

**SISTEMA
DE ARREFECIMENTO
DE MOLDES
PARA EMBALAGENS
DE VIDRO**

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010675

1377049

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO I e II:

**"SISTEMA DE ARREFECIMENTO DE MOLDES
PARA EMBALAGENS DE VIDRO"**

Prof. orientador: OMAR MOORE DE MADUREIRA

Realizado por: EDUARDO MUSA

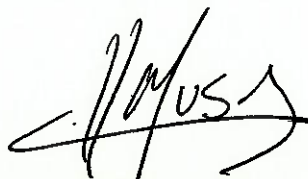
N.USP: 6220872

ANO DE 1990

Este trabalho foi realizado junto à Companhia Vidraria Santa Marina onde fui estagiário de Janeiro a dezembro de 1990 no Centro Técnico Embalagem (CTE).

Uma breve estadia no "Bureau d'études Moules" (Escritório de estudo de moldes) da Saint Gobain, matriz da Santa Marina, em Chalon-sur-Saône na França foi também de grande valia para a sua execução.

Agradeço a orientação do professor Omar Moore de Madureira e a colaboração dos engenheiros do CTE e do BEM. Sem eles o trabalho não teria sido possível.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'E. Musa' with a stylized flourish at the end.

EDUARDO MUSA

5/12/90

ESTUDO DE VIABILIDADE

I - ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE

Como em todos os setores, a concorrência no setor vidreiro tem se acirrado a cada dia, e para se manter competitivo no mercado hoje, é necessário se procurar sempre um aumento na produtividade de seu processo de fabricação.

Na fabricação de embalagens de vidro o aumento da produtividade, ou seja da velocidade de produção, depende, entre outros fatores, do sistema utilizado para a ventilação dos moldes. Já que com velocidades maiores, uma quantidade maior de calor deverá ser retirada dos moldes num mesmo intervalo de tempo. Logo uma maior ventilação se faz necessária.

Na Santa Marina trabalha-se hoje com a ventilação convencional por "empilhagem" lateral. Porém, para a fabricação de alguns produtos, no limite máximo de seu desempenho, o que impede o aumento da velocidade de fabricação de tais produtos.

Além do aumento nas velocidades de produção, as embalagens de vidro estão também passando por um processo de alívio de peso. Produtos mais leves além de serem mais agradáveis aos consumidores, são produzidos em velocidades maiores com menor consumo de matéria-prima. O alívio é sobretudo necessário para enfrentar a entrada no mercado, com grande força, de novos materiais para embalagem como a lata, o papel e principalmente o plástico.

Produtos aliviados devem porém ter uma excelente distribuição de vidro pois as tolerâncias dimensionais são bem mais rígidas. O que só é possível com uma ventilação homogênea e bem distribuída ao redor do molde.

é notável então que para se adaptar às novas características do mercado, deve-se pensar na substituição do sistema de ventilação por "empilhagem" lateral atualmente usado em todas as unidades da Santa Marina.

Novos sistemas de ventilação de moldes foram desenvolvidos e vêm sendo utilizado com sucesso no exterior. São eles : o sistema Vertiflow, desenvolvido pela Emhart, fabricante americano de máquinas e equipamentos para vidraria; o sistema Frap desenvolvido pela vidraria espanhola Vicasa, recentemente adquirida pela Saint-Gobain e o sistema Axial-Cooling da alemã Heye Glass.

Não é portanto o objetivo deste trabalho o desenvolvimento de um novo sistema de ventilação e sim, baseado em todas as informações disponíveis e resultados de testes já realizados pela Saint-Gobain, determinar entre os sistemas citados acima aquele que melhor se adapta ao contexto da Santa Marina, levando em conta os produtos aqui produzidos e os equipamentos disponíveis. Deseja-se com o novo sistema um aumento mínimo de 10% sobre as velocidades atingidas atualmente com o sistema convencional de ventilação.

Recomenda-se ao leitor não familiarizado com o vidro e a sua técnica de conformação que leia atentamente, antes de prosseguir, o Anexo 1.

II - FORMULAÇÃO DO PROJETO

Antes de se iniciar o estudo das possíveis soluções existentes é necessário que o problema de engenharia envolvendo a ventilação dos moldes no processo de conformação de embalagens de vidro esteja totalmente identificado e formulado. Para isto uma análise térmica completa do processo de conformação deve ser feita.

1-A conformação do vidro - análise da viscosidade:

Inicialmente é preciso compreender como o vidro é trabalhado analisando a influência da viscosidade no processo de conformação.

A maleabilidade do vidro depende exclusivamente de sua viscosidade, que varia com a composição do vidro e a temperatura em que ela se encontra. Para cada composição constroi-se uma curva característica da variação da viscosidade em função da temperatura. Uma análise desta curva (exemplo figura 1) permite compreender como o vidro é trabalhado. Dela se destacam dois pontos:

-Softening Point (Littleton Point ou ponto de Amolecimento): ponto onde a viscosidade é de $10E7,6$ poises.

-Gob Point (Ponto de Gota): ponto onde a viscosidade é $10E3$ poises.

Estes dois pontos delimitam a zona de trabalho ou conformação do vidro, já que para densidades superiores à do Softening Point o vidro é tão viscoso que pode ser considerado sólido e para viscosidades inferiores à do Gob Point o vidro é totalmente líquido.

Logo para se iniciar a conformação, o vidro deve ser entregue a máquina, sob forma de gota, com temperatura inferior à do Gob Point. Lembra-se aqui que a temperatura da gota nunca deverá ser inferior à Temperatura Superior de Devitrificação (TSD) para se evitar a devitrificação na fornecedora. E ao término da conformação, o produto deverá estar a uma temperatura inferior à do Softening Point para

que esteja rígido o suficiente e não se deforme sob a ação de seu próprio peso.

A figura 2 apresenta a composição de todos os vidros utilizados na Santa Marina e as respectivas temperaturas dos pontos específicos de trabalho. Destaca-se ainda a inclusão da faixa de trabalho de cada composição, representada pelo gradiente de temperatura entre o Gob Point e o Littleton Point (GOB-LIT). Vale observar que um vidro é dito "curto" quando esta faixa é pequena, característica necessária ao vidro conformado mecanicamente a altas velocidades. Inversamente o vidro é dito "longo" quando esta faixa é grande, o que caracteriza os vidros conformados por processos manuais.

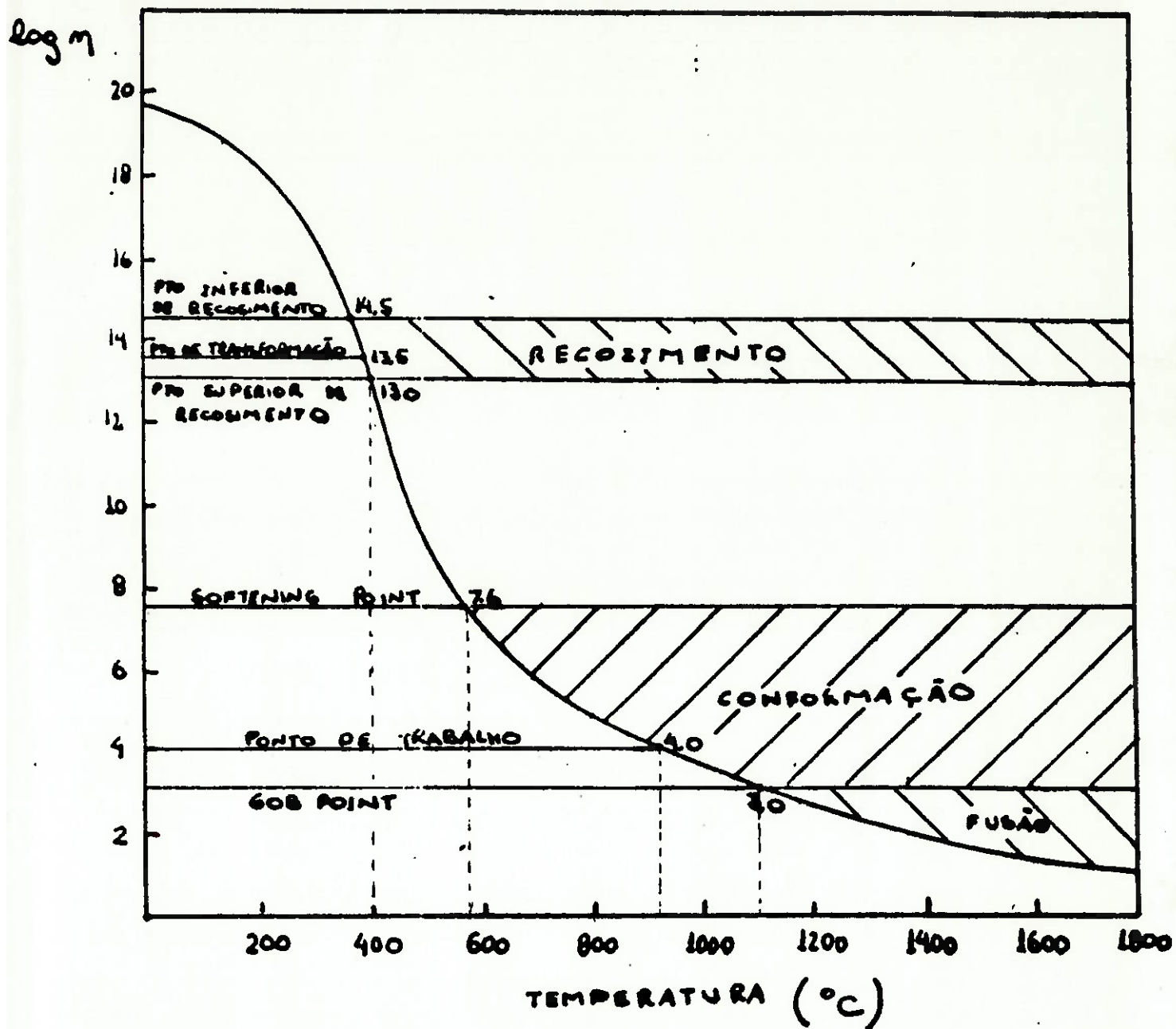


Figura 1: Curva Viscosidade - Temperatura para uma dada composição de vidro.

2-Temperatura e transferência de calor durante a conformação:

Do que foi visto acima percebe-se que o arrefecimento da massa de vidro durante o ciclo de conformação é necessário para se obter as condições exigidas de viscosidade/temperatura no fim do processo. Analisemos então as transferências de calor durante os vários estágios da conformação, determinando de que forma e em que proporções elas ocorrem.

A tabela abaixo mostra de que forma ocorrem as transferências de calor durante os vários estágios do processo Soprado-Soprado de conformação de garrafas:

CORTE DA GOTA	-RADIAÇÃO -CONVECÇÃO natural com o ar ambiente -CONDUÇÃO pelo contato com as lâminas da tesoura
ENTREGA	-RADIAÇÃO -CONVECÇÃO com o ar ambiente (gota em movimento sob a ação da gravidade) -CONDUÇÃO pelo contato com o material de entrega
BLOCO	-RADIAÇÃO -CONVECÇÃO forçada com o ar de assopro -CONDUÇÃO pelo contato com o ar contido no bloco pelo contato com a superfície interna do bloco
TRANSFERÊNCIA	-RADIAÇÃO -CONVECÇÃO -CONDUÇÃO pelo contato com o revert
FORMA	-RADIAÇÃO -CONVECÇÃO forçada com o ar de assopro -CONDUÇÃO pelo contato com o ar contido na forma pelo contato com a superfície interna da forma
EXTRAÇÃO	-RADIAÇÃO -CONVECÇÃO -CONDUÇÃO pelo contato com as garras do alicate

TABELA 1

Obs: Ocorrem ainda transferências de calor internas à massa de vidro devido ao gradiente de temperatura existente dentro da gota. Transferências por condução e radiação.

Na prática quase todo o calor é transferido dentro dos moldes. Sendo as quantidades de calor que são transferidas durante o corte da gota, a entrega, a transferência e a extração desprezíveis diante destas.

Logo a temperatura da gota no corte e na penetração do bloco podem ser consideradas praticamente iguais, como também as temperaturas do parison na saída do bloco e na penetração da forma. Ensaios por calorimetria também mostraram que as temperaturas médias obtidas nos vários estágios da conformação são bastante estáveis. Estão como dissemos estreitamente ligadas à curva característica do vidro e dependem muito pouco do peso do artigo e da velocidade da máquina, entre outros.

Uma análise das condições de fronteira do bloco e da forma permite então determinar em que proporção ocorrem as trocas de calor. Num estudo feito na unidade de Mers da Saint-Gobain na França sobre o vidro branco sodocálcico, utilizado na produção de embalagens transparentes, obteve-se os resultados apresentados na tabela II (valores médios para 50 medidas na fabricação).

Obs: Foram feitas tentativas de realização de ensaios de calorimetria nas unidades brasileiras porém a falta de material adequado para os ensaios provocou resultados pouco confiáveis. Por isso os valores de Mers são aceitos pois a composição do vidro sodocálcico brasileiro é bem parecida.

ESTÁGIO DA CONFORMAÇÃO	TEMPERATURA C	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA C	NÍVEL DE ENTALPIA H cal/g	VARIAÇÃO DE ENTALPIA (+) H cal/g	VISCOSIDADE Log
Penetração no bloco	1070 + 30	100	399 + 11	36.5 + 15	3.8 + 0.2
Transferência	970 + 32		363.5 + 11		4.55 + 0.25
Extração da forma	735 + 28	236	286.7 + 8.6	76.8 + 15	7.6 + 0.3

TABELA 2

* Num processo quase-estático à pressão constante como o que ocorre dentro dos moldes, a transferência de calor é igual à variação de entalpia da massa de vidro:

$$Q = \Delta H (\text{cal})$$

$$\text{onde } \Delta H = m \cdot C_p \cdot \Delta T (\text{cal})$$

$$\text{ou por unidade de massa } \Delta h = C_p \cdot \Delta T (\text{cal/g})$$

$$* \text{ Para o vidro } C_p = 0.289 \text{ cal/g.K}$$

Assim sendo as transferências de calor durante o ciclo de fabricação são, como mostrado na tabela II:

$$\begin{aligned} \text{BLOCO : } \Delta H &= 0.0355 \times \text{massa ; se } \Delta H \text{ em Kcal e massa em g} \\ \text{FORMA : } \Delta H &= 0.0768 \times \text{massa ; se } \Delta H \text{ em Kcal e massa em g} \\ \Delta H_{\text{total}} &= 0.1123 \times \text{massa} \end{aligned}$$

Ou seja a troca de calor durante o processo se reparte em torno de 30% no bloco e 70% na forma. Todavia se os tempos de contato e as temperaturas não estão ajustadas idealmente, a repartição das quantidades de calor transferidas podem oscilar entre 20-80% e 45-55%, sendo o primeiro caso o mais encontrado na prática.

Estas diferenças se traduzem por perdas de velocidade das máquinas e podem ser acompanhadas de dificuldades de fabricação com a aparição de defeitos no produto. No caso da repartição 20-80%, encontrada mais frequentemente, é a forma que limita a velocidade da máquina pois impõe um tempo de contato vidro-forma mais longo já que é preciso se eliminar mais calor depois de ter garantido um tempo de reaquecimento e alongamento do parison que é superior ao do que poderia se obter idealmente.

Isto explica, entre outros fatores, o porquê dos investimentos iniciais para a implantação de novos sistemas de ventilação estarem exclusivamente voltados para o lado da forma.

Direcionaremos então o presente estudo para esta fase do processo de conformação, analisando qualitativamente e quantitativamente as transferências térmicas que aí ocorrem.

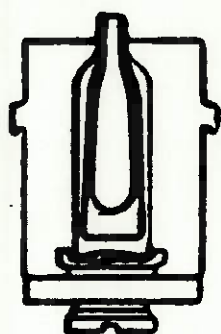
3-Análise térmica da conformação dentro da forma:

Relembremos inicialmente as operações de conformação que ocorrem dentro da forma:

ALONGAMENTO

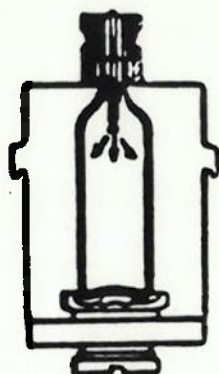
ASSOPRO FINAL

EXTRAÇÃO



1-Fechamento da forma

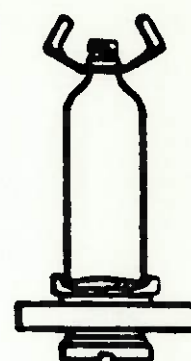
2-Abertura da forminha



3-Início do assopro final

4-Fim do assopro final

5-Abertura da forma



6-Entrada do alicate

7-Solda do alicate

Figura 3

Após a transferência do parison pelo revert, a forma se fecha e a forminha se abre. Com o parison entregue à forma inicia-se a fase de ALONGAMENTO E REAQUECIMENTO. Isto é necessário para a homogeneização das temperaturas internas do parison, que devido às transferências de calor no bloco, tem sua superfície com temperatura inferior às camadas internas.

Esta homogeneização se dá graças as transferências de calor internas ao vidro por condução e radiação. A radiação interna do vidro é uma transferência térmica "em cascada". As camadas de vidro mais quentes irradiam para as camadas mais frias que absorvem esta radiação, e que por sua vez ao terem sua temperatura elevada irradiam para as camadas ainda mais frias. As proporções das transferências por condução e

radiação internas ao vidro variam em função do tempo e da região considerada.

Durante a fase de alongamento do parison iniciam-se também as trocas térmicas entre o vidro, o ar existente dentro da forma e a forma. O vidro troca calor por condução com o ar que está a uma temperatura inferior, que por sua vez se aquece e transfere este calor ao molde. Vidro e molde também trocam calor por radiação. Uma parte deste calor é absorvida pelo molde e outra parte é refletida (a reflexão no molde depende de seu material, o estado de sua superfície - oxidação e polimento - e da lubrificação). Examinando-se a parte radiativa do fluxo térmico que penetra no molde, nota-se que ela é sensivelmente menor que a parte condutiva.

Durante o assopro final o vidro troca calor por convecção com o ar do assopro. O contato entre o vidro e a superfície do molde aumenta. é aqui que grande parte do calor é trocado por condução devido ao gradiente de temperatura existente.

No início do contato, o vidro está na sua temperatura mais alta e a superfície do molde na sua temperatura mais baixa. O gradiente de temperatura é máximo logo a transferência de calor também é máxima.

As figuras 4 e 5 mostram como variam a temperatura da superfície da forma e o fluxo térmico durante as várias etapas da conformação dentro da forma (definidas pela numeração apresentada na figura 3).

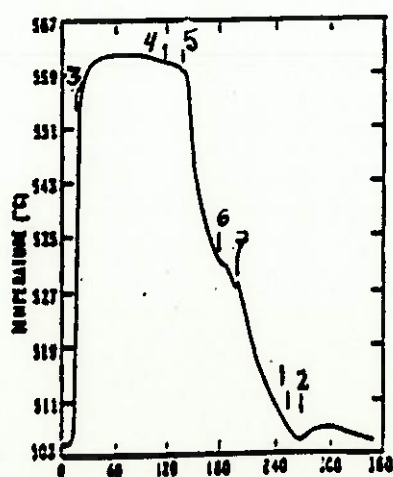


Figura 5: Temperatura

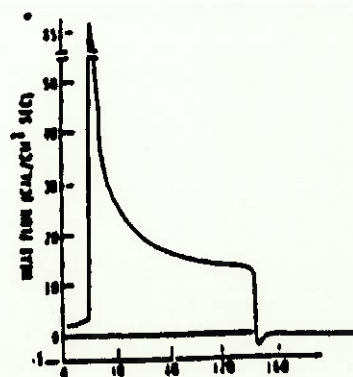


Figura 6: Fluxo térmico

O fluxo de calor que penetra na forma é em parte estocado no interior do molde e em parte transferido por condução em direção a superfície externa do molde.

Este fluxo é por fim transferido ao exterior, para o ar ambiente, os vários acessórios em contato com o molde e o fluido de arrefecimento.

A figura 6 mostra toda a cadeia térmica da conformação dentro do molde.

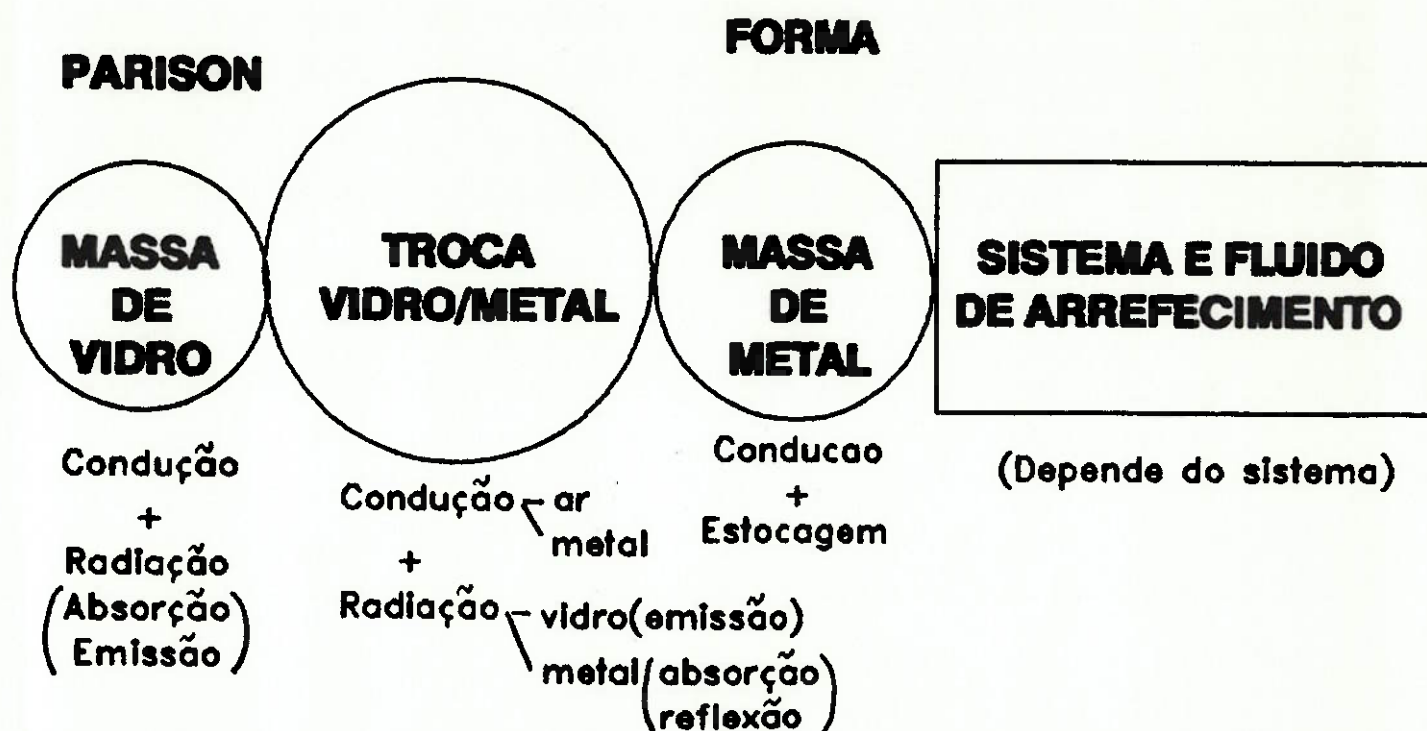
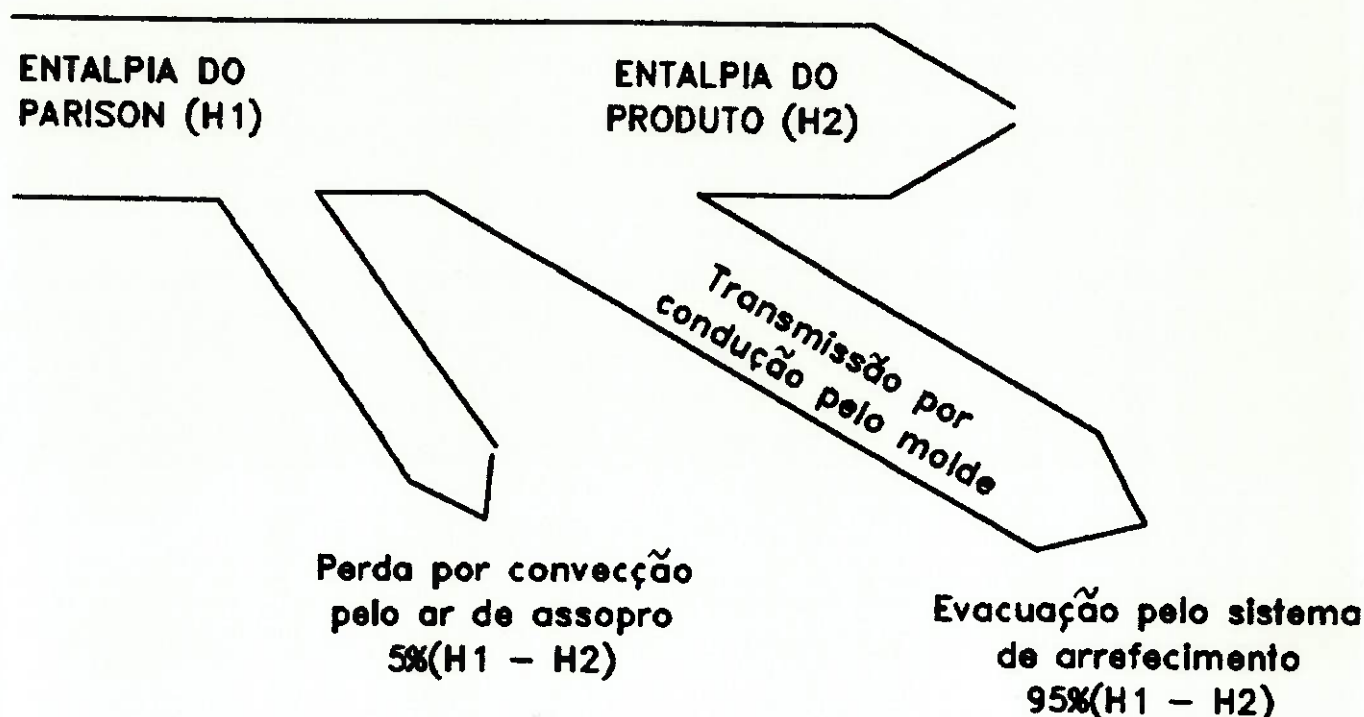


FIGURA 6: Cadeia térmica de conformação.

4-Análise do molde:

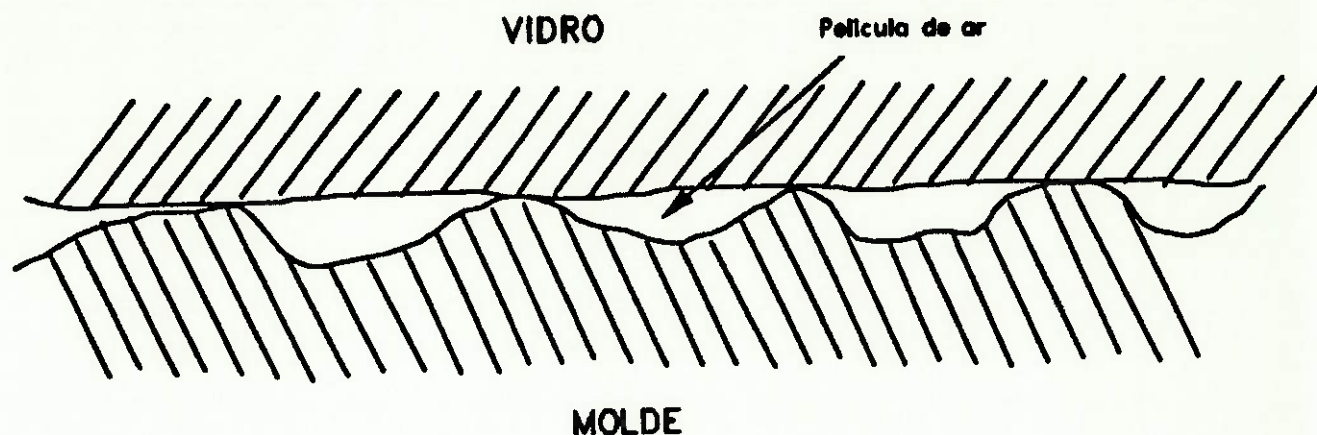
No item anterior analisamos termicamente a conformação dentro da forma, mostrando como o vidro troca calor nesta fase do processo. Na prática porém considera-se que todo o calor é transferido durante o contato do vidro com o molde e o ar de assopro. Desprezando então as outras formas de transferências térmicas, estudos mostraram que 95% do calor perdido pelo vidro é transferido por condução pelo molde e 5% por convecção pelo ar de assopro.



4.1-Interface vidro/molde:

A transferência entre o vidro e o molde por condução depende no entanto das condições da interface entre ambos. Se analisarmos a temperatura da superfície externa do produto quando o molde se abre notaremos que ela é superior à temperatura da superfície interna do molde. Se a continuidade entre os dois materiais fosse perfeita a temperatura das duas superfícies seria a mesma. A diferença que aparece é devida a uma resistência térmica da interface vidro/molde que pode ser explicada por três fenômenos:

a) Discontinuidade causada por um contato por pontos (Teoria de TRIER).



Devido às características das superfícies do molde e do vidro o contato entre os dois se estabelece por pontos, formando uma película de ar entre o produto e a superfície interna do molde. Estes pontos representam apenas de 5 a 10% da superfície total, sendo uma das razões da não homogeneidade das temperaturas dos dois materiais.

b) Hipótese de não contato por recuo do molde e principalmente do vidro (teoria de COHEN): no início do contato vidro/molde a superfície do vidro está na sua temperatura mais alta enquanto o molde se encontra na superfície mais baixa. Este gradiente provoca uma contração do vidro pelo resfriamento de sua camada superficial, ao mesmo tempo que o aquecimento do molde o dilata. Logo o contato tende a separar os dois materiais. Pela condução do calor para o exterior o molde volta a um estado térmico próximo do inicial, e a camada superficial do vidro se reaquece pela evacuação de calor do interior. Vidro e molde se reaproximam provocando novo recuo.

c) Camada de lubrificantes e óxidos: a presença de uma camada de lubrificantes e óxidos e também alguns conteúdos do vidro provocam uma barreira térmica impedindo o bom contato entre o vidro e o molde.

4.2--Aquecimento do molde:

Quando um molde frio recebe calor do vidro, sua temperatura sobe por absorção e estocagem deste calor. Supondo que não há transferência para o exterior durante esta fase, o aumento da temperatura se dá seguindo a equação:

$$Q = m.Cp. \Delta T$$

$$\Rightarrow \Delta T = Q/m.Cp$$

Onde Q = quantidade de calor recebida
 m = massa do molde
 Cp = calor específico do material

Para diminuir o tempo de aquecimento dos moldes algumas unidades aquecem os moldes em estufas antes da instalação nas máquinas. É importante lembrar que enquanto a superfície interna do molde não atingir a temperatura ideal de trabalho do artigo a transferência de calor não se dará em condição de solidificar a camada superficial do artigo de modo que ele não se deforme na abertura do molde.

4.3-Materiais:

Diferentes materiais e ligas podem ser usados na construção dos moldes. A tabela 4 apresenta as características das ligas mais usadas.

VALOR A 300K (27 C)	CONDUTIVIDADE (W/m.K)	Cp (KJ/Kg.K)	MASSA VOLUMÉTRICA (Kg/m ³)	DIFUSIVIDADE (cm ² /s.)
AÇO INOX 15 Cr - 10	20	0.46	7816	0.055
FoFo	57	0.46	7272	0.170
BRONZE 75 Cu - 25 Sn	26	0.34	8665	0.087

4.4-Condução pelo molde:

Vimos que a transferência de calor na interface vidro/molde depende apenas das temperaturas do vidro e do molde no momento do contato. Neste contato a superfície interna do molde se aquece de 50 a 70°C e por condução este é transferido se atenuando em toda a espessura do molde. Este aumento de temperatura é uma estocagem provisória de calor que será evacuada para a superfície externa do molde durante toda a fabricação. A uma profundidade de 10 a 15 mm já se pode considerar a temperatura do molde estável.

As condições de evacuação do calor através do molde dependem da condutividade do material, da espessura e da diferença de temperatura entre as faces em contato com o vidro e o fluido de arrefecimento.

Uma escolha adequada da espessura do molde e da ventilação em função da condutividade do material do molde permitem manter a temperatura ideal de trabalho na superfície interna do molde e o fluxo global de calor.

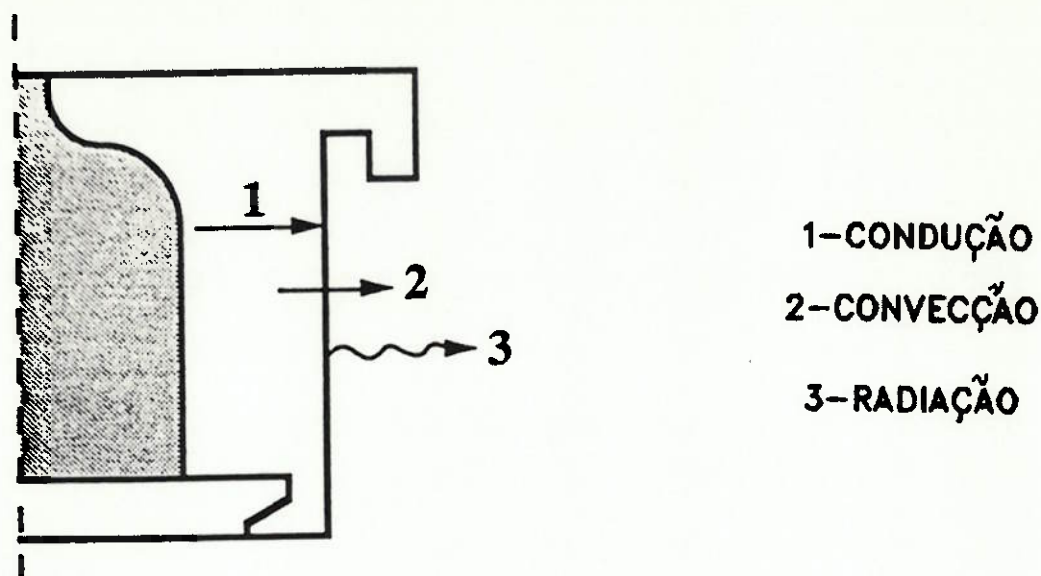
É possível então com um bom equilíbrio destes parâmetros manter uma mesma cadência de produção com moldes de diferentes materiais. O fracasso no uso de ligas de alta condutividade se explica justamente pela má adequação destes parâmetros.

5-Arrefecimento do molde:

O arrefecimento do molde é sem dúvida um dos pontos mais importantes do processo de conformação das embalagens de vidro, e também extremamente delicado a tratar. Já vimos que para o vidro não se deformar ao fim da conformação, ou seja na abertura da forma, ele deverá estar a uma temperatura determinada pela curva de viscosidade do mesmo. Vimos também que para atingir tal temperatura o vidro trocará calor com o molde, estando a quantidade de calor trocada estreitamente ligada ao gradiente de temperatura entre o produto e a superfície interna do molde. Com o molde já aquecido este não absorverá calor e sim transferirá todo o calor trocado com o vidro para o exterior. Caso não seja evacuado, o molde

acumulará este calor e por consequência se aquecerá, elevando assim a temperatura da superfície interna, se afastando então da condição ideal de trabalho.

O molde troca calor por condução com as partes em contato com ele, ou seja as bráçadeiras que o suportam, por convecção natural com o ar ambiente e por radiação:



Estas trocas naturais não são porém suficientes para se evacuar todo o calor trazido pelo produto. É necessário um sistema de arrefecimento forçado, principalmente para altas velocidades de produção. Neste ponto é importante lembrar que independente da velocidade de trabalho o calor trocado por produto é o mesmo, pois está ligado a variação de sua entalpia que como vimos depende apenas de sua composição e curva de viscosidade. Mas quanto maior a velocidade maior é o fluxo de calor trazido ou seja uma maior quantidade de calor deverá ser evacuada num mesmo intervalo de tempo requerendo assim um sistema de arrefecimento que possa absorver tal fluxo.

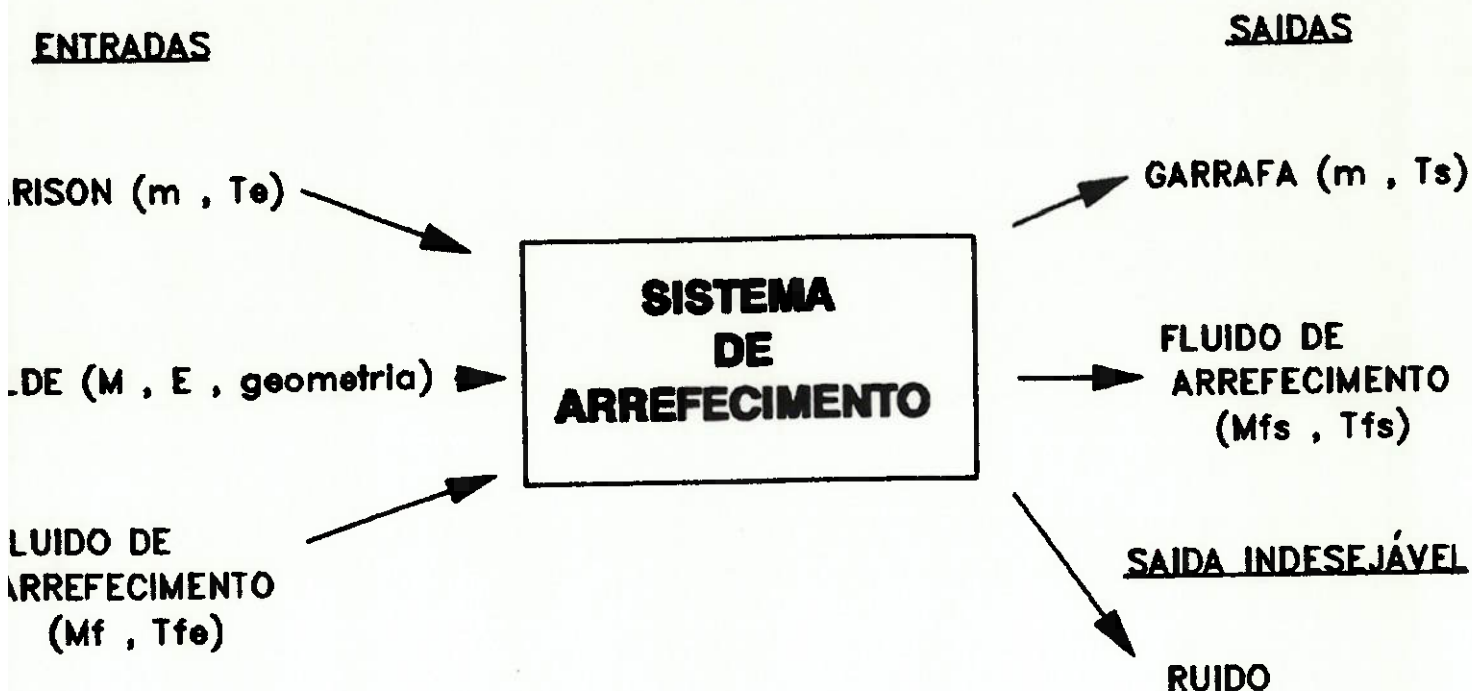
Atualmente o sistema de arrefecimento utilizado em todas as unidades da Santa Marina é o sistema de "empilhagem lateral". O sistema utiliza ar como fluido de arrefecimento aplicado radialmente por uma série de difusores empilhados em ambos os lados do molde. Cada difusor é chamado no jargão vidreiro de "empilhagem". Um ventilador por máquina garante o fornecimento do ar. Uma tubulação ligada à saída do

ventilador se divide para suprir todas as seções da máquina.

A eficiência do sistema está ligada à velocidade do ar na saída dos difusores, que é limitada pela potência do ventilador e a característica dos difusores. Também é função da quantidade e inclinação dos difusores. As bracadadeiras também são um obstáculo à eficiência do arrefecimento já que são instaladas entre molde e "empilhagens" por necessidade construtiva. Não permitem então uma perfeita homogeneidade e distribuição do arrefecimento ao redor de todo o molde. Por fim o sistema vem sendo um limitador de velocidade para a fabricação de alguns produtos, pois já está em seu limite de capacidade.

III - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Com a necessidade do arrefecimento dos moldes identificada é necessário formular o sistema de arrefecimento determinando suas especificações técnicas. Trata-se de um conjunto de requisitos funcionais, operacionais e construtivos a serem atendidos pelo sistema. Inicialmente esquematizamos abaixo o sistema de arrefecimento descrevendo as entradas que recebe e as saídas que produz.



Onde:

m = massa do produto

T_e = temperatura do parison na entrada da forma

T_s = temperatura da garrafa na saída da forma

M = massa do molde

E = espessura do molde

M_f = fluxo em massa de entrada do fluido de arrefecimento

M_{fs} = fluxo em massa de saída do fluido de arrefecimento

T_{fe} = temperatura de entrada do fluido de arrefecimento

T_{fs} = temperatura de saída do fluido de arrefecimento

1-Especificações funcionais:

1.1-Desempenho: Já vimos que o calor a ser transferido do molde por produto é a variação da entalpia da massa de vidro e $\Delta H = H_e - H_s = m.C_p.\Delta T = m.C_p.(T_e - T_s)$.

Mas o fluxo a ser absorvido pelo sistema de arrefecimento durante a fabricação é função do número de produtos conformados no molde por unidade de tempo ou seja da velocidade de fabricação por molde definida como cadência de produção (n).

Vimos também que apenas 95% do fluxo será transferido pelo molde, sendo os 5% restantes absorvidos pelo ar do assopro. Logo o fluxo total é: $\bar{\Phi} = (0.95).(n).\Delta H$

$$\Rightarrow \boxed{\bar{\Phi} = (0.95).(n).(m.C_p.(T_e - T_s))}$$

Logo para quantificar o fluxo a ser absorvido pelo sistema de arrefecimento devemos definir os parâmetros n, m, T_e e T_s que são funções do produto a ser fabricado, das características do vidro e da máquina a ser usada para a fabricação.

Em torno de 300 produtos podem entrar em fabricação nas duas unidades da Santa Marina que iremos considerar: Fábrica Água Branca de Embalagens (FABE) e a Fábrica Porto Ferreira (FPF). Dezesete máquinas diferentes podem ser usadas como também várias composições de vidro.

Portanto a grande quantidade de parâmetros em jogo impossibilita a determinação de um fluxo máximo que o sistema de arrefecimento deverá ser capaz de absorver.

A seguir iremos então mostrar como se determina o fluxo a ser absorvido para a fabricação de um determinado produto. Para tal definimos inicialmente os parâmetros citados acima e apresentamos no fim um exemplo de cálculo.

a) Diferença de temperatura $\Delta T = (T_e - T_s)$: Este parâmetro é função da composição do vidro e pode ser definido pela sua curva de viscosidade. T_s é a temperatura de saída da forma que como vimos deve ser igual a temperatura do Littleton Point que pode ser determinada para cada composição usada na Santa Marina pela figura 2. T_e é a temperatura de entrada na

forma. A determinação prática desta temperatura é muito difícil, adota-se então, segundo recomendações da Emhart aceitas pela Saint Gobain, que $T_e = GOB - 200^{\circ}C$. Ou seja a temperatura de entrada do parison na forma é a temperatura do GOB POINT menos $200^{\circ}C$. A temperatura do Gob também pode ser determinada pela figura 2.

b) Cadência de produção: Define-se cadência de produção ou velocidade por molde como:

$$n = (\text{velocidade da máquina}) / (n_{\text{de seções}} \times \text{tipo de carga})$$

A velocidade é o número de cortes que a tesoura executa por minuto definida em CPM (cortes por minuto). A tesoura pode cortar 1, 2 ou 4 gotas num mesmo corte isto é o tipo de carga, respectivamente Simples carga, Dupla carga ou quádrupla carga. O tipo de carga é função do tamanho das seções ou seja das características construtivas da máquina, já que o tipo de carga é definido pelo número de moldes que se tem por seção. Produtos pequenos como frascos são feitos em quádrupla carga, produtos grandes como garrações são feitos em simples carga e produtos intermediários em dupla carga. O tamanho da seção é característica da máquina definido pelo parâmetro "distância entre centros", todas as máquinas Santa marina tem $4 \frac{1}{4}$ " de distância entre centros, apenas a máquina 13 da FPF tem distancia entre centros de $6 \frac{1}{4}$ ". A tabela abaixo apresenta as características das máquinas Santa Marina.

		MÁQUINA	N. SEÇÕES	ENTRE CENTROS
F P F		11	8	4 1/4
		12	6	4 1/4
		13	8	6 1/4
F A B E	F3	31	6	4 1/4
		32	6	4 1/4
		34	8	4 1/4
	F5	51	6	4 1/4
		52	6	4 1/4
		54	5	4 1/4
		55	6	4 1/4
	F12	121	6	4 1/4
		122	6	4 1/4
		125	6	4 1/4
		126	6	4 1/4
		127	6	4 1/4
	F16	161	6	4 1/4
		162	5	4 1/4

22

TABELA 6

c) **Relação peso/velocidade:** A velocidade de fabricação depende principalmente do peso do produto. Não se pode determinar uma velocidade standard para uma dada massa de vidro pois outros fatores devem ser levados em conta como problemas específicos de fabricação de certos produtos ou de equipamentos.

Mas para cada tipo de processo, máquina e composição de vidro pode-se levantar um gráfico, que chamamos de curva de velocidades, que plota as velocidades médias obtidas nas últimas fabricações em função do peso dos produtos. Com isso podemos ter uma idéia da velocidade em que um produto de massa m poderá ser produzido. Foram levantadas as curvas de velocidades para o FAFE e a FPF que são apresentadas a seguir. A título comparativo foram plotadas as velocidades obtidas por vidrarias européias e americanas. Pode-se reparar que para uma mesma massa as velocidades por elas alcançadas são bem superiores às velocidades da Santa Marina pois já utilizam sistemas modernos de ventilação.

d) **Exemplo para cálculo de fluxo:** Apresentamos agora um exemplo para a determinação do fluxo a ser absorvido pelo sistema de arrefecimento para a garrafa Kaiser One Way com capacidade de 330 ml e peso de 175 g. Ela é produzida em vidro ambar na máquina 11 (8 seções, 4 1/4") da FPF em dupla carga.

Com estas informações vemos da curva de velocidade página 31 que ela seria produzida com uma velocidade em torno de 165 CPM assim temos: $n = 165 / (8 \times 2) = 10.31$ garrafas molde/minuto.

Da figura 2 vemos que $G_{OB} = 1166^{\circ}\text{C}$

$$LIT = 724^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Logo } T_e = 1166 - 200 = 966^{\circ}\text{C} = 1239\text{K}$$

$$T_s = 724^{\circ}\text{C} = 997\text{K}.$$

$$\text{Assim temos: } \dot{\Phi} = (0.95) \cdot (n) \cdot (m) \cdot C_p \cdot (T_e - T_s)$$

$$\Rightarrow \dot{\Phi} = (0.95) \times (10.31) \times (175) \times (0.289) \times (1239 - 997)$$

=> Fluxo a ser absorvido:

$$\dot{\Phi} = 119876.4 \text{ cal/min}$$

1.2-Conforto: Na produção vidreira as condições de trabalho ao redor das máquinas são extremamente rudes, com níveis de calor e ruído elevadíssimos. A principal fonte de ruído é o atual sistema de arrefecimento utilizado, logo o sistema que irá substituí-lo deverá reduzir este problema. O nível de ruído não poderá ultrapassar os atuais, em torno de 108 dB.

1.3-Segurança: Trabalhando com fluidos a altas temperaturas, o sistema deve evitar a projeção de tais fluidos no ambiente e principalmente no operador da máquina.

2-Especificações operacionais:

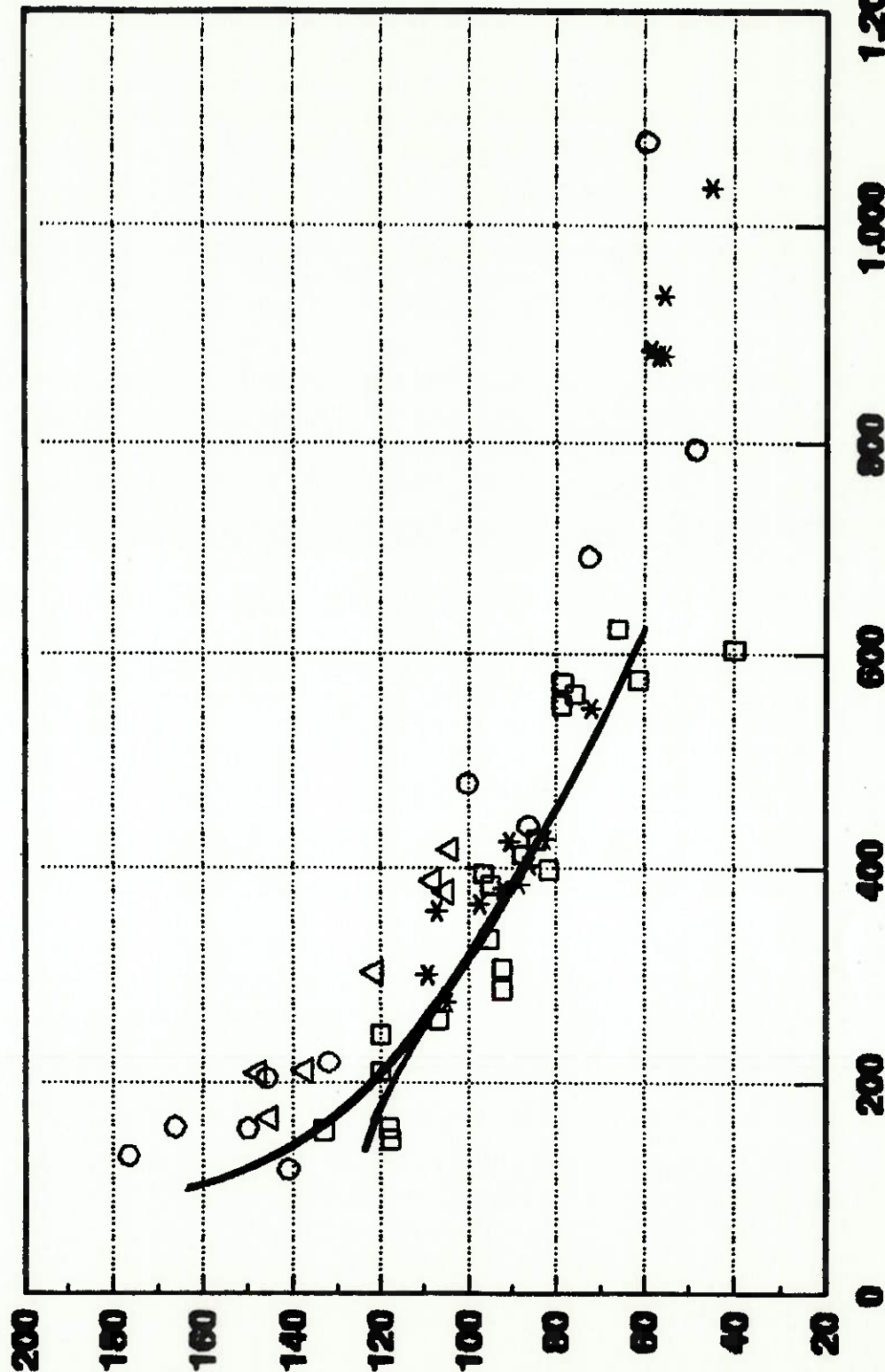
2.1-Confiabilidade: Na Santa Marina as máquinas seguem uma rotina de manutenção e são reformadas de 18 em 18 meses. O sistema de arrefecimento não poderá alterar esta rotina apresentando falhas que interrompam o funcionamento da seção antes da parada prevista para reforma.

3-Especificações construtivas:

Como não estão previstas máquinas novas para o parque da Santa Marina o sistema de ventilação deverá se adaptar às máquinas sem grandes alterações de suas características. Para tal deve-se prever na construção e escolha do sistema a sua capacidade de se acoplar à máquina.

IS6 - DUPLA CARGA GARRAFAS BRANCAS

VELOCIDADE (cortes/minuto) FÁB FIMISA (1) CAMPO BOM *



(1) - DADOS FORNECIDOS PELA SGE
VIDRARIAS AMERICANAS E EUROPEIAS

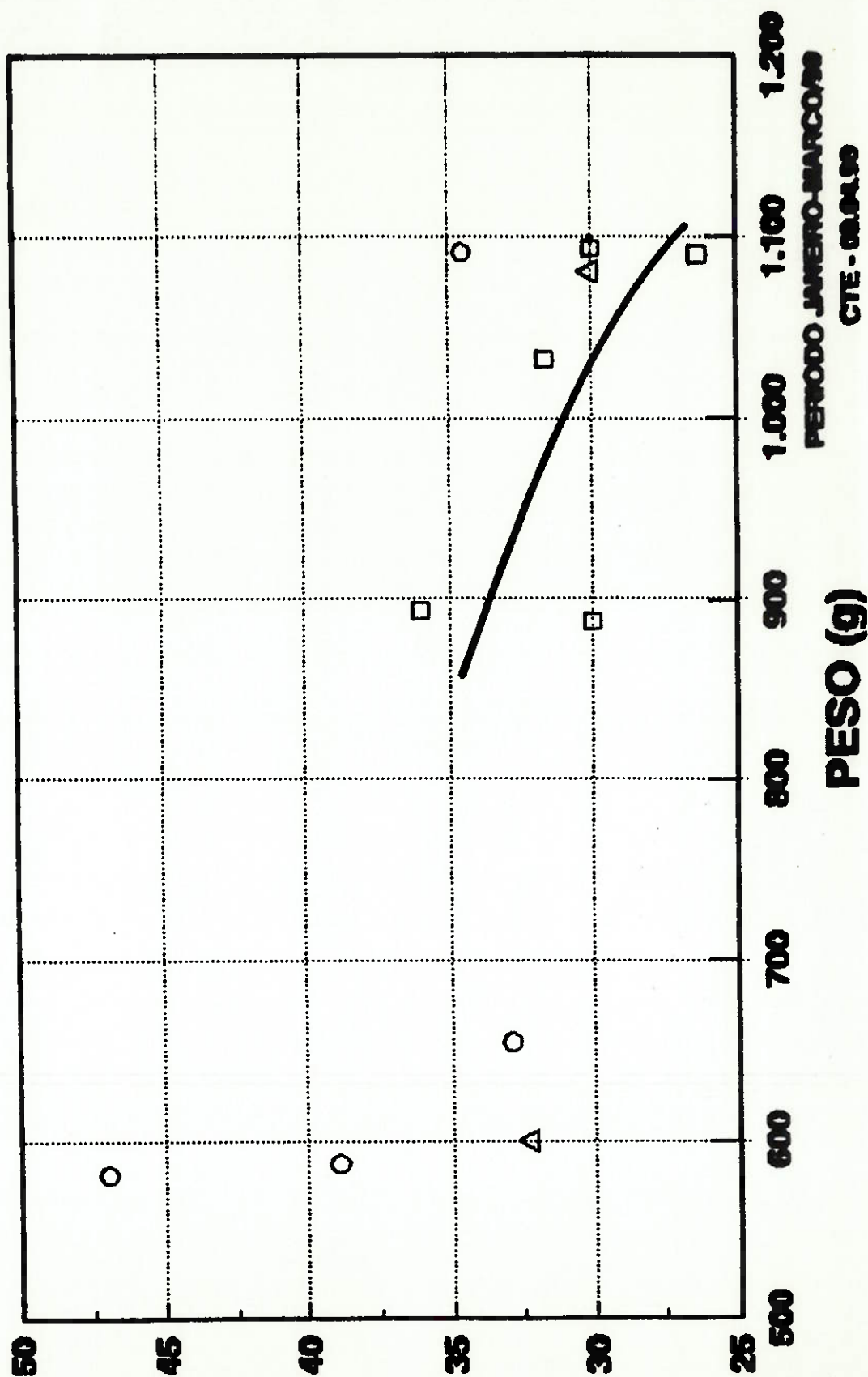
PERÍODO JANERO-MARÇO/99
CTE - 08.04.99

IS6 - SIMPLES CARGA

GARRAFAS BRANCAS

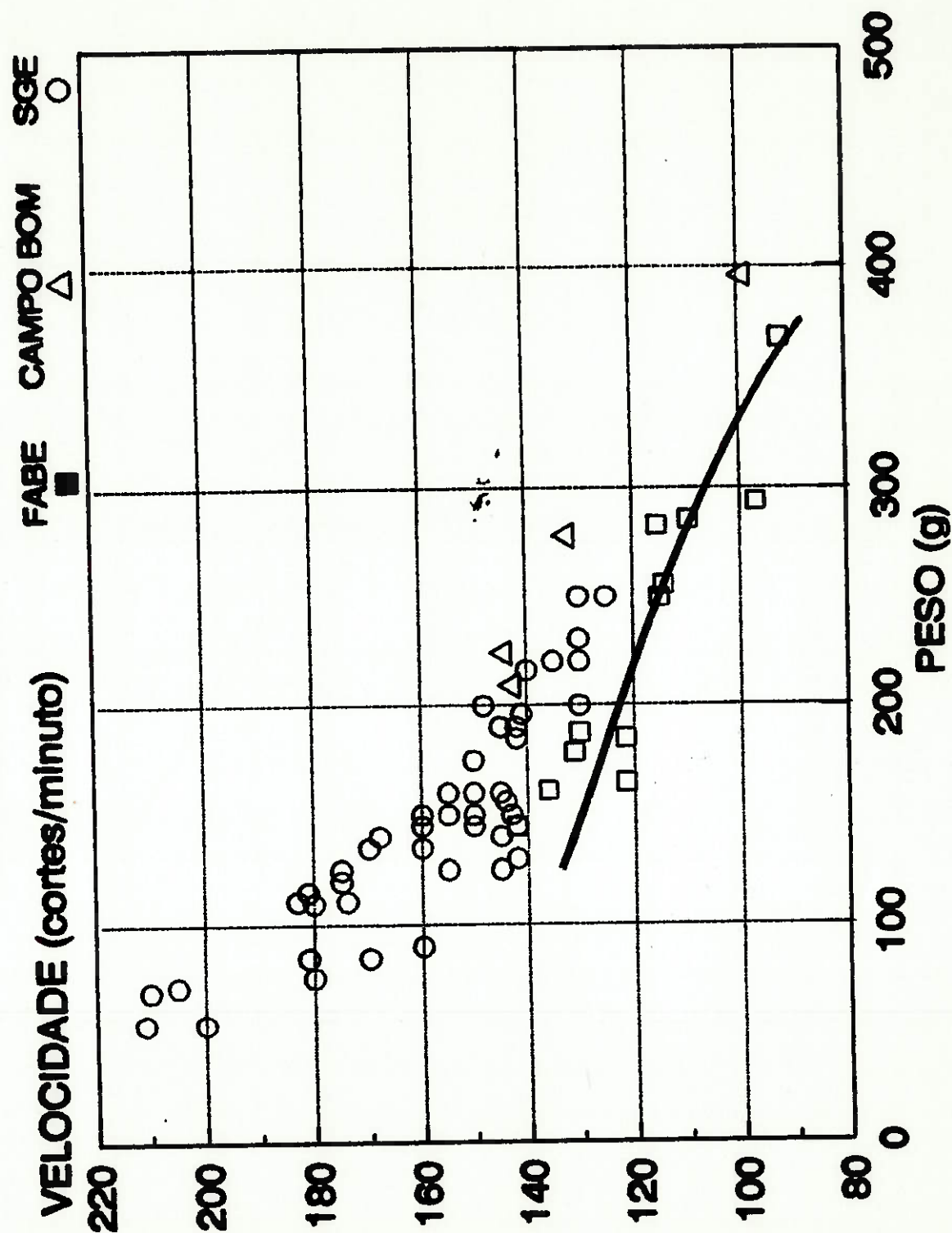
VELOCIDADE (cortes/minuto)

FABE ■ CAMPO BOM △ REMESA ○



CURVA DE VELOCIDADES

IS 6 - DUPLA CARGA - PS

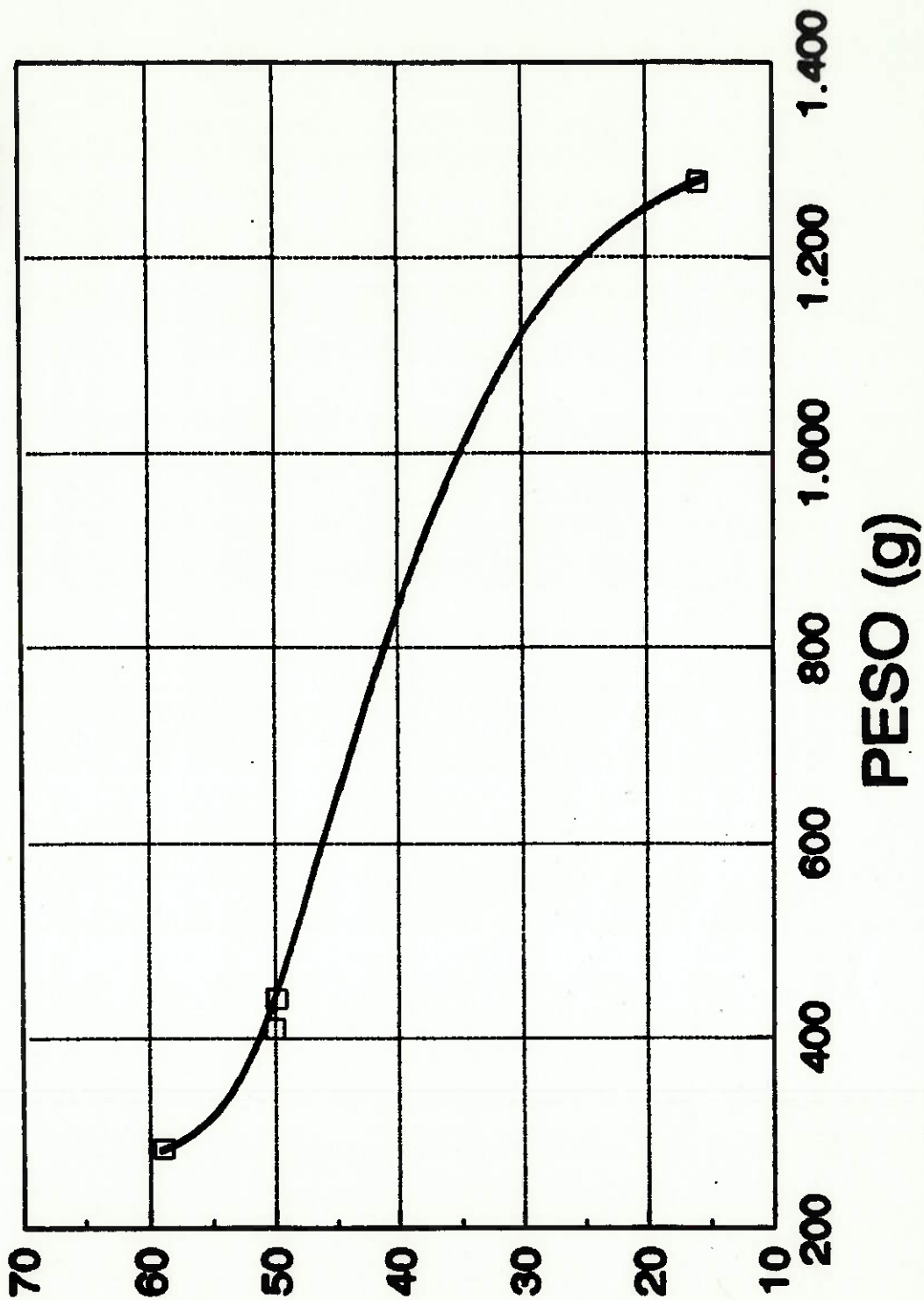


CURVA DE VELOCIDADES

IS 6 - SIMPLES CARGA PS

FABE
FORNO 12

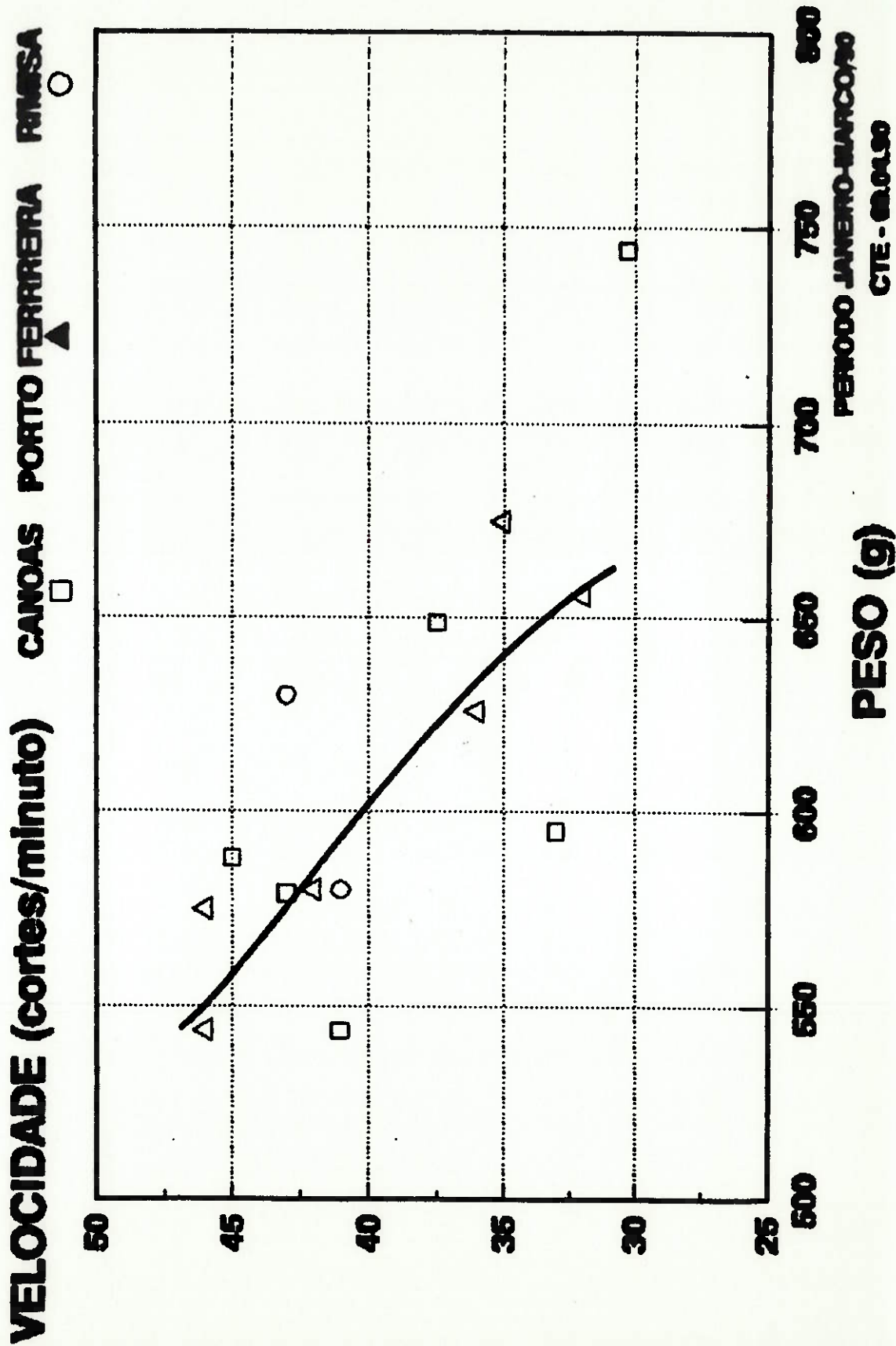
VELOCIDADE (cortes/minuto)



CURVA DE VELOCIDADES

IS6 - SIMPLES CARGA

GARRAFAS AMBAR

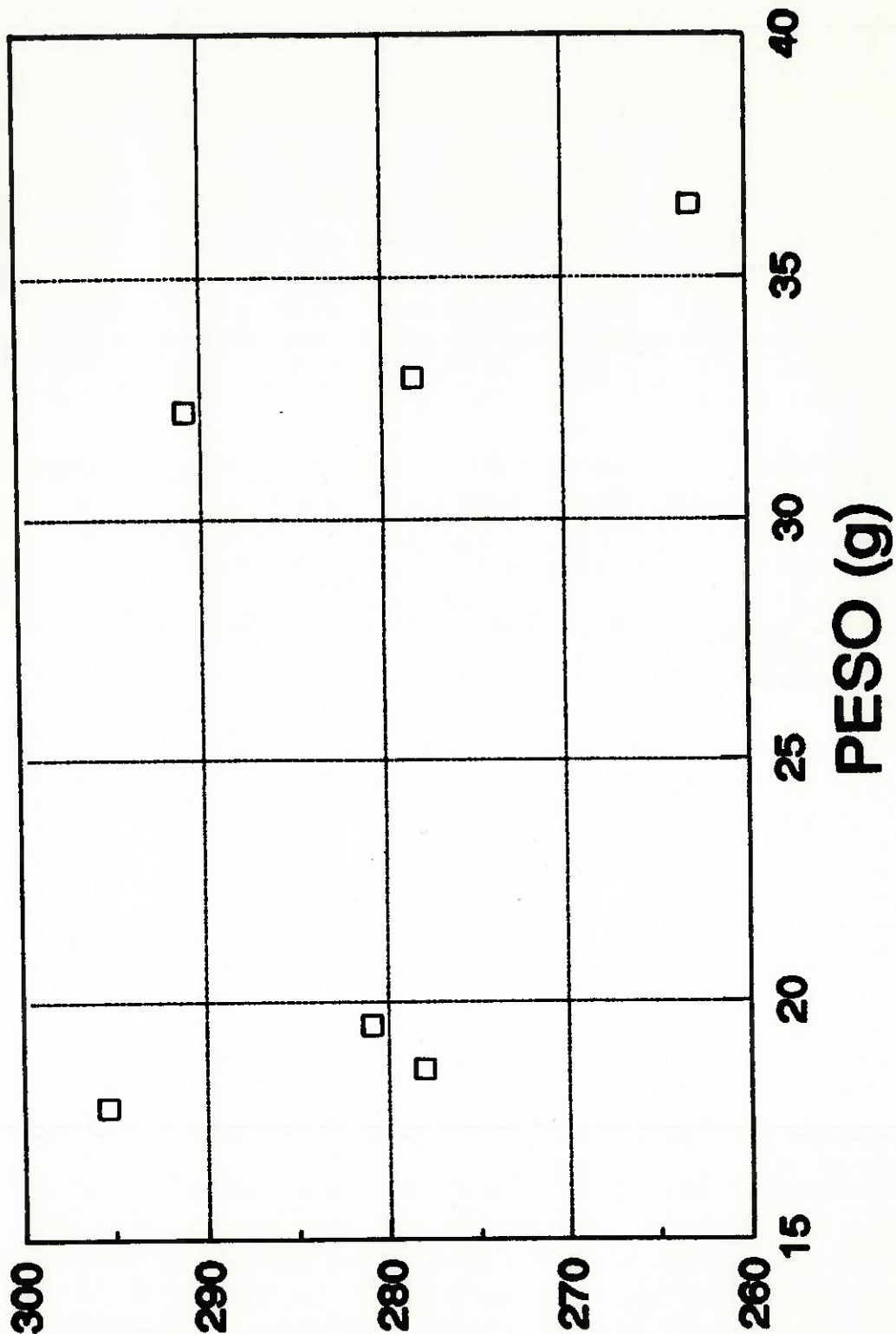


CURVA DE VELOCIDADES

IS 5 - QUADRUPLA GOTA

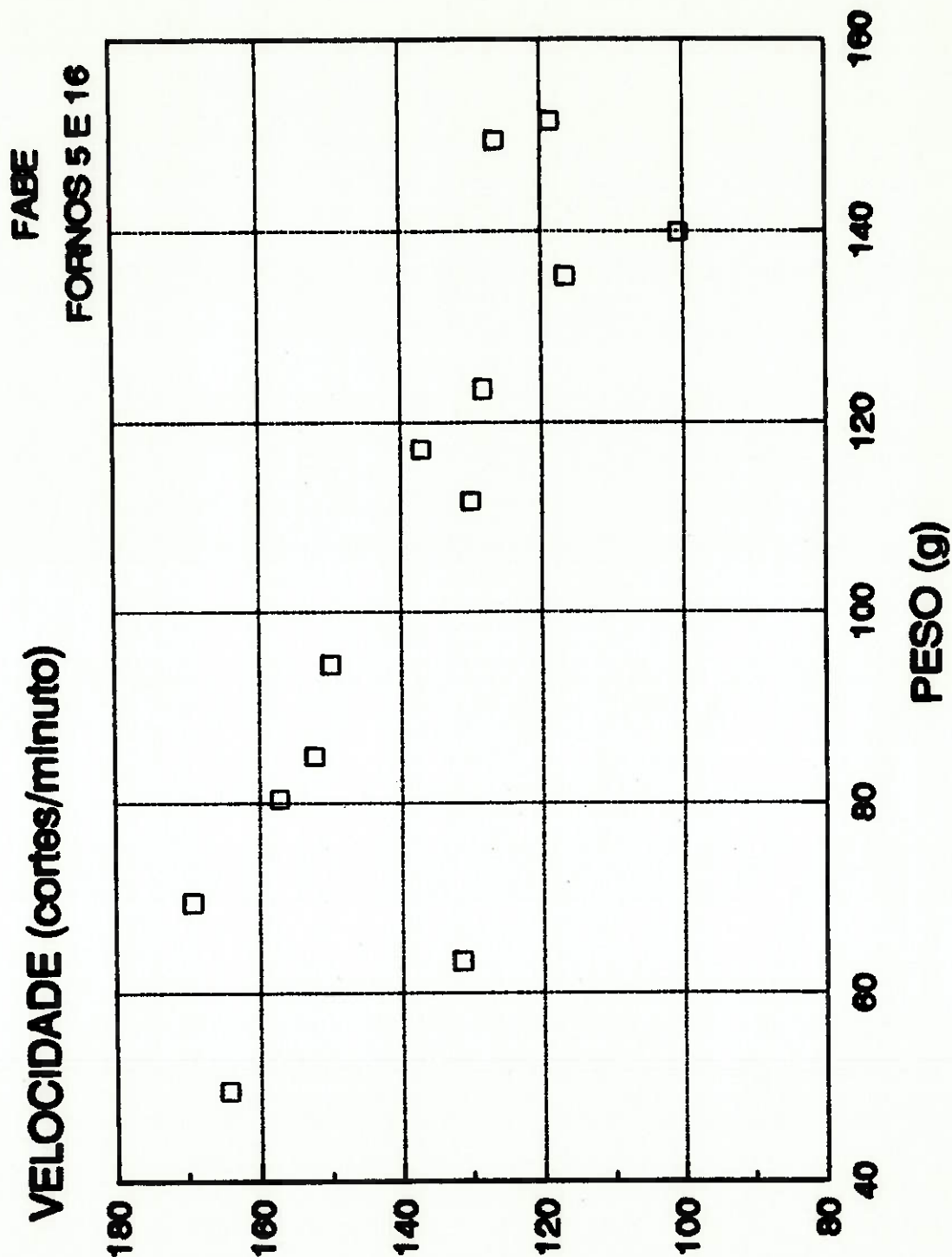
FABE
FORNOS 5 E 16

VELOCIDADE (cortes/minuto)



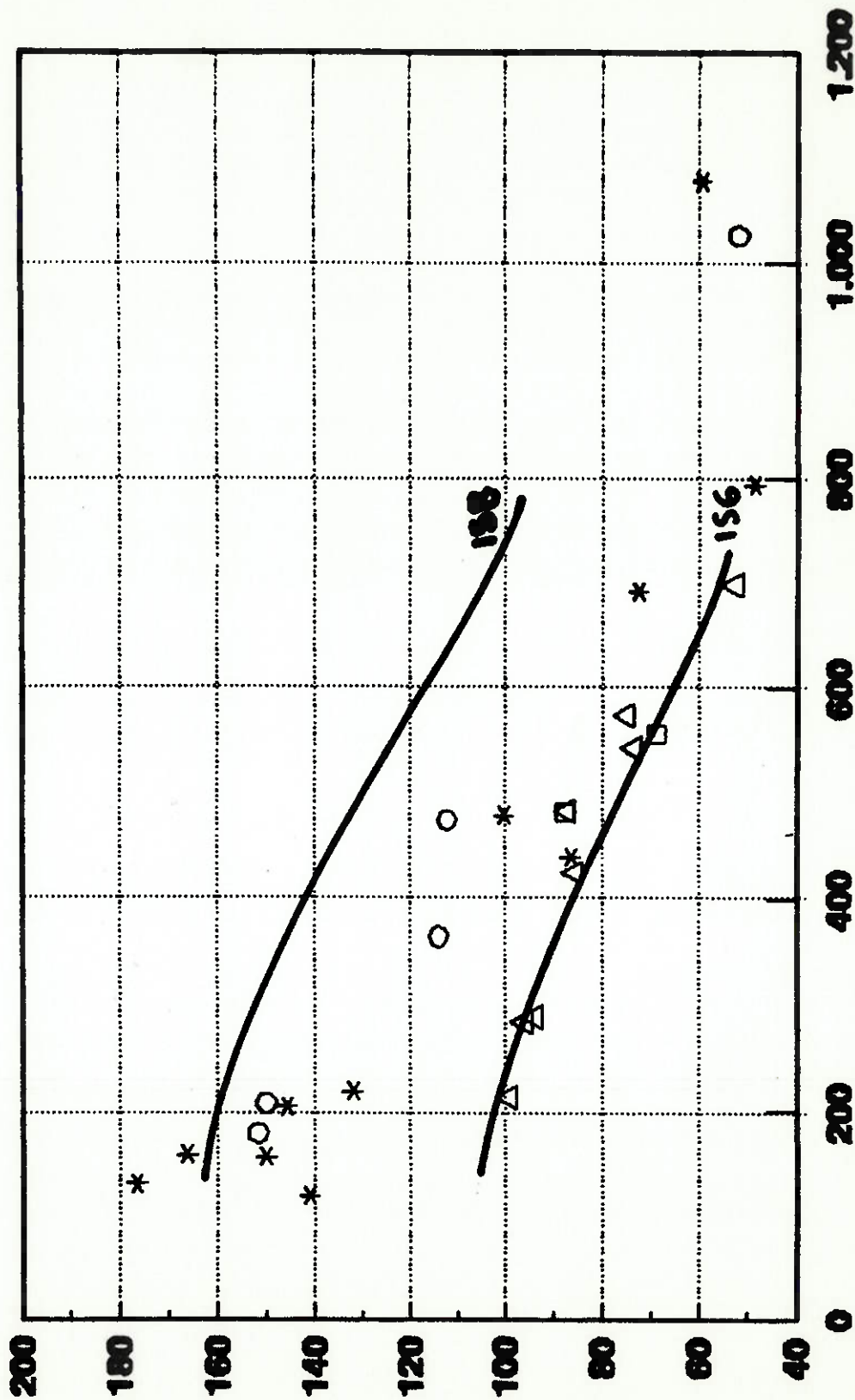
CURVA DE VELOCIDADES

IS 6 DUPLA CARGA - FRASCOS



IS6 - DUPLA CARGA GARRAFAS AMBAR

VELOCIDADE (cortes/minuto) CANOAS PORTO FERRERA RANSA (*)



(*) - DADOS FORNECIDOS PELA SGE
VIDRARIAS AMERICANAS E EUROPEIAS

PESO (g)

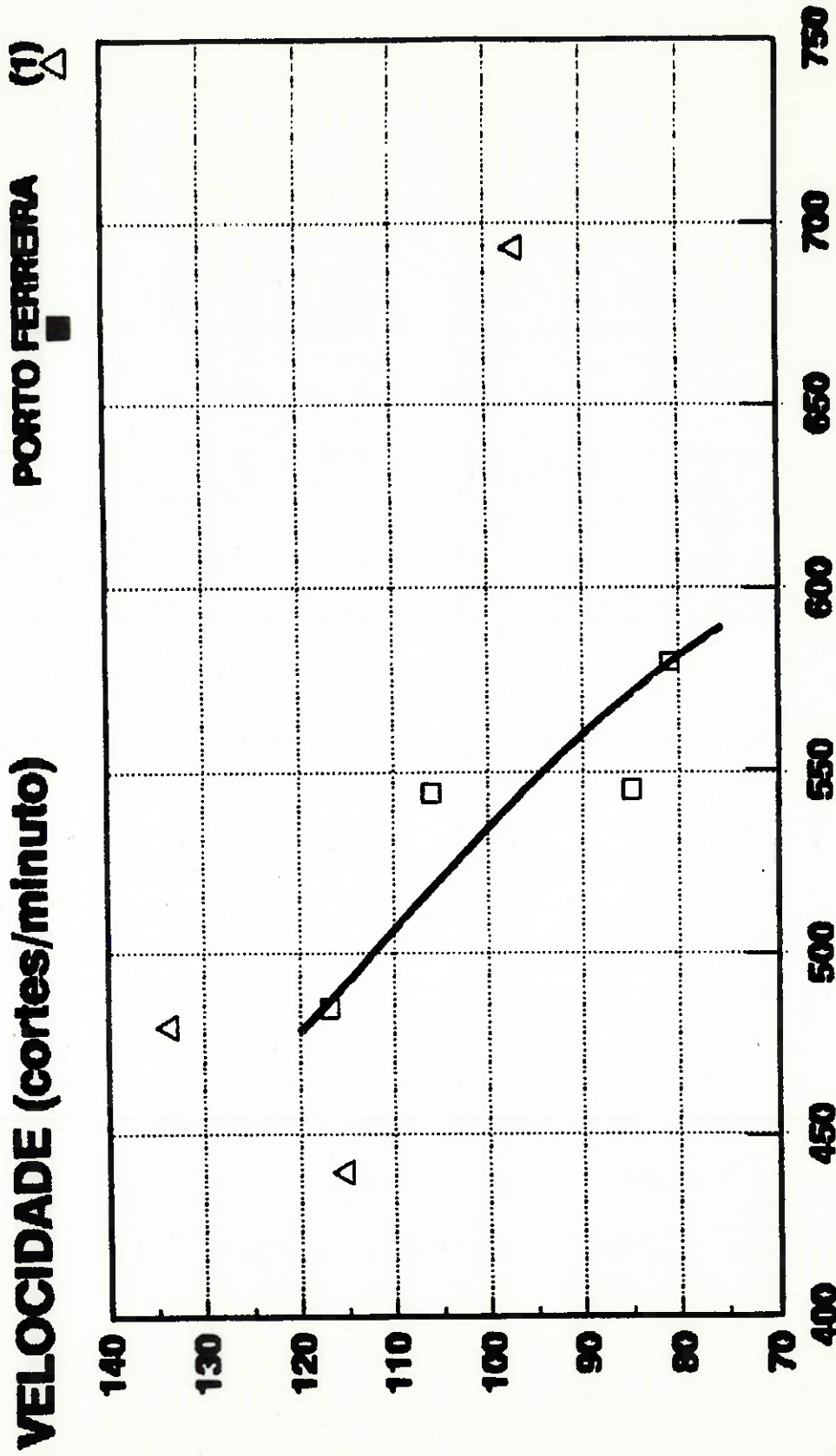
PERIODO JANEIRO-MARCO/59

CTE - 09.04.50

CURVA DE VELOCIDADES

IS8 - 6 1/4" - DC

GARRAFAS AMBAR



(1) - DADOS FORNECIDOS PELA SGE
VIDRARIAS AMERICANAS E EUROPEIAS

PERIODO JANEIRO-MARCO/99
CTE - 11.04.90

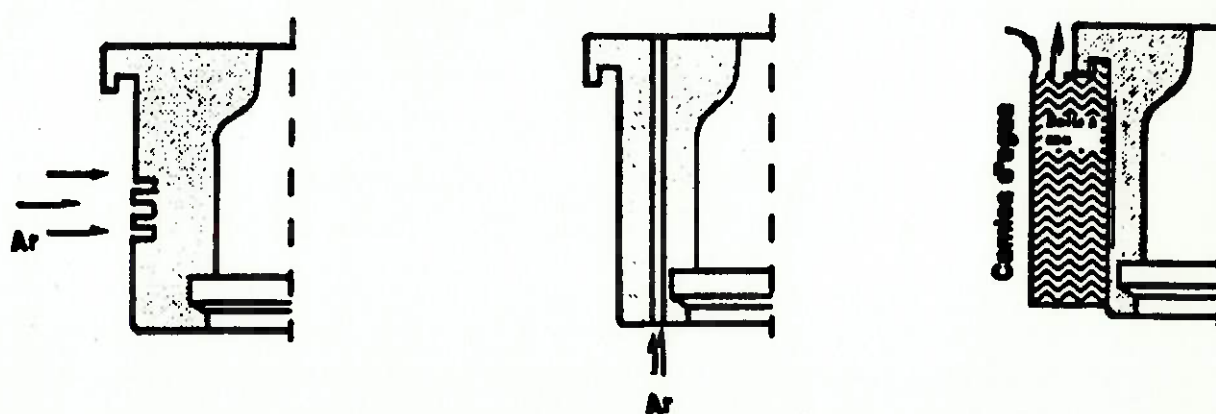
IV - SÍNTESE DAS SOLUÇÕES:

Como dissemos no início não é o objetivo deste trabalho desenvolver novos sistemas de arrefecimento de moldes. Este trabalho já foi feito pelas vidrarias e fabricantes de equipamentos quando o desempenho do sistema convencional por "empilhagem" lateral se tornou insuficiente.

No Brasil todas as vidrarias utilizam o sistema convencional de arrefecimento, no exterior porém os trabalhos neste campo levaram a quatro novos sistemas que já estão perfeitamente operacionais. São eles:

- Ventilação clássica temporizada
- Vertiflow
- Axial Cooling
- FRAP

A figura abaixo mostra como cada sistema atua no molde e a tabela 7 apresenta as características de cada tecnologia de arrefecimento que descrevemos individualmente a seguir.



-Clássica temporizada

-Vertiflow
-Axial Cooling

-FRAP

Figura 11: Tecnologias de arrefecimento

TECNOLOGIA						
	CLÁSSICA	CLÁSSICA TEMPORIZADA	VERTIFLOW	AXIAL COOLING	FRAP	
CARACTERÍSTICA						
1-FLUIDO DE TRABALHO	AR VENTILADO	AR VENTILADO	AR VENTILADO	AR VENTILADO	ÁGUA	
2-DIREÇÃO DO FLUIDO	RADIAL	RADIAL	AXIAL	AXIAL	PERIFÉRICA	
3-MOLDE	CONVENCIONAL	CONVENCIONAL	FURAÇÕES VERTICAIS	FURAÇÕES VERTICAIS	COM CAMISA	
4-SUPRIMENTO DO FLUIDO	EMPILHAMENTO LATERAL	EMPILHAMENTO LATERAL	FORMA	BLOCO	BRAÇADEIRA	TUBULAÇÃO EXTERNA
				CHAPETU		
5-APLICAÇÃO	CONTÍNUA	TEMPORIZADA	TEMPORIZADA	CONTÍNUA OU TEMPORIZADA	CONTÍNUA OU TEMPORIZADA	CONTÍNUA

TABELA 7

1) Ventilação clássica temporizada:

Foi a primeira tentativa em se melhorar o desempenho da ventilação clássica por "empilhagem" lateral. Manteve-se as "empilhagens" porém a vazão de ar passou a ser controlada. No sistema convencional a aplicação do ar sobre os moldes é contínua em todas as seções da máquina simultaneamente. A vazão do ventilador é então dividida igualmente entre todas as seções (descontando as perdas de carga). Com a temporização passou-se a ventilar o molde somente quando o produto está sendo conformado, ou seja quando o parison está dentro do molde que é o momento da grande transferência do fluxo de calor. Com isto ganha-se em vazão por molde já que as seções nunca serão todas ventiladas ao mesmo tempo. Estudos mostraram que no máximo 3 seções sobre 4 serão ventiladas ao mesmo tempo logo tem-se um aumento mínimo de 25% em vazão comparado ao sistema convencional. Maior vazão significa maior velocidade do ar e logo maior transferência de calor por convecção. A ventilação temporizada pode então transferir mais calor aumentando o desempenho do processo sem grandes alterações das características da ventilação convencional como se vê na tabela 7.

A temporização é feita com a colocação de "dampers" de controle na saída do ar do caixão para as "empilhagens". Dois sistemas de "dampers" são utilizados, o chamado "papillon" é uma chapa metálica pivotada por um eixo na interface entre "empilhagem/saída do caixão" que interrompe o fluxo de ar quando acionada pneumaticamente. No outro sistema, proposto pela Emhart, o fluxo de ar é interrompido por um êmbolo acionado por um cilindro. Este sistema é porém desvantajoso por provocar grandes perdas de carga.

2) Axial Cooling:

O sistema Axial Cooling foi desenvolvido pela vidraria e também fabricante de equipamentos alemã Heye Glass. Como vemos na tabela 7 Também usa ar ventilado como fluido de arrefecimento mas aplicado axialmente no molde por furos usinados verticalmente no molde.

O suprimento do fluido é feito por uma peça distribuidora fixa a braçadeira e em contato com o molde. As "empilhagens" são eliminadas porém usa-se o sistema de êmbolo com cilindro para controlar a alimentação do ar do caixão para a peça distribuidora. Se desejado pode-se aplicar o ar continuamente já que a peça distribuidora acompanha o movimento de rotação do molde.

Devido às características dimensionais do sistema apenas uma coroa de furos pode ser usinada no molde o que limita o desempenho do sistema.

A figura 12 mostra o sistema Axial Cooling, é importante observar a possibilidade de refrigerar o fundo de forma. A figura 13 mostra a peça distribuidora e a figura 14 a montagem da peça na braçadeira.

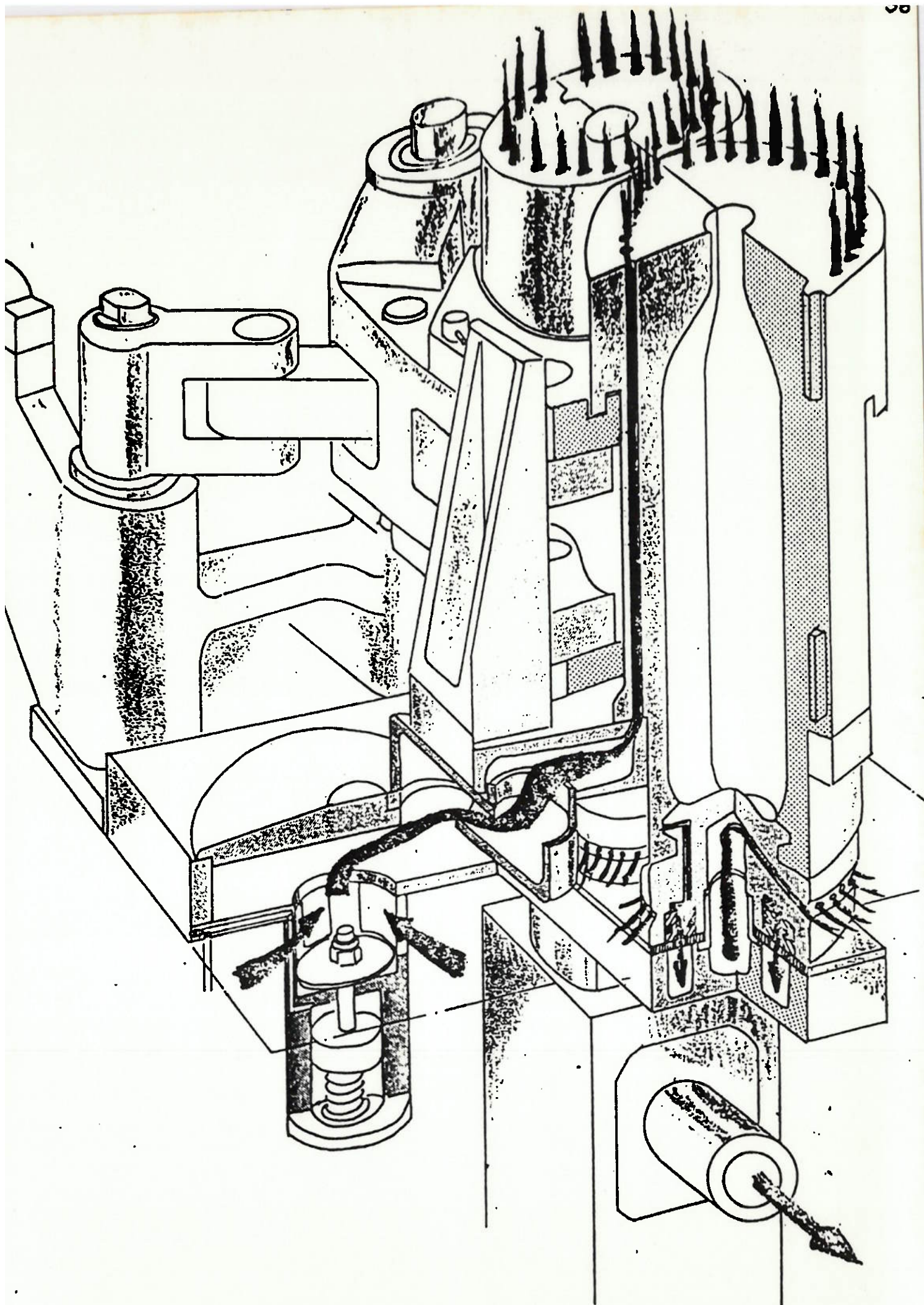
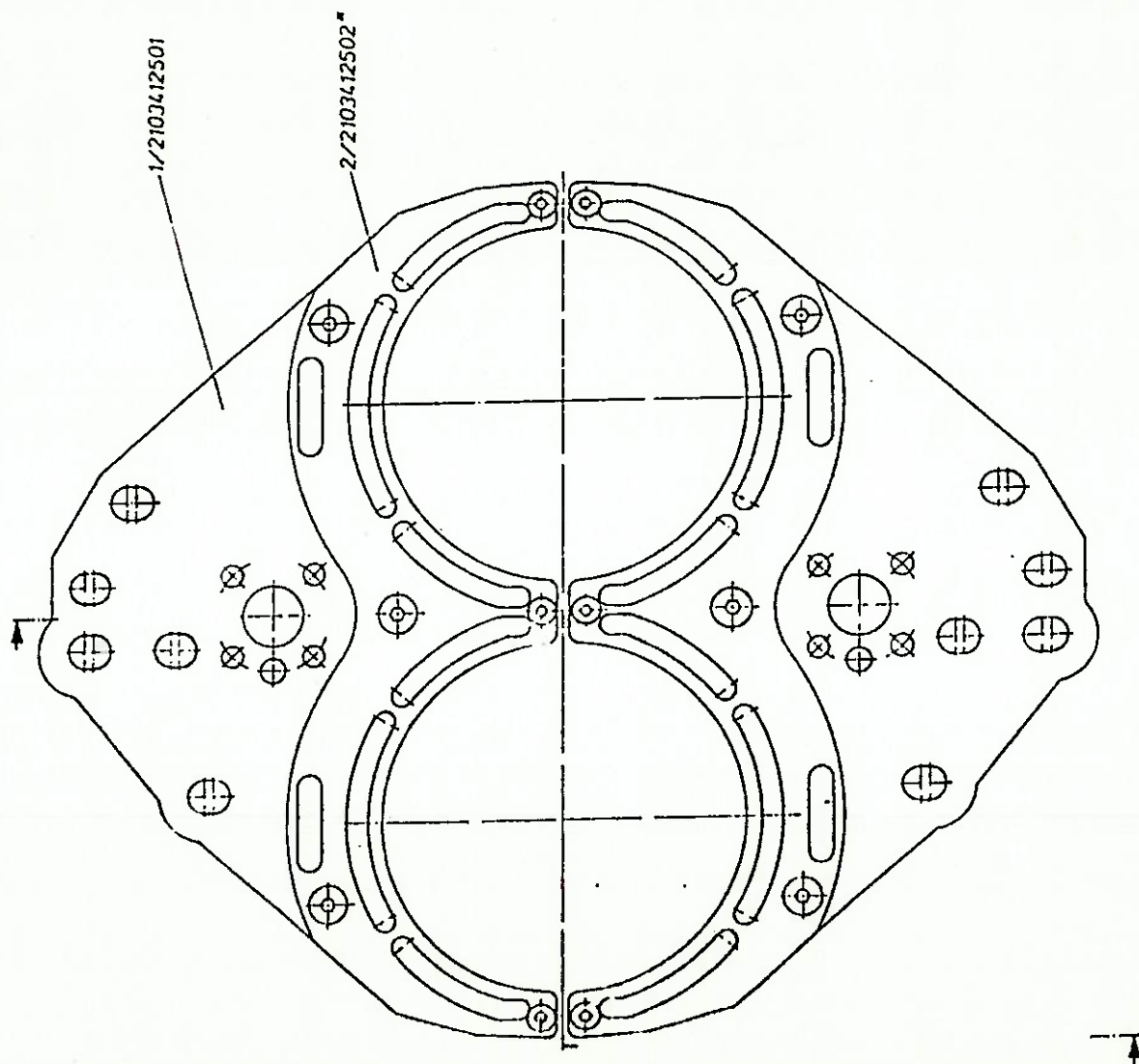


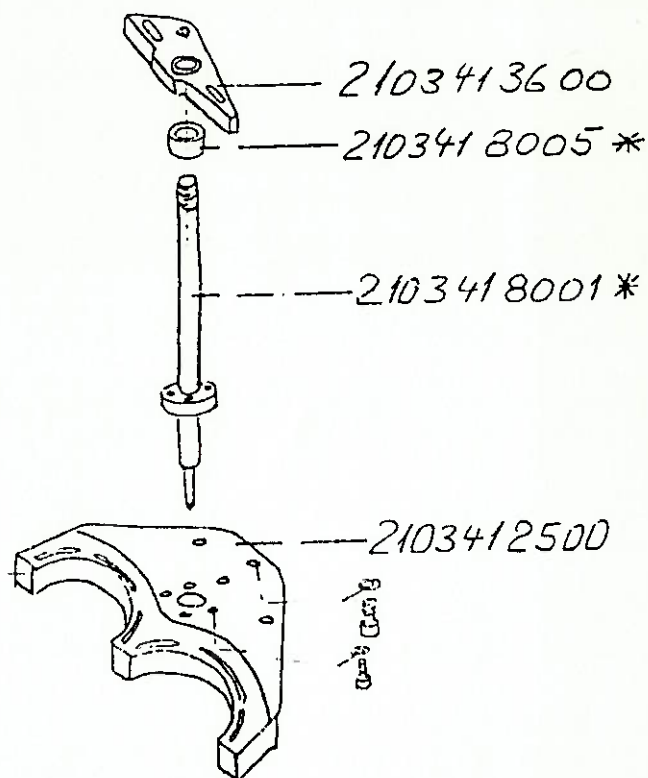
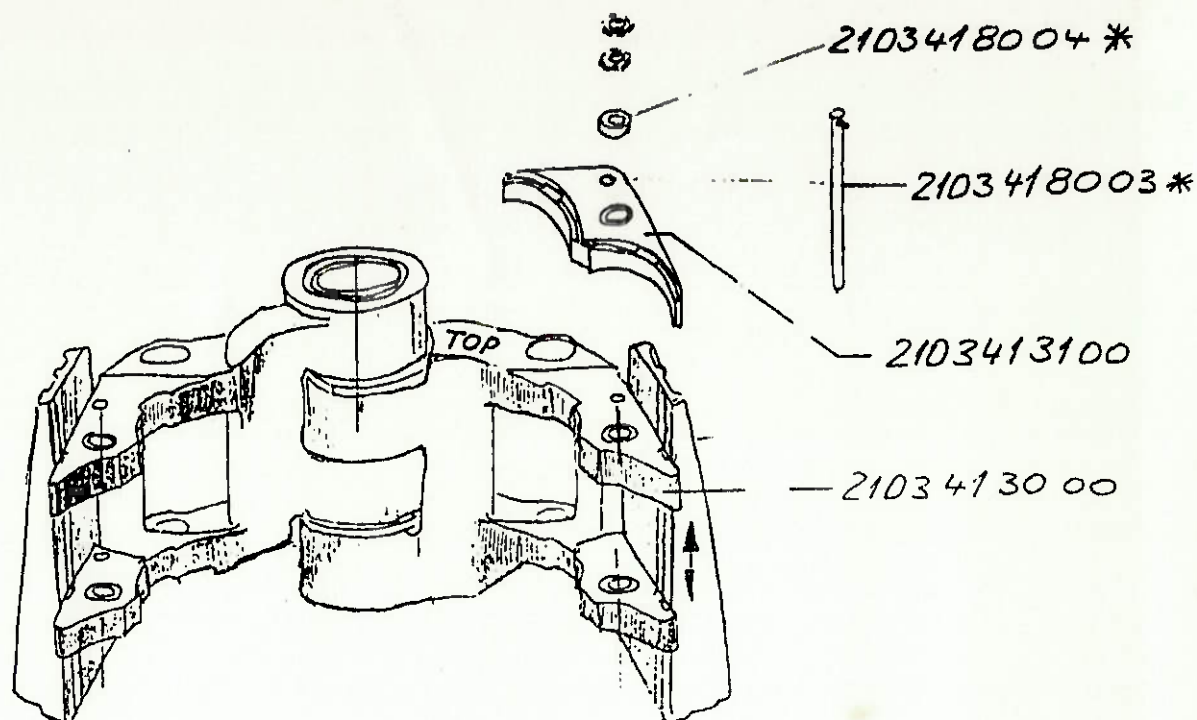
FIGURA 12



Ersatzteile
Spare Parts

21 03 41 25 00
FF-Kühlstück
Cooling Distributor

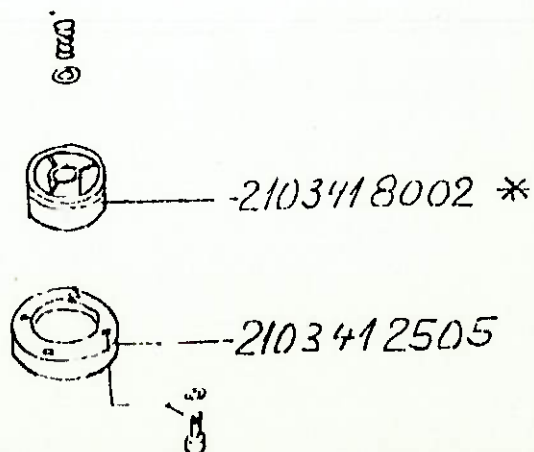
FIGURA 13



5 1/2 ISAK
FERTIGFORM-
HALTER

H = 153,75

2103411100

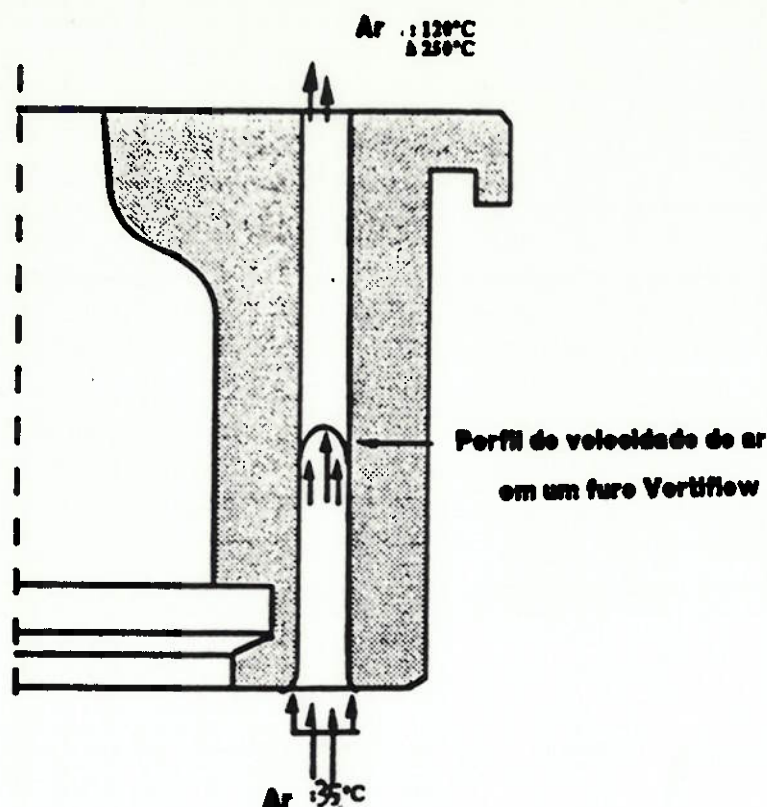


* - UMRÜSTTEILE

9.10.88 / l.m.

3) Vertiflow:

O sistema Vertiflow, desenvolvido pela americana EMHART-GLASS MACHINERY GROUP, é um arrefecimento a ar do tipo axial. Nele a convecção é interna ao molde pois o ar é forçado a passar por furos usinados axialmente no molde.



Nota-se que o sistema usa o mesmo princípio do Axial-Cooling mas aqui o ar é sugado do caixão da máquina até o equipamento Vertiflow que pressuriza o ar além de direcioná-lo para os furos do molde. Com a pressurização aumenta-se a velocidade do ar e tem-se uma melhor transferência de calor por convecção dentro dos furos.

Para melhor compreensão do funcionamento do mecanismo ver os desenhos esquemáticos apresentados a seguir, os números no texto se referem à figura 16.

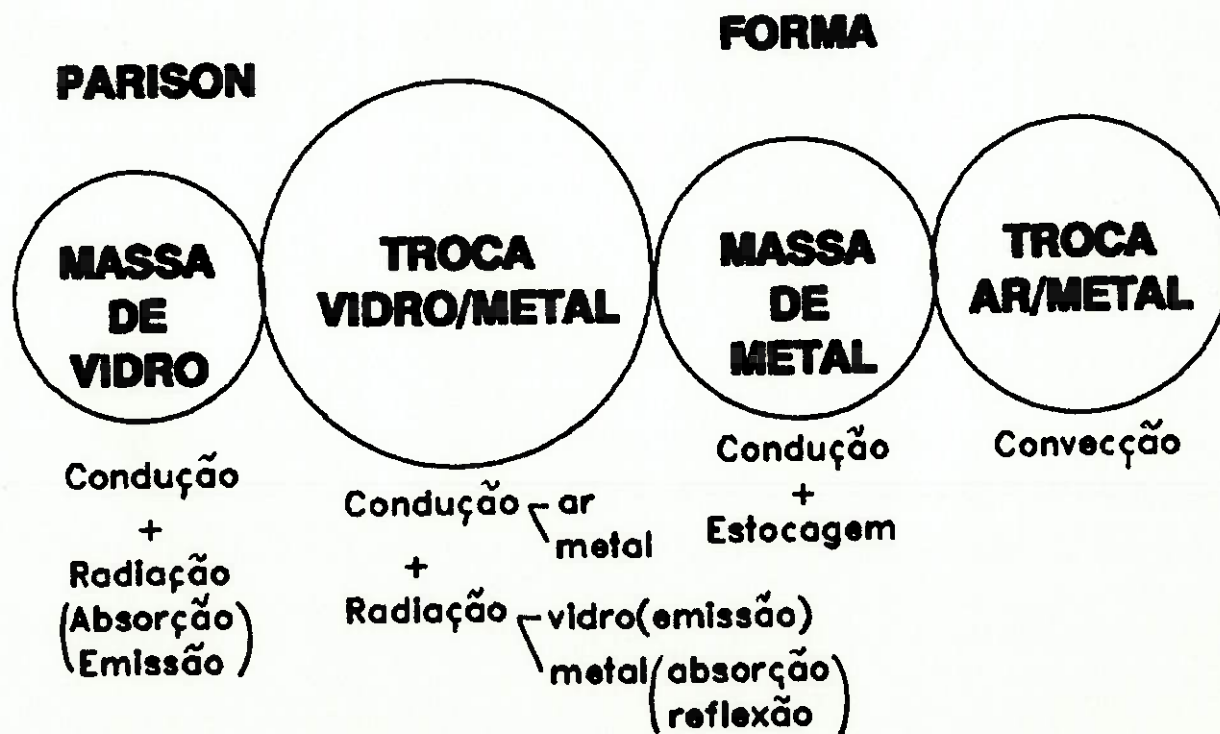
Ar de ventilação (4) de baixa pressão é conduzido pela abertura frontal do caixão da seção até as caixas plenum (3) do mecanismo. As caixas plenum garantem pressão constante para a ventilação nos furos do molde. A ventilação é temporizada na entrada das caixas plenum por dampers (7) acionados pneumaticamente.

Uma placa distribuidora (10) serve de apoio ao fundo de forma (9). A placa e o fundo de forma são usinadas com o mesmo padrão de furos do molde.

Das caixas plenum o ar é obrigado então a passar pelos furos usinados na placa distribuidora, fundo de forma e forma, sendo depois evacuado para o ambiente.

Não existe uma configuração única de furos. Para cada produto é desenvolvida a melhor configuração ou seja quantidade de furos, diâmetro dos furos, quantidade de coroas, e diâmetro das coroas.

Abaixo apresentamos a cadeia térmica do Vertiflow. É a mesma para o Axial-Cooling e os sistemas por "empilhagens". A única diferença é que para os sistemas axiais a convecção é interna aos moldes.



VERTI-FLOW - SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

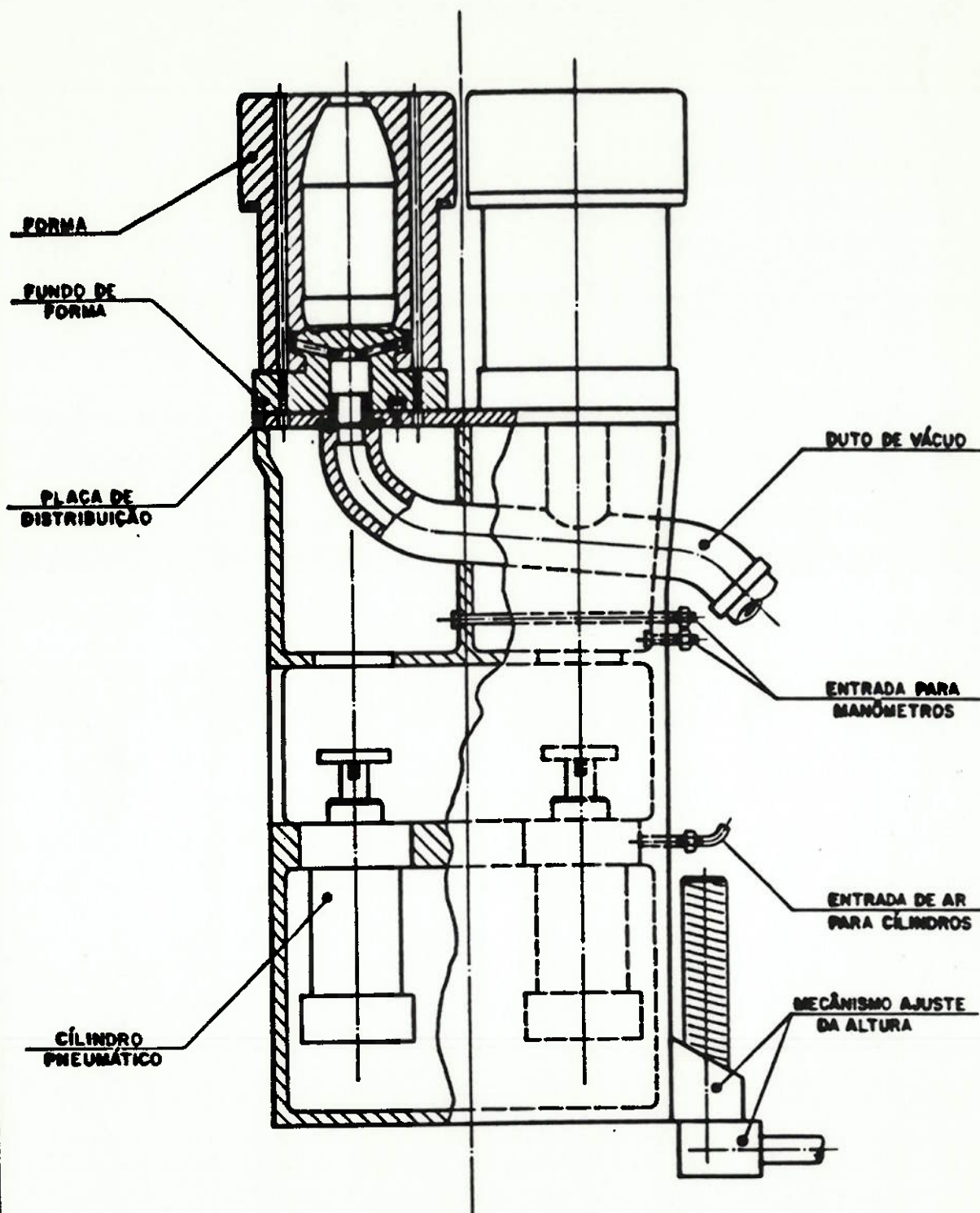
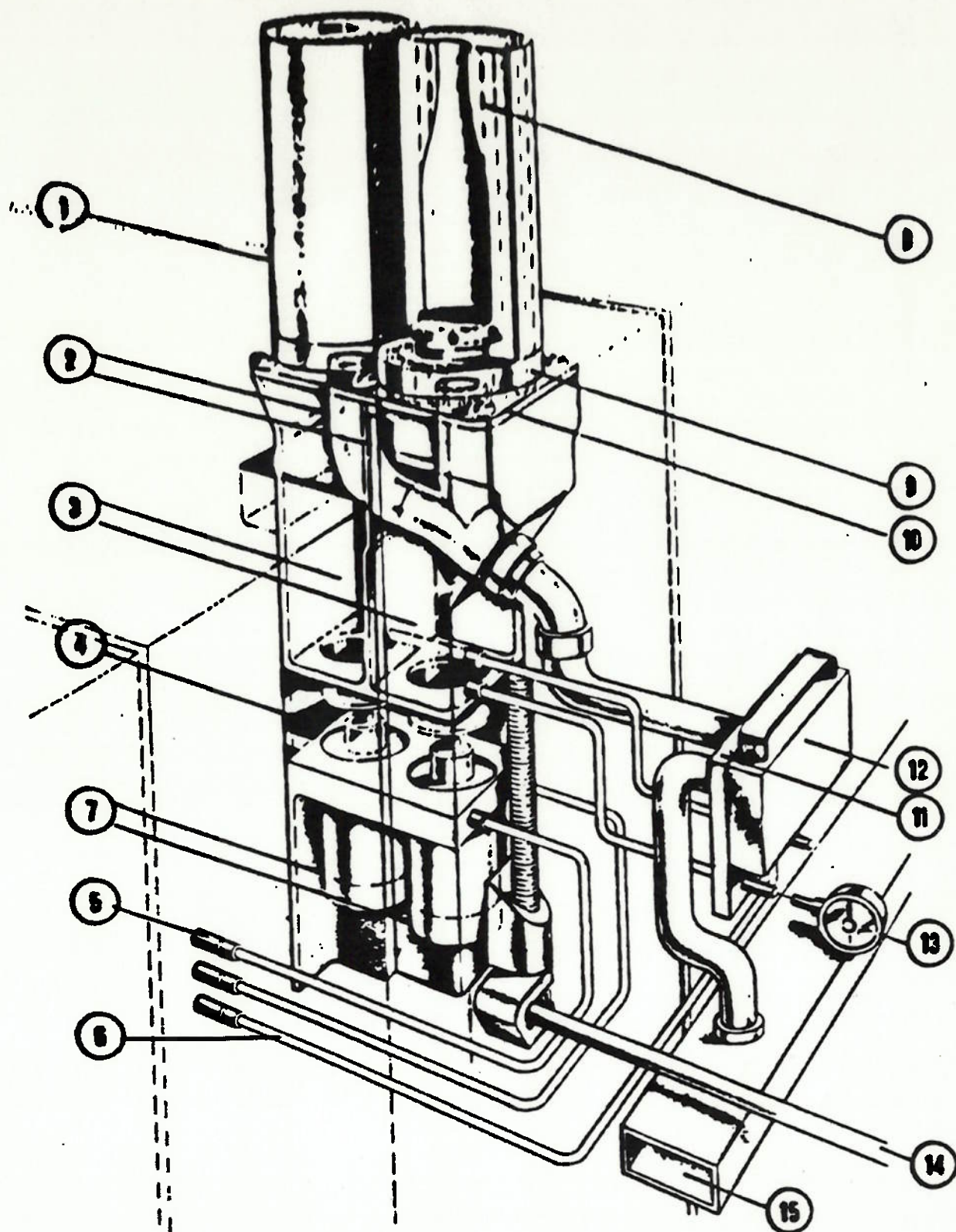


Figura 15



1. Caixa
2. Passagens para Vácuo
3. Caixas Plenum
4. Ar de ventilação do caixão
5. Ar piloto dos Dampers
6. Ar piloto do Vácuo
7. Dampers para ventilação intermitente
8. Moldes com furos verticais
9. Fundo de forma

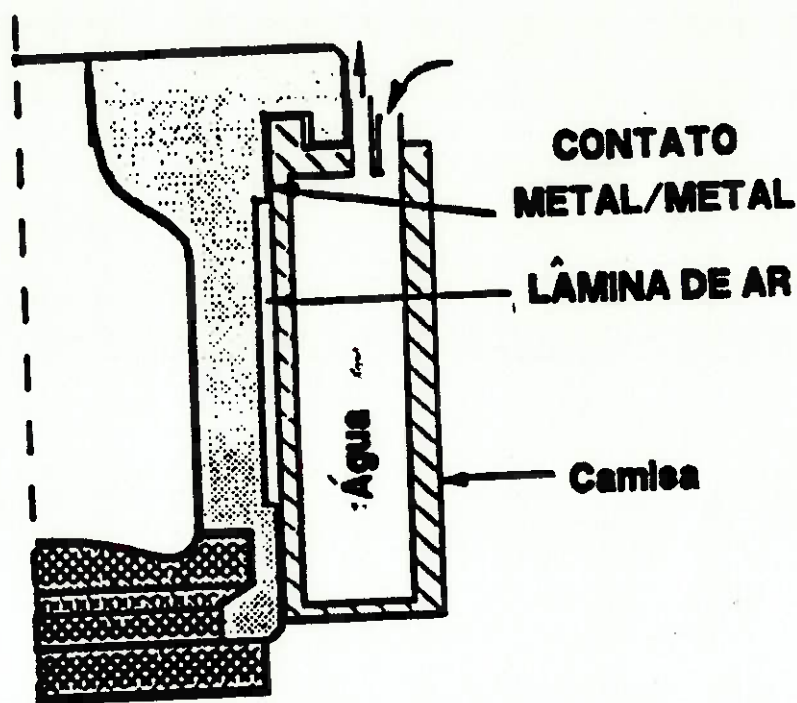
10. Placa distribuidora
11. Placa adaptadora para uso do vácuo
12. Unidade de válvula e filtro para uso do vácuo
13. Manômetro para controle da pressão nas caixas plenum
14. Mecanismo de controle de altura
15. Manifold de Vácuo.

Figura 16

4) FRAP:

Na busca de sistemas alternativos de arrefecimento de moldes a Vicasa, vidraria espanhola recentemente adquirida pela Saint-Gobain, propôs a utilização de água como fluido de trabalho e desenvolveu o sistema FRAP (nome derivado das iniciais FR e AP dos inventores do sistema).

O sistema consiste basicamente em envolver periféricamente os moldes com uma camisa de água. O molde é suportado pela camisa que por sua vez é fixa a braçadeira.

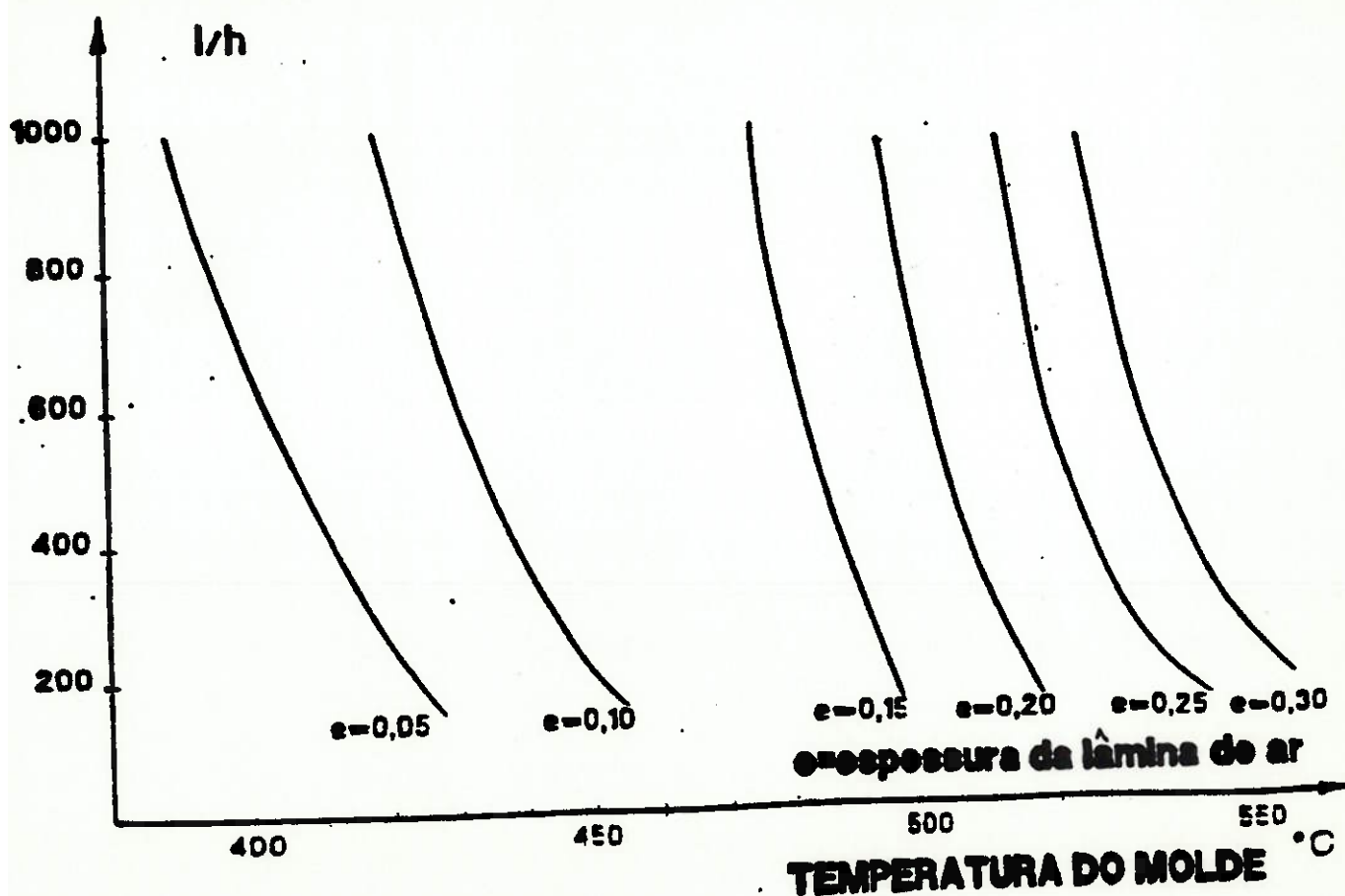


Intercala-se entre o molde e a camisa uma lâmina de ar. Esta lâmina funciona como isolante que regula a transferência de calor e evita o contato entre o molde e a camisa. As zonas de contato metal/metal devem ser as menores possíveis para se limitar o fluxo de calor por estas regiões.

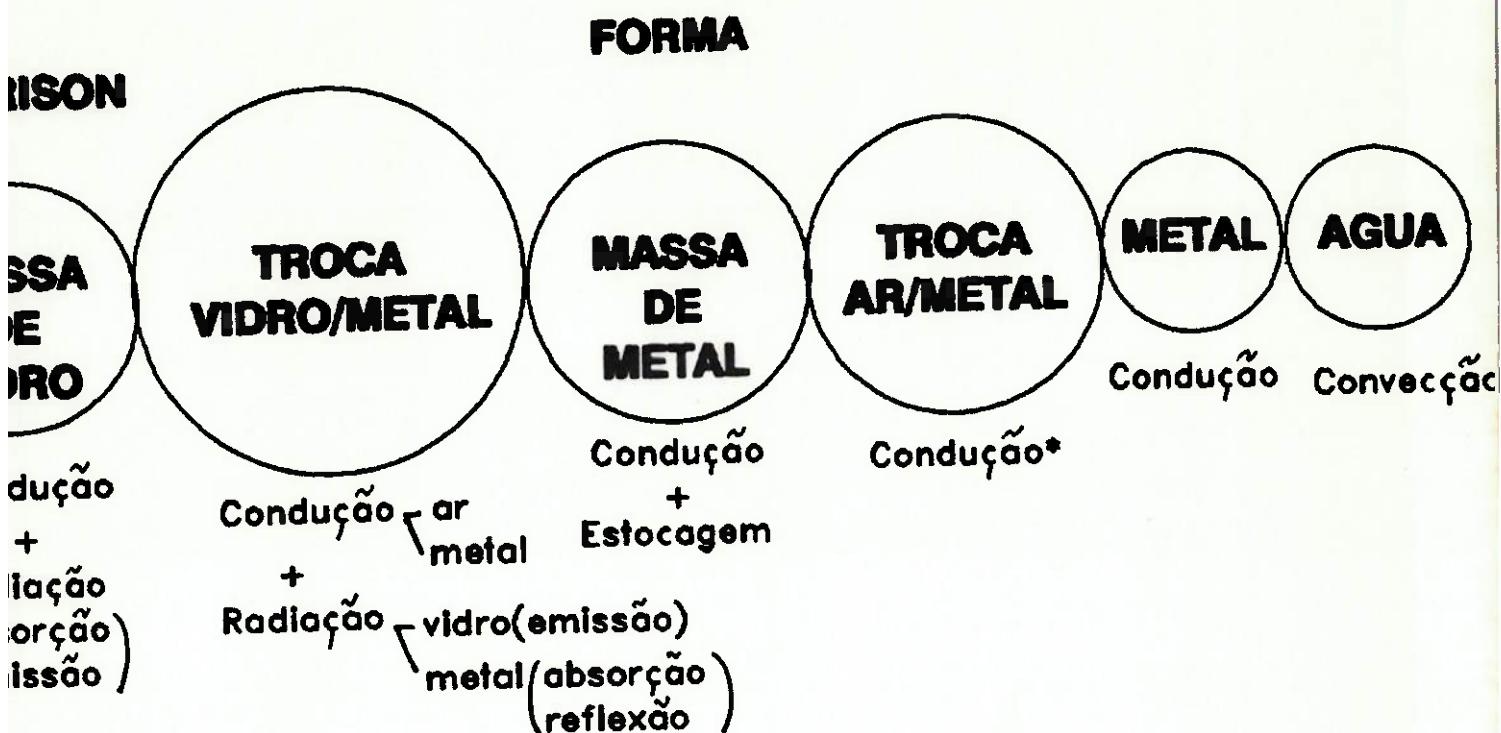
A alimentação de água é feita por tubulações rígidas externas à máquina ligadas por mangueiras flexíveis às camisas. Na saída da tubulação de água quente deve ser acoplada uma instalação para refrigerar a água. Um controlador de vazão e termômetros acompanham sempre o processo. A figura 19 mostra o esquema de instalação do equipamento na máquina.

O gráfico abaixo apresenta o princípio de funcionamento do sistema. Ver que a temperatura do molde depende principalmente da espessura da lâmina de ar, variando pouco com a vazão de água. A vazão é normalmente fixada de forma que a água aqueça moderadamente, em torno de 20 a 40 C, durante o processo. Deve se tomar sempre o cuidado de não produzir vapor e consequentemente provocar o risco de explosões dentro do circuito.

VAZÃO DE ÁGUA



Abaixo apresentamos a cadeia térmica para o sistema FRAP:



*Obs.: não há transferência de calor por convecção dentro da lâmina de ar por não haver movimentação.

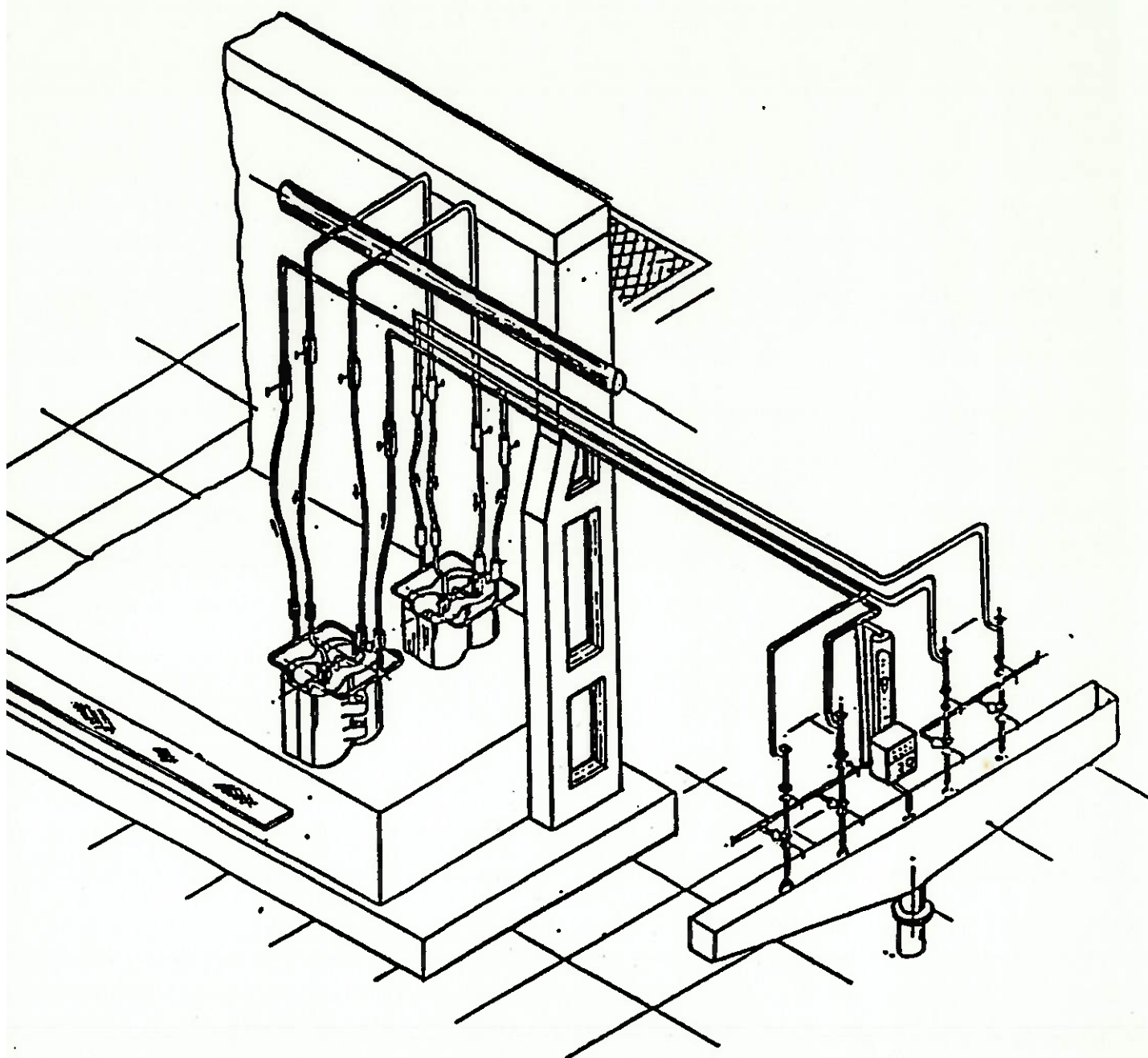


Figura 17: Instalação do FRAP na máquina.

IV - EXEQUIBILIDADE FÍSICA

Todos os sistemas apresentados devem ser adaptados às máquinas. Isto foi levado em conta no desenvolvimento dos sistemas porém é necessário aqui descrever quais modificações seriam necessárias às máquinas da Santa Marina para acoplar cada um deles e como fazê-lo.

Todos os sistemas que usam ar como fluido de trabalho são temporizados, isto é uma limitação para a instalação pois apenas as máquinas mais modernas da Santa Marina tem válvulas e linhas internas para controle de temporização. Para as máquinas mais antigas seria necessária a construção de linhas externas para isto, o que atrapalharia mais ainda o já limitado ambiente de trabalho inviabilizando a instalação.

A seguir indicamos como seria feita a instalação de cada sistema nas máquinas onde isto é possível.

1) Clássica temporizada:

Para acoplá-lo basta instalar o damper de controle de vazão na saída do caixão. As máquinas que foram construídas com linhas de temporização já prevem o uso do sistema e a instalação é extremamente fácil. Basta decidir qual tipo de damper de controle se deseja usar e instalá-lo.

b) Axial-cooling:

Instala-se como para a ventilação clássica o damper de controle. Mas aqui as "empilhagens" devem ser retiradas e no seu lugar prevê-se o acoplamento da peça de distribuição. Um pino é instalado onde a peça de distribuição se encaixa, lembrando que esta deve seguir o movimento de rotação do molde.

3) Vertiflow:

É sem dúvida o sistema mais fácil de ser instalado. O mecanismo é construído de forma a se acoplar no mecanismo de controle do atual suporte de fundo de forma. Para instalá-lo basta retirar o atual suporte de fundo de forma e substituí-

lo pelo mecanismo Vertiflow. Nada deverá ser feito à máquina.

4) FRAP:

Por sua vez o FRAP é o sistema mais complicado de instalar. Devem ser construídas linhas externas para o suprimento de água, além de se instalar todos os equipamentos de controle e refrigeração. Estes podem ser individuais por máquina e logo instalados ao seu redor ou podem ser unificados para todas as máquinas de um forno.

Nas atuais condições das unidades da Santa Marina qualquer das duas possibilidades é inviável pois os espaços são extremamente limitados o que inviabiliza atualmente a implantação do sistema FRAP.

V - VALOR ECONÔMICO

Como vimos a instalação da temporização da ventilação clássica é muito simples e os custos também são extremamente pequenos. Há apenas o custo dos dampers de temporização já que a mão de obra para a instalação pode ser a própria equipe de manutenção da unidade. Logo os custos de implantação são irrisórios diante às maiores velocidades que puderam ser obtidas com o novo sistema.

O sistema Axial-Cooling tem também os custos da temporização que como já vimos são bem pequenos. Além disso é necessária uma pequena modificação da máquina para instalação das placas de distribuição, mas que também pode ser feita pela equipe de manutenção da unidade com custo quase zero. Mas aqui como para o sistema Vertiflow temos que levar em conta o custo dos novos equipamentos, principalmente da usinagem dos moldes.

A usinagem axial dos moldes é bastante delicada com tolerâncias extremamente rígidas. São necessárias máquinas de furação horizontais de comando numérico ou um processo trabalhoso em máquinas convencionais. Para a Saint-Gobain os custos adicionais com a furação não saem hoje por mais de 20% do preço do molde já que os fornecedores se equiparam e

os custos de desenvolvimento e amortização dos equipamentos já foram absorvidos. Soma-se a isto o fato dos moldes furados (Vertiflow) terem vida maior que os convencionais e hoje o custo de um molde furado é no fim praticamente igual ao de um convencional.

Para o Brasil a situação é diferente já que não existem as máquinas adequadas e poucos são os fornecedores com tecnologia para realizar as furações dentro das tolerâncias exigidas. O custo de desenvolvimento da furação é estimado em torno de 300 US\$ por molde. E inicialmente os moldes furados custariam o dobro de um molde convencional. O preço de um molde varia com o seu tamanho e complexidade (material, geometria, gravações, etc.).

O custo de aquisição de um mecanismo Vertiflow é em torno de 2000 US\$ (já incluídas as taxas de importação). Logo para equipar uma máquina de 8 seções o custo seria de 16000 US\$, lembra-se que para instalar o Vertiflow não são necessárias modificações na máquina. Este custo é completamente absorvido na primeira campanha do equipamento o que o faz ter um grande valor econômico.

Já vimos que o sistema FRAP é inviável mas é interessante ressaltar que seus custos de implantação são bem maiores do que o dos outros sistemas pois é necessário instalar todas as tubulações, adquirir todos os equipamentos de controle e desenvolver e fabricar as camisas.

VI - VIABILIDADE FINANCEIRA

Não há problema quanto a viabilidade financeira já que todos os investimentos hoje estão virados para o ganho de produtividade. Somando-se ainda os baixos custos envolvidos vê-se que a implantação de um novo sistema de arrefecimento de moldes é uma excelente opção para se enfrentar a atual conjuntura da economia do país.

VI - CONCLUSÃO

No estudo de viabilidade vimos a necessidade de se substituir o atual sistema de arrefecimento dos moldes por "empilhagens" laterais. Apresentamos quatro soluções de sistemas de arrefecimentos desenvolvidos no exterior e que já vem sendo utilizados em fabricação com sucesso.

O sistema FRAP se mostrou inviável atualmente devido ao espaço que necessita e que as unidades da Santa Marina não dispõem hoje. Os outros sistemas são viáveis e no Projeto Básico iremos selecionar a melhor das opções apresentadas.

ANEXO 1

*** O VIDRO ***

CARACTERÍSTICAS E PROCESSO DE CONFORMAÇÃO

Este trabalho tem por objetivo familiarizar o leitor com o vidro e a vidraria.

Nele serão apresentadas noções básicas sobre o vidro, tais como: estrutura, tipos e matérias-primas.

Serão também apresentados os principais componentes de uma vidraria moderna, assim como o processo de conformação de garrafas.

ÍNDICE

I	- INTRODUÇÃO	4
II	- DEFINIÇÃO, ESTRUTURA E VISCOSIDADE	5
III	- TIPOS DE VIDRO E ACABAMENTOS	10
IV	- MATÉRIAS-PRIMAS	12
V	- A VIDRARIA	16
	1 - HISTÓRICO	16
	2 - FLUXOGRAMA DE UMA VIDRARIA	18
VI	- FORNOS	20
	1 - TIPOS DE FORNOS	20
	2 - ELABORAÇÃO DO VIDRO	25
VII	- FORNECEDORA (FEEDER)	26
VIII	- CONFORMAÇÃO DE GARRAFAS	29
IX	- A MÁQUINA IS	31
X	- OS MOLDES	32
XI	- RECOZIMENTO DO VIDRO - ARCHA	33
XII	- CONCLUSÃO	36
XIII	- APÊNDICES	37
	1 - AS VANTAGENS DO VIDRO PARA EMBALAGENS	38

I - INTRODUÇÃO

O vidro é um material muito especial, possui determinadas propriedades que o tornam extremamente versátil, e com infinidades de aplicação. Há séculos o homem o vem usando, graças a sua transparência, para janelas e vitrais.

Hoje em dia, porém, o vidro se presta às mais diversas aplicações, como a produção de lâ de vidro, material altamente isolante, térmico e acústico; e fibra de vidro para reforço de plástico, permitindo a utilização de plástico nos mais diversos produtos, desde carrocerias de automóveis até piscinas.

No campo das comunicações, a fibra ótica de vidro está revolucionando e, em poucos anos, deixarão de existir os tradicionais fios de cobre, que serão substituídos com inúmeras vantagens técnicas e econômicas.

No campo da ótica, a tecnologia vidreira desenvolveu lentes que são usadas para a correção da visão humana e como componente principal de telescópios e lunetas.

Mas uma das aplicações mais difundidas hoje em dia é a confecção de embalagens. É bem verdade que nos últimos tempos, muitos novos materiais surgiram para dividir esta função, como a lata, o papel e o plástico, porém as vantagens do vidro são insuperáveis. Em apêndice mostramos, à título ilustrativo, todas as vantagens do vidro e o porquê dele ser considerado como um material altamente nobre para embalagens.

II - DEFINIÇÃO, ESTRUTURA E VISCOSIDADE

Antes de mais nada é preciso se determinar o que é vidro. Das várias definições, a mais fiel e significativa é a de Morey: "Vidro é uma substância inorgânica obtida por fusão, que se encontra em uma condição contínua e análoga ao estado líquido desta substância, mas que, devido a uma variação reversível da viscosidade durante o resfriamento, possui uma viscosidade tão elevada que pode ser considerada rígida para todos os fins práticos."

A razão do vidro ser um material especial reside na estrutura desorganizada de suas moléculas. Nas substâncias cristalinas, os íons ocupam posições definidas, formando um retículo ordenado; os grupos de íons se repetem ao longo de qualquer plano, de uma maneira periódica e ordenada. Nos vidros os íons ocupam posições quaisquer ao acaso desordenado, e o retículo não obedece uma forma geométrica regular.

Decorrem daí uma série de nomes dados ao vidro, como líquido super-resfriado, sólido amorfo ou não-cristalino, solução sólida e outros. A rigor nenhum destes "apelidos" são corretos.

O vidro se comporta então de maneira diferente dos outros materiais durante o resfriamento. A figura 2.1 mostra a variação da temperatura de uma substância cristalina (curva a) e de um vidro (curva b), desde o seu estado de fusão até a solidificação completa. Para a substância cristalina observamos primeiro uma diminuição contínua da temperatura em função do tempo (intervalo AB), depois a temperatura permanece constante (intervalo BC). Este intervalo de tempo corresponde à temperatura em que a substância cristaliza ou ao ponto de fusão. A temperatura permanece constante porque o calor perdido é compensado pelo calor de cristalização (fenômeno exotérmico). No intervalo CD o processo de cristalização terminou, não há mais líquido e a temperatura continua diminuindo de uma maneira contínua até atingir a temperatura ambiente. Para o vidro, observamos que a temperatura varia segundo uma curva suave e contínua em função do tempo, desde o seu estado líquido até a temperatura ambiente. Não mostra o patamar correspondente ao ponto de fusão. É importante ressaltar que à temperaturas elevadas os vidros são líquidos verdadeiros, não oferecendo resistência as tensões de cisalhamento, com os átomos e moléculas se movendo livremente. A figura 2.2 mostra como varia o volume dos diferentes materiais e do vidro em função da temperatura.

É fácil entender agora porque a viscosidade é uma das propriedades que mais interessam os vidreiros, já que na fabricação ou no trabalho com o vidro o processo mecânico ou manual utilizado exige um vidro em determinada viscosidade.

A viscosidade varia com a composição do vidro e a temperatura. A figura 2.3 mostra como a viscosidade varia em função da temperatura para uma determinada composição. Lembremos que cada vidro determinado tem uma curva de viscosidade correspondente. Este gráfico nos permite entender como é trabalhado o vidro. Para se dar a fusão os componentes deverão ser aquecidos à temperaturas superiores à do chamado Ponto de Gota (Gob point, $\eta = 10^3$ Poises). E para que o vidro possa ser conformado ou "manipulado" ele deverá estar numa faixa de temperaturas entre a do Gob Point e a do chamado Ponto de Amolecimento (Softening Point; $\eta = 10^{7,6}$ Poises). Abaixo da temperatura do Softening Point o vidro não poderá mais ser conformado.

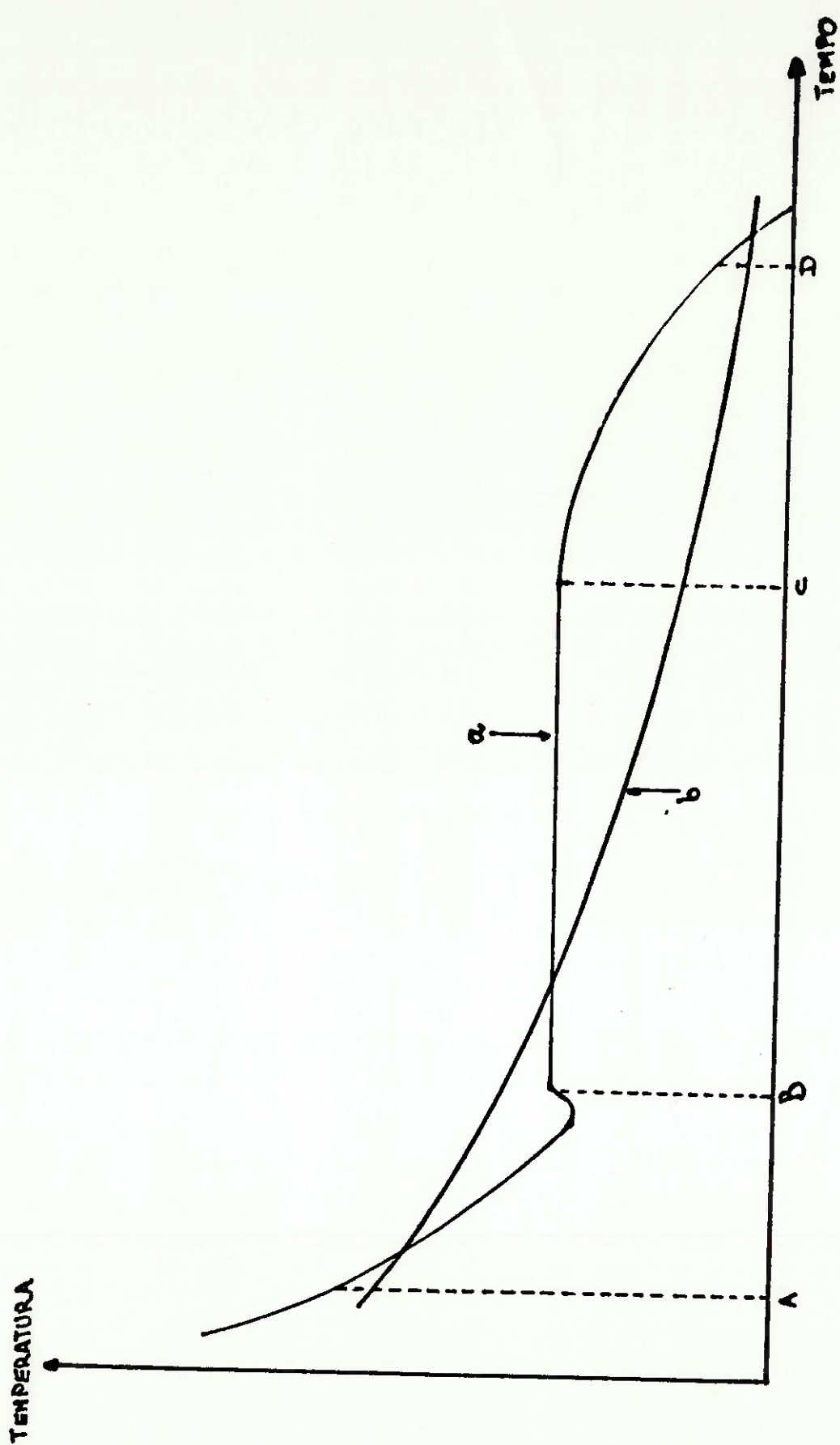


FIGURA 2.1: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE UMA SUBSTÂNCIA CRISTALINA (CURVA a) E DE UM VIDRO (CURVA b) DESDE SEU ESTADO DE FUSÃO ATÉ A SOLIDIFICAÇÃO COMPLETA.

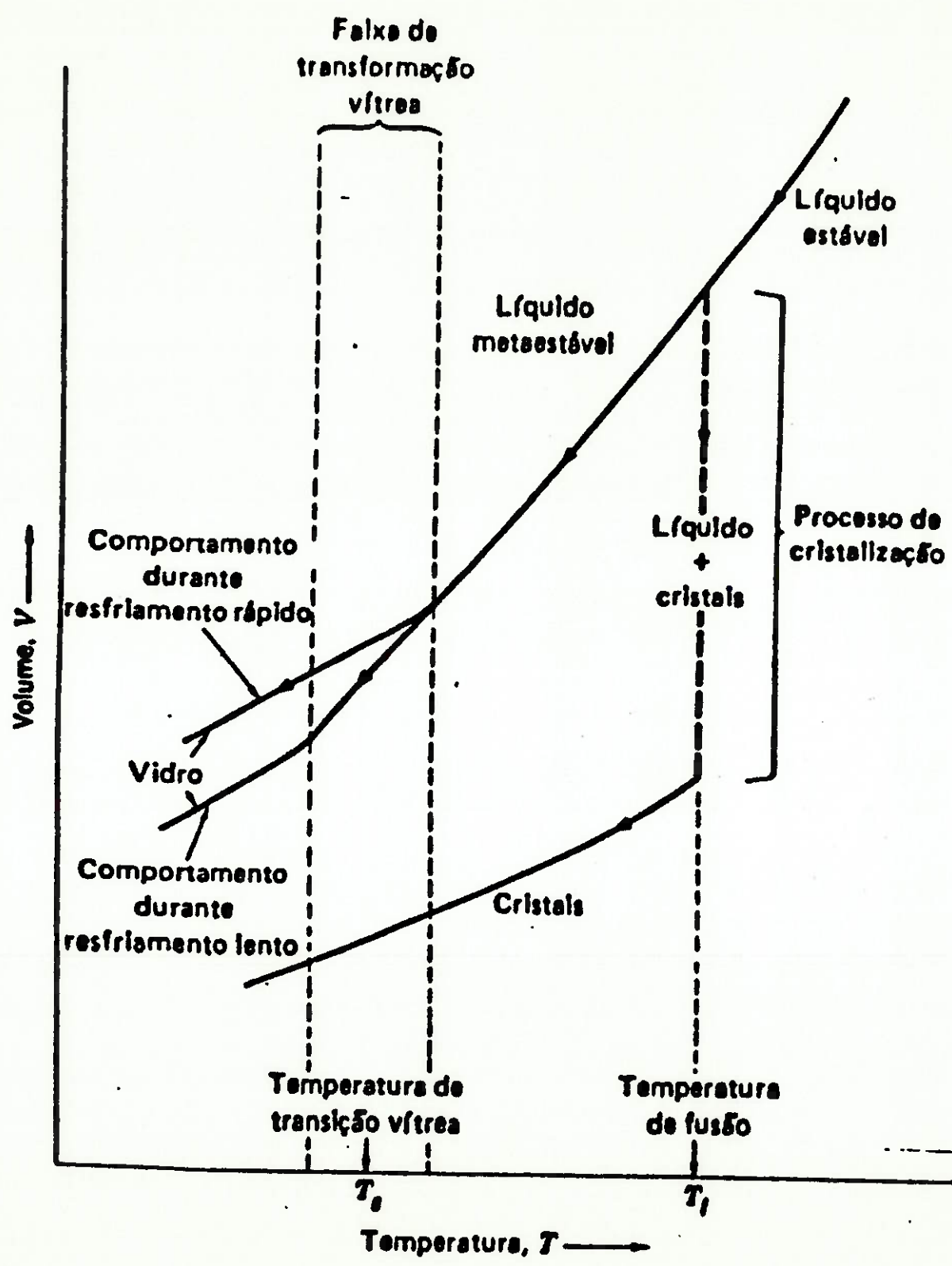


FIGURA 2.2: Mudanças de volume de um líquido durante a cristalização.

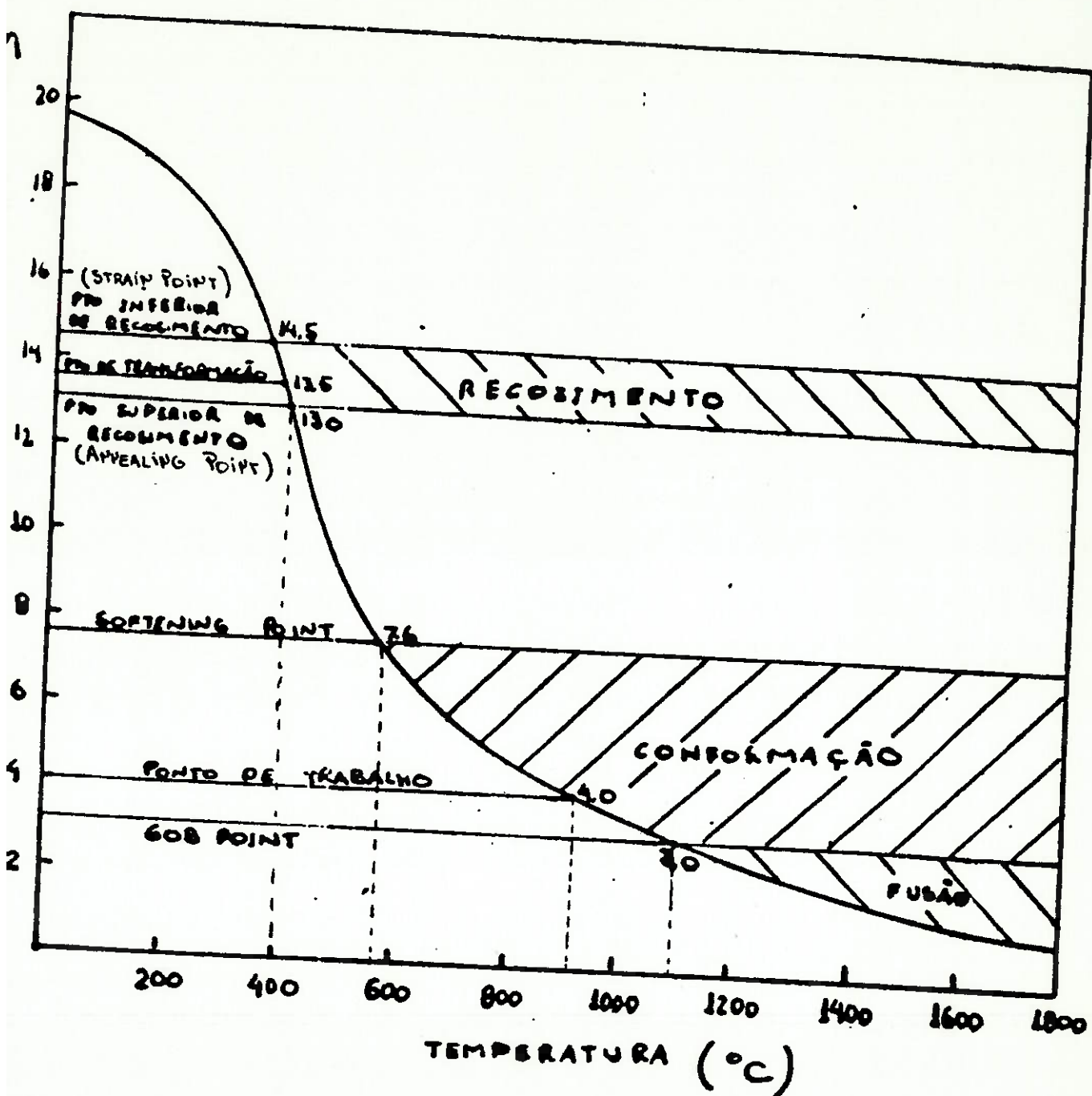


FIGURA 2.3: VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA UMA DETERMINADA COMPOSIÇÃO DE VIDRO.

III - T I P O S D E V I D R O E A C A B A M E N T O S

Os principais tipos de vidro quanto à composição são:

- Soda Cálcicos: Os principais elementos são a sílica (SiO_2) e o óxido de cálcio (CaO). São os vidros mais comuns, utilizados para a confecção de vidro plano e embalagens.

- Boro-Silicato: Os principais elementos são a sílica (SiO_2), e o óxido de boro (B_2O_3) e o óxido de sódio (Na_2O). São vidros de grande resistência ao choque térmico, utilizados na produção de artigos de mesa refratários, como o "Marinex" da Santa Marina e o "Pirex" da Corning. Possuem, também, grande resistência ao ataque químico, sendo utilizado em todos os utensílios de laboratório.

- Alumínio Boro Silicatos: Os principais elementos são a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de boro (B_2O_3). São vidros de grande resistência mecânica, utilizados na confecção de fibras para isolação (lã de vidro) e fibras têxteis de reforço.

- Ao Chumbo: Os principais elementos são a sílica (SiO_2), o óxido de chumbo (PbO) e o potássio (K_2O). São os vidros mais nobres, pelo seu brilho e transparência. São utilizados para fazer artigos de mesa de luxo, e também são utilizados em lentes, pelas suas propriedades óticas.

Escolhemos a seguir, sem mencionar todos, acabamentos dados aos produtos da indústria e vidreira.

- **Espelho:** sobre um vidro de qualidade ótima são projetadas:
- uma camada de prata dando o efeito de espelho;
- uma camada de cobre, protegendo a prata;
- uma camada de tinta, para proteger o cobre.

No início, as camadas eram colocadas com pincéis, hoje existem máquinas de espelhação automáticas.

- **Vidro metalizado:** muito utilizado na arquitetura de hoje. Na saída da máquina de estiragem, com o vidro ainda quente (800°) projeta-se um sal metálico colorido, dando ao vidro um aspecto meio refletor.

- **Vidro Laminado:** utilizado pela indústria automobilística. Uma camada de plástico (acrílico) é colocado entre 2 lâminas de vidro. Quando aquecido, ela tornar-se transparente, aderindo fortemente às lâminas. Esse produto tem a vantagem de que, quando quebrar, os pedaços de vidro ficam colados ao plástico, não se estilhaçando.

- **Vidro Isolante:** uma camada de ar perfeitamente seca é armazenada entre duas folhas de vidro presas por uma moldura de metal. Uma janela deste tipo melhorará bastante o isolamento térmico e acústico.

IV - MATÉRIAS - PRIMAS

Grande parte das matérias-primas utilizadas para a produção do vidro são minerais existentes em abundância na natureza, e dentro desta classe, os principais são:

- **Areia:** A areia é constituída praticamente só de sílica (SiO_2), que é a base da grande maioria dos vidros. Pode ser retirada de praias tanto do mar como de rios, ou de jazidas situadas em vales onde se acumularam através dos tempos. Muitas vezes esta areia depositada se mistura a um aglutinante natural, formando arenitos.

Ao invés da areia, também pode utilizar-se quartzo, ou seja, uma rocha também constituída de sílica, que é moída na granulometria desejada.

- **Calcário:** É uma rocha constituída de carbonato de cálcio (CaCO_3), que é extraída na forma de pedreiras. A rocha é britada e moída, até a obtenção da granulometria desejada. É o fornecedor de cálcio (CaO).

- **Dolomita:** É uma rocha constituída de um carbonato duplo de cálcio e magnésio (CaMgCO_3). Assim como o calcário, é extraído em jazidas na forma de pedreiras, sendo em seguida britada e moída. É a fornecedora do óxido de magnésio (MgO).

- **Feldspato:** É também um mineral constituído de um aluminossilicato de sódio e potássio ($\text{KNa(AlSi}_3\text{O}_8)$). A razão de sua utilização é pelo óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3) que ele fornece. Além da alumina, o feldspato fornece outros óxidos que fazem parte da constituição do vidro: SiO_2 , Na_2O e K_2O .

O feldspato também é uma rocha ou um minério, porém não existem jazidas muito grandes, pelas suas próprias características, obrigando a ter-se diversos fornecedores para suprir a demanda.

- **Boratos:** Para obtenção do óxido de Boro (B_2O_3) utilizam-se boratos, sendo os mais utilizados o Borax pentahidratado, borax anidro e ácido bórico. Esses boratos são produtos industrializados a partir de minérios que não existem no Brasil, sendo, portanto, importados, o que aumenta muito o custo dos vidros que o utilizam.

- Alumina calcinada: Quando não se pode utilizar o feldspato, por causa dos diversos óxidos que este aporta, ou seja, se o vidro não admitir, na sua análise, esses outros óxidos, utiliza-se a alumina calcinada como fonte de Al_2O_3 .

- Barrilha ou carbonato de sódio (Na_2CO_3) é o principal fornecedor de óxido de sódio. Embora seu percentual em peso não seja tão grande, representa o maior custo entre as matérias-primas dos vidros sodo cálcicos. Podemos dizer que, aproximadamente 60% do custo de uma composição é devido à barrilha.

- Lixívia: Como tentativa de redução de utilização de barrilha, introduziu-se na composição, lixívia de soda cáustica, que é uma solução líquida de hidróxido de sódio a 50% ($NaOH$), e também fornece o óxido de sódio (Na_2O) para o vidro. O que diferencia, e muitas vezes dificulta a utilização da lixívia, é o fato de ser a única matéria-prima líquida. Porém, já foi comprovado que pode obter-se vantagens técnicas com sua utilização.

Além dessas matérias-primas principais, que entram em maior quantidade, existem outras que, embora utilizadas em menor proporção, são de grande importância na elaboração do vidro.

- Afinantes: Normalmente é utilizado o sulfato de sódio para os vidros sodo cálcicos, mas podem ser usados também sulfato de cálcio e sulfato de bário, ou cloreto de sódio, que nada mais é que o sal para vidros borosilicatos. A finalidade de utilizar os afinantes é a seguinte: o vidro é formado pela fusão de matérias-primas pulverulentas, portanto existe uma quantidade grande de ar que está entre os grãos que, após a fusão, deve ser expulso para não se tornar bolhas. Da mesma forma, várias matérias-primas durante o aquecimento, desprendem gases, e esta é a razão pela qual a composição perde cerca de 15% em peso, quando se transforma em vidro, e parte destes gases também podem ficar retidos na massa, dando origem a bolhas.

Os afinantes são matérias-primas que também soltam gases, porém, com uma característica, somente a altas temperaturas e de uma maneira violenta, formando grandes bolhas, e com grande força ascensional. Não podemos esquecer que o vidro, mesmo na fusão, é muito viscoso, e as bolhas grandes ao subirem incorporam as bolhas pequenas que ficaram retidas, além de promover uma agitação mecânica do banho.

Desta maneira o vidro fica afinado, ou seja, livre de bolhas e homogêneo.

- Colorantes e descolorantes: Para dar cor ao vidro, adicionamos na composição, combinação de óxidos colorantes, como por exemplo: óxido de ferro, cobalto, manganês, níquel, cromo, etc.

Por outro lado, quando queremos um vidro incolor, tudo o que devemos fazer é evitar que qualquer um desses óxidos colorantes entre na composição, o que é quase impossível, pois, principalmente o óxido de ferro, que confere uma cor esverdeada ao vidro, está sempre presente nas matérias-primas, que na maioria são minerais. Devido a isso, somos obrigados a usar descolorantes, que na verdade não tiram a cor, mas a disfarçam. Os descolorantes mais utilizados são o selênio e o óxido de cobalto.

PAPEL DOS ÓXIDOS CONSTITUINTES DO VIDRO (Ver figura 4.1)

SiO_2 e B_2O_3 : São os vitrificantes, ou seja, óxidos, que devido à características de sua estrutura molecular, têm a capacidade de dar origem ao vidro.

A sílica (SiO_2), sozinha, dá um bom vidro, com boas qualidades, porém, exige temperaturas muito elevadas para fusão e conformação, necessitando de fornos especiais e economicamente inviáveis. No caso do óxido de boro (B_2O_3), ele sozinho, dá um vidro muito solúvel, sem aplicação, sendo utilizado junto com a sílica, nos vidros chamados borosilicatos.

Na_2O ; K_2O : O óxido de sódio e o de potássio são óxidos alcalinos, e têm a função de fundentes, ou seja, sua adição permite que a sílica seja fundida a temperaturas inferiores do que quando só, tornando-se um processo tecnologicamente viável. O problema, que surge em um vidro que contém somente sílica e alcalina, é a solubilidade, ou seja, este vidro, em contato com a água, vai se dissolvendo, perdendo a característica tão importante da transparência e superfície lisa.

CaO ; MgO : São chamados de estabilizantes, pois sua adição confere uma estabilidade nas propriedades do vidro, evitando que o mesmo seja solúvel, como no caso de um vidro só com sílica e óxido de sódio ou potássio.

Al_2O_3 : Também é um estabilizante, e em pequenas quantidades, confere aumento da resistência química e mecânica, sendo presente em quantidades consideráveis, nas fibras de reforço, onde a resistência mecânica é fundamental.

ELEMENTOS	VISCOSIDADE	DENSIDADE	DUREZA MECÂNICA	RESISTÊNCIA		
				AO CHOQUE-TÉRMICO	AO CHOQUE-MECÂNICO	AO VAPOR D'ÁGUA
B_2O_3	↑	-	↑	↑	-	↑
Na_2O	↑	↑	↑	↑	↑	↑
CaO	↑	↑	↑	↑	-	↑
Al_2O_3	↑	↑	↑	↑	↑	↑
SiO_2	↑	↑	↑	↑	-	↑
Li_2O	↑	↑	↑	↑	↑	↑

aumenta



diminui

Figura 4.1: Influência dos óxidos nas principais propriedades do vidro

V - A V I D R A R I A

1. HISTÓRICO

O descobrimento do vidro é muito incerto. Sabe-se que os primeiros vidros usados pelos homens foram as obsidianas, produtos vítreos naturais, provenientes do esfriamento rápido de lavas vulcânicas, de coloração verde escura e de aspecto brilhante, porém opaco. As obsidianas foram usadas, principalmente, como material de corte, lâminas, pontas de lança e flechas, e os de superfícies polidas até como espelhos.

Plínio, o Antigo, grande naturalista romano publicou, no início da era moderna, uma "História Natural", enciclopédia da ciência na Antiguidade, atribuindo a primeira obtenção de vidro aos Fenícios. Segundo ele, navegadores Fenícios tiveram que aportar numa costa para reparos nas embarcações. Sendo a costa deserta e arenosa, para preparar as refeições, apoiaram os caldeirões sobre blocos de salitre (provavelmente nitrato de sódio), entre os quais fizeram fogo. Após um certo tempo, observaram um líquido vermelho escorrer entre o fogo, que ao esfriar tornava-se sólido (vidro). Tecnicamente, o fato é aceitável, pois a madeira, ao ar livre, pode gerar temperaturas de 1100° - 1200° C, e o eutético do sistema soda+sílica é 793° C, e o do sistema soda+sílica+cálcio é de 725° C.

Os vidros mais antigos que se conhecem, fabricados e moldados pelo homem são: uma pérola de vidro de 12.000 A.C. (Egito), e um amuleto de vidro verde, do ano 7.000 A.C. (Egito). Na era ptolomaica, e com a continuação na era romana, temos os primeiros conhecimentos da indústria do vidro na Mesopotâmia, na Síria e na Palestina. Os chineses antigos conheciam o vidro de chumbo. Os métodos de moldagem eram muitíssimos primitivos. Um dos mais usados, para o vidro oco, era o de moldar o vidro, no estado viscoso, sobre um bastão de madeira protegido por uma espessa camada de areia fina. Os vidros transparentes e incolores eram raríssimos.

Kisa (historiador romano), data a invenção da vara de assopro um pouco antes da era cristã. Com esta técnica, observamos um incremento industrial e um melhoramento na qualidade do vidro, que transformou um artigo de luxo em um artigo de necessidade.

Segue depois, um longo período sem evolução, na Europa.

Enquanto isto, os árabes desenvolveram esta indústria e aplicaram para a fabricação de pesos.

No Século XII, talvez por consequência das Cruzadas, a indústria de vidro desenvolveu-se rapidamente, em Veneza, que se tornou o centro da indústria de vidro na Europa, e manteve o monopólio por 4 séculos.

As indústrias foram reunidas na Ilha de Murano, e severas medidas foram tomadas para manter o segredo. O operário que trabalhava na indústria não podia mais sair da ilha.

EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA DO VIDRO:

O que marca a época da divulgação da tecnologia do vidro, e com uma consequente evolução, é a publicação, muito atrevida para a época, do livro de Neri, em Florença, "L'ARTE VITRARIA", em 1612. A partir desta data, as indústrias de vidro multiplicaram-se na Europa. Na Inglaterra, substituiu-se a madeira pelo carvão, obtendo-se, assim, temperaturas mais elevadas. Com Lavoisier, e o desenvolvimento da química, foi possível o estudo e a racionalização da matéria-prima e da composição do vidro. No Século XIX, com os trabalhos dos físicos Scott, Abbe e Winkelmann, foram reveladas as propriedades físicas do vidro, e, como consequência, o desenvolvimento da indústria do vidro ótico.

Recentemente, principalmente nos quatro últimos decênios, houve uma verdadeira revolução industrial da manufatura do vidro com o desenvolvimento dos tanques contínuos de produção e de máquinas automáticas, que substituíram total e perfeitamente os movimentos da mão do homem na moldagem. No vidro oco, o sopro humano foi substituído pelo mecânico a ar comprimido. No vidro plano, surgiram as máquinas de estiragem que substituíram os rolos manuais.

O desenvolvimento do vidro foi lento, por se tratar de um composto extremamente complexo. Até o início do século, na falta de bases científicas e tecnológicas, imperava o empirismo prático, mantido e transmitido como "segredo vidreiro" de família em família. Problemas como homogeneidade da massa, composição, defeitos, etc., eram tratados a luz de experiências, muitas vezes fortuitas.

2. FLUXOGRAMA DE UMA VIDRARIA

A figura 5.1 apresenta o fluxograma de uma vidraria moderna. As matérias-primas, ao chegarem à fábrica, são estocadas em lotes, que, dependendo das instalações, podem estar em baias ou silos. Completado um lote é tomada uma amostragem representativa com a qual determina-se a análise química e granulométrica do material.

Com as matérias-primas do estoque alimentam-se os silos da usina de composição, que por sua vez, alimentam as balanças que fazem a dosagem das matérias-primas. Esta dosagem é determinada através do cálculo de composição.

Quando se deseja produzir um determinado tipo de vidro, com base na teoria ou experiência anterior, é necessário determinar qual será a análise química que este vidro deve ter, pois todas as propriedades e características do vidro dependem de sua composição química. A partir desta análise química, chamada Análise Química Padrão, e das matérias-primas disponíveis, é feito o cálculo da composição do vidro.

Com a composição determinada, as matérias-primas são pesadas e passam para o misturador. No misturar, existe um tempo de mistura seca e um tempo de mistura úmida, quando são injetadas a água e/ou a lixívia. O caco que tem origem em diversos pontos do processo (reprova do controle de qualidade, trocas de fabricação, quebras, etc) é reaproveitado como matéria-prima, sendo adicionado à composição na saída do misturador.

A composição pronta é conduzida ao forno, onde, após a enfora, passa por três processos que se sucedem ao longo do forno, sem divisão de localização bem definida; a fusão, que é a passagem para o estado líquido, a afinagem, que é a retirada de bolhas e homogeneização da massa, e o acondicionamento, que é a passagem do vidro à temperatura de conformação.

Estando o vidro elaborado, e na temperatura adequada, ele é conformado por sopro, prensagem ou estiragem, a fim de adquirir a forma do produto final.

Após a conformação, os artigos são levados a um forno de recozimento que tem a finalidade de esfriar, lenta e homogeneamente, os artigos, e dessa forma, evitar tensões que fragilizam os produtos.

Na saída do forno de recozimento ou archa, os produtos são escolhidos, sendo reprovados os defeituosos e embalados para serem expedidos aos clientes.

A seguir cada elemento que compoe a vidraria será analisado individualmente. Porém, com um enfoque especial para a fabricação de vidro oco e, mais precisamente, garrafas.

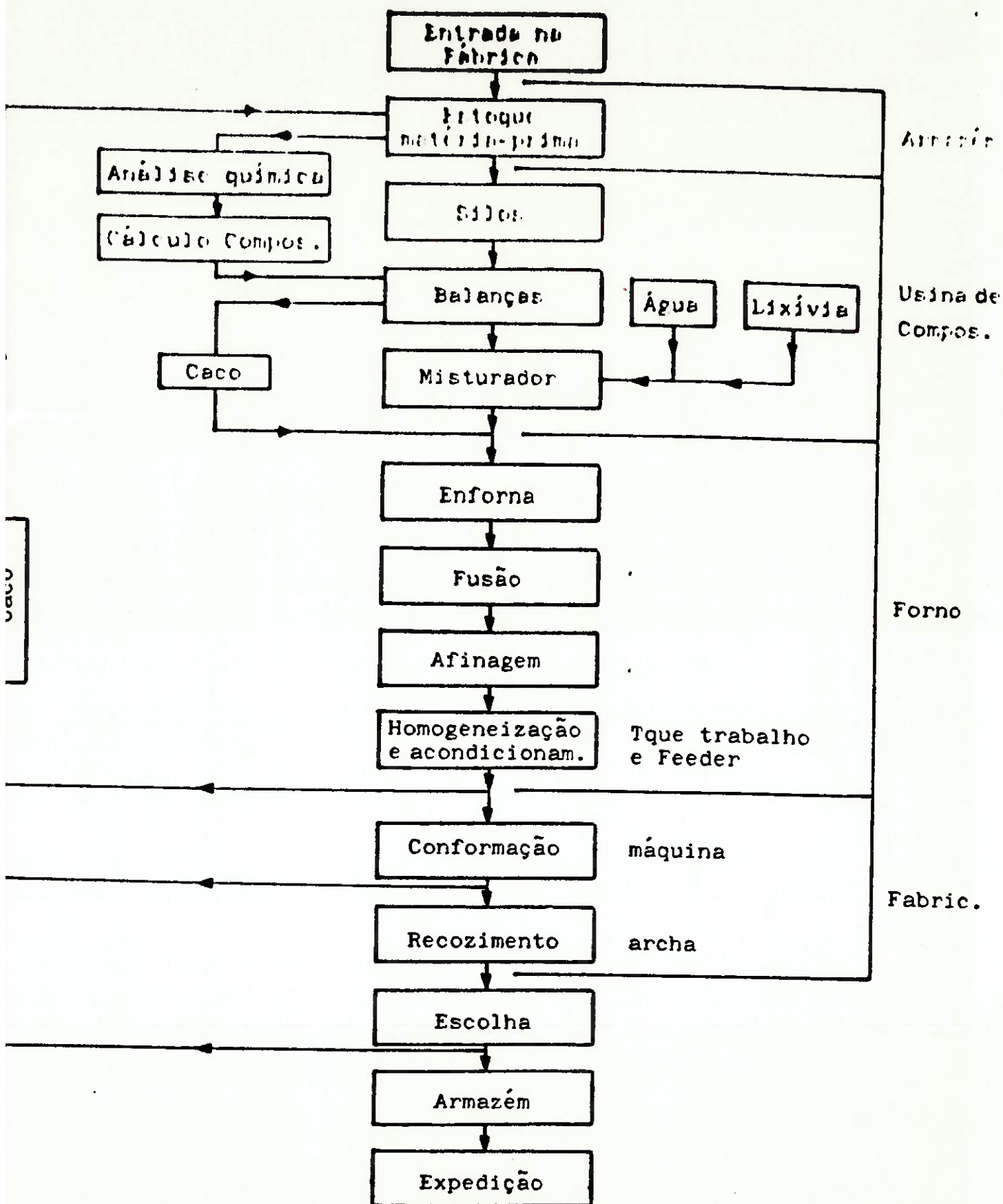


Figura 5.1 : Fluxograma de uma vidraria

VI - F O R N O S

1. TIPOS DE FORNOS

Existem vários tipos de fornos utilizados em vidrarias, e podemos classificá-los de várias maneiras:

A - Quanto ao regime de utilização:

Intermitentes: são, geralmente, fornos pequenos existentes em vidrarias manuais, ou para produção de vidros muito especiais. Eles recebem uma carga, realizam a fusão desta e são esvaziados. Normalmente, esta operação repete-se uma vez ao dia.

Contínuos: são fornos mais comuns, onde é enforcada a composição, e extraído o vidro continuamente, funcionando sem parar desde o início da campanha até a parada para reparação do forno.

B - Quanto a forma de aquecimento

B.1 - Combustão: a energia é introduzida através da combustão de óleo ou gás em um espaço existente sobre o banho de vidro, que recebe o calor da irradiação das chamas. Os fornos a combustão dividem-se em dois tipos:

a. Regenerativo: quando funciona em ciclos, ou seja, por um período, a fumaça originária da combustão passa através de uma empilhagem de material refratário, aquecendo-o, antes de ir para a chaminé. Ao mesmo tempo, o ar que vai combinar com o combustível, para produzir a chama, está se aquecendo em uma outra empilhagem, que foi aquecida pela fumaça no ciclo anterior. Ao final do ciclo, que pode ser de 20 ou 30 minutos, altera-se novamente o sentido da combustão, e pela empilhagem onde passou fumaça, que a aqueceu, agora vai passar ar frio, e pela empilhagem que passou o ar que a esfriou vai passar fumaça.

b. Recuperativo: não possui ciclos como no anterior, porém, a fumaça, antes de ir para a chaminé, passa por um grande tubo, dentro do qual existem vários pequenos tubos, por onde passa o ar que vai ser utilizado na combustão. Desta maneira, parte do calor da fumaça passa para o ar que vai ser utilizado na combustão.

B-2 - Elétricos: são fornos que utilizam a energia elétrica, como forma de aquecimento. São introduzidos eletrodos dentro do banho de vidro, e pela passagem de corrente entre eles, o vidro se aquece por efeito "joule", pois embora à temperatura ambiente o vidro seja um mau condutor de eletricidade, podendo-se mesmo dizer que é um isolante, à altas temperaturas, no estado de fusão, ele é bom condutor.

Usa-se também eletrodos nos fornos à combustão, quando deseja-se uma maior extração ou para aquecimento em regiões localizadas.

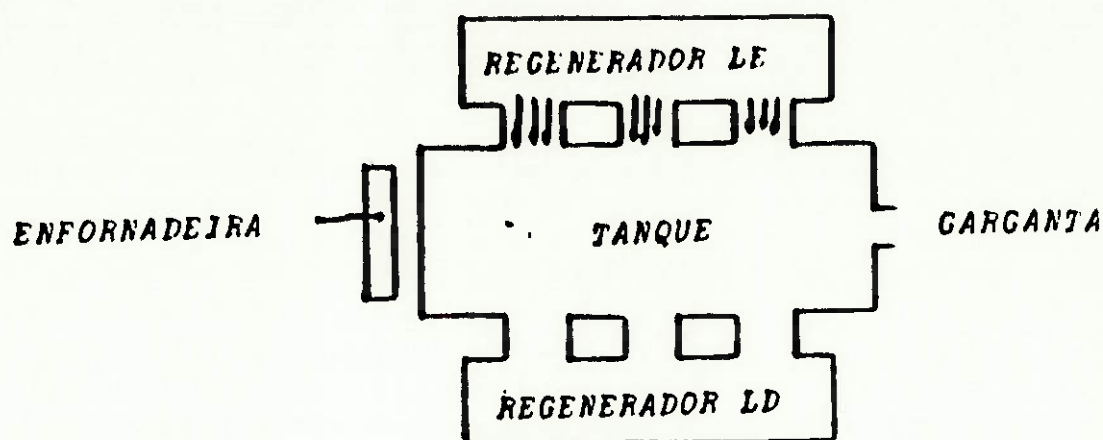
C. Quanto à posição dos queimadores

C.1 - Queimadores laterais: neste caso, a enforna se faz pela traseira do forno, e os queimadores e câmaras, que são regiões que contém as empilhagens, situam-se nas laterais. Havendo combustão da direita para a esquerda ou da esquerda para a direita, conforme os ciclos de combustão. O número de queimadores depende do tamanho do forno.

C.2 - Queimadores posteriores ou ferradura: os queimadores, sempre em número de dois, estão na traseira do forno, e a enforna dá-se pela lateral. Conforme o ciclo, a combustão dá-se na esquerda ou na direita.

A figura 6.1 apresenta alguns tipos de fornos utilizados pela Cia. Vidraria Santa Marina.

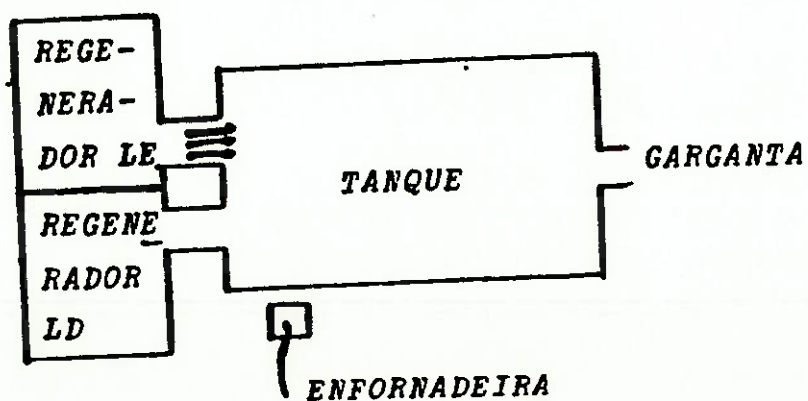
1. QUEIMADORES TRANSVERSAIS - SIDE PORT



OBS: FORNO COM REVERSÃO DE CHAMA

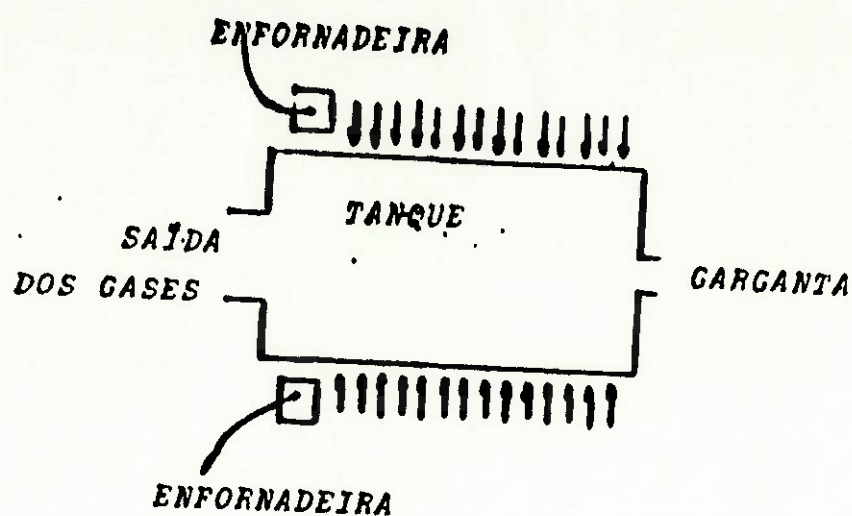
(↓ = MAÇARICO)

2. FERRADURA - END PORT



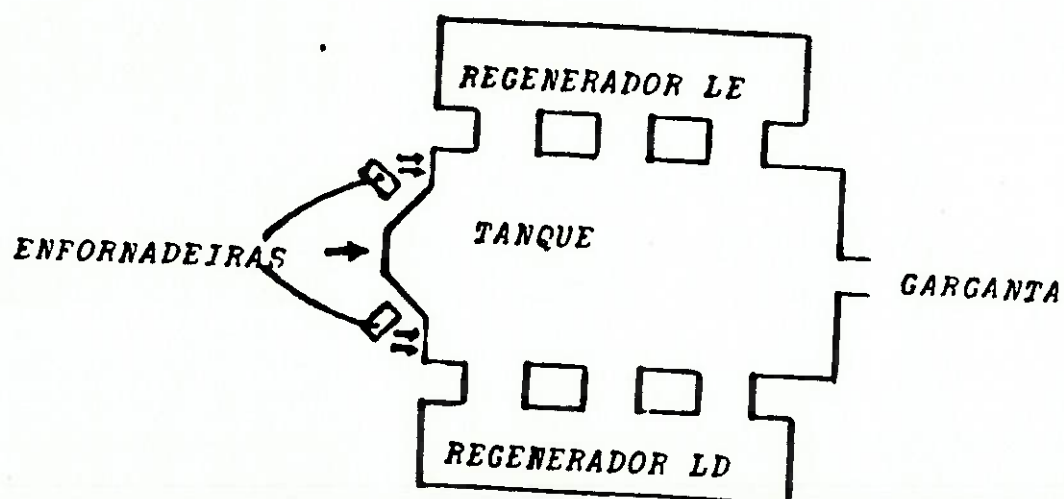
OBS: FORNO COM REVERSÃO DE CHAMA

3. UNIT MELTER



OBS: FORNO SEM REVERSÃO DE CHAMA

4. MISTO



OBS: FORNO COM REVERSÃO DE CHAMA

FIGURA 6.1 B: TIPOS DE FORNOS SM

5. FORNO ELÉTRICO

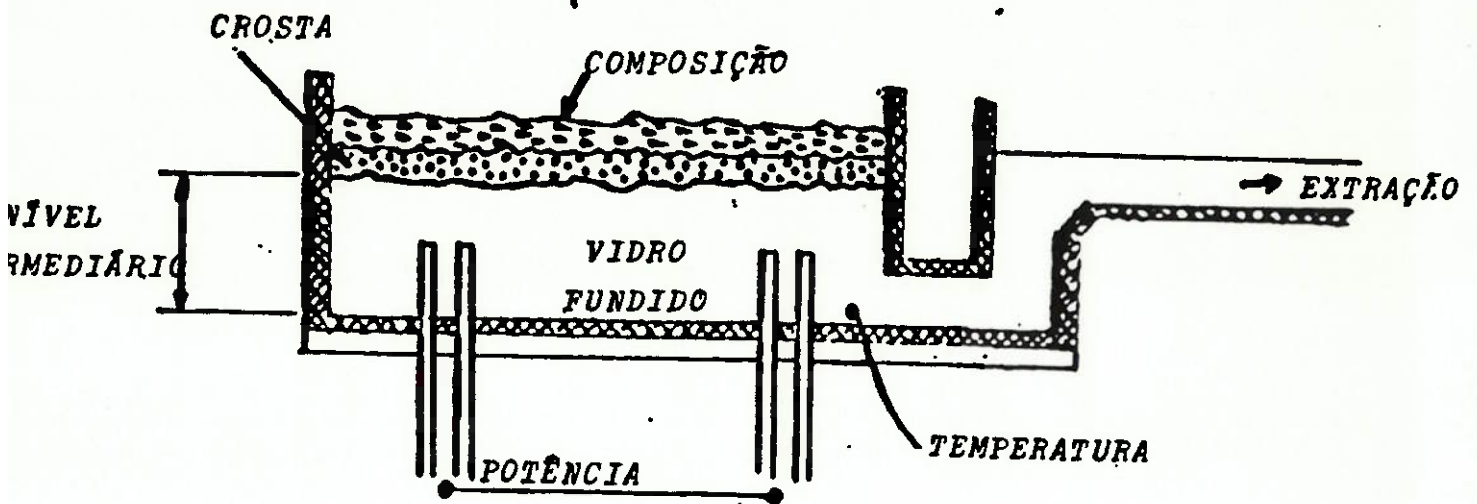


FIGURA 6.1c: TIPOS DE FORNOS SM

2. ELABORAÇÃO DO VIDRO

Os fornos contínuos podem ser comparados a uma piscina de vidro. Sobre ela há a combustão, ou dentro dela existem eletrodos para a introdução de energia na forma de calor. Em uma extremidade as máquinas extraem o vidro para a produção dos artigos, portanto há a tendência de abaixar o nível da "piscina". Existe, porém, um detector de nível muito sensível, que detecta quando este abaixa, e aciona a enforadeira, que introduz composição nova, que fica boiando e que, com a alta temperatura, vai fundir-se e passar a fazer parte do banho.

Nos fornos de vidro oco, que produzem vidro para embalagem e produtos de mesa, a qualidade ótica não é tão importante como no caso do vidro plano, que vai ser usado em janelas de carros e residências, sendo portanto de menor tamanho, e possuindo uma garganta que funciona como um sifão, impedindo que material não fundido e sobrenadando chegue às máquinas. Os fornos de vidro plano, que devem produzir um vidro de maior qualidade, são maiores, não possuindo garganta, porém, havendo tempo suficiente para que o vidro se homogenize bem e perca todas as pequenas bolhas até chegar nas máquinas.

De qualquer maneira, tanto em um caso como no outro, a composição passa por três etapas, até atingir as máquinas.

1a. Fusão - ou passagem para o estado líquido.

2a. Afinagem - que é a homogeneização e retirada de bolhas, que se obtém elevando-se a temperatura para que o vidro atinja um estado de baixa viscosidade.

3a. Condicionamento - o vidro, que foi levado a alta temperatura para afinar, deve ser resfriado até a temperatura que corresponda a uma viscosidade conveniente para a sua conformação, quer seja na máquina de vidro plano, quer seja na de garrafas ou de produtos domésticos.

Em fornos intermitentes, estas etapas se dão todas no mesmo local, mas em intervalos de tempos bem definidos. Em fornos contínuos, elas vão se sucedendo ao longo dos fornos, sem uma divisão bem marcada.

VII - F O R N E C E D O R A (F E E D E R)

O feeder é uma conexão ou canal de refratário destinado a conduzir o vidro fundido até a distribuição na máquina. Ele é projetado e construído para uma tonelagem determinada em função da máquina que irá alimentar. Quanto maior a capacidade produtiva da máquina, mais importantes serão os recursos e o volume do feeder.

O feeder recebe o vidro à saída do tanque de trabalho a uma temperatura aproximada de 1250° a 1300°C . Durante o transporte e por meios apropriados (resfriamento, aquecimento, pressão, reguladores, etc.) o vidro é acondicionado até uma temperatura compatível com a fabricação.

O vidro sai do feeder em forma de gotas à aproximadamente uma temperatura de 1100° a 1120°C . Estas temperaturas variam um pouco em função da tonelagem extraída e do artigo fabricado. Deve-se então resfriar em torno de 150°C ao longo do feeder, colocando todos os instrumentos em marcha a fim de obter na outra extremidade um vidro o mais homogêneo possível.

A figura 7.1 apresenta a curva teórica de temperatura ao longo de um feeder, assim como as várias regiões que descrevemos a seguir.

As diferentes zonas de uma fornecedora são:

1. Alimentador: o alimentador é o conjunto de mecanismos e peças refratárias, localizado na parte dianteira da fornecedora. Tem por finalidade a formação da gota que alimentará a máquina de acordo com o tipo de fabricação, isto é, cortando o vidro com formato e peso apropriado, de maneira contínua e automática, dentro de uma velocidade estabelecida.

Essas condições são obtidas atualmente pela ação de um pino refratário, que se desloca no interior de um tubo do mesmo material, mergulhando no vidro. A subida lenta do pino aspira o vidro para o interior do tubo e sua descida mais rápida o expulsa, em massa compacta. As tesouras cortam no momento desejado.

A figura 7.2 apresenta um desenho esquemático do alimentador.

2. Zona de Equalização: zona destinada à equalização das temperaturas; é onde o vidro deve se homogeneizar.

3. Zona de resfriamento 1

4. Zona de resfriamento 2

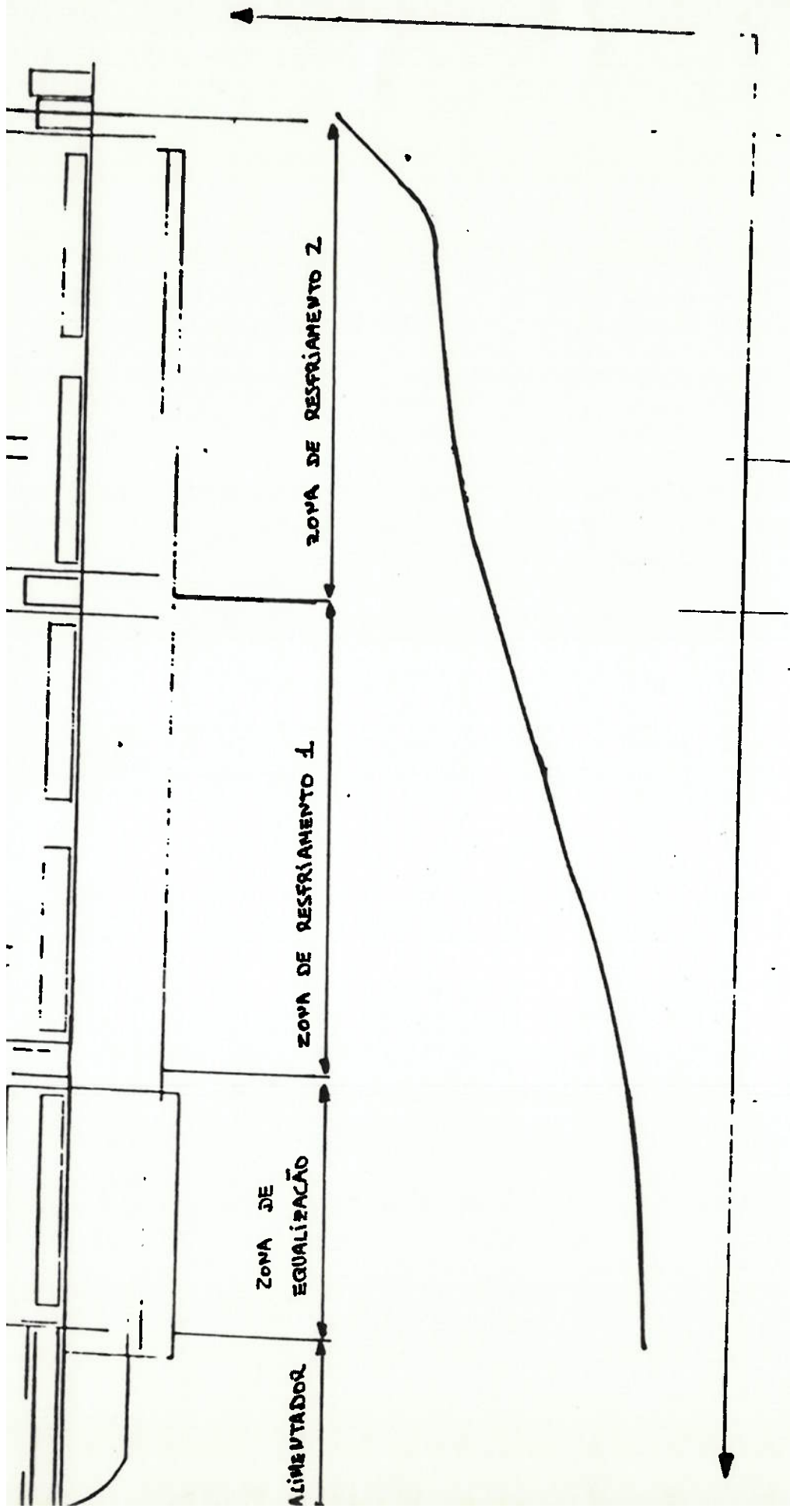
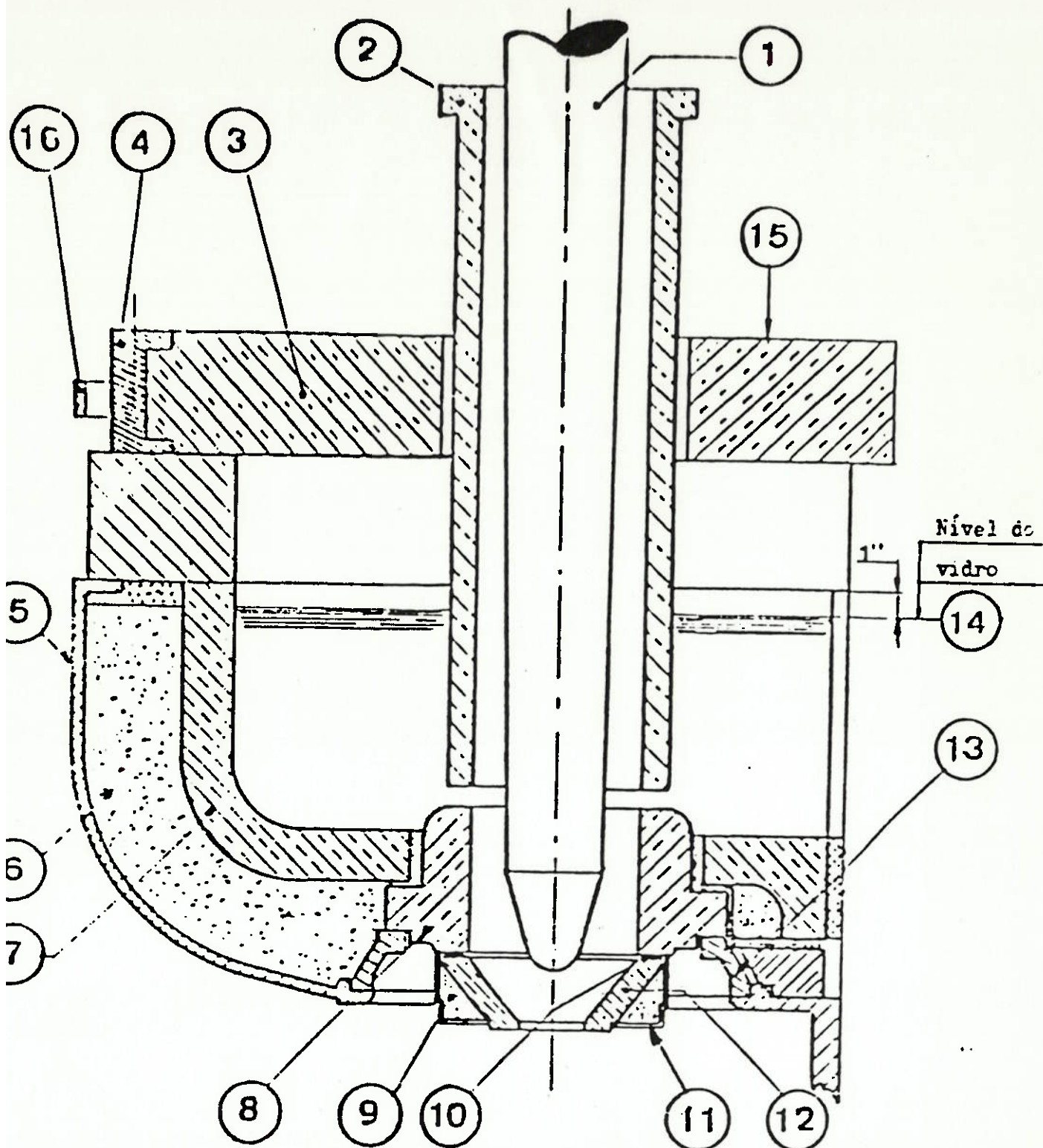


FIGURA 7.1: CURVA DE TEMPERATURA (TEÓRICA) AO LONGO DA FORNECEDORA



- | | | |
|-------------------|------------------------|-----------------------------|
| . Pino refratário | 7. Panela refratária | 13. Anel de liga refratária |
| . Tubo refratário | 8. Anel da panela | 14. Nível do vidro |
| . Meia-lua | 9. Isolante | 15. Cavalete |
| . Suporte | 10. Junta de vedação | 16. Pegador |
| . Panela metálica | 11. Suporte da arruela | |
| . Isolante | 12. Arruela | |

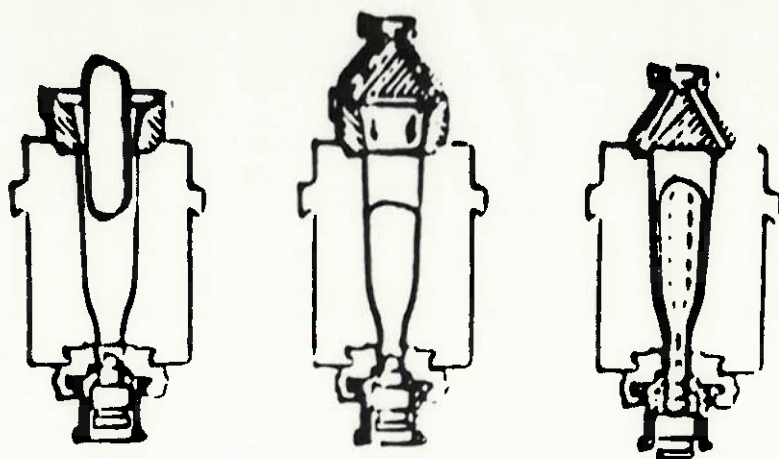
Figura 7.2 : ALIMENTADOR

VIII - CONFORMAÇÃO DE GARRAFAS (PROCESSO SOPRADO-SOPRADO)

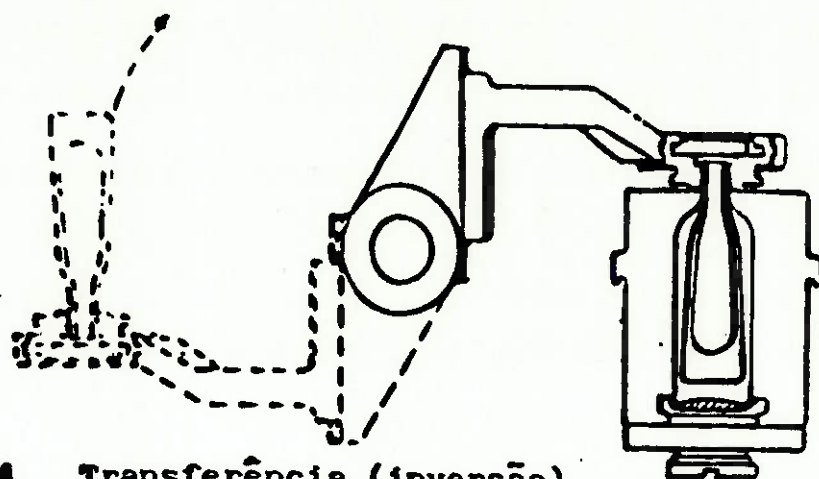
A configuração de uma garrafa é feita por uma sequência de etapas, que formam o ciclo de operação, onde cada etapa é formada por um certo número de movimentos e assopros sincronizados. O diagrama do processo pode ser visto na figura 8.1.

Analisemos as diferentes etapas:

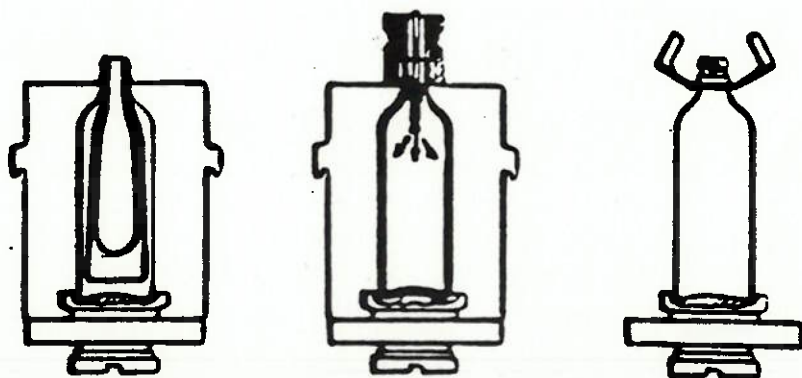
- 1. Carregamento:** a gota de vidro é transportada, através de calhas, por gravidade, até a cavidade do pré-molde (bloco). O gargalho é formado nessa operação.
- 2. Compressão:** O pré molde (bloco) é tapado e dá-se a compressão para terminar de formar o gargalo e fazer o furo para a perçagem.
- 3. Assopro do Parison (Perçagem):** o pino desce para dar passagem ao ar comprimido que enche o parison (pré-conformação da garrafa).
- 4. Transferência (inversão):** dá-se a inversão do parison para dentro da forma.
- 5. Reaquecimento (Alongamento):** é dado um tempo para que haja o reaquecimento do parison.
- 6. Assopro Final:** um assopro final infla o parison, para que tome o formato definitivo do produto.
- 7. Extração (Desmoldagem):** a garrafa está formada, e é extraída do molde para resfriamento.



1. Carregamento 2. Compressão 3. Assopro do Parison



4. Transferência (inversão)



5. Alongamento 6. Assopro final 7. Extração

FIGURA 8.1: PROCESSO SOPRADO-SOPRADO
DIAGRAMA DE FORMAÇÃO DE UMA GARRAFA

IX - A MÁQUINA IS

A máquina IS é um conjunto de mecanismos e cilindros pneumáticos, montados em seções individuais, que tem por finalidade produzir os diversos movimentos descritos anteriormente e necessários à conformação de um vasilhame. Tudo em determinado tempo, e obedecendo uma sequência pré-determinada, de uma maneira contínua e automática. A automação é feita mecanicamente, através de um tambor de programas (tempos), ou por sistema eletrônico, onde se pode corrigir ou alterar qualquer tempo de movimento, conforme a necessidade do artigo que está sendo ou será fabricado. O tambor, ou sistema eletrônico, atua e desatua as válvulas da caixa de válvulas que comanda a passagem do ar de acionamento dos cilindros pneumáticos da máquina.

A seguir damos algumas características gerais das máquinas IS.

- Máquina com o mínimo de peças em movimento;
- Diversificação da quantidade de seções: máquinas com 2,4,5,6,8 ou 10 seções;
- As seções podem ser alimentadas por um conjunto de colheres ou por um distribuidor de gotas, sempre através dos conjuntos formados por um canal intermediário e um defletor;
- Possibilidade de modificar e ajustar as regulagens de uma seção à outra na mesma máquina;
- Possibilidade de fazer uma grande variedade de produtos diferentes em formato, peso, capacidade, etc.
Exemplos de peso: aproximadamente Máx = 1.750 gramas
Min = 3,6 gramas;
- Possibilidade de se fabricar numa mesma máquina, e ao mesmo tempo, com a condição que o peso seja o mesmo, artigos diferentes;
- Diferentes tipos de máquinas IS, caracterizadas pelo dimensional dos entre-centros.

Obs.: A primeira Máquina IS (inventada por Ingle e Smith (IS)) foi construída pela Companhia Hartford-Empire, nos Estados Unidos, em 1925.

Em apêndice, um ensaio fotográfico permite uma melhor

X - OS MOLDES

O molde é um dos componentes principais na conformação do vidro em embalagens. É nele que são determinados os perfis do produto e também onde acontecem as maiores transferências de calor necessárias ao processo.

Geralmente os moldes são fundidos em ferro, pois o Ferro Fundido tem boa condutividade térmica e boa resistência ao desgaste térmico. Moldes em Bronze também já são usados, pois apesar do Bronze ter menor resistência, sua condutividade térmica é melhor, o que permite uso de velocidades maiores, ou seja, maiores rendimentos. É importante salientar que o maior custo do Bronze pode ser compensado pelo aumento da produtividade e que estão se desenvolvendo ligas de Bronze que equivalem à vida do Ferro Fundido.

Aço também é usado, mas apenas para a produção de pequenos moldes.

A qualidade dos produtos está muito ligada ao estado dos moldes. Quanto maior a deterioração dos moldes, as rigas ficam mais pronunciadas, a repartição do vidro se deteriora, os dimensionais exteriores começam a chegar nos limites de tolerância geométrica e as características de transferência de calor se alteram. Estes fatores modificam as variáveis de trabalho, causando a deterioração do rendimento da fabricação.

XI - RECOZIMENTO DO VIDRO - ARCHA

Todos os artigos, fabricados a partir do vidro fundido, sofrem, durante e após o processo de conformação, um resfriamento brusco e/ou irregular, que provoca o surgimento de tensões internas à massa do vidro.

Como a distribuição destas tensões nos objetos não é uniforme, surge uma instabilidade do ponto de vista de resistência mecânica, tornando os artigos extremamente frágeis, chegando até a ruptura espontânea imprevista e, portanto, impróprios para uso.

Recozimento é o tratamento térmico que tem por finalidade eliminar este estado de tensões ou diminuí-lo até um valor não perigoso.

O processo de recozimento consta de duas etapas:

1a. - Relaxamento das tensões, mantendo-se o artigo a uma determinada temperatura (Annealing Point + 50°C) durante um certo tempo;

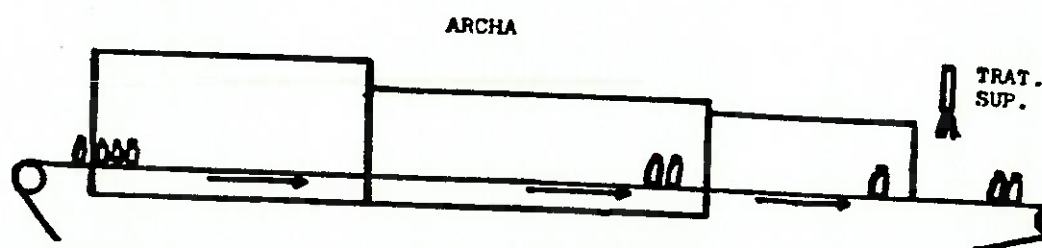
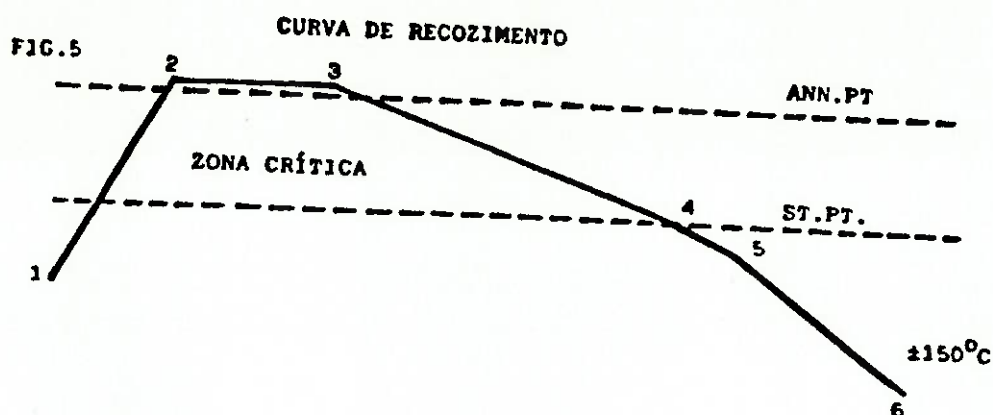
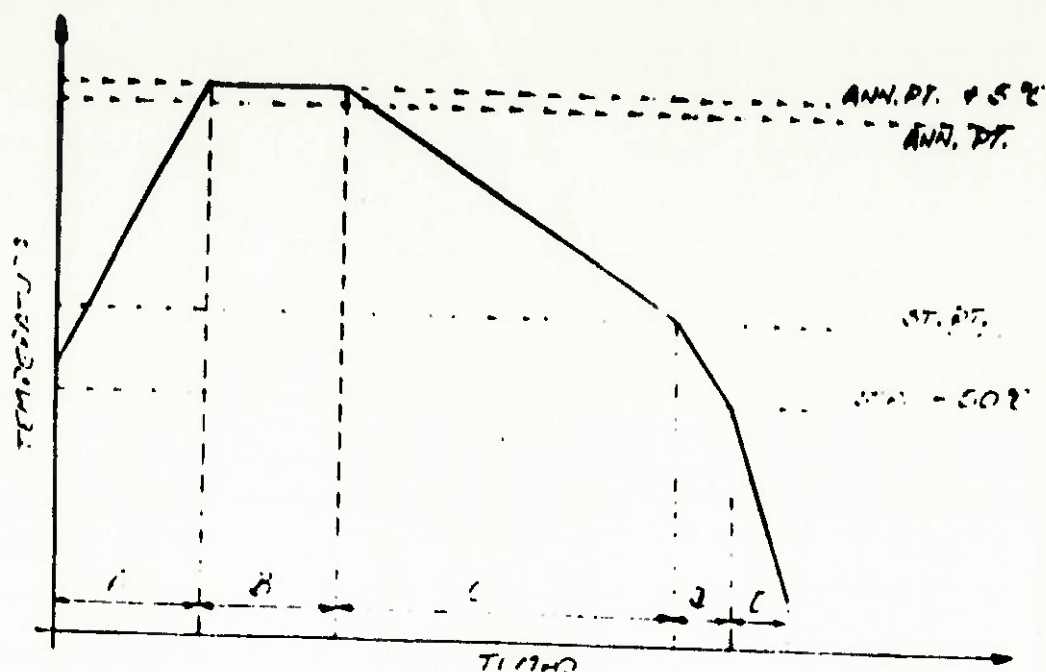
2a. - Resfriamento controlado desde a temperatura de relaxamento das tensões até um nível térmico mais baixo, onde não exista mais o perigo de formarem-se tensões (Strain Point - 50°C).

Portanto, conhecendo-se estas duas temperaturas, "Annealing Point" e "Strain Point", de um vidro, podemos definir como se fará o recozimento dos artigos fabricados com ele (ver curvas de recozimento na Figura 10.1).

O forno elétrico de recozimento ou archas, consta essencialmente de um túnel metálico revestido internamente por material refratário. É percorrido por uma esteira contínua de malha metálica, sobre a qual são colocados os artigos a recozer.

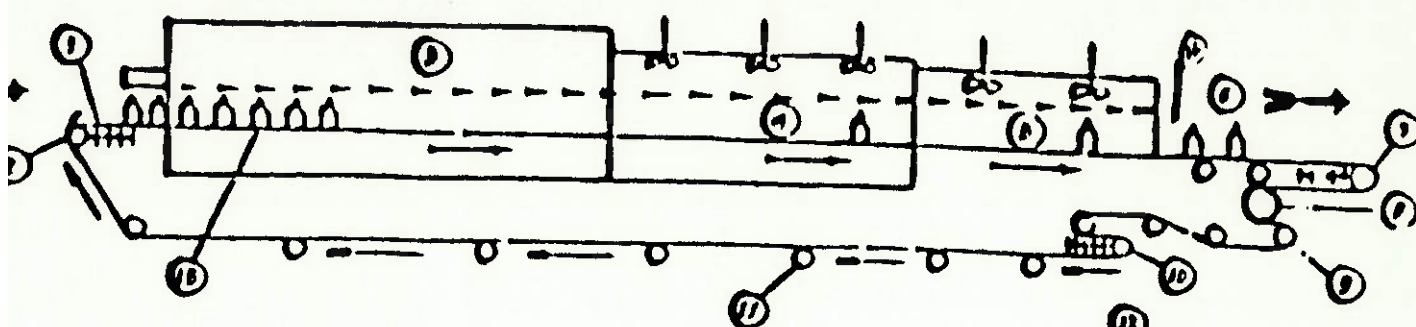
São dotados de meios adequados de aquecimento e resfriamento, de modo a reproduzir, ao longo de seu comprimento, as curvas de recozimento indicadas aos diversos artigos.

Geralmente são divididos em zonas, com controles individuais de temperatura, e termoelementos para verificação das curvas reais. O acionamento das resistências e o controle de potência são automáticos (ver Figura 10.2).



TRECHO	DESCRIÇÃO
1 - 2	Aquecimento rápido até Ann. Pt. + 5°C
2 - 3	Estabilização para relaxamento das tensões
3 - 4	Resfriamento crítico até St. Pt.
4 - 5	Resfriamento de segurança até St. Pt. - 50°C
5 - 6	Resfriamento final até 150°C p/ tratamento à frio

FIGURA 10.1 : CURVAS DE RECOZIMENTO



- . Esteira de malha metálica
- . Rolete regulável entrada
- . Zona de aquecimento
- . Zona de resfriamento controlado
- . Zona de resfriamento final
- . Zona de resfriamento final e escolha
- . Rolete regulável saída
- . Tambor de tração revestido de borracha
- . Rolete compressor
- . Rolete esticador
- . Rolete apoio do retorno da esteira
- . Motor elétrico
- . Variador PIV
- . Redutor
- . Artigos de vidro
- . Tratamento à frio

DETALHE DO TAMBOR

FIG. 8

FIGURA 10.2: ARCHA DE RECOZIMENTO

XII - C O N C L U S Ã O

Os outros processos de conformação do vidro como, por exemplo, o Float e a estiragem para a produção de vidro plano e o processo "Prensado-Soprado" para a produção de potes, não foram apresentados, já que os trabalhos seguintes estão ligados totalmente à conformação de garrafas.

Por fim, é interessante ressaltar que a "ciência dos vidros" é um campo ainda muito pouco explorado. Muitas dúvidas ainda persistem em relação a sua estrutura e comportamento e os processos atuais de conformação podem ser melhorados, como outros poderão ser desenvolvidos.

XII ■ A P É N D I C E S

APÊNDICE 1 : AS VANTAGENS DO VIDRO PARA EMBALAGENS

Algumas embalagens são relativamente seguras. Muitas podem ser recicladas. Outras são reutilizadas. Pureza, versatilidade e impermeabilidade são outras características, que vez por outra são encontradas isoladamente nas embalagens. Mas especialistas e designers vêm reiteradamente reconhecendo que o vidro é o único material que sintetiza todas estas qualidades. A tecnologia desenvolvida e aplicada ao vidro permitiu que ele adquirisse novas vantagens em relação a outros materiais. Seu peso foi sensivelmente reduzido, ao mesmo tempo em que se tornou mais resistente. E como embalagem é o único material que corresponde plenamente a duas características essenciais das embalagens modernas: protege a natureza, não poluindo o meio ambiente, e protege o consumidor, não contaminando o produto embalado.

O vidro é então uma das poucas embalagens que tanto pode ser reciclável como reutilizável, ou até mesmo retornável.

No caso da reciclagem, o vidro jogado no lixo é usado novamente para a produção de vidro novo. Seu processo de reciclagem é o mais simples e seus benefícios são da economia até a ecologia. O vidro descartado pelo consumidor é separado, coletado e revendido às indústrias vidreiras. Os cacos são triturados e servem de matéria-prima para a fabricação de vidro novo. Um quilo de caco é suficiente para a produção de um quilo de vidro, sem que haja a menor perda da qualidade original. A reciclagem permite, desta forma, manter praticamente intocáveis os mananciais de areia e de outros recursos naturais utilizados na fabricação do vidro. Propicia também redução no consumo de energia no processo produtivo e economia de espaço nos aterros sanitários. Além de tudo, a reciclagem, leva ao barateamento da embalagem de vidro, que reverterá em benefício do próprio consumidor.

Mas se o consumidor preferir, poderá guardar a embalagem de vidro, reutilizando-a como copo ou recipiente para produtos comprados a granel.

A terceira opção do consumidor, no caso das garrafas retornáveis, é usar o vasilhame vazio como parte do pagamento da bebida a ser comprada. Devolvendo a garrafa vazia, o consumidor ganha no preço, pagando menos, pois só lhe é cobrado o líquido.

As embalagens de vidro são também uma proteção maior para o consumidor, pois os produtos comercializados em vidro são mais puros e naturais. Por suas características de neutralidade, o vidro evita que conservantes tenham que ser adicionados aos alimentos. Produtos embalados em outros materiais exigem, muitas vezes, grandes doses de conservantes para mantê-los com suas características inalteradas. Nas embalagens de vidro isto não é necessário, pois por não ser porosa, mantém o produto assepticamente isolado, mantendo assim seu aroma original e impedindo a contaminação por substâncias externas.

O vidro também é transparente, o que em muitos casos evita que o consumidor seja lesado, já que capacidade e qualidade podem ser verificadas visualmente.

É compreensível, agora, porque o vidro é considerado um material nobre para embalagens. Hoje em dia é difícil de imaginar um produto de primeira qualidade que não seja embalado em vidro. Qualquer produto fino, por exemplo, pode ser identificado pela sua embalagem. As embalagens de vidro deixaram de ser apenas embalagens e passaram a ser vistas como um documento de identificação do próprio produto.

Dizem que as embalagens de vidro encarecem o produto. É verdade que algumas vezes, os produtos em vidro são até um pouco mais caros, mas não por causa da embalagem. Custam mais porque são os melhores do mercado e a única embalagem capaz de conferir esta credibilidade e nobreza é o vidro.

PROJETO BÁSICO

I - ESCOLHA DA MELHOR SOLUÇÃO

Precisamos escolher entre as soluções viáveis, resultantes do estudo de viabilidade a que tem, aparentemente, as melhores possibilidades de sucesso.

Iremos nos basear nos testes já realizados pela Saint-Gobain e em informações dos fabricantes para determinar as vantagens e desvantagens de cada uma das soluções e escolher a melhor. Mesmo o sistema FRAP tendo sido considerado inviável achamos interessante também comparar suas vantagens e desvantagens. A Saint-Gobain realizou testes com o sistema que se mostrou interessante para a fabricação de alguns produtos, e não nos parece impossível que no futuro, com a construção de fábricas mais modernas no Brasil, o sistema se torne viável.

Descrevemos abaixo sistema por sistema suas vantagens e desvantagens.

a) Clássica temporizada:

Foi como dissemos o primeiro passo para se melhorar o sistema convencional aumentando o seu desempenho com um ganho de vazão. Tem a vantagem de ser de implantação extremamente fácil e de custo quase nulo. Mas para a Saint-Gobain seu desempenho também ficou insuficiente e já foi praticamente abandonada.

b) Axial-Cooling:

Tem uma grande desvantagem por ter sua patente requerida pela Heye que condicionou o uso do sistema à aquisição dos equipamentos por ela produzidos. Por isto as informações sobre o sistema e seu desempenho são muito limitadas. A Saint-Gobain não realizou nenhum teste com o sistema também pelo fato do relacionamento entre as duas companhias não ser muito bom.

O Axial-Cooling não é então uma boa solução para a Santa Marina que deve seguir as indicações de sua matriz francesa. Mas das poucas informações disponíveis da Heye e de vidrarias que usam o sistema parece que a grande desvantagem

do sistema é o fato de ele ser limitado a apenas uma coroa de furos o que limita o seu desempenho. Ele é sobretudo indicado para a fabricação de pequenas garrafas e as velocidades da Heye para a fabricação destas com o Axial-Cooling são superiores ao melhor desempenho da Saint-Gobain. Mas para a fabricação de outros produtos o seu desempenho é fraco.

c) Vertiflow:

O Vertiflow tem grandes vantagens em relação à ventilação convencional que listamos e explicamos a seguir:

-Redução do consumo de ar/energia: devido a temporização da aplicação do ar de arrefecimento.

-Melhoria das condições de trabalho: significativa redução dos níveis térmicos pois o ar quente é evacuado por cima dos moldes e não é projetado sobre o operador como na ventilação convencional. Também se tem uma grande redução dos níveis sonoros como vemos na tabela abaixo (dados obtidos em medições em fabricação pela Saint-Gobain):

	CLÁSSICA (1987)	VERTIFLOW (1988)
FORMA	108 dB	93 dB
BLOCO	101 dB	93 dB

-Redução dos tempos de troca de fabricações com o sistema convencional deve-se nas trocas de fabricação retirar as "empilhagens" existentes e substituí-las por aquelas adequadas para o novo produto a ser fabricado. Com o Vertiflow elimina-se este tempo.

-Eliminação da placa de proteção entre a forma e a placa morta: esta placa é necessária para impedir que o fluxo radial atinja o produto quando este está em repouso na placa morta, na saída da forma aguardando para ser empurrado para o transportador. Com o Vertiflow o fluxo de ar é evacuado por cima do molde o que permite eliminar a placa facilitando o acesso do operador ao molde.

-Padronização das braçadeiras: as braçadeiras são um obstáculo para o arrefecimento radial pois estão entre empilhagem e molde. Alguns produtos que necessitem de arrefecimento especial em certos lugares necessitam de braçadeiras que não interfiram. Com o Vertiflow tem-se a possibilidade de usar braçadeiras iguais para vários produtos e ter-se uma melhor fixação pois como não são obstáculo para o arrefecimento poderão envolver melhor o molde.

-Melhor distribuição de temperaturas no molde: no sistema convencional o fluxo de ar é radial e não se tem uma boa distribuição ao redor do molde, as partes laterais em contato direto com o fluxo são melhor arrefecidas. No Vertiflow com a distribuição dos furos em todo o perímetro do molde tem-se uma perfeita distribuição do ar e logo homogeneização das temperaturas ao redor do molde. Diminuem-se assim as variações de espessura e os defeitos nos produtos.

-Maior vida dos moldes: os moldes Vertiflow se desgastam menos como vemos na tabela abaixo (desempenho Saint-Gobain):

	QUANTIDADE DE FORMAS	GARRAFAS/ FORMA	GANHO
4 1/4 CLÁSSICA	642	515 000	143 %
4 1/4 VERTIFLOW	90	1 252 000	
5 1/2 CLÁSSICA	434	488 000	32 %
5 1/2 VERTIFLOW	220	643 000	

Por fim já citamos a vantagem do Vertiflow em poder colocar mais de uma coroa de furos nos moldes. Sua única desvantagem é o fato de não resfriar as braçadeiras que esquentando podem travar. Isto pode ser solucionado com a montagem de algumas "empilhagens" que provocariam um fluxo radial sobre elas, lembrando que o sistema Vertiflow não obriga a eliminação destas.

O Vertiflow se mostrou como a melhor opção para a Saint-Gobain que tem hoje 90% de suas formas trabalhando com o sistema. O seu desempenho é muito bom atingindo velocidades médias em torno de 12% sobre o sistema convencional. A tabela a seguir compara o desempenho dos dois sistemas para a fabricação de alguns produtos.

Por tudo apresentado até aqui o sistema Vertiflow parece ser a melhor opção para a Santa Marina substituir o sistema convencional que usa em todas as suas unidades.

Usine	Modèle	Poids	Standard		Vertiflow		Gain
			Vitesse	Rend.	Vitesse	Rend.	
CHALON	Bourgogne ALL.	380	170 DP	88	182	91	14 %
CHALON	Bourg. Tradition	600	8 DP	90	121	91	7 %
COGNAC	Bordelaise Std.	440	110 DP	-	163	-	5 %
VAUXROT	BSA 26,5	130	110 DP	88	297	90	8 %
CHALON	Schneppes 21	135	8 DP	89	240	90	8 %
VAUXROT	Bordelaise 77	380	110 DP	85	169	88	5 %
VAUXROT	Martini 102	550	110 DP	83	136	86	16 %

DESEMPENHO VERTIFLOW

d) FRAP:

A Saint-Gobain realizou apenas alguns testes com o FRAP que se mostrou bastante promissor como sistema de arrefecimento. A maior dificuldade encontrada foi o difícil controle da lâmina de ar que altera suas características com o aquecimento e dilatação do molde, alterando assim as condições de transferência de calor. Abaixo listamos as principais vantagens e desvantagens do sistema:

VANTAGENS:

- Baixo custo de energia.
- Melhoria das condições de trabalho: redução dos níveis térmicos e sonoros.
- Grande capacidade de resfriamento.
- Sistema muito estável.

DESVANTAGENS:

- Investimento inicial caro: instalações auxiliares caras e complicadas.
- Necessidade de espaço para instalação das instalações auxiliares.
- Moldes e camisas inteiramente novos.
- Pouco flexível e não standard.
- Não se interrompe o resfriamento quando da parada da seção.

O FRAP parece ser um bom sistema para máquinas que produzem um só produto ou que tem poucas trocas de fabricação, viabilizando assim a implantação das instalações auxiliares à máquina.

Dos testes realizados com os vários sistemas e de sua experiência a Saint-Gobain propõe na tabela abaixo o que ela considera ser as condições ideais de arrefecimento para diferentes tipos de produtos:

	MÁQUINAS DE UM PRODUTO		MÁQUINAS MÚLTIPLOS PRODUTOS	
	FORMA	BLOCO	FORMA	BLOCO
GARRAFAS				
Pequenas capacidades 50cl	FRAP	FRAP <i>Vertiflow</i>	VERTIFLOW	CLÁSSICA
75cl e 1l	FRAP	FRAP <i>Vertiflow</i>	VERTIFLOW	CLÁSSICA
POTES	FRAP	?	VERTIFLOW	CLÁSSICA

Como a produção da Santa Marina é muito versátil e todas as máquinas produzem uma grande quantidade de produtos a escolha do sistema Vertiflow para é realmente então a melhor solução de novo sistema de arrefecimento. O Vertiflow deverá apenas ser implantado para a forma. Do lado do bloco deve-se principalmente pensar em instalar a temporização (na tabela acima quando citado o arrefecimento clássico induz-se que ele é temporizado pois nas unidades da Saint-Gobain só se usa atualmente o arrefecimento temporizado tendo sido completamente abandonado o arrefecimento contínuo).

II - MODELO MATEMÁTICO

No Estudo de Viabilidade analisamos globalmente como ocorrem as transferências de calor durante o processo de conformação de embalagens de vidro.

Na realidade os fenômenos que ocorrem são muito complexos. A transferência de calor entre o vidro e o fluido de arrefecimento é um fenômeno periódico, resultado de períodos onde o vidro quente está em contato com o molde e períodos sem contato onde a parede interior pode se resfriar com o contato com o ar ambiente. A transferência de calor também é função como vimos das condições da interface vidro/molde e do contato pusatório entre ambos.

Algumas tentativas foram feitas para modelar matematicamente o processo de transferência de calor através do molde mas poucos são os autores que chegaram a conclusões parecidas. Eles divergem por exemplo sobre a influência da radiação no processo e na modelagem da interface do vidro com o molde entre outros. O trabalho mais reconhecido talvez seja o dos professores de engenharia térmica H. Menuier e J. Henriette da escola Politécnica de Mons na Bélgica que desenvolveram um método a base de elementos finitos para resolver o problema.

No caso dos moldes Vertiflow o problema é ainda maior devido à complexidade da geometria dos moldes. Um tratamento analítico ou numérico comum é completamente inviável. A Emhart porém, desenvolveu um Software baseado também no método de elementos finitos que calcula numa primeira etapa o fluxo de calor recebido pelo molde e numa segunda etapa o calor absorvido pelo sistema Vertiflow.

Foi impossível ter acesso aos algoritmos do programa, protegidos pela Emhart, e às hipóteses usadas para simplificar o problema. O programa de nome Vertiflow II (VF II) é patenteado pela Emhart que se recusou a nos fornecer estas informações.

O "Bureau Etude Moules" da Saint Gobain possui o programa e considera os resultados extremamente confiáveis.

Pelos vários motivos apresentados acima não será feita uma modelagem matemática do sistema. Explicaremos porém a utilização do programa VF II e seus resultados. Na prática as vidrarias que usam o Vertiflow também não se preocuparam em modelar o sistema e usam o programa VF II que pode ser adquirido junto com os mecanismos Vertiflow.

Programa VF II:

O programa VF II pode ser usado em qualquer microcomputador tipo IBM AT/XT. Inicialmente devem ser entrados todos os dados relativos a fabricação de um produto:

- descrição da máquina a ser usada: velocidade desejada de fabricação, número de seções da máquina, quantidade de moldes por seção, processo de fabricação (Soprado-Soprado ou Prensado-Soprado), pressão do caixão, temperatura do ar de arrefecimento e distância entre centros.

- regulagem da máquina: unidade de regulagem (graus para tambor mecânico ou regulagem eletrônica) e tempos de abertura da forminha, de início do Vertiflow, de acionamento do vácuo (quando desejado), de início do assopro, de abertura do molde e final do Vertiflow.

- detalhes do produto: peso, capacidade, diâmetro do gargalo, altura do gargalo, altura sem o gargalo, diâmetro máximo, tipo de vidro e temperatura da gota.

- detalhes do molde: diâmetro do fundo de forma, diâmetros inferior e superior do molde, temperatura interna desejada, material, condutividade térmica e ângulo entre os furos.

Por fim devem ser introduzidas as configurações das duas coroas de furos. Aqui é interessante ressaltar que no início do desenvolvimento do Vertiflow os moldes tinham apenas uma coroa de furos e a Emhart havia lançado no mercado o programa VF I para este tipo de configuração. Com a prática e a necessidade de maiores velocidades passou-se a trabalhar com duas coroas de furos. Foi então necessário adaptar o

Programa e criou-se o VF II. Atualmente só se usam duas coroas de furos.

A seguir apresentamos a entradas de dados no programa (aplicação do programa para a fabricação da garrafa de cerveja brasileira produzida na máquina 13 da FPF).

ALAN FENTON - HARTFORD DIVISION, WINDSOR
MACHINE DETAILS

-
- 1) Machine Speed.....= 114 BPM
 - 2) No.of Sections.....= 8
 - 3) No.of Cavities/Section...= 2
 - 4) Process.....= Blow & Blow
 - 5) Frame Pressure.....= 600 mm.WG
 - 6) Cooling Air Temperature..= 20 Degrees C
 - 7) Mechanism Type.....= 6.25 in. C.D., Group 8
- TIMING DETAILS

-
- 1) Timing Units.....= Degrees
 - 2) Neckring Open.....= 330
 - 3) VERTIFLOW On.....= 330
 - 4) Vacuum On.....= None
 - 5) Final Blow On.....= 30
 - 5) Mould Open.....= 160
 - 7) VERTIFLOW Off.....= 165

Print screen with <Shift><PrtScr>

Press any key . .

ALAN FENTON - HARTFORD DIVISION, WINDSOR
CONTAINER DETAILS

-
- 1) Weight.....= 490 g.
 - 2) Brimful Capacity.....= 672 ml.
 - 3) Finish Bore.....= 27 mm.
 - 4) Height of Finish.....= 17.45 mm.
 - 5) Height under Finish..= 264 mm.
 - 5) Maximum Diameter.....= 75 mm.
 - 7) Glass Colour.....= White
 - 8) Gob Temperature.....= 1060 Deg C

MOULD DETAILS

-
- 1) Bottom Plate Flange.....= 19 mm.
 - 2) Upper Band Diameter.....= 158.5 mm.
 - 3) Lower Band Diameter.....= 158.5 mm.
 - 4) Desired Inner Temperature.....= 525 Deg C
 - 4) Mould Material.....= Cast Iron
 - 4) Thermal Conductivity.....= 37 W/mK
 - 4) Pitch Angle between Holes.....= 10

Print screen with <Shift><PrtScr>

Press any key . .

COOLING CONFIGURATION FOR INNER ROW OF HOLES.

-
- 1) Number of holes.....= 34
 - 2) Length of Hole in Mould (exc BP)= 290 mm.
 - 3) Average PCD of Cooling Holes....= 116 mm.
 - 4) Hole Type 1 Straight thro bottom plate & mould
 - 5) Hole Diameter.....= 8.00 mm.
 - 6) Diam. of hole in bottom plate...= 8.50 mm.
 - 7) Depth of counterbore.....= No counterbore
 - 8) Diam. of counterbore.....= -----
 - 9) Exit diam. after taper cutting..= Plain exit
 - 0) Taper cutter used.....= -----

COOLING CONFIGURATION FOR OUTER ROW OF HOLES.

-
- 1) Number of holes.....= 26
 - 2) Length of Hole in Mould (exc BP)= 290 mm.
 - 3) Average PCD of Cooling Holes....= 135 mm.
 - 4) Hole Type 1 Straight thro bottom plate & mould
 - 5) Hole Diameter.....= 8.00 mm.
 - 6) Diam. of hole in bottom plate...= 8.50 mm.
 - 7) Depth of counterbore.....= No counterbore
 - 8) Diam. of counterbore.....= -----
 - 9) Exit diam. after taper cutting..= Plain exit
 - 0) Taper cutter used.....= -----

Print screen with <Shift><PrtScr>

Press any key . . .

Com todos os dados introduzidos o programa calcula a quantidade de calor que deve ser evacuada pelo sistema. Calcula também a quantidade de arrefecimento fornecida e apresenta o resultado sob a forma de um percentual do arrefecimento aplicado em função do arrefecimento necessário. Isto é o que definimos por % de arrefecimento:

$$\% \text{ de arrefecimento} = \frac{\text{fluxo de calor evacuado pelo Vertiflow}}{\text{fluxo de calor recebido pelo molde}}$$

Logo se

% de arrefecimento >100% : excesso de arrefecimento
<100% : falta de arrefecimento.

Abaixo mostramos a saída do programa:

```

The calculated COOLING REQUIREMENT for this container mould....= 8.23 kW
The COOLING APPLIED calculated as a percentage of REQUIREMENT..= 145.7 %

```

lpo a

5-21-1990 11:34:17

HART VERTIFLOW SOFTWARE - V3.06ID

ASK NUMBER = 9500 ALAN FENTON - HARTFORD DIVISION, WINDSOR

Print screen with <Shift><PrtScr>

Press any key . .

Na prática tenta-se atingir uma % de arrefecimento entre 100% e 110%. Se feita uma análise para um produto e obtem-se um valor acima de 110% pode-se então aumentar a velocidade de fabricação. Neste caso aumenta-se gradativamente a velocidade até entrarmos dentro da faixa de eficiência determinada. Mas obtendo resultado inferior a 100% isto significa que não será possível trabalhar com a velocidade escolhida, será então necessário alterar alguns parâmetros construtivos dos moldes para atingir a velocidade desejada dentro da faixa de eficiência determinada acima.

No exemplo analisado vê-se então um significativo potencial para aumento da velocidade de fabricação da garrafa de cerveja.

III - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Pretende-se aqui determinar o grau com que o funcionamento do sistema Vertiflow é afetado pela variação de seus parâmetros. Para tal efetuou-se uma simulação do programa VF II no "Bureau Etude Moule" na unidade Chalon-sur-Saône da Saint Gobain. Usou-se de início uma garrafa tipo BSA de 125 gramas, regulagem de máquina e geometria de molde teóricas que proporcionariam uma % de arrefecimento de 100%. É interessante ressaltar que a geometria e a regulagem teóricas usadas estão muito próximas das reais usadas para a fabricação deste produto.

Partindo-se então desta situação teórica "ideal" variou-se um a um os parâmetros construtivos do molde mantendo os outros constantes na condição "ideal" vendo assim como cada parâmetro influencia a eficiência do sistema Vertiflow.

Foram então construídas curvas caracterizando a variação da % de arrefecimento em função da variação dos parâmetros.

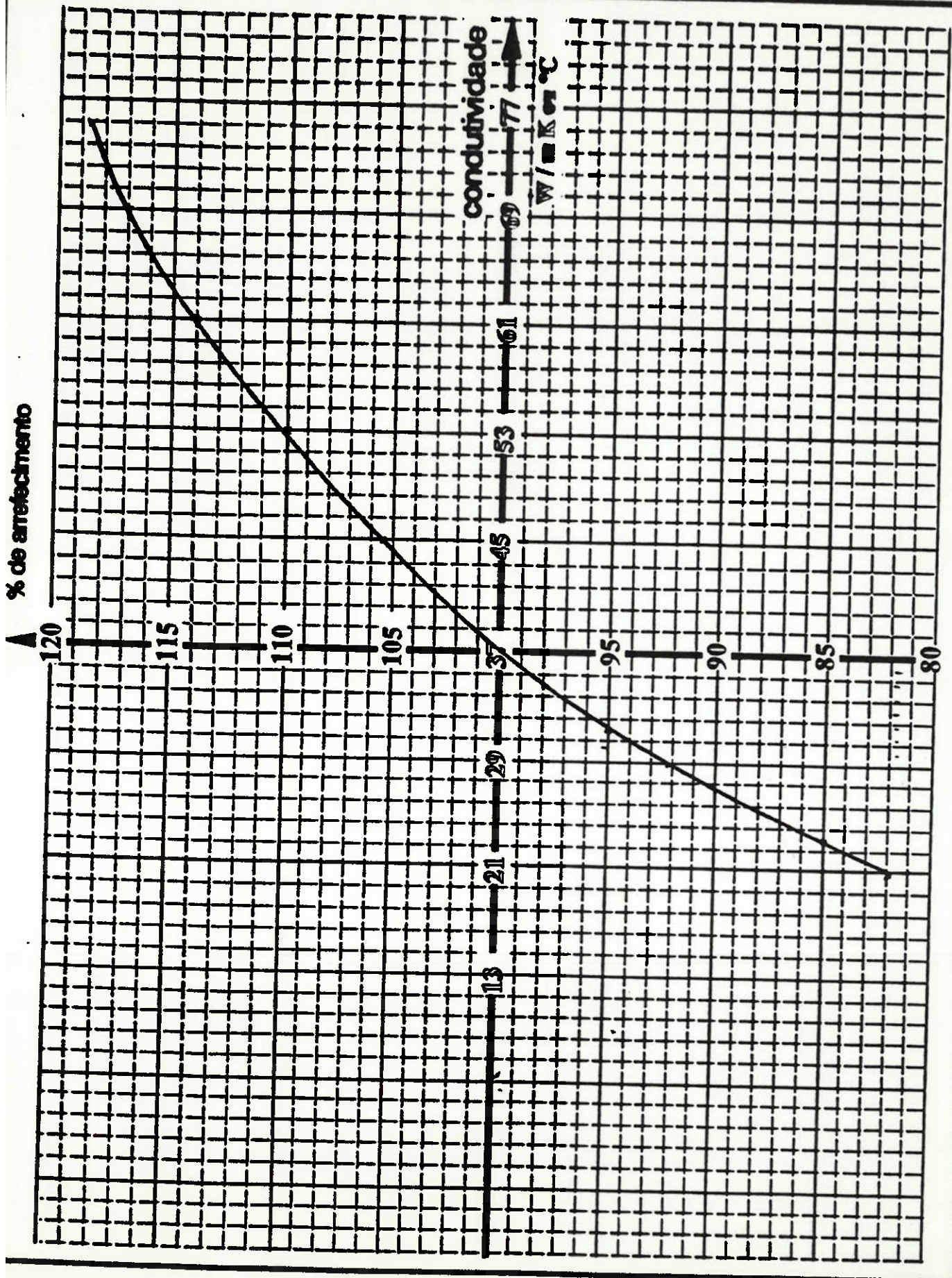
As curvas são apresentadas a seguir e os parâmetros analisados foram:

- condutividade do molde (curva 1)
- número de furos (curva 2)
- diâmetro da coroa dos furos (curva 3)
- diâmetro externo dos moldes (curva 4)
- diâmetro dos furos (curva 5)

*Obs.: Fazendo a mesma simulação para outros produtos obtêm-se curvas similares que apresentam as mesmas tendências de variação.

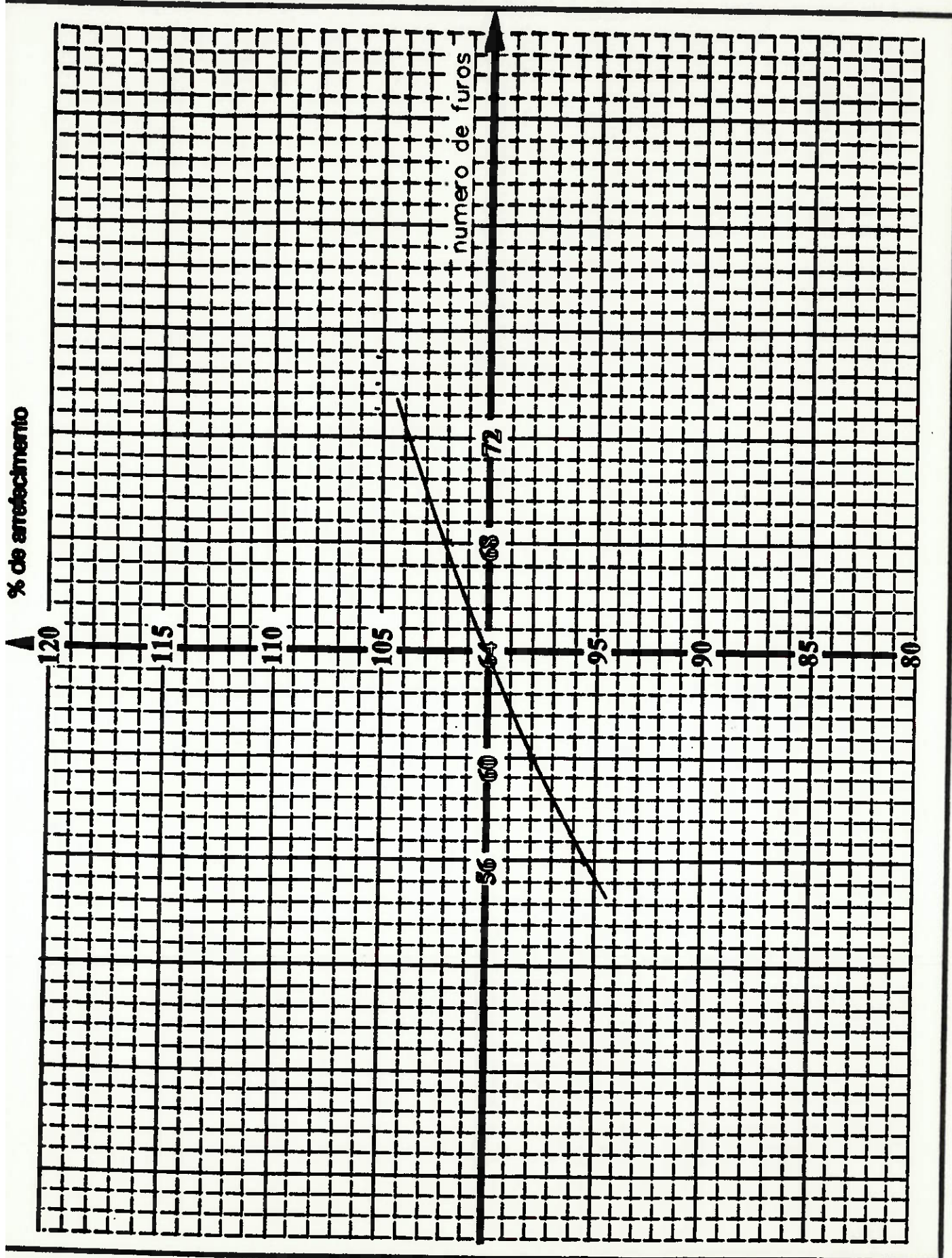
VERTIFLOW 1

% de arrefecimento em função
da condutividade dos moldes



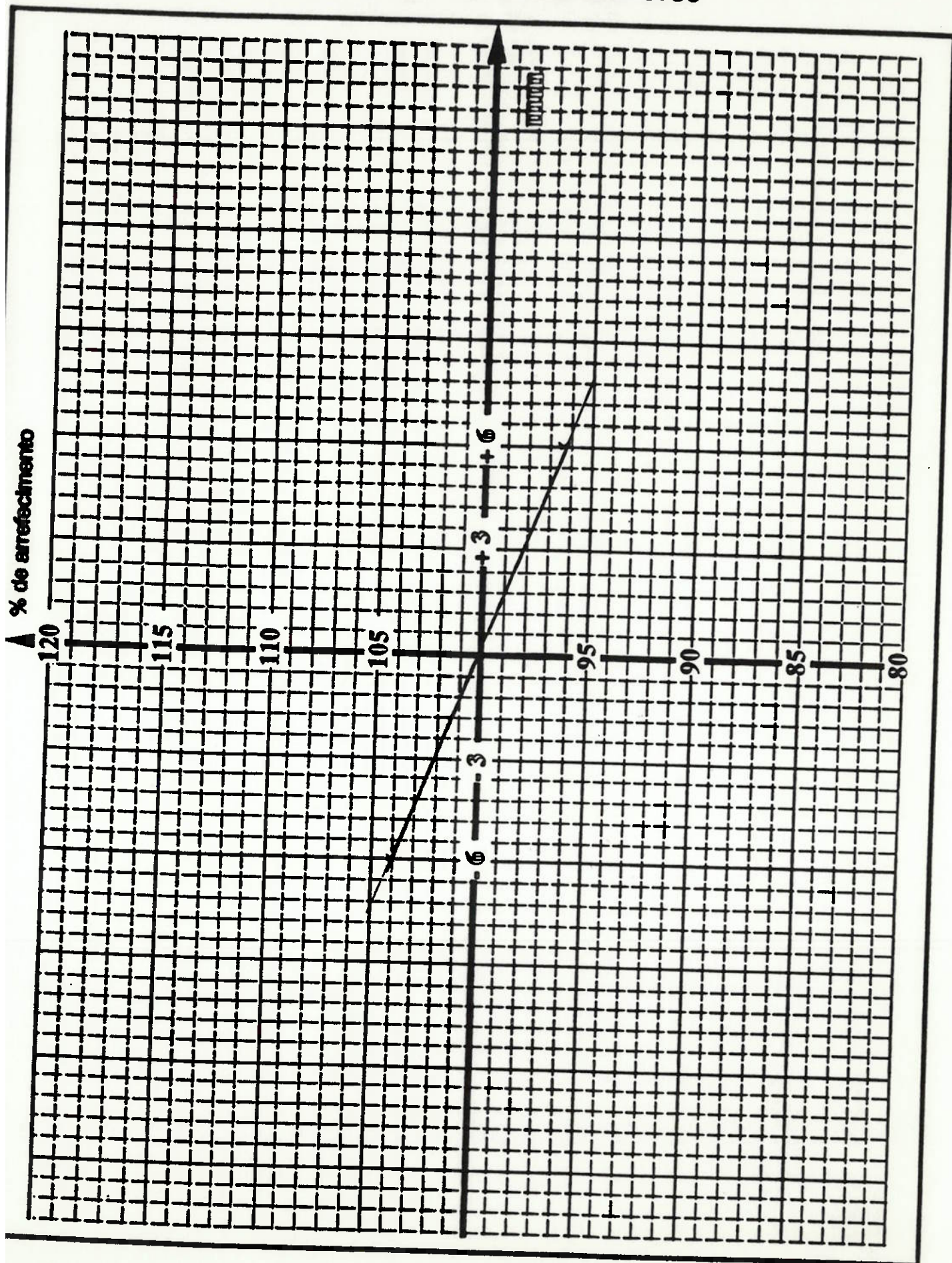
VERTIFLOW 2

% de arrefecimento em função
do número de furos



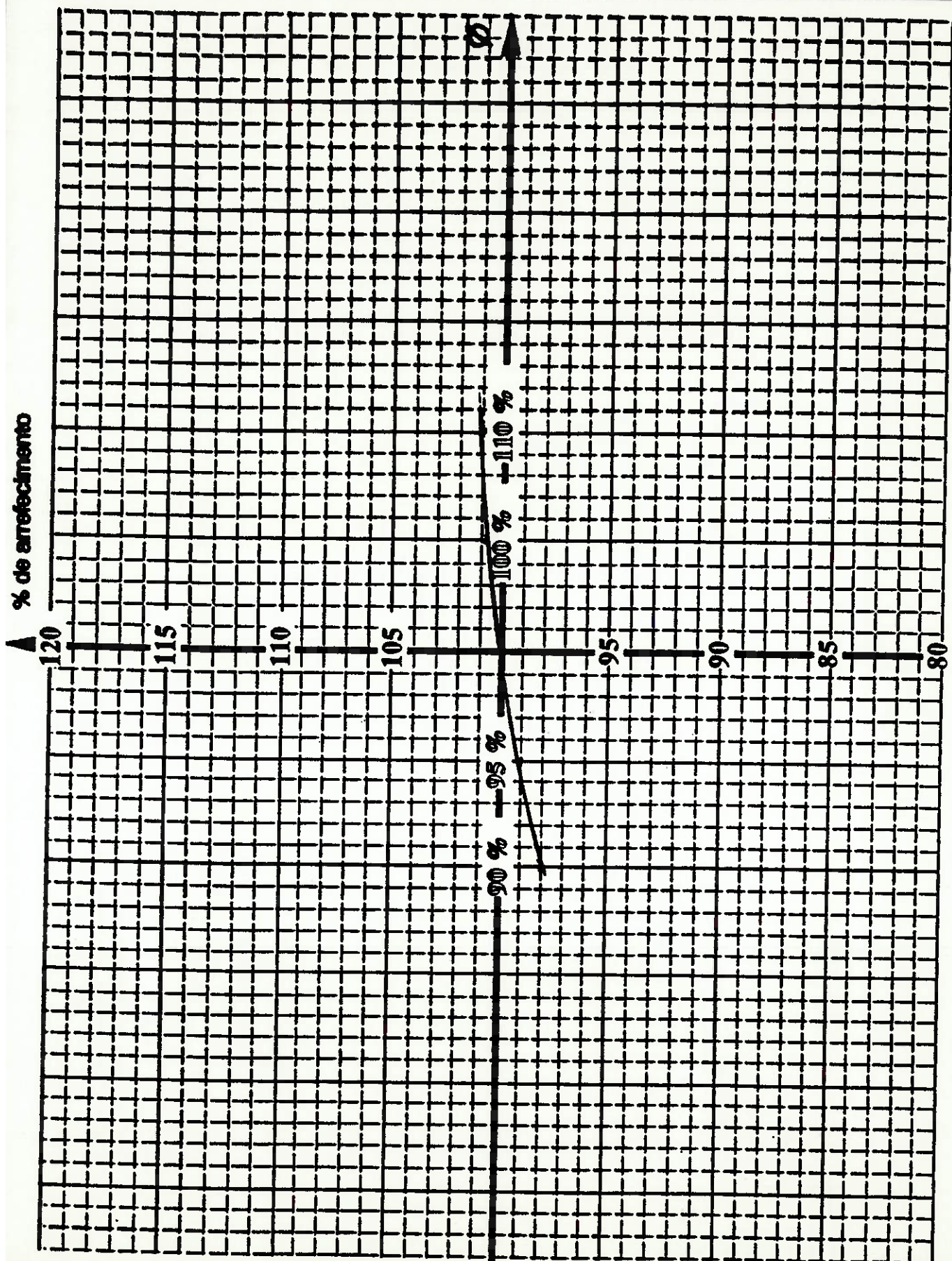
VERTIFLOW 3

% de arrefecimento em função
do diâmetro da coroa dos furos



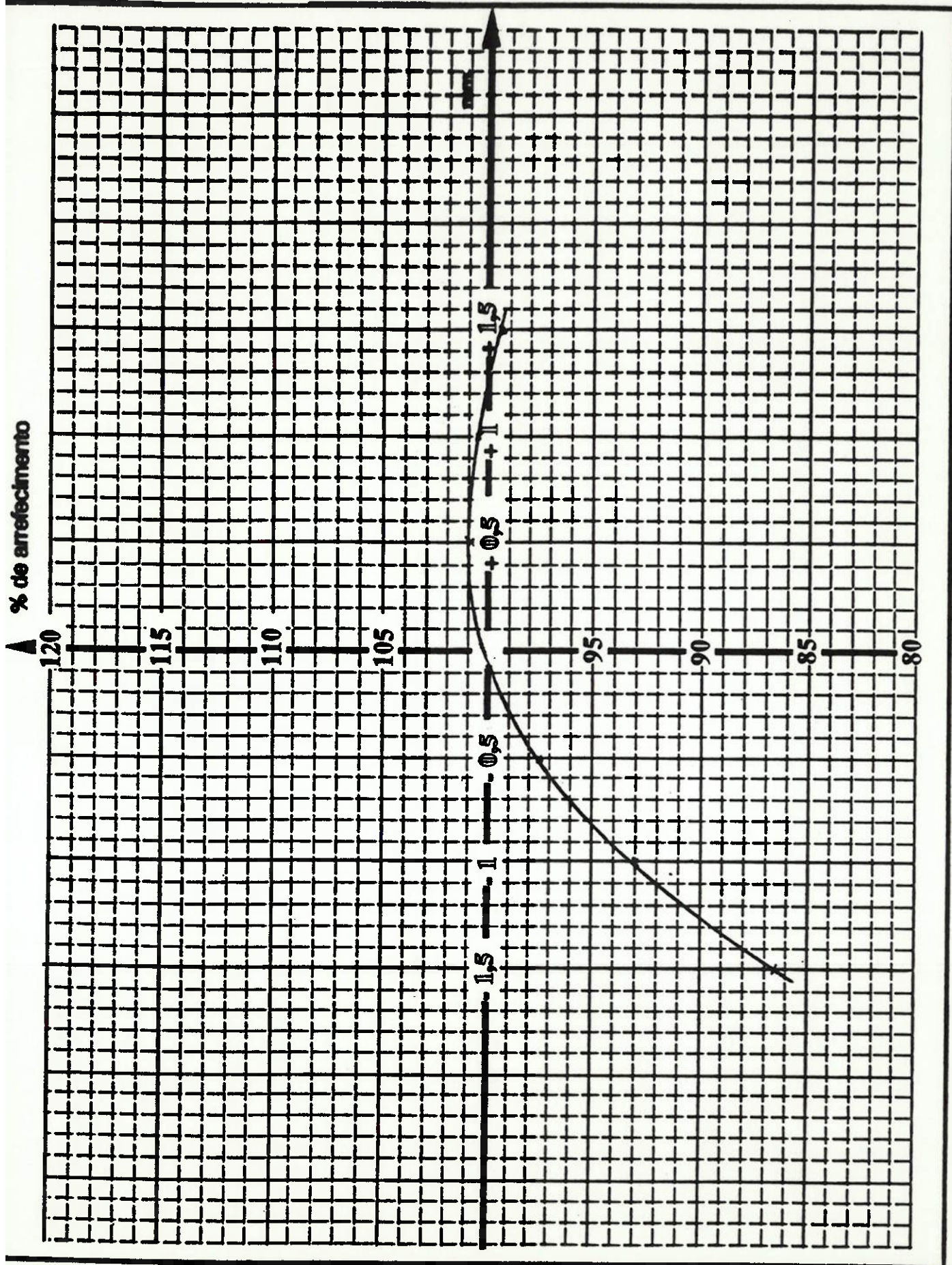
VERTIFLOW 4

% de arrefecimento em função
do diâmetro externo dos moldes



VERTIFLOW 5

% de arrefecimento em função
do diâmetro dos furos



Na tabela abaixo resumimos os efeitos dos parâmetros apresentando os valores que provocam uma variação de -5% e mais 5% sobre a situação de eficiência "ideal" de arrefecimento (100%).

PARÂMETRO	% DE ARREFECIMENTO		
	95%	100%	105%
1-CONDUTIVIDADE DOS MOLDES (W/m K ou C)	31	37	42
2-NÚMERO DE FUROS	56	64	76
3-DIÂMETRO DA COROA DOS FUROS (mm)	+8	0	-8
4-DIÂMETRO EXTERNO DOS MOLDES (mm)	98%	100%	101%
	-10%	0	+10%
5-DIÂMETRO DOS FUROS (mm)	95%	100%	101%
	-0.8	0	+0.5

A seguir analisamos individualmente os parâmetros e seus efeitos:

1-condutividade dos moldes: o fluxo de calor (Φ) trazido pelo produto é transferido por condução pelo molde. A condução é função da condutividade do molde (λ), da temperatura interna do molde (T_1), da temperatura da superfície do molde em contato com o ar de arrefecimento (T_2) e da espessura(e):

$$\Phi = \lambda \cdot (T_1 - T_2)/e$$

Mas o fluxo é mantido constante como também são as temperaturas internas do molde e a espessura, logo para um aumento da condutividade do molde a temperatura da superfície do molde em contato com o ar de arrefecimento (T_2) deve aumentar. Com o aumento de T_2 aumenta a diferença de temperatura entre o ar de arrefecimento e o molde aumentando assim a transferência de calor por convecção. Isto explica a tendência da curva, um material com melhor condutividade aumenta a eficiência do arrefecimento.

A influência deste parâmetro é muito grande pois vemos que um pequeno aumento da condutividade de 37 para 42 W/m.K aumenta em 5% a eficiência do arrefecimento.

Este efeito vem sendo usado na prática com o uso de moldes em liga de bronze com condutividade de 77 W/m.K. atingindo-se velocidades bem superiores. Nota-se na curva que para uma condutividade de 77 W/m.K teríamos uma % de arrefecimento de 120%.

2-Número de furos: A transferência de calor por convecção é também função da área de contato que troca calor. Aumentando-se o número de furos aumenta-se a área de contato e por consequência a troca por convecção.

Também é um parâmetro de grande influência pois ganha-se 5% em eficiência adicionando-se apenas 9 furos ao molde.

3-Diâmetro da coroa dos furos: Aproximando os furos da superfície interna do molde diminui-se a espessura de troca de calor por condução, e como o fluxo transferido é constante a temperatura da superfície do molde em contato com o ar de arrefecimento também aumenta e como vimos anteriormente ganha-se em eficiência.

Este parâmetro tem influência moderada pois é necessário diminuir-se 8mm no diâmetro da coroa dos furos para se ganhar 5% em eficiência. Nota-se que o diâmetro do molde deste produto é apenas de 18mm.

-Diâmetro externo dos moldes: Este parâmetro não tem quase nenhum efeito sobre a eficiência. Ganha-se apenas 1% em eficiência para um aumento de 10% do diâmetro do molde. A transferência de calor sendo interna ao molde é de se esperar que o seu diâmetro externo pouco influencie.

-Diâmetro dos furos: Dois efeitos contrários se somam na influência deste parâmetro. Aumentando o diâmetro dos furos aumenta-se a área de contato da troca por convecção o que aumenta a troca, porém com furos maiores diminui-se a velocidade de contato do ar de arrefecimento diminuindo assim a troca de calor. Para furos um pouco maiores os efeitos se sobrepõem não influenciando assim a eficiência.

Mas para furos menores a diminuição da área de contato tem influência maior que o ganho de velocidade do ar e perde-se 5% de eficiência com furos de diâmetros apenas 0.5mm menores.

IV - ANÁLISE DE COMPATIBILIDADE

Na análise de sensibilidade vimos como a variação dos parâmetros construtivos do molde afetavam a eficiência do sistema Vertiflow. Porém existem uma série de restrições que devem ser obedecidas para a variação destes parâmetros.

A figura 1 mostra um corte de um molde Vertiflow e uma vista de topo onde são mostradas as restrições que definimos a seguir. Estas restrições foram determinadas da prática com o uso do sistema, das tolerâncias de usinagem e de informações da Emhart.

-e1: Devido a problemas de resistência mecânica a espessura e1 não poderá ser inferior a 1 mm.

-e2: Para evitar que haja escape de ar com o desgaste do molde devido ao movimento de abrir e fechar a espessura e2 não poderá ser inferior a 3 mm.

-e3: A espessura e3 entre a cavidade interna e os furos internos não poderá ser inferior a 10 mm.

-e4, e5, e6: Por problemas de tolerância de usinagem, resistência mecânica, problemas de condução de calor e para evitar que os fluxos de ar na saída dos furos se encontrem provocando turbulências definiu-se que as espessuras e4, e5, e6 entre dois furos vizinhos não poderá ser inferior a 1,5 mm. E segundo indicações da Emhart para que a transmissão de calor se efetue corretamente entre as duas coroas de furos a espessura e6 deve ainda ser superior à metade do menor valor de e4 e e5.

-e7: também por questões de resistência mecânica e estanqueidade a espessura e7 não poderá ser inferior a 1,5 mm.

-e8: a espessura entre o fundo de forma e os furos internos pelo mesmo motivo não poderá ser inferior à 1 mm.

Por fim por questões construtivas o primeiro furo deverá estar deslocado de 25 graus da linha de centro do molde.

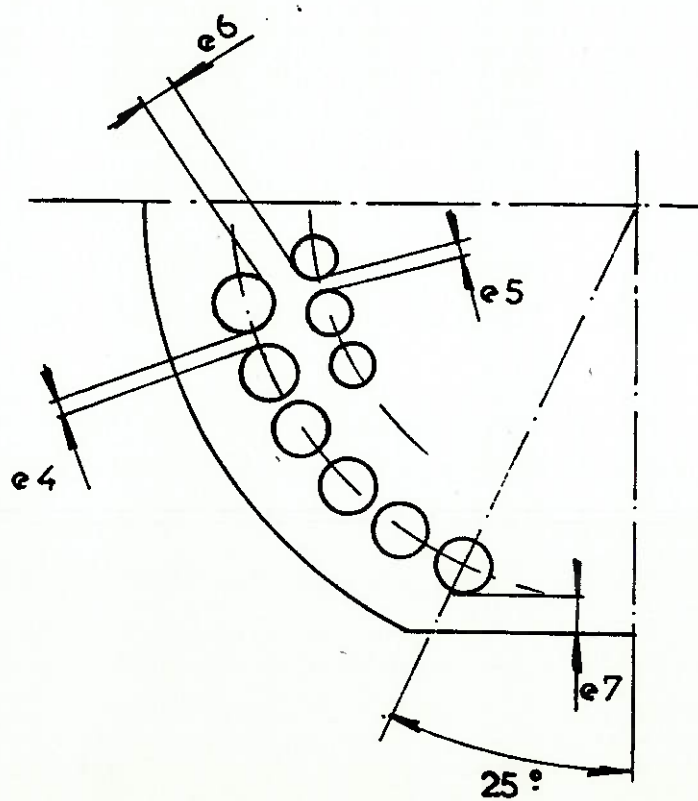
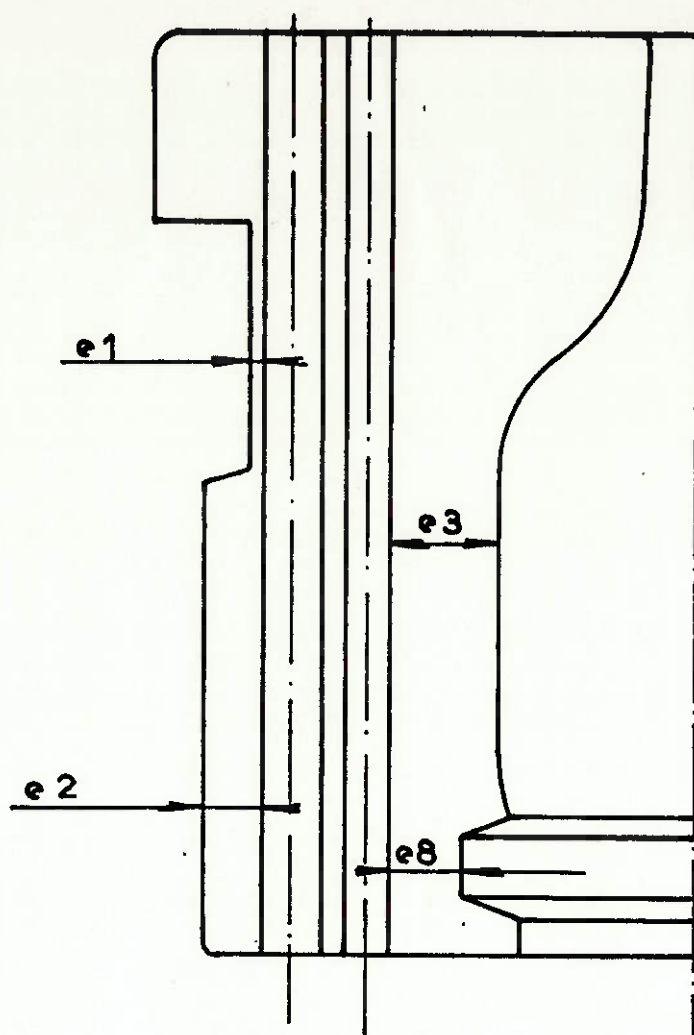


Figura 1: espessuras com restrições

V - ANÁLISE DA ESTABILIDADE

Vamos aqui analisar como o funcionamento do sistema Vertiflow é afetado pela alteração de suas variáveis de entrada. Para tal simulamos o programa VF II, como na análise de sensibilidade, variando uma a uma as variáveis de entrada enquanto as outras eram mantidas constantes na condição 100% de % de arrefecimento. As curvas de variação da eficiência também foram levantadas e são apresentadas a seguir. As variáveis analisadas foram:

6-Temperatura desejada do molde

7-Peso do artigo

8-Temperatura da gota

9-Temperatura do ar de arrefecimento

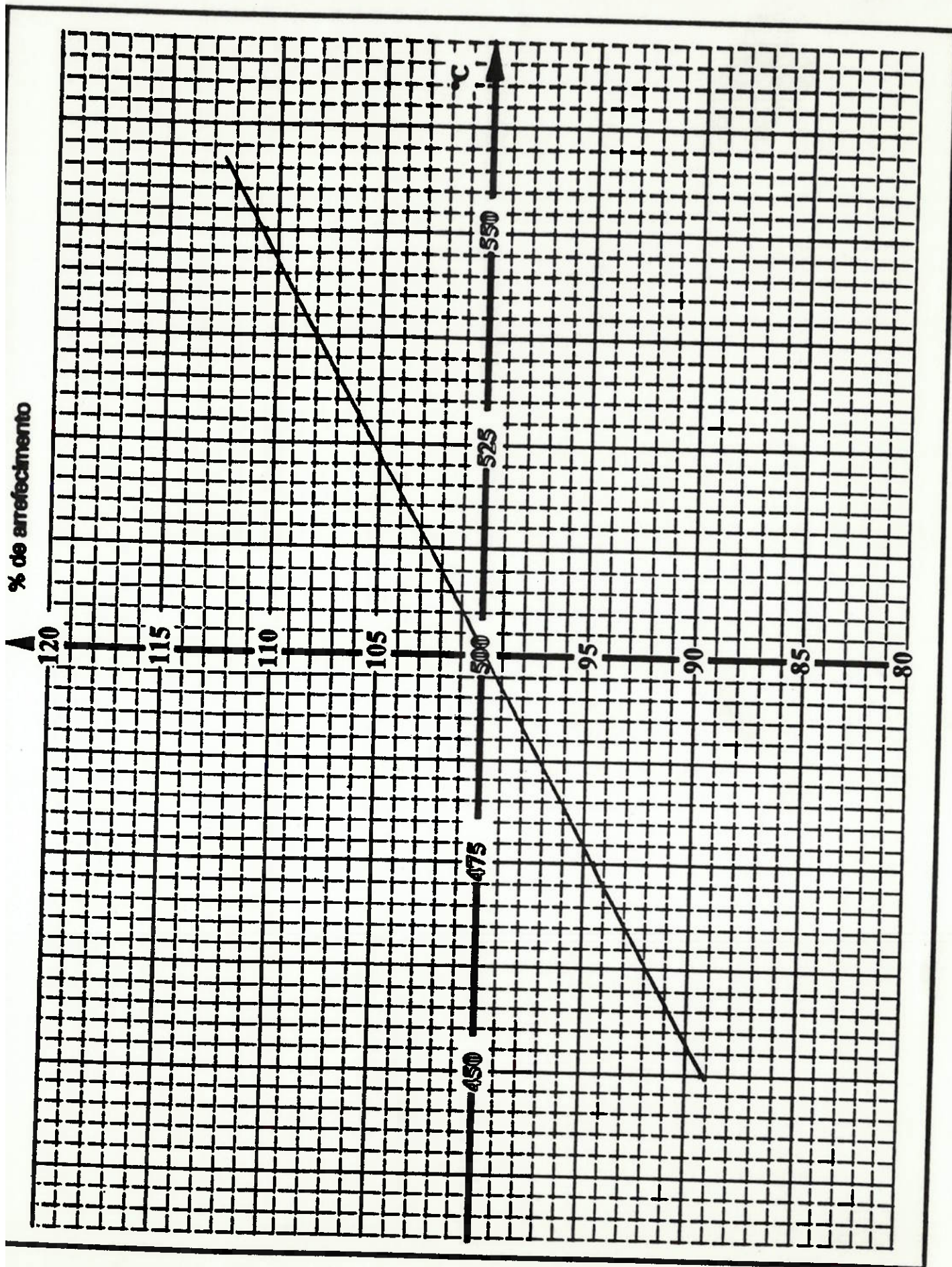
10-Pressão do ar do caixão

Definimos uma faixa de estabilidade para o sistema compreendida entre 95% e 105% de % de arrefecimento e anotamos os valores das variáveis nos limites da faixa estabelecida :

VARIÁVEL	% DE ARREFECIMENTO		
	95%	100%	105%
6-TEMPERATURA DESEJADA DO MOLDE (C)	478	500	523
	-4.5%	0	+4.5%
7-PESO DO ARTIGO (g)	136	126	117
	+9%	0	-7%
8-TEMPERATURA DA GOTA (C)	1246	1196	1146
	+4%	0	-4%
9-TEMPERATURA DO AR DE ARREFECIMENTO (C)	56	36	16
	+60%	0	-60%
10-PRESSÃO DO AR NO CAIXÃO (mmH ₂ O)	676	800	946
	-16%	0	+18%

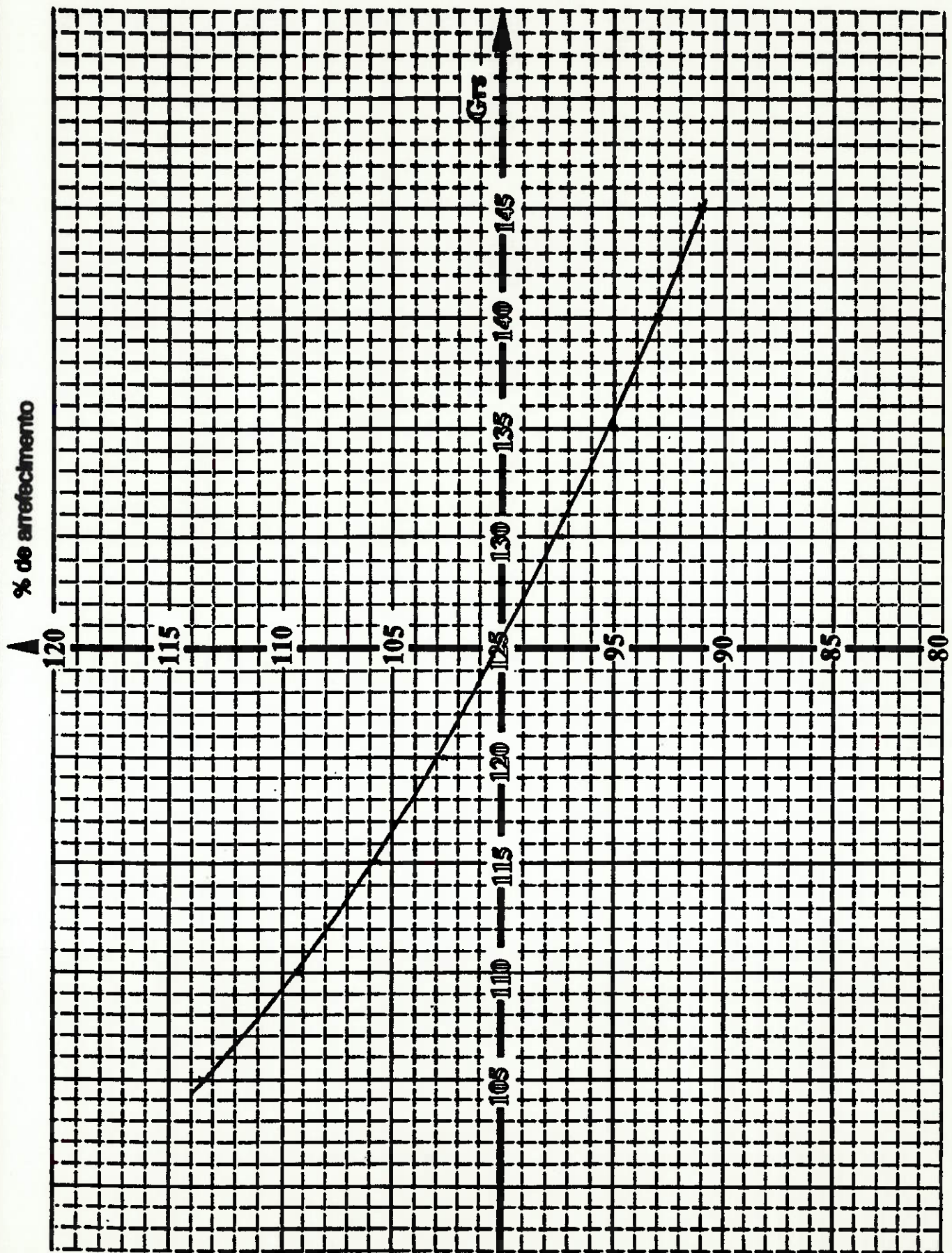
VERTIFLOW 6

% de arrefecimento em função
da temperatura desejada dos moldes



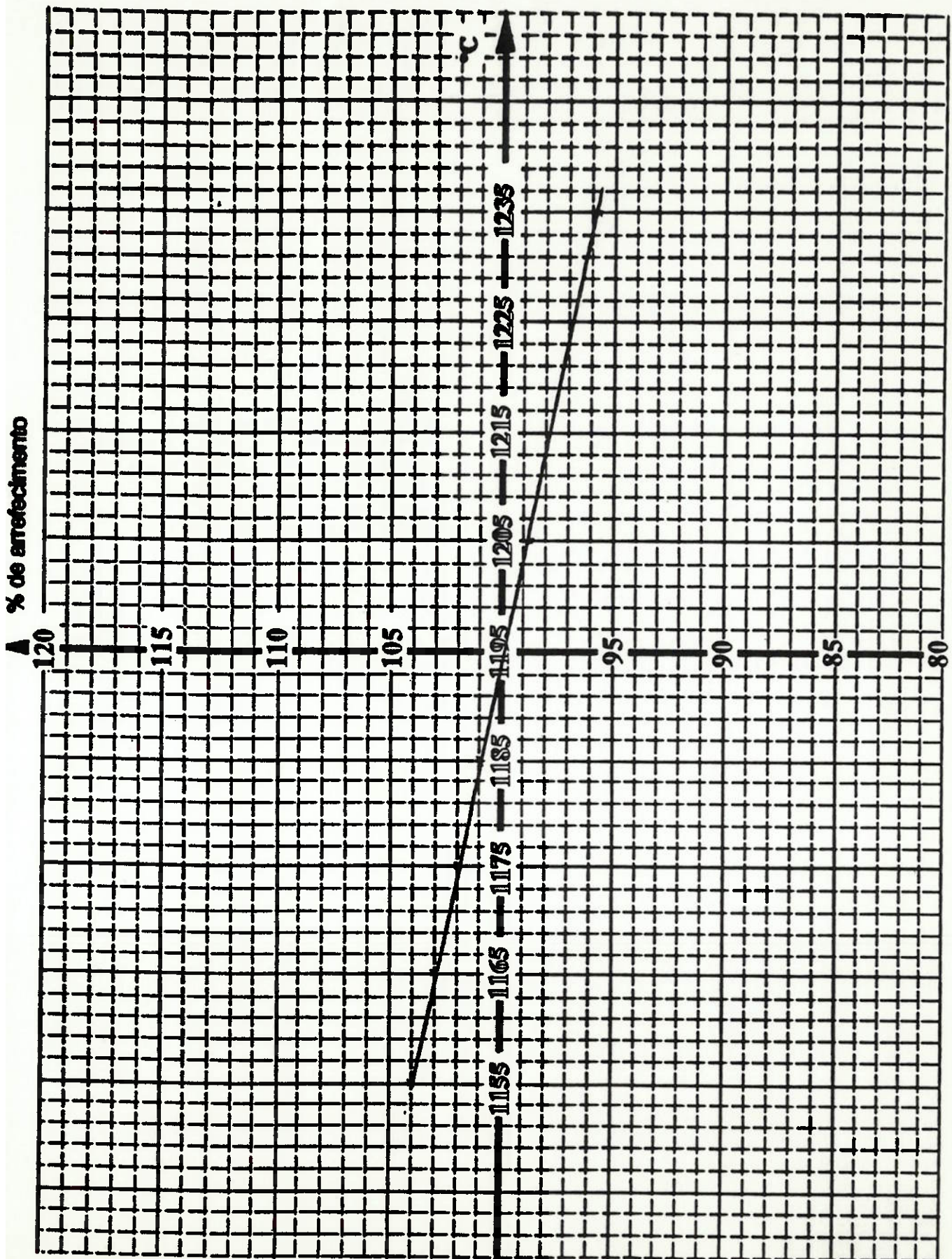
VERTIFLOW 7

% de arrefecimento em função
do peso do artigo



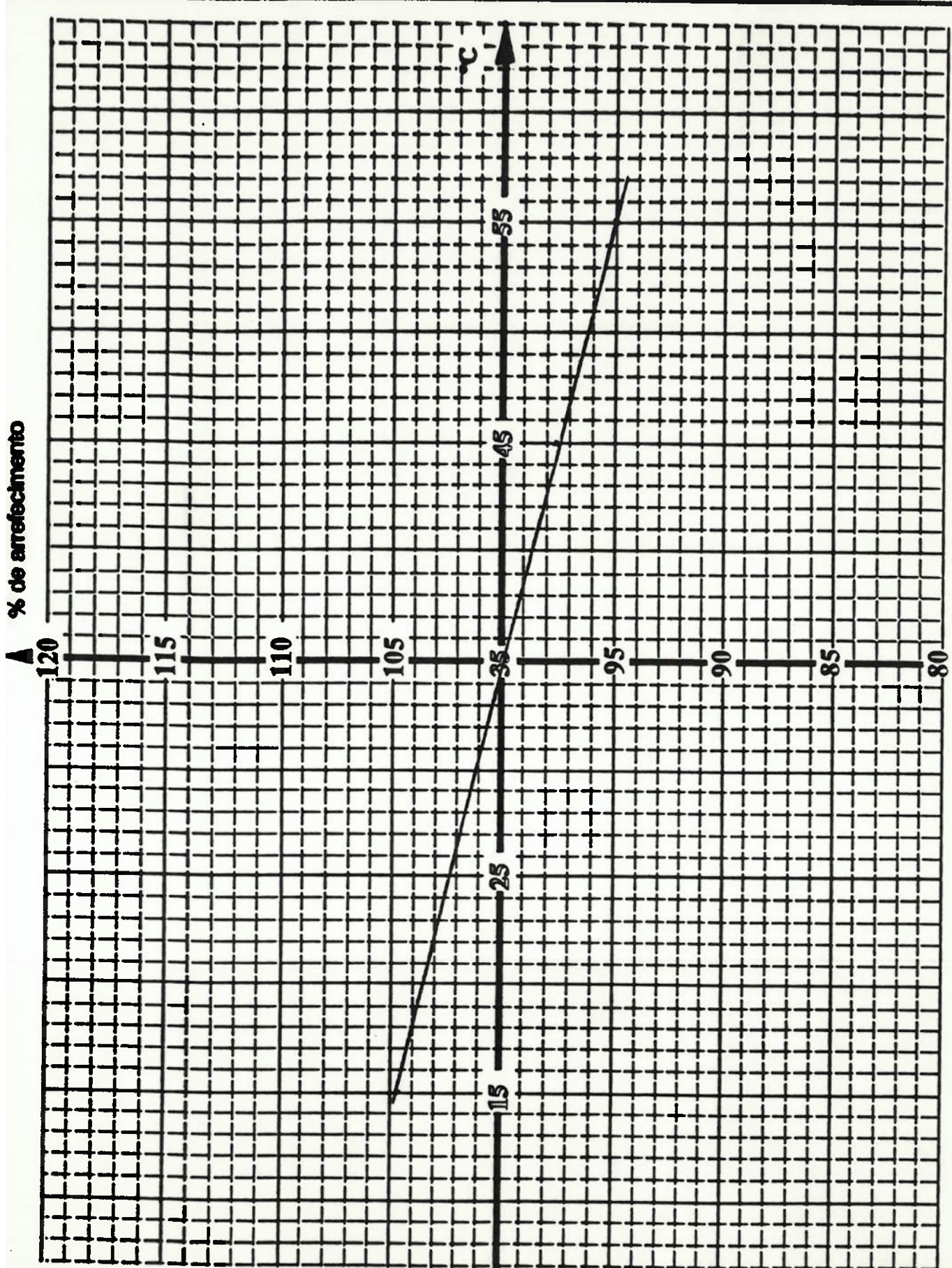
VERTIFLOW 8

% de arrefecimento em função
da temperatura da gota



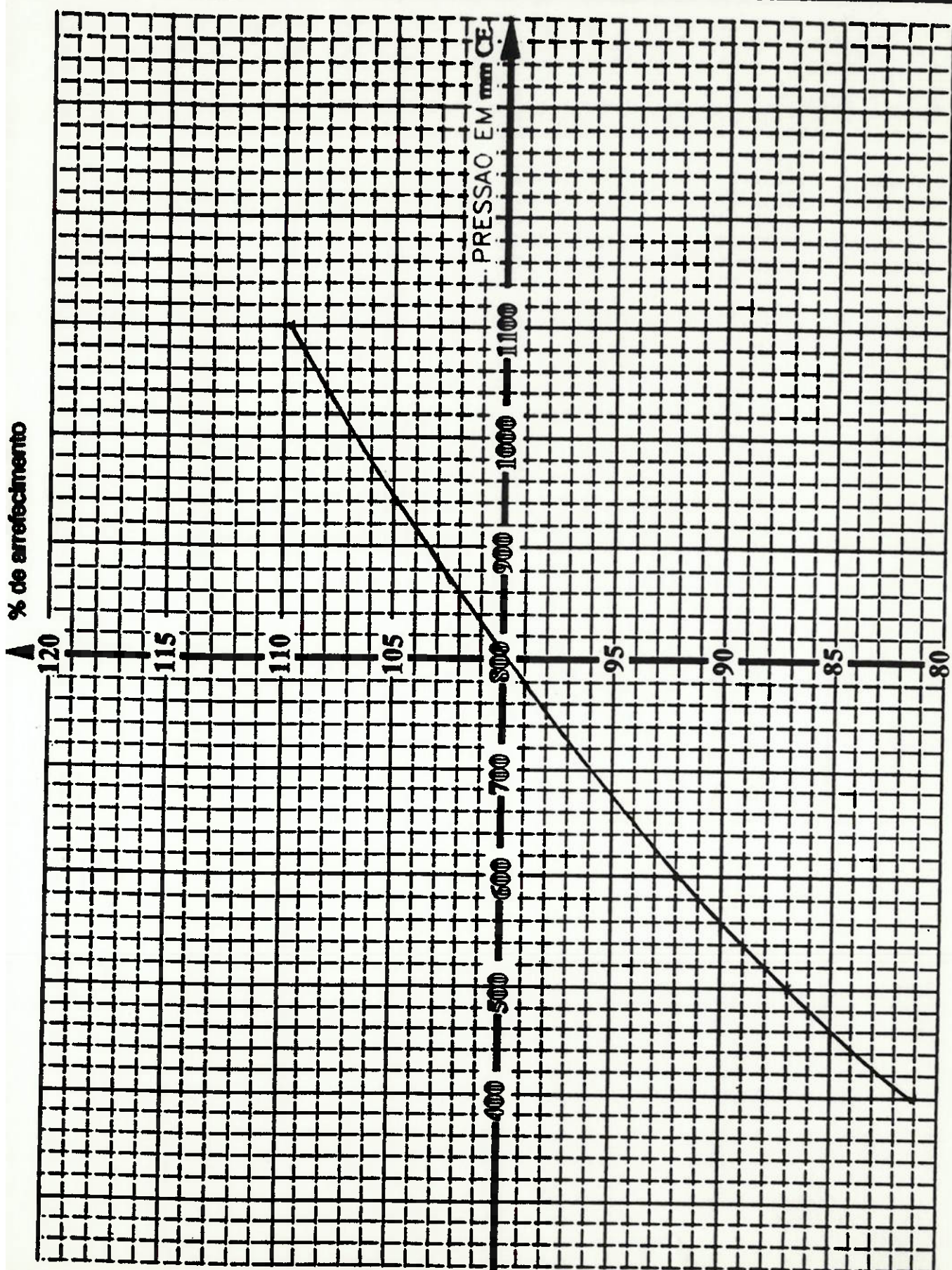
VERTIFLOW 9

% de arrefecimento em função
da temperatura do ar de arrefecimento



VERTIFLOW 10

% de arrefecimento em função
da pressão do caixão



Analisemos agora a variação de cada variável individualmente:

-Temperatura desejada do molde: A temperatura interna do molde deve ser definida como vimos no Estudo de Viabilidade para se ter as condições necessárias de viscosidade/temperatura do produto no fim da conformação. Da simulação vê-se que com uma variação de apenas 4.5% atingimos os limites de estabilidade do sistema. Ela deve então ser rigorosamente controlada durante a fabricação. O operador da máquina deverá então estar atento às condições da interface vidro/molde e lubrificar com frequência a superfície interna do molde para evitar que ela se aqueça.

-Peso do artigo: Esta variável também têm grande influência na eficiência do sistema, com uma variação média de 8% atinge-se os limites de estabilidade. O operador deverá então controlar com cuidado o peso do artigo. Para tal deverá retirar o produto na saída da forma e pesá-lo com frequência. Caso esteja fora dos limites deverá regular o corte da gota para voltar ao peso ideal.

-Temperatura da gota: Esta é a variável que necessita maior atenção. Uma pequena variação de 4% atinge os limites de estabilidade estabelecidos. Mas é também a mais difícil de se controlar pois depende do condicionamento do vidro na fornecedora e das condições do forno. Os termopares instalados na saída da fornecedora informam a temperatura do vidro e devem estar sob rigoroso controle do operador caso não haja um sistema de controle instalado.

-Temperatura do ar de arrefecimento: A temperatura do ar varia diariamente de 10 graus e anualmente pode variar de até 20 graus. O sistema é então estável às variações atmosféricas já que estas variações estão dentro do limite de estabilidade do sistema.

-Pressão do ar no caixão: A pressão do ar no caixão varia pouco durante a fabricação. Não é problema pois nunca

variará espontaneamente 100 mmH₂O que é a variação limite para a estabilidade do sistema.

VI - OTIMIZAÇÃO FORMAL

Na análise de compatibilidade definimos uma série de restrições para a configuração dos furos no molde Vertiflow. Os moldes por sua vez tem seu diâmetro externo limitado pela distância entre centros da máquina. Para uma máquina de 4 1/4" de entre centros o menor dos diâmetros (restrição e1) tem no máximo 104 mm.

Para a otimização definimos então os moldes com diâmetro máximo possível e seguindo as restrições impostas determinamos todas as configurações possíveis de furos que são apresentadas na tabela abaixo:

COROA EXTERNA					
DFe=5	DFe=6	DFe=7	DFe=8	DFe=9	DFe=10
DCe=108	DCe=107	DCe=106	IMPOSSIVEL		

COROA INTERNA	DFi=5	DCi=97	DCi=95	DCi=93	IMPOSSIVEL
		D=72	D=70	D=68	
	DFi=6	DCi=97	DCi=94	DCi=92	
		D=71	D=68	D=66	

Onde:

- DFe = diâmetro dos furos da coroa externa
- DFi = diâmetro dos furos da coroa interna
- DCe = diâmetro da coroa externa
- DCi = diâmetro da coroa interna
- D = diâmetro máximo de artigo que pode ser usado com esta configuração.

Na prática viu-se que a configuração que dá os melhores resultados é a com diâmetros de furos da coroa externa de 7 mm e da interna de 5 mm. Esta é considerada então a configuração ótima dos furos Vertiflow.

VII - PREVISÕES PARA O FUTURO

No futuro as novas máquinas a ser adquiridas pela Santa Marina deverão ser controladas eletronicamente e não mais por tambores mecânicos. Estas máquinas podem atingir velocidades bem maiores e só são viáveis com um sistema de arrefecimento adequado. No exterior estas máquinas utilizam o sistema Vertiflow que até o momento mostrou ser a melhor opção de arrefecimento.

Mas existem ainda grandes possibilidades de se atingir maiores velocidades com o Vertiflow e ele não está próximo de se tornar obsoleto. Todas as pesquisas estão agora voltadas no sentido de se melhorar o seu desempenho. Estudam-se novas ligas de maior condutividade e estão desenvolvendo a terceira coroa de furos. A Saint Gobain está hoje a frente de todas as vidrarias neste sentido e já vem testando moldes com 3 coroas de furos fundidos em liga de bronze de alta condutividade.

VIII - PREVISÃO DO TEMPO DE FUNCIONAMENTO

O mecanismo Vertiflow tem uma vida muito grande. O único componente que se desgasta é a mola do cilindro de controle dos dampers que se desgasta com o tempo. A Saint Gobain para diminuir este problema substitui as molas do mecanismo por outras de maior rigidez. Mesmo assim elas são substituídas na reforma da máquina (de 18 em 18 meses).

E como o mecanismo em si não está sujeito a nenhum esforço mecânico seu tempo de funcionamento é muito grande.

IX - CONCLUSÃO

Este estudo teve por objetivo confirmar a escolha feita pela Santa Marina em escolher o sistema Vertiflow para substituir o atual sistema clássico de arrefecimento de moldes usado.

No estudo de viabilidade apresentou-se o problema do arrefecimento dos moldes e a necessidade um sistema de melhor desempenho. Foram também apresentados todos os sistemas conhecidos de arrefecimento.

O projeto básico mostrou ser o Vertiflow a melhor opção para a Santa Marina e estudou o seu desempenho.

Ensaio de fabricação estavam marcados para Junho de 90 mas uma série de fatores ligados principalmente aos acontecimentos políticos e econômicos deste ano e à dificuldade em se encontrar um fornecedor capaz de furar os moldes dentro das tolerâncias exigidas desmotivaram a equipe do Centro Técnico e a direção da empresa.

Esperamos que este trabalho venha a contribuir para se retomar os ensaios e implantar o sistema que trará grandes benefícios.