



## Coloração

A resina PET, tal como é fornecida permite obter embalagens transparentes e incolores. No entanto, é possível produzir embalagens coloridas, utilizando concentrados coloridos. Estes são constituídos por resina PET natural na qual foi dispersa uma determinada quantidade de pigmentos. Para obter a coloração e intensidade de cor desejadas, mistura-se o concentrado colorido com PET natural, seguindo um rácio pré-estabelecido (*let down ratio*), por exemplo, 1 parte de concentrado por 100 partes de resina natural.

O processo de mistura (*batch blending*) nada tem de complicado, podendo ser efectuado por tamboração-agitação. Existem, aliás, sistemas automáticos para assegurar

o processo de mistura, baseados em dispositivos de medida que permitem debitar o concentrado colorido a um rácio constante para a corrente de resina natural. A intensidade de cor pode ser determinada quer pela alteração do *let down ratio*, quer pela alteração do rácio de alimentação.

De uma forma ou de outra, a utilização de concentrados coloridos apresenta várias vantagens para o transformador. Em primeiro lugar, a flexibilidade, dado que as mudanças de cor são extremamente rápidas. Em segundo lugar, há grandes vantagens económicas, quer porque as perdas de tempo e de resina nas mudanças de cor são reduzidas ao mínimo, quer porque não há necessidade de silos para armazenar resinas pré-coloridas.

## Secagem

A transformação do PET requer uma secagem controlada como pré-requisito essencial. O PET absorve a humidade da atmosfera. Durante a armazenagem, a humidade será absorvida até que seja alcançado o valor de equilíbrio com as condições do ambiente. Esse valor de equilíbrio pode ir até 0,6% do peso, embora, na prática, o nível de humidade do PET armazenado em sacos por períodos relativamente curtos, seja significativamente inferior a 0,1% do peso.

Para obter a melhor performance do PET, é essencial reduzir o teor de humidade a um valor inferior a 0,004% (40 partes por milhão) ou, preferencialmente, a 30 ppm. A razão desta exigência reside no facto de, a temperaturas inferiores ao ponto de fusão, a água hidrolizar rapidamente o polímero, reduzindo o seu peso molecular e as suas propriedades físicas. Na prática, a melhor temperatura de secagem ronda os 175 °C.

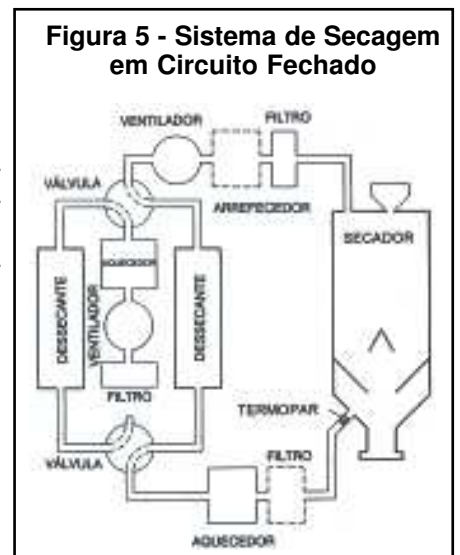
O processo de secagem é ilustrado na figura anexa. Trata-se de um sistema em circuito fechado, ligado ao alimentador por tubagem isolada e o mais curta possível. O alimentador deve ser cilíndrico, com uma relação altura-diâmetro aproximadamente de 2:1 e devidamente isolado para conservar a energia.

O ar desumidificado num leito dessecante. O ar quente força o ar seco para o alimentador e o ar de retorno recircula pelo sistema em circuito fechado. O sistema secador tem uma configuração em duplicado, permitindo ciclos repetitivos e alternados. Devem ter-se em conta as seguintes exigências:

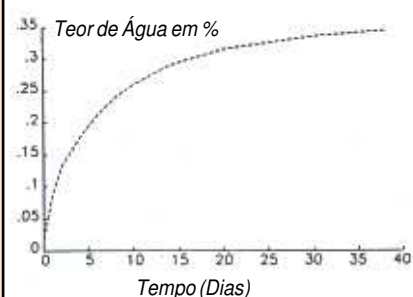
- o ponto de orvalho (*dew point*) do ar seco deverá situar-se entre -30 °C e -40 °C;
- a temperatura real do polímero deverá ser mantida entre os 160 °C e 180 °C,
- o polímero deve permanecer no alimentador-secador pelo menos 4 horas.

Durante o processo de secagem, o teor de acetaldeído é reduzido.

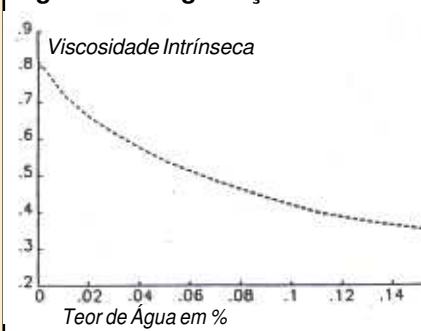
**Figura 5 - Sistema de Secagem em Circuito Fechado**



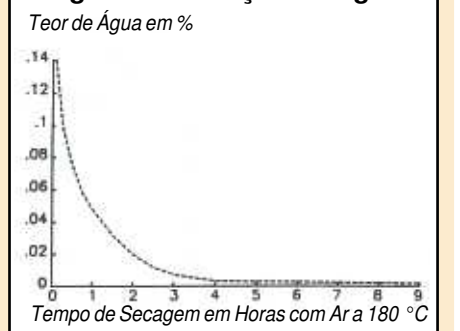
**Figura 3 - Absorção de Água PET cristalino a 63% de H.R.**



**Figura 4 - Degradação Hidrolítica**



**Figura 6 - Redução de Água**



## Injecção - Estiragem - Sopros (Garrafas)

A transformação do PET para fabrico de garrafas envolve um processo combinado de moldação por injecção - estiragem - sopros.

A primeira etapa - moldação por injecção - destina-se à produção de pré-formas. Envolve a injecção do PET fundido para a cavidade do molde e o arrefecimento rápido da pré-forma para uma temperatura abaixo da “zona de cristalização”.

A segunda etapa envolve o reaquecimento das pré-formas até uma temperatura de “estado termoelástico”, a estiragem no interior do molde final, o sopros e o arrefecimento.

Este processo apresenta várias vantagens. Em primeiro lugar, as garrafas têm propriedades mecânicas acrescidas, graças à estiragem bi-axial que tem lugar durante o “estado termoelástico”. Em segundo lugar, as garrafas apresentam gargalos e fundos sem costuras e com uma superfície de alta qualidade. Em terceiro lugar, as garrafas apresentam grande uniformidade dimensional, para além de uma espessura uniforme. Finalmente, as garrafas apresentam um peso mínimo, dentro de tolerâncias apertadas.

Existem dois métodos para aplicar este processo:

No **método one step**, as duas etapas acima referidas decorrem na mesma máquina. As pré-formas são injetadas num primeiro molde, e passam ao “estado vítreo” (abaixo da temperatura de cristalização) durante a transferência para uma segunda estação, na qual são novamente levadas para uma temperatura de “estado termoelástico”. Segue-se a transferência instantânea para a estação de estiragem-sopros, onde são moldadas as garrafas. A ejeção das garrafas dá-se na quarta estação.

No **método two step**, as duas etapas do fabrico de garrafas são independentes, decorrem em máquinas distintas e podem mesmo ser diferidas no tempo. Na primeira etapa, destinada à injecção de pré-formas, é utilizada uma máquina de injecção modificada. É essencial garantir o arrefecimento completo e rápido das pré-formas, deixando-as no “estado vítreo” imediatamente após a injecção. As pré-formas podem então ser armazenadas ou transferidas para os equipamentos da segunda etapa. Na segunda etapa, as pré-formas são reaquecidas em condições controladas, de forma a atingir a temperatura de “estado termoelástico”. Um equipamento especial encarrega-se de as introduzir na máquina de estiragem-sopros, onde são moldadas as garrafas. As duas etapas podem ser configuradas em contínuo, sendo, neste caso, necessário assegurar cadências de produção compatíveis.

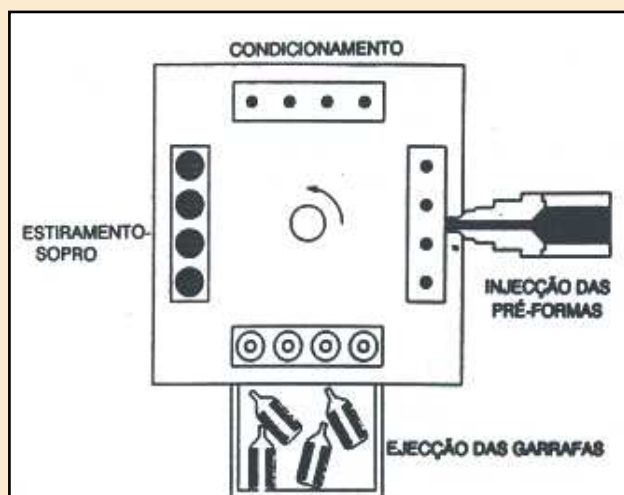


Figura 7 - Método *One Step*

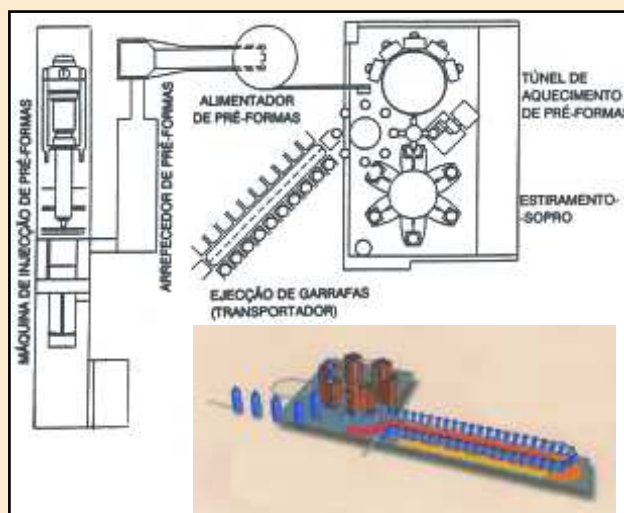


Figura 8 - Método *Two Step* (versão integrada)



## Pré-formas

As pré-formas de garrafas PET podem ser produzidas em máquinas convencionais de injeção modificadas para este efeito. Informação detalhada sobre estas máquinas pode ser obtida junto dos respectivos fabricantes. Importa, no entanto, ter em conta algumas recomendações de carácter geral:

- As máquinas de parafuso com movimento alternado (*reciprocating screw machines*) com geometria de parafuso adequada contribuem para minorar a perda de viscosidade e proporcionam bons resultados na redução do nível de acetaldeído.

- A relação comprimento-diâmetro deverá situar-se entre 18 e 20. As cabeças de mistura com comprimentos de um ou dois diâmetros são vantajosas para o efeito de mistura dos concentrados coloridos na massa. O rácio de profundidade do canal (*channel depth ratio*) deverá situar-se abaixo de 2,3 para 1.

- Os comandos hidráulicos do parafuso são vantajosos. Permitem um controlo de velocidade infinitamente variável. Este é um processo de prevenir a sobrecarga de polímero não plastificado no cilindro.

- O parafuso deverá ter uma válvula de não retorno, de forma a proporcionar um volume de saída consistente e uma rápida reposição da pressão.

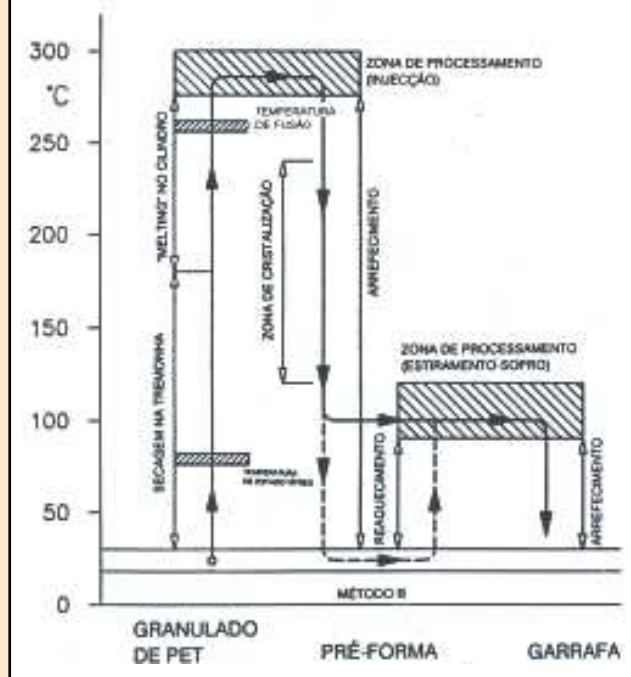
- Uma alternativa ao parafuso de movimento alternado é a unidade de injeção de duas etapas, que separa a plastificação da injeção propriamente dita. A extrusora pode ser dimensionada para fornecer um *output* elevado com uma mistura eficiente e um tempo de permanência mais curto. Um cilindro e um pistão injectam o material plastificado no molde da pré-forma.

Para a produção de pré-formas, devem ser utilizados moldes de **canais quentes (hot runners)**. Nos canais de distribuição, a distância entre a entrada e a saída devem ser iguais para todas as cavidades. Os canais devem ser o mais curtos possível, de forma a reduzir o tempo de permanência. O sistema de aquecimento deve proporcionar uma temperatura uniforme ao longo de todos os canais. Os canais devem ser maquinados sem irregularidades interiores, de forma a proporcionar uma transição suave do material.

As válvulas de saída devem assegurar um fecho positivo-positivo. Recomenda-se um desenho de acção dupla em que o bico da válvula seja positivamente aberto ou fechado por força hidráulica ou pneumática. O diâmetro da saída deverá ser



Figura 9 - Ciclo Térmico de Injecção-Estiragem-Sopro



aproximadamente igual à espessura da pré-forma para evitar a excessiva fricção do material fundido. O alinhamento das cavidades e machos deverá ser perfeito, de modo a assegurar a melhor distribuição do material. Este aspecto é particularmente crítico quando se trata de produzir embalagens leves.

## Nível de acetaldeído

Os bons resultados da estiragem-sopro de garrafas PET dependem primariamente do processamento das pré-formas. O nível de acetaldeído das garrafas, o escurecimento e a viscosidade intrínseca estão relacionadas com as condições de injeção das pré-formas.

O nível de acetaldeído é susceptível de afectar o sabor das bebidas, mesmo quando presente em baixa concentração. Durante o processo de injeção, é gerado algum acetaldeído no polímero, sendo necessário controlar pelo menos dois parâmetros: o tempo de permanência do material fundido no cilindro e no molde e a exposição térmica do material fundido.

O nível de acetaldeído aumenta exponencialmente com a temperatura. Por exemplo, um aumento da temperatura dos canais do molde de 265 °C para 300 °C provoca um acréscimo de 12 ppm no nível de acetaldeído. O impacto do aumento da temperatura de saída no nível de acetaldeído é pequeno. Foi determinado que um aumento da temperatura de saída de 275 °C para 305 °C origina um aumento do acetaldeído nas paredes da pré-forma de 1 ppm. No entanto, uma temperatura mais elevada contribui para a menor cristalinidade da parte da pré-for-



# TRANSFORMAÇÃO DO PET

ma mais próxima da saída. Uma temperatura elevada mantém a massa amorfa durante mais tempo e concentra a cristalinidade num pequeno diâmetro em torno da área de saída.

Uma vez que a regeneração de acetaldéido no PET depende do tempo e da temperatura, o efeito térmico do sistema de aquecimento da saída tem pouco impacto nessa regeneração devido ao facto de o tempo de permanência da massa no molde ser muito curto em comparação com a permanência no cilindro.

Qualquer acréscimo da pressão de retorno é susceptível de aumentar a energia térmica da massa fundida e causar o aumento do nível de acetaldéido. A pressão de retorno tem o seu efeito habitual na plastificação. O aumento da pressão de retorno expelle ar, incrementa a mistura (homogenização) e aumenta o tempo de permanência. Se alguma pressão de retorno for necessária por estes motivos, deverá ser mantida ao nível mínimo.

O aumento mais significativo do acetaldéido é causado pela maior duração do tempo de ciclo. O nível de acetaldéido aumenta exponencialmente com a duração do ciclo, pelo que este deverá ser o mais curto possível, o que oferece vantagens económicas adicionais.

A rotação do parafuso poderá influenciar ligeiramente o nível de acetaldéido nas pré-formas. O aumento da rotação do parafuso provoca uma ligeira subida do nível de acetaldéido.

O rácio de injeção tem também algum efeito no nível de acetaldéido. A redução do tempo de injeção de 4 para 1 segundo provoca um acréscimo de 1,5 ppm no nível de acetaldéido.

É indispensável manter as condições de operação constantes durante todo o processo de injeção, de forma a que a viscosidade intrínseca da resina permaneça igualmente constante e a garrafa venha a ter as propriedades mecânicas desejadas.

Nas condições descritas anteriormente, não se verifica alteração significativa da viscosidade intrínseca. Sob condições de secagem adequadas, ocorre tipicamente uma perda de 0,02 a 0,04 dl/g. Uma vez que viscosidade intrínseca não varia de forma significativa, o peso molecular médio é mantido. Por conseguinte, não há detrimento das propriedades mecânicas das garrafas se forem observadas as condições recomendadas para a injeção de pré-formas.

## Transparência

O PET é transparente quando amorfo, isto é, não cristalizado. A cristalização ocorre entre 120 °C e cerca de 240 °C. A velocidade de cristalização é muito lenta nos extremos deste intervalo térmico, mas aumenta drasticamente entre 140 °C e 180 °C. No entanto, esta velocidade mais elevada é ainda suficientemente lenta para que se produza uma pré-forma transparente e vítrea, devido ao arrefecimento rápido a temperaturas próximas dos 5 °C.

A temperatura da massa pode influenciar de forma significativa a formação de "nevoeiro" nas pré-formas. Quando a resina de PET é fundida, a temperatura deve ser mantida suficientemente elevada para destruir a formação de núcleos homogéneos e produzir pré-formas isentas de "nevoeiro". A afinação da temperatura pode variar em função do comprimento do cilindro e da configuração do parafuso da máquina de injeção. As altas temperaturas de fusão aumentam a transparência das pré-formas, mas também afectam o nível de acetaldéido. A temperaturas muito baixas, que normalmente ocasionariam "nevoeiro" nas pré-formas, podem conseguir-se alguns resultados fazendo aumentar a temperatura nas tubagens do molde *hot runner*.

### DEFEITOS TÍPICOS NA PRODUÇÃO DE PRÉ-FORMAS

DEFEITOS	CAUSAS	CORRECÇÃO
<b>BOLHAS DE AR</b> nas paredes da pré-forma	Bolsas de ar em aglomerações de granulado ou descompressão excessiva da massa.	Diminuir a temperatura na alimentação do parafuso para evitar a fusão prematura e ventilar o ar. Afinar o dispositivo hidráulico p/ diminuir a descompressão da massa.
<b>NUVENS</b> zonas brancas nas paredes	Temperatura da massa demasiado baixa ou massa com água.	Aumentar a temperatura para destruir partículas cristalinas (verificar o acetaldéido) ou melhorar o sistema de secagem.
<b>"OLHOS DE PEIXE"</b> cicatrizes elípticas na superfície da pré-forma	Contacto entre pré-formas após a ejeção ou no tapete antes do arrefecimento.	Minimizar o contacto entre pré-formas após a ejeção.
<b>RISCAS</b> irregularidades na superfície interna	Velocidade de injeção demasiado baixa e arrefecimento durante o enchimento da cavidade.	Aumentar a velocidade de injeção.
<b>ANÉIS</b> aneis radiais no interior da pré-forma	Condensação no macho durante a abertura do molde, provocando o arrefecimento local da massa durante o enchimento.	Diminuir o vapor nas imediações do molde ou aumentar ligeiramente a temperatura de arrefecimento.
<b>MACIÇOS CRISTALINOS</b> na parte cilíndrica da pré-forma	Podem ocorrer em pré-formas feitas em moldes sem dispositivo shut off ou devido à cristalização de massa na zona de fecho no ciclo anterior.	Aumentar ligeiramente a temperatura do fecho para manter a massa amorfa.
<b>ANÉIS CRISTALINOS</b> entre a linha e o anel de suporte	Bolsas de ar comprimido entre a superfície de aço e a massa. A separação entre o aço e a massa provoca re-cristalização.	Reduzir a velocidade de injeção para ventilar o ar ou aumentar a ventilação do molde.
<b>GITOS</b> fibras no gargalo da pré-forma	Formação de fibras durante a ejeção das pré-formas.	Diminuir a temperatura do fecho (diminuição controlada para não provocar maciços cristalinos). Em moldes s/ dispositivo de shut-off, aumentar descompressão da massa.

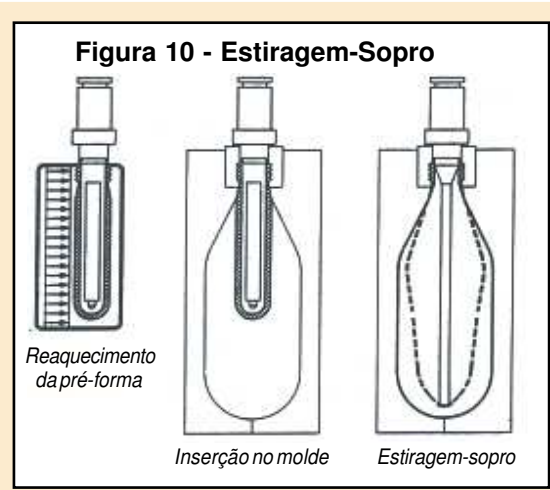
# TRANSFORMAÇÃO DO PET

## Da pré-forma à garrafa

Concluído o processo de injeção, as pré-formas encontram-se no seu estado vítreo. Para a fase posterior do processo, têm que ser novamente aquecidas até passarem ao estado termo-elástico, inseridas no molde de sopro, onde são submetidas sequencialmente a uma estiragem e ao sopro. (Figura 10).

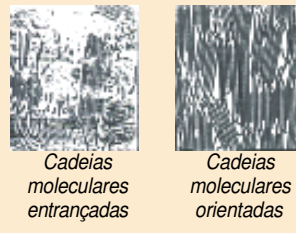
No processo *two step*, o reaquecimento é feito num forno de túnel, equipado com aquecedores (contacto eléctrico, radiadores infra-vermelhos, aquecedores de quartzo, ou ainda campos dieléctricos alternados). À saída do forno as pré-formas deverão apresentar temperaturas entre os 90 e os 110 °C. O controlo dos tempos de exposição (*heat soak time*) é fundamental para obter um grau de orientação biaxial mais elevado na etapa seguinte. Quanto mais baixa a temperatura (mais próxima dos 90°), mais elevado o grau de biorientação. Todavia, se a pré-forma for soprada a temperatura demasiado baixa, ocorre perolização na superfície interna da garrafa.

Para além de transformar a pré-forma em garrafa, a estiragem-sopro provoca a orientação biaxial (axial e circunferencial, biorientação) das paredes da garrafa. As cadeias moleculares do PET, que se encontravam entrançadas, alinham-se no sentido da estiragem (Figura 11), tornando as paredes da garrafa mais lisas, mais trans-



parentes e brilhantes, com maior resistência e menor permeabilidade aos gases. Concluída a estiragem-sopro, a superfície do PET é arrefecida até ficar abaixo do “estado vítreo”. A velocidade de estiragem-sopro pode contribuir para aumentar a orientação biaxial e as propriedades físicas.

Figura 11 - Orientação



O teor máximo de acetaldeído na garrafa após 24 horas, à temperatura ambiente, é especificado pela indústria utilizadora, em função do tipo de líquido a ser embalado.

### DEFEITOS TÍPICOS NA PRODUÇÃO DE GARRAFAS

#### NO REAQUECIMENTO

##### DEFEITOS

##### CAUSAS

##### CORRECÇÃO

**Concentrações de material no fundo da garrafa**

A área esférica (extremidade) da pré-forma não é muito estirada, o que está na origem da concentração. O nível do calor nesta área provoca uma retracção e forma uma protuberância.

Aumentar a temperatura nessa área da pré-forma.

**Zonas de "Nevoeiro"**  
(manchas translúcidas)

Durante a radiação, as zonas translúcidas atingiram a temperatura de cristalização.

Reduzir a radiação de calor que incide sobre essas áreas.

**Perolização**  
(pequenos pontos que reflectem a luz)

Formação de micro-orifícios no interior das paredes da garrafa causada pela estiragem a temperatura demasiado baixa.

Regular a temperatura de irradiação.

#### NA ESTIRAGEM-SOPRO

##### DEFEITOS

##### CAUSAS

##### CORRECÇÃO

**Gargalo descentrado**

Falta de sincronização entre a velocidade do pistão estirador e o tempo de sopro.

Ajustar a saída de ar e o dispositivo óleo-hidráulico ou pneumático que comanda o pistão.

**Rugosidades**  
(ou dobras)

As rugosidades ou dobras podem ser causadas quando o pistão de estiragem entra em movimento antes de começar o ciclo de sopro. Deste modo, o aumento de volume é maior do que a secção do molde, o que provoca as referidas rugosidades.

Ajustar e sincronizar os dispositivos de estiragem e sopro.

## Injecção-Sopro

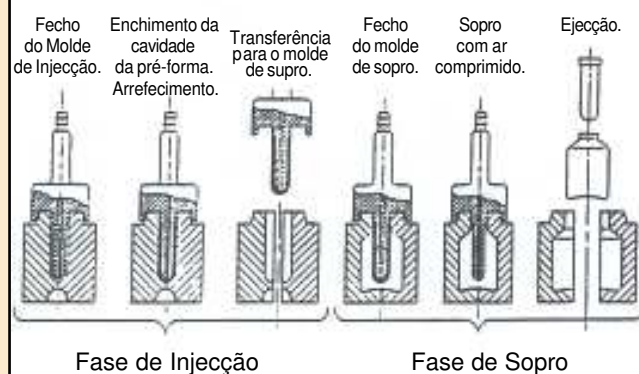
O processo de injecção-sopro (sem estiragem) também pode ser utilizado para produzir embalagens, normalmente de menor formato, designadamente para produtos alimentares, detergentes domésticos, produtos farmacêuticos, etc.. As embalagens de PET produzidas por injecção-sopro têm normalmente uma orientação apenas circunferencial, diferindo por isso das garrafas PET bi-orientadas.

A primeira etapa consiste na moldação por injecção de uma pré-forma, num molde compreendido por cavidade e um núcleo oco. A segunda etapa envolve basicamente a moldação por sopro num segundo molde e o arrefecimento. A pré-forma é injectada no estado de fusão, arrefecida e soprada no estado termo-elástico (Figura 12). O núcleo oco usado na etapa de injecção funciona na segunda etapa como mandril de sopro, razão pela qual é provido de um canal de ar (para além dos canais de controlo de temperatura). O canal de ar termina com uma abertura em forma de anel, que pode ser aberta ou fechada por controlo mecânico localizado no próprio macho. Na fase de injecção, a abertura é fechada (por exemplo, pela pressão da massa fundida que entra no molde de injecção). Na fase de sopro, o fluxo de ar actua para abrir.

Não há uma posição fixa pré-determinada para a saída de ar. A posição é determinada por um conjunto de variáveis do processo. A melhor forma de determinar a melhor posição e para testar o design e temperatura da pré-forma consiste na análise do processo de sopro. Essencialmente, trata-se de analisar a deformação da pré-forma como função do tempo de sopro. O período considerado vai desde o início do sopro até ao momento em que termina a expansão da pré-forma, e não inclui o tempo de arrefecimento. É aconselhável aumentar o tempo de sopro a intervalos constantes (por exemplo, 0,5 / 0,75 / 1,0 s, etc.) e soprar diversas pré-formas em cada teste.

O controlo de temperatura fiável das diferentes zonas do molde de injecção só pode ser assegurado por um sistema de circulação de refrigerante e canais de controlo de temperatura que cerquem completamente a pré-forma. Trabalhando com machos com diâmetro de 15 mm, não é possível um controlo exacto da temperatura. Nos casos em que se trabalha com machos com relações comprimento/diâmetro de 5 para 1, o controlo de temperatura é confiado a sistemas de fluxo de ar. Com machos mais compridos, continua a existir um balanço térmico automático, o que pode criar problemas de processamento. Os machos com diâmetros de 15 mm podem ser fornecidos com sistema de controlo directo de temperatura. A distribuição adequada de temperatura no molde de injecção só pode ser atingida e mantida se os circuitos individuais de controlo de temperatura não se sobrepõem excessivamente e se não houver um calor constante irradiando do molde e da respectiva estrutura.

Figura 12 - Injecção-Sopro



A incorrecção da temperatura é indicada, por exemplo, quando a pré-forma apresenta zonas de expansão excessiva ou pela ocorrência de rebentamentos durante o sopro. Se a zona do gargalo está demasiado fria, a pré-forma não pode ser facilmente removida do macho, o que provoca uma irregularidade na espessura da garrafa na passagem do gargalo para o ombro. Outro factor importante que influencia o controlo de temperatura é a distribuição da espessura da embalagem. Podem surgir problemas se o intervalo entre as espessuras máxima e mínima for muito grande.

A temperatura do macho e para as diferentes zonas do molde deve preferencialmente corresponder à temperatura de estiragem da pré-forma, entre 90 e 110 °C. A temperatura da massa deve aproximar-se destes valores enquanto a pré-forma se encontra no molde. Em circunstância alguma se deve encurtar o tempo de permanência da pré-forma no molde seleccionando temperaturas do macho e do molde abaixo da temperatura de sopro. A aproximação de temperaturas deve ser maior precisamente nas áreas onde se prevê uma maior variação da espessura. A temperatura ideal de sopro depende do rácio de sopro praticado e pode ser determinada experimentalmente produzindo embalagens a várias temperaturas e tempos de pré-formação e ensaiando as propriedades dessas embalagens (resistência à queda, à compressão e ao rebentamento), bem como a aparência (transparência e acabamento de superfície).

No início do sopro, a pré-forma afasta-se lentamente do macho. O fluxo de ar procura o ponto ideal para iniciar a expansão, que é normalmente o ponto menos espesso ou mais quente da pré-forma.

Existem dois métodos de remoção da embalagem moldada: por dispositivo ejector mecânico ou por sopro. Neste último caso, e uma vez que o ar usado para a ejeção provem do mesmo orifício anelar, se os machos operarem na posição horizontal, a saída de ar não deve ser colocada perto da zona do gargalo. Pode acontecer que, ao ser libertado, o contentor se desloque ao longo do macho, deixando de estar na direcção do fluxo de ar de ejeção, que se perde.

## Packaging Design

O *design* de uma embalagem PET é uma tarefa complexa e inter-disciplinar. Há que relacionar três ordens de considerações:

- a) **objectivos de marketing,**
- b) **aspectos técnico-económicos,**
- c) **exigências ambientais.**

Os objectivos de *marketing* estão relacionados com a apresentação do produto, os aspectos estéticos, a diferenciação do produto e da marca, etc.. A embalagem PET deve ser atraente para o consumidor, aumentando a notoriedade do produto. Deve também reunir aspectos de "conveniência", isto é, facilidade de utilização. Todos estes aspectos levam o *designer* a procurar formas atraentes e inovadoras.

As características do PET e dos processos de transformação condicionam a liberdade do *designer*. As primeiras garrafas PET, que conquistaram o mercado das bebidas carbonatadas, ofereciam um grau de liberdade limi-

tado em termos de *design*: formato cilíndrico, paredes lisas, base em polietileno (*base cup*). A evolução tecnológica aumentou enormemente a liberdade do designer: novos formatos, curvas e estrias, pegadas, desaparecimento do *base cup*, etc..

Actualmente, desde que se respeitem algumas exigências básicas e se disponha de moldes e equipamentos adequados, as condicionantes técnicas são menos limitativas para o *designer*.

Por outro lado, a evolução tecnológica tem permitido otimizar as embalagens PET, ou seja, produzir embalagens cada vez mais atraentes e resistentes mas com uma quantidade de matéria-prima cada vez menor.

A incidência económica deste último aspecto está relacionada com a terceira ordem de exigências a ter em conta no *design*: os aspectos ambientais.

Nesta edição, vamos destacar alguns aspectos técnicos fundamentais a ter em conta no projecto de uma nova embalagem PET. Mais adiante, destacaremos os aspectos ambientais a considerar.

## Alguns aspectos técnicos

O *design* das pré-formas está dependente de cinco aspectos críticos: acabamento, zona cónica de transição (do gargalo para o corpo cilíndrico), perfeição cilíndrica, fundo e extremidade. Cada um destes segmentos deve ser examinado em separado para determinar o seu efeito na produção e nas propriedades da garrafa, designadamente na fase de reaquecimento da pré-forma.

Ao desenhar uma embalagem PET para bebidas carbonatadas ou embaladas sob pressão, o rácio de estiragem axial deve ser de 2,5 para 1, até ao máximo de 3 para 1. O rácio de estiragem circunferencial deve ser de 4,3 para 1 até ao máximo de 6 para 1. Para embalagens sob pressão, o rácio circunferencial é o parâmetro mais crítico e deve acompanhar o rácio axial, devendo ser de 10 para 1.

A espessura mínima é usualmente determinada pela indústria utilizadora. Regra geral, as garrafas sem retorno são exigidas com uma espessura mínima de 0,25 mm.

O desenho de uma pré-forma requer uma projecção. A garrafa é dividida em secções transversais, tantas quantas o design da garrafa exigir: a primeira secção é a do gargalo, a última é a da base. O volume de material de cada secção (diâmetro X espessura X comprimento da secção) deve ser igual à correspondente secção da pré-forma. Para calcular a quantidade de material para cada secção da pré-forma, a partir da secção correspondente da garrafa, o comprimento da secção da garrafa e o seu diâmetro são divididos pelos rácios de estiragem acima indicados. As diferentes secções da pré-forma calculada podem então ser desenhadas como um todo, de forma a obter uma pré-forma com formato cilíndrico e uma zona de transição cónica. Se for o caso de produção de garrafas pelo processo *two step*, as pré-formas devem ter secção ligeiramente cónica (no máximo 0,2°) para facilitar a ejeção.

A área de transição da pré-forma (a que irá dar lugar aos ombros da garrafa) é a secção mais difícil, quer do ponto



Molde de injeção



Pré-formas



Reaquecimento



Molde de sopro



# TRANSFORMAÇÃO DO PET

de vista do movimento de material durante o sopro, quer do ponto de vista do aquecimento, devido à sua curta distância. Quando a espessura da parede da pré-forma muda da zona mais delgada para zonas mais espessas, o acabamento deve ser mantido frio para evitar rebentamentos. A zona de transição actua como um prisma, reflectindo mais do que absorvendo a luz das lâmpadas de quartzo.

A segunda área difícil da pré-forma é a extremidade, onde se encontra um pequeno círculo de material que normalmente não é estirado. O fundo da pré-forma é, aliás, o último a ser soprado. É arrefecido pelo sopro e pelo estiragem da pré-forma. Um arrefecimento incorrecto pode ocasionar cristalização, que pode ser evitada reduzindo a espessura da extremidade para 2 ou 3 mm.

Antes de instalar moldes de pré-formas com várias cavidades, é conveniente efectuar os testes com moldes de uma cavidade. Um bom teste para o *design* da pré-forma consiste em efectuar o sopro sem molde para verificar até que ponto o “balão” se aproxima do formato desejado. Este teste permite ainda verificar se o perfil térmico é correcto e se há material em excesso.

O PET é um termoplástico com elevadas propriedades barreira aos gases. A área de superfície da embalagem é o primeiro facto a considerar (quanto menor for essa área, menor a permeação de gás), valendo aqui a regra trivial de procurar o menor rácio entre área total e quantidade de produto embalado. Não sendo viável o formato esférico (geometricamente ideal), a tendência é para o formato que menos se afaste do cilíndrico. Temos então um primeiro compromisso entre a optimização geométrica e a liberdade de formato.

Os plásticos são materiais visco-elásticos, o que significa que tendem para a deformação em função do tempo, da temperatura e da pressão. Parte da deformação é elástica e reversível, mas a parte restante é definitiva. A deformação deve ser controlada e mantida abaixo de limites aceitáveis, de modo a que o nível do líquido embalado não desça, não haja perda de carbonatação em consequência do aumento do espaço interior, e de forma



a que o aspecto e estabilidade exterior da embalagem não se modifique. Para reduzir a deformação, devem ajustar-se cuidadosamente os parâmetros de processamento que afectam a distribuição e orientação do material plástico ao longo das paredes da embalagem. As investigações a este propósito devem ser feitas com referência ao ciclo de vida normal das embalagens.

As embalagens de bebidas carbonatadas são embalagens pressurizadas. Nestes casos, as cinturas e ondulações são contra-indicadas, dado que podem conduzir ao aumento indesejável do volume das embalagens.

Os “ombros” da garrafa distribuem a pressão sobre as paredes verticais. A resistência à carga vertical deve ser testada tendo em conta as práticas de empilhamento de embalagens e até pormenores técnicos como a pressão exercida sobre as garrafas nas linhas de engarrafamento. Devem evitar-se ombros planos, largos ou com ângulos de declive demasiado apertados, os quais contribuem para uma fraca *performance* em termos de resistência à carga vertical, devido ao efeito de dobragem.

A espessura das paredes de uma embalagem é usualmente determinada pela aplicação final. Devem procurar-se os compromissos entre as funções da embalagem (propriedades barreira, resistência, etc.) e os aspectos económicos (redução de espessuras, menor peso).



Estiragem-sopro



Saída das garrafas moldadas



Embalagens PET cheias



## Extrusão - Termoformagem

Os processos de extrusão e termoformagem permitem produzir outros tipos de embalagem, tais como tabuleiros ou “cuvettes” para produtos alimentares, taças ou copos para margarinas, caixas ou alvéolos para bolos, ou ainda embalagens para produtos farmacêuticos ou cosméticos, *blisters*, etc.

A extrusão transforma o PET numa folha plana e lisa. A termoformagem destina-se a moldar o formato da embalagem, por acção combinada da temperatura e da pressão ou vácuo. As duas etapas podem ser combinadas (processo em contínuo) ou separadas (no tempo e no espaço). A indústria transformadora pode produzir folha PET a partir da matéria-prima (granulado), pode produzir embalagens a partir de folha adquirida a outro transformador ou produzir embalagens a partir de granulado (com ou sem produção em linha). A indústria embaladora pode comprar as embalagens prontas, pode adquirir folha para as suas máquinas de termoformar-encher-fechar ou pode mesmo ter a sua própria linha de extrusão-termoformagem.

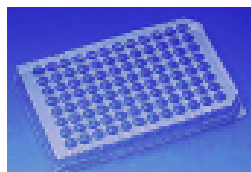
## Da folha à embalagem

A partir do grau de PET adequado pode fabricar-se um filme ou folha com características ideais para extrusão-termoformagem. A extrusão é o processo básico de transformação de matérias-primas plásticas e consiste na fusão do granulado por acção combinada da temperatura e pressão. A folha de PET é produzida em extrusão plana (que difere da extrusão tubular, comum na produção de filmes plásticos). À saída da extrusora, uma fiação plana ou linear deposita uma fina camada de PET sobre um rolo em rotação. A folha forma-se por calandragem, isto é, pela passagem por sistemas de rolos (calandras), que podem ter várias configurações. A lisura, o brilho e a uniformidade de espessura da folha resultam da perfeição da superfície dos rolos e de um controlo muito preciso da temperatura. Nos sistemas baseados num *chill roll* (rolo resfriador), a espessura da folha é regulada na fiação. Nos sistemas baseados em calandras de três ou mais rolos, a espessura é regulada pela distância entre rolos. Após, a calandragem, a folha PET está pronta para a etapa seguinte. Pode ser cortada ou bobinada para transformação posterior ou pode ainda ser termoformada em contínuo.

A folha PET transparente é designada pela sigla A-PET, em que o “A” representa “amorfo” (transparente). A termoformagem de folha A-PET pode ser feita nas máquinas convencionais, usadas para termoformar outras folhas plásticas. Também se podem utilizar os mesmos moldes, desde que se tenha em conta o índice de retracção (sensivelmente idêntico para o PET e PVC, mas diferente relativamente ao PP). Outro aspecto a ter em conta é a homogeneidade térmica necessária para

### Selenis PET para extrusão-termoformagem

Dimensões dos grânulos	secção oval 3,3 x 2,1 mm 3 mm de comprimento
Densidade	1,41 g/cm <sup>3</sup>
Ponto de fusão	260°C
Cristalinidade	±55%
Viscosidade intrínseca	0,81 ±0,02%
Teor de humidade	<0,2%
Densidade aparente	0,9 g/cm <sup>3</sup>
Teor de finos	< 350 ppm
Peso molecular médio	60 000
Teor de acetaldeído	< 1,5 ppm



que o PET não cristalize. A cristalização torna-se visível com a redução da transparência. Para além dos moldes e da temperatura, a termoformagem pode envolver sistemas baseados em altas pressões (2 a 6 bar), em vácuo (-1 bar) ou combinações de pressão e vácuo.

### Propriedades da folha A-PET

Densidade	1,34 g/cm <sup>2</sup>	
Absorção de energia (tracção)	271 mJ/mm <sup>2</sup>	
Resistência à tracção	54,6 N/mm <sup>2</sup>	
Alongamento	4,4%	
Alongamento à ruptura	174%	
Módulo elástico de tracção	2531 N/mm <sup>2</sup>	
Ponto de amolecimento Vicat	71°C	
Retracção	2,0%	
Resistência à perfuração	1375 N/mm	
Ponto de fusão	260°C	
Ponto de transição vítrea	74°C	
Condutividade térmica	0,13 W/mK	
Ponto de inflamação	400°C	
Permeabilidade	ORIENTADO	N/ORIENTADO
Oxigénio (cm <sup>3</sup> /mm)	1,7	2,3
Azoto (cm <sup>3</sup> /mm)	0,3	0,4
CO <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> /mm)	6,0	14
Vapor de água (g/mm)	0,2	0,5
a 85% de H.R.		

## C-PET

### a embalagem que vai ao forno

O sucesso do PET na área da embalagem está relacionado com a facilidade de produção de embalagens leves e práticas para o consumidor. O C-PET (PET cristalizado) distinguiu-se no mercado como o primeiro material plástico capaz de suportar a utilização quer em fornos micro-ondas, quer em fornos convencionais.

Os tabuleiros de C-PET são opacos (efeito da cristalização), mas a sua resistência térmica supera claramente essa desvantagem. Podem ser utilizados a temperaturas que vão desde os -40°C aos 220°C, o que significa que as embalagens de CPET podem suportar quer a refrigeração, quer as temperaturas de fornos convencionais. São embalagens de conveniência e valor acrescentado, já que, para além da função típica de proteger e conservar, servem também para confeccionar e mesmo para servir.



A folha A-PET apresenta um impressionante conjunto de características que a tornam ideal para inúmeras aplicações no mercado da embalagem. Destacamos as principais:

- compatibilidade para contacto alimentar,
- pode ser termoformada a temperaturas mais baixas ( $\pm 100$  °C), o que permite cadências elevadas,
- elevada taxa de deformabilidade, permitindo formas complexas (tabuleiros com “compartimentos”),
- a dobragem não origina vincos brancos,
- facilidade de corte (separação após termoformagem),
- facilidade de soldadura (ultrassons, alta frequência, laser);
- facilidade de colagem (adesivos reticulantes a frio ou colas termo-fusíveis - *hot melts* - sem solventes),
- imprimibilidade, sendo viáveis vários processos, sem pré-tratamento da folha,
- possibilidade de metalização da folha sob vácuo,
- boas propriedades barreira,
- possibilidade de complexagem, designadamente com PE e EVOH, para reforço das propriedades barreira,
- possibilidade de empilhamento de embalagens vazias, existindo vários processos para melhorar esta propriedade (coextrusão, aditivos, banhos especiais),
- possibilidade de produção de folha expandida,
- reciclabilidade.

## Múltiplas possibilidades

A extrusão de PET comporta muitas outras variantes e aplicações. Para além da mono-extrusão simples, podem referir-se variantes como as seguintes:

- Produção de **folha expandida** (“espuma”), através da utilização de aditivos que libertam dióxido de carbono durante o processo de extrusão. A folha expandida conserva as características técnicas mais importantes, designadamente a facilidade de termoformagem. As propriedades mecânicas são, em regra, mantidas a cerca de 70%.
- **Coextrusão** de PET em combinação com outros materiais. A coextrusão consiste basicamente na extrusão de vários materiais plásticos em extrusoras separadas, combinando-os na zona da fiação de forma a obter uma folha ou filme com estrutura multicamada. O processo é utilizado quer para obter propriedades barreira acrescidas com menores espessuras, quer para aproveitar reciclados (normalmente contidos numa camada interior).
- O PET é também os dos materiais mais utilizados na produção de embalagens flexíveis. O filme PET é combinado com outros materiais flexíveis (filmes plásticos, papel, folha de alumínio) por processos de **complexagem**, ou seja, a contracolagem de várias camadas de filme ou folha, de forma a obter um material flexível com propriedades desejadas (brilho, barreira, resistência, selabilidade, pelabilidade, etc.). Um complexo típico é, por exemplo PE/EVOH/PET.
- O filme PET é também compatível com processos de **endução**, de que os dos melhores exemplos é a **metalização sob vácuo**. Este processo permite produzir filmes para aplicações técnicas ou embalagens especiais.
- O PET pode também ser utilizado como material de **revestimento**, depositando PET em massa sobre folhas produzidas a partir de outro material.

