porque a contração volumétrica ocorre, a resina na área da linha de solda tentará se separar. Com a moldagem por injeção há bastante pressão na borda de ataque que de novo força a junção. As peças corretamente projetadas de assistência a gás têm o benefício de comprimentos mais curtos de fluxo e de contração, amortecidos pelo gás injetado. A co-injeção de espuma estrutural tem o problema das bordas de ataque das partes dianteiras do fluxo que consistem na resina contínua. Isto é favorável nos termos da força da linha de solda, mas uma área substancial será desprovida da espuma e favorecerá aparecerem marcas de afundamento. Uma prática comum para o moldador de co-injeção de espuma estrutural é trabalhar com excesso de material para sanar o problema.

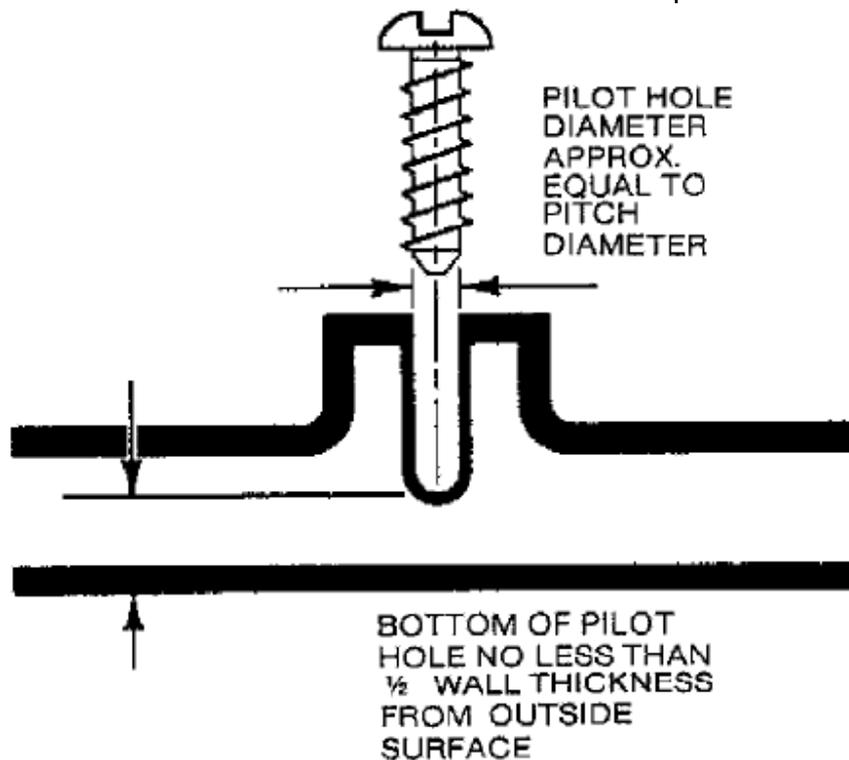


FIGURE 2.40 Boss design for threaded hardware.

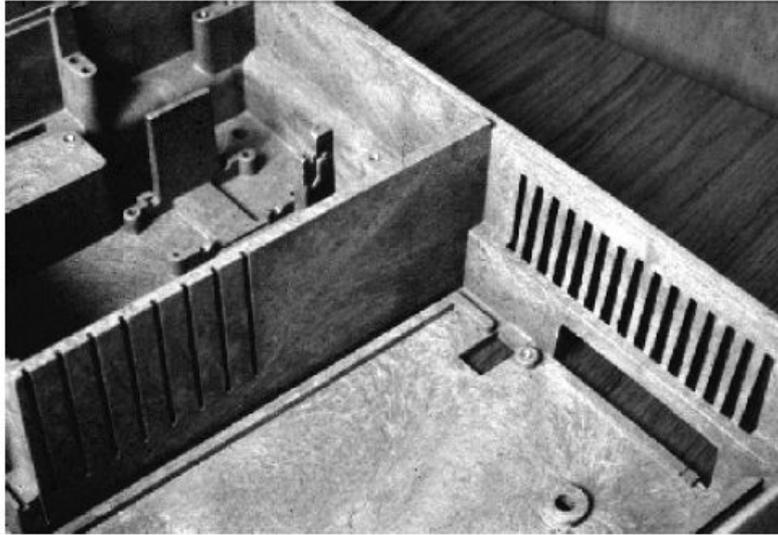


FIGURE 2.41 Low-pressure structural foam louvers and weld line.

## 2.12 Pesquisa de defeitos básica

A espuma estrutural e a injeção assistida a gás são essencialmente tecnologias de moldagem por injeção. A maioria das técnicas regulares da resolução de problema da moldagem por injeção aqui se aplicam. A diferença principal é que em vez de um amortecedor plástico de empacotamento, a pressão de gás (da injeção direta do nitrogênio ou da formação de espuma) faz o empacotamento. Os métodos de moldagem de injeção incompleta terão problemas de preenchimento que diferem da injeção a alta pressão de injeção completa. Nesta seção nós descrevemos algumas destas diferenças originais.

A espuma estrutural é um processo de injeção incompleta, e o preenchimento do molde depende da pressão de gás interna para a formação de espuma. Quando há falta da pressão do agente de sopro ou o aumento da viscosidade do material, o molde não preenche completamente. Isto é designado como uma rejeição da injeção incompleta. A ventagem é uma consideração importante para a espuma estrutural. A ventagem inadequada pode também restringir o preenchimento. Se pouca formação de agente de sopro causa rejeições da injeção incompleta, demasiado agente de sopro pode causar outro problema, chamado sopro posterior. Isto é, quando a força das peles da peça moldada é demasiado fraca para impedir a formação de espuma depois que a peça é removida do molde. Tipicamente, o sopro posterior indica resfriamento incompleto e aparece como uma protuberância na superfície da peça, freqüentemente em torno das seções espessas. O ciclo de resfriamento reforça as peles e igualmente reduz a pressão do agente de sopro dentro da peça que foi moldada. Agente de sopro residual preso dentro da peça moldada pode causar problemas adicionais e exigir alguma desgaseificação. Pintando uma peça de espuma estrutural antes da desgaseificação apropriada, pode conduzir a defeitos e bolhas. O tratamento térmico elevado pós-moldagem acelera o processo de desgaseificação.

A moldagem por injeção assistida a gás igualmente tem seus próprios problemas. Com uma injeção incompleta do plástico seguida por um volume de gás, há umas vezes que ocorre a penetração do gás. Se o gás penetra demasiado distante na parte dianteira do fluxo de plástico, pode haver uma completa ruptura, um canal aberto de gás que se estende além da frente plástica de avanço. O resultado é uma peça rejeitada. Um exemplo menor da penetração do gás é a

circunstância chamada de dedos viscosos, onde o gás penetra nas áreas finas que foram projetadas para ser contínuas. O outro extremo é a penetração inadequada do gás, deixando sólido excedente nas áreas espessas que foram projetadas para ser deslocadas do núcleo com o gás. Todas estas circunstâncias são controladas pelo perfil da injeção do gás. O projeto da peça moldada tem um efeito direto no processo assistido a gás e deve ser incluído no planejamento do gás. Há outro aspecto original do processo, a ventagem turbilhonada, que deixa um revestimento áspero no interior da passagem do gás causada por variações de pressão extremas do gás entre a injeção e os estágios de ventagem. Isto é geralmente visto nas peças ou nas projeções ocas de relação elevada, onde há uma porcentagem elevada do núcleo para fora do gás (30% positivo). O revestimento áspero toma a forma de picos ou de pequenos vulcões. Resulta do nitrogênio que é forçado no polímero durante a fase de alta pressão da injeção e depois sendo liberado durante o estágio de ventagem.

### **2.13 Moldagem por injeção assistida a água**

O tempo de ciclo de moldagem reduzido é a vantagem principal de usar água em vez de gás nitrogênio para a assistência. A noção de usar um meio líquido não é inesperada considerando a mudança de fase devido às temperaturas e às pressões internas do molde durante o processo. Certamente, muitas das patentes assistidas a gás da moldagem por injeção referem-se ao meio de pressão como a um fluido ao invés de um gás. A moldagem por injeção assistida a água pode ser aplicada para uma larga escala de resinas, incluindo polipropileno sem carga e a poliamida carregada com fibra de vidro. Há problemas óbvios associados com o uso da água, tal como a segurança devido à choques elétricos, ao vapor, à água quente, e o deslizamento. Uma forma relatada a água é a evacuação da mesma da peça moldada antes da manipulação pelas mãos humanas. Algumas adaptações da assistência a água incluem o ar comprimido ou o nitrogênio em vários estágios do processo. O gás comprimido é injetado após a evacuação da água ou como meio da evacuação da água. Diversas variações da tecnologia foram demonstradas com resultados promissores, incluindo o método de assistência inicial e remoção do núcleo com nitrogênio seguido pela água e então por ar comprimido ou por nitrogênio. É igualmente útil perfurar o artigo moldado enquanto resfria para permitir um fluxo contínuo de água ou de nitrogênio super resfriado.

Em uma das técnicas, o núcleo perdido pode ser conseguido por injeção incompleta da resina seguida pela injeção de água. Desde que a água flui para um local sem saída, um método original de evacuação da água é usado. Mais tarde no ciclo de resfriamento a pressão de água é reduzida, e o ar comprimido é injetado através da porta de água. Desde que a porta de água está na extremidade da porta do molde, a pressão acumula-se no extremo oposto. Quando a pressão do ar é liberada, a água restante é soprada fora durante o estágio de ventagem. A passagem interior resultante é muito lisa e muito mais uniforme em espessura do que se o nitrogênio tivesse sido usado para o núcleo perdido. Isto pode ser explicado pela diferença na compressibilidade entre o nitrogênio e a água. Os métodos assistidos a água estão sendo submetidos a desenvolvimentos adicionais até à data deste artigo. O equipamento para o processo exige a habilidade de controlar precisamente o volume e a pressão da água a alta temperatura, assim como o gás ou o ar. A recirculação de água tem que ser considerada. Uma limitação principal é a tendência de que o choque térmico congele a pele do plástico junto às paredes internas. Os artigos moldados conjugando seções espessas e finas podem ter plástico prematuramente resfriado, e um pico de pressão resulta. O projeto de produto deve envolver o engenheiro de

processo de moldagem. O processo trabalha melhor em produtos tubulares com reforços e detalhe externos.

## **2.14 Moldagem por micro-injeção**

A moldagem por micro-injeção (também chamada de micro moldagem) produz peças que tem dimensões totais, características funcionais, ou requisitos de tolerâncias que são expressos em termos de milímetros ou até de micrometros. Entre os vários processos de micro produção e micro usinagem, a moldagem por injeção possui a vantagem de ter a riqueza de experiências disponíveis na tecnologia convencional de plásticos, seqüências padrão de processos, alto nível de automação e ciclos curtos. Entretanto, devido as características de miniatura das peças moldadas, ela requer uma máquina de moldagem especial e equipamentos auxiliares que possibilitem tarefas como controle de volume de injeção, evacuação do molde (vácuo), injeção, ejeção, inspeção, separação, manuseio, deposição, orientação, e embalagem das peças moldadas. Técnicas especiais também iniciam a ser usadas para fabricação dos insertos de moldes e cavidades.

Embora isto não seja um modo claro de definir a moldagem por micro-injeção, aplicações deste processo podem ser amplamente categorizadas em três tipos de produtos ou componentes:

- Peças moldadas por micro-injeção (micro moldagem) que pesam de poucas miligramas a frações de gramas e possivelmente tem dimensões de escalas micrométricas (por exemplo, micro engrenagens, micro pinos de operação),
- Peças moldadas por injeção de tamanho convencional, mas exibindo regiões micro estruturadas ou características funcionais (por exemplo, discos compactos com trilhas de dados, lentes óticas com características de micro superfície, e sanduíche para produzir micro engrenagens com a tecnologia plástica do sanduíche,
- Peças micro precisas que podem ter qualquer dimensão, mas que tem tolerâncias na escala de micrometros (por exemplo, conectores para tecnologia de fibra ótica).

### **2.14.1 Desafios Técnicos**

Devido a suas características únicas, a moldagem por micro-injeção requerem atenção especial aos equipamentos, processos e ferramentas. Com tamanho diminuto do volume das peças e de injeção, a máquina de moldagem convencional de injeção não é uma solução economicamente viável. As aplicações para a micro injeção requerem máquinas equipadas com medidas especiais e projetos de injetores ram (pistão) ou roscas com medição acurada do volume de injeção e para eliminar problemas associados com a degradação do material. Tomando o tamanho e o peso das peças, a ejeção é realizada com ventosas de sucção, carregamento eletrostático ou sopro. Grandes canais e bicos são usados para ter um grande tamanho de injeção o bastante para o controle confiável do processo e a sobre comutação. Os métodos tradicionais de controle de qualidade, como a medição de peso da peça, tornam-se impraticáveis e são substituídas pelo sistema de inspeção por vídeo. O controle da temperatura da parede do molde (as vezes próximo ou acima da temperatura de massa as expensas do tempo de ciclo) é importante para prevenir a solidificação prematura de seções ultra finas. Particularmente, o processo “variotherm” emprega dois circuitos de óleo a diferentes temperaturas para aquecer e resfriar o molde nos estágios de preenchimento e resfriamento, respectivamente. Ainda mais, a evacuação do molde pode ser necessária se a espessura das paredes da peça moldada é menor que 5  $\mu\text{m}$ , a mesma ordem como para a dimensão do vent para o escape do ar. Outras

solicitações da máquina incluem o alinhamento preciso e o movimento suave do molde para prevenir deformação das peças delicadas, e sala limpa enclausurada ou boxes com cortinas de ar laminar para prevenir contaminação das peças moldadas.

Métodos tradicionais de ferramental, assim como vários métodos de usinagem e usinagem por eletro erosão (EDM), tem revisto lentamente suas limitações com decréscimo das dimensões de insertos e cavidades. Tecnologias existentes no campo da micro eletrônica, como a técnica LIGA, tem sido empregada para fabricar insertos de molde e cavidades para moldagem por micro-injeção. LIGA é um acrônimo derivado das palavras alemãs para litografia de raio-X profunda, eletro formação (galvanização), e réplica da moldagem por injeção. Outros processos incluem micro corte, usinagem ultra precisa, usinagem a laser, e tecnologias de micro eletro erosão (EDM).

#### **2.14.2 Materiais Aplicáveis**

Quase todo material apropriado para moldagem macroscópica pode ser micro moldado. Materiais indicados para micro injeção incluem poliacetal (POM), PC, PMMA, PA, polímeros líquidos cristalinos, e borrachas de silicone. A moldagem por injeção reativa (RIM) também tem sido aplicada usando materiais de base de acrilatos, amidas, e silicones.