

CAPÍTULO 7 - PROJETO DE UM MOLDE DE INJEÇÃO

7.1. GENERALIDADES

O projeto de um molde de injeção constitui problema complexo, cuja importância não pode ser desprezada. Dele depende a garantia da produção de moldados de qualidade, já que pouca ou nenhuma compensação poderá ser conseguida da máquina, durante o processo de moldagem. A atenção no projeto deve ser complementada com o zelo no uso, a fim de garantir que o custo do molde possa vir a ser diluído sobre uma produção razoável, de no mínimo 500.000 ciclos de moldagem, a preferivelmente bem mais do que isso. O uso de componentes padronizados contribui para a redução dos custos de projeto e manufatura dos moldes, e deve, por isso, ser enfatizada tanto quanto possível.

Um projeto completo envolve a aplicação de conhecimentos de uma ampla gama de setores da Engenharia Mecânica e da Engenharia de Materiais. O conhecimento do comportamento reológico dos polímeros, juntamente com o desenho das peças pretendidas, e de um primeiro esboço do molde, permite estimar os esforços que serão desenvolvidos no ciclo de moldagem. Estes servem para selecionar a máquina e para o dimensionamento das peças que integram o molde, à luz de modelos matemáticos que permitam a estimativa dos estados de tensão a que as mesmas estarão sujeitas em serviço. A concepção do molde pode exigir conhecimentos da teoria dos mecanismos, especialmente na moldagem de peças de geometria mais complexa. As trocas térmicas que deverão ocorrer entre o material moldado e o molde, e o dimensionamento do sistema de refrigeração,

exigem o conhecimento das características termodinâmicas do material e conhecimentos básicos de sistemas térmicos. Finalmente, as solicitações mecânicas e térmicas impõem severos requisitos sobre os materiais selecionados para a construção do molde.

Um projeto adequado deve ser intensamente discutido entre todos os interessados. Quaisquer dúvidas devem ser resolvidas antes de se dar início à construção do molde. Ocorrendo dúvidas quanto ao adequado funcionamento do molde durante a construção do mesmo, é preferível interromper a produção até que o problema seja devidamente esclarecido ou resolvido.

O projeto de um molde requer normalmente decisões prévias sobre um grande número de alternativas possíveis, relativas a diferentes aspectos do mesmo:

- Número e disposição das cavidades;
- Alimentação (simples, canal quente ou canal isolado);
- Materiais para as várias peças;
- Injeção (simples ou múltipla, tipo(s) do(s) ponto(s) de injeção);
- Linha divisória (regular ou irregular, molde de duas ou três placas);
- Sistema de extração dos moldados;
- Sistema de refrigeração do molde;
- Fabricação (usinada, fundida, por eletroerosão, etc.).

As decisões com relação a esses diversos aspectos não são, em geral, independentes. Elas se interrelacionam, como o mostra a Figura 7.1.

No presente capítulo, os diferentes aspectos envolvidos no projeto de um molde de injeção serão esclarecidos à luz de um exemplo, baseado em um problema concreto.

Evidentemente que as soluções aqui adotadas serão

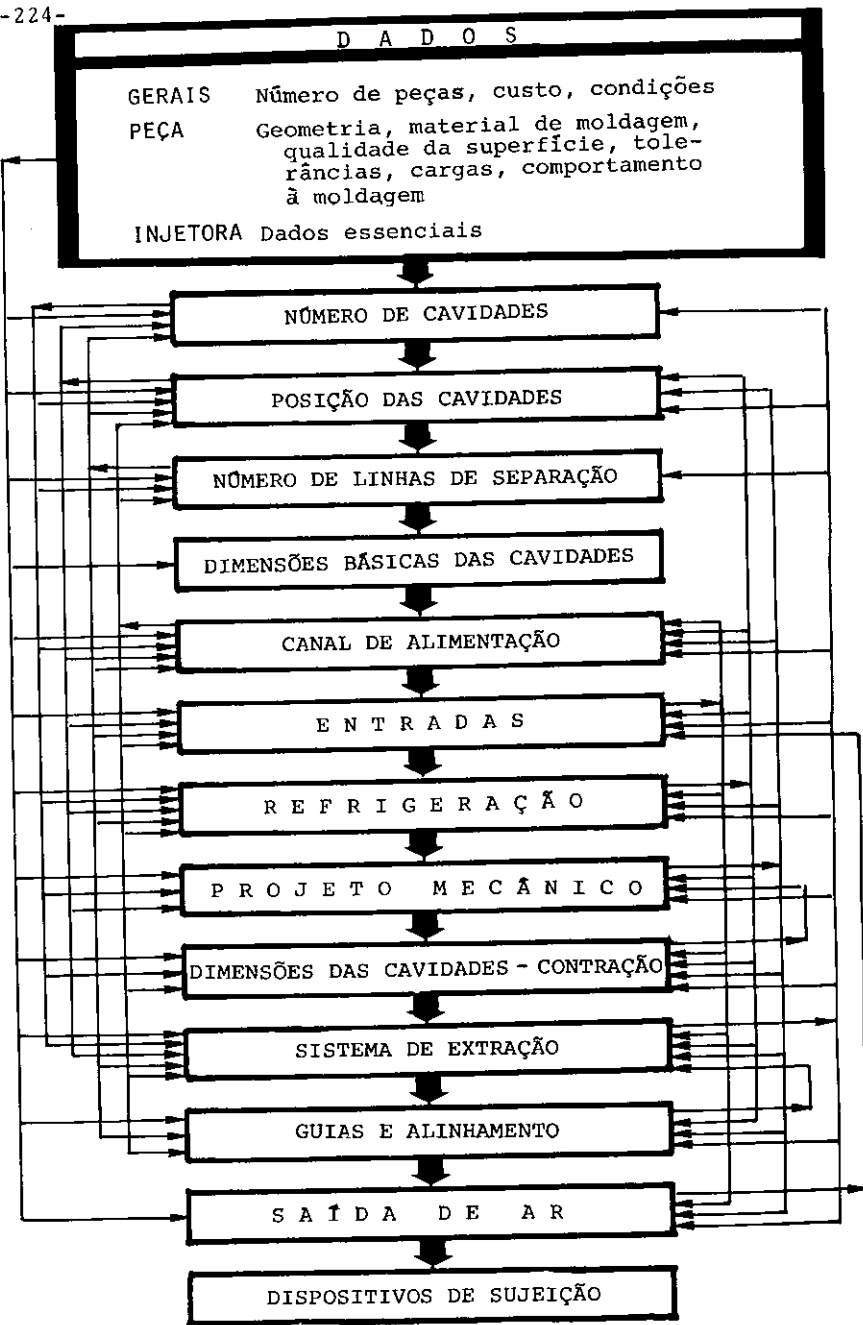


Figura 7.1 - Etapas do projeto de um molde de injeção.

pertinentes ao problema em pauta, e que soluções diferentes poderão vir a ser preferíveis para o projeto de outros moldes que envolvam peças, materiais e requisitos distintos. O objetivo do capítulo, em verdade, é o de mostrar a linha de raciocínio envolvida na atividade de projeto.

7.2. PROJETO DE UM MOLDE

7.2.A. PROPOSIÇÃO DO PROBLEMA

Quer-se projetar um molde de injeção para a produção de copos para cafezinho, como o que está ilustrado na Figura 7.2. Eles deverão ser confeccionados em polipropileno. O pedido ascende a 800.000 peças por ano.

Dispõe-se de uma injetora com as seguintes características:

- Capacidade de injeção e de plastificação: 250 N/h
(Para o material de referência)
- Força de fechamento dos moldes: 100 kN
- Curso máximo de fechamento: 400 mm
- Pressão de linha: 3 MPa
- Diâmetro do cilindro principal: 80 mm
- Diâmetro do cilindro de acionamento: 200 mm

7.2.B. CAPACIDADE DA MÁQUINA

A capacidade nominal da máquina precisa ser corrigida para o material a ser usado na moldagem, no caso, o polipropileno, de acordo com as fórmulas já vistas à página 172, com dados numéricos que podem ser extraídos da Tabela 8 (Página 174), e que vão relacionados a seguir:

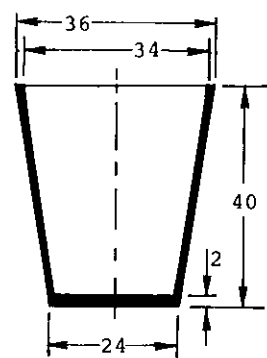


Figura 7.2 - Desenho da peça.

	Polistireno	Polipropileno
Calor específico (kJ/N/°C)	0,136	0,196
Peso específico (kN/m ³)	11	8,9
Fator volumétrico	2	1,95
Temperatura de injeção (°C)	100	200

A capacidade de plastificação da injetora, ao processar polipropileno, pode, portanto, ser calculada como

$$C_p = 250 \times \frac{0,136}{0,196} = 173,4 \text{ N/h},$$

enquanto que a capacidade de injeção é calculada como

$$C_i = 250 \times \frac{8,9}{11} \times \frac{2}{1,95} = 207,4 \text{ N/h}.$$

Verifica-se que crítica na moldagem do polipropileno, na máquina disponível, é a capacidade de plastificação, ou seja, a capacidade da injetora levar o material à temperatura de moldagem, o que em parte se justifica pela maior temperatura requerida para a moldagem deste material, relativamente ao material de referência.

Cumprе lembrar, outrossim, que não se deve operar no limite da capacidade da máquina, usando-se reduções que, em injetoras de êmbolo, como é o caso, são da ordem de 40%. Assim sendo, para efeito de projeto, adotar-se-á a capacidade de plastificação

$$C_p = 0,6 \times 173,4 = 104 \text{ N/h}.$$

7.2.c. REQUISITOS DE PRODUÇÃO

A produção de 800.000 peças por ano corresponde a aproximadamente 3200 peças por dia útil. Considerando oito horas de trabalho por dia, terão de ser produzidas 400 peças por hora.

Contudo, é necessário prever uma reserva para tempos improdutivos, devidos a paradas para a manutenção da máquina ou da ferramenta, ou devidos a defeitos nestas, ou

outras razões (greves, por exemplo). Fixando arbitrariamente em 20% essa folga, dever-se-á elaborar o projeto para uma produção da ordem de 500 peças por hora.

Admitindo, com base na experiência, e como se confirmará posteriormente, um ciclo de moldagem da ordem de 30 segundos, o que equivale a 120 ciclos por hora, a produção de verá suprir

$$n = \frac{500}{120} = 4,1666 \text{ peças/ciclo}.$$

Como obviamente não se irá moldar uma fração de peça, fixa-se, então, uma produção de quatro peças por ciclo, o que irá exigir 125 ciclos por hora, correspondendo a

$$\frac{3600}{125} = 28,8 \text{ segundos/ciclo}.$$

Por essa linha de raciocínio foi definida, portanto, a opção de um molde de múltiplas cavidades.

DADO

Em decorrência dessa opção, ir-se-á planejar a moldagem de quatro peças num molde de três placas, com injeção pelo fundo, com quatro canais de distribuição de igual comprimento, partindo do canal de alimentação (Figura 7.3). A alimentação pelo fundo garante um fluxo regular e axissimétrico de preenchimento das cavidades, eliminando problemas de contração desigual e deixando a marca do ponto de injeção na superfície que no uso da peça, ficará menos aparente.

As dimensões básicas serão, agora, tentativamente definidas, em caráter provisório, para fim de encaminhamento dos cálculos (Figura 7.4).

O canal de distribuição, em sua extensão horizontal, será realizado, por conveniência de usinagem, com seção transversal trapezoidal, com as dimensões mínimas (alargamento médio) de 3 mm, já que o volume de material a ser transferido à cavidade da peça não é grande. O comprimento do canal pode ser razoavelmente fixado em 45 mm, aí

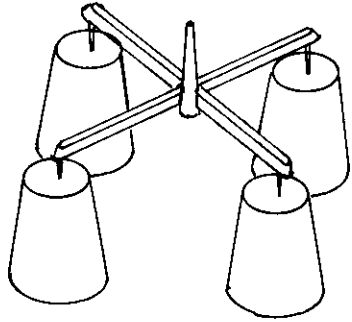


Figura 7.3 - A concepção do moldado.

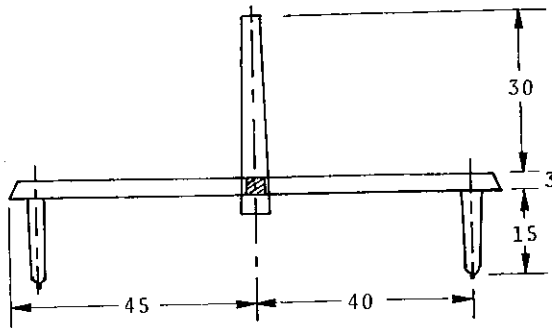


Figura 7.4 - O sistema de alimentação e suas dimensões básicas.

incluída uma extensão adicional para um poço frio secundário. Posteriormente, quando se tiver de complementar a ferramenta, e, especialmente, alojar os canais de refrigeração, esse comprimento poderá ter de ser ampliado.

b) A extensão vertical dos canais de distribuição, também por conveniência de usinagem, será cônica, com o diâmetro máximo de 3 mm junto à extensão horizontal, caindo para 2 mm próximo à cavidade, convergindo num ponto de injeção capilar, com 0,5 mm de diâmetro, que deverá romper-se automaticamente por ocasião da abertura do molde. O comprimento dessa extensão vertical é inicialmente fixado em 15 mm.

c) O canal de alimentação, que deverá trazer o material para as quatro peças e respectivos canais de distribui-

ção, terá, como de praxe, execução cônica, com diâmetro mínimo de 3 mm e máximo de 5 mm, terminando em um poço frio. O comprimento desse canal de alimentação é fixado, inicialmente, em 30 mm.

Assim sendo, tem-se condições de calcular os volumes de material que serão contidos nas cavidades das peças, nos canais de distribuição e no canal de alimentação:

Volume de cada peça	4428,6 mm ³
Volume do canal de distribuição:	
Extensão horizontal	405,0 mm ³
Extensão vertical	39,4 mm ³
Volume parcial, por peça	4873,0 mm ³

Em decorrência:

Volume para quatro peças	19492 mm ³
Volume do canal de alimentação	385 mm ³
Volume de material movimentado por ciclo de moldagem	19877 mm ³

Esse volume, no caso do polipropileno, corresponde a um consumo de material, na moldagem, de

$$19877 \text{ mm}^3/\text{ciclo} \times 8,9 \text{ kN/m}^3,$$

ou seja, de 0,1769 N/ciclo (aproximadamente 18 g/ciclo).

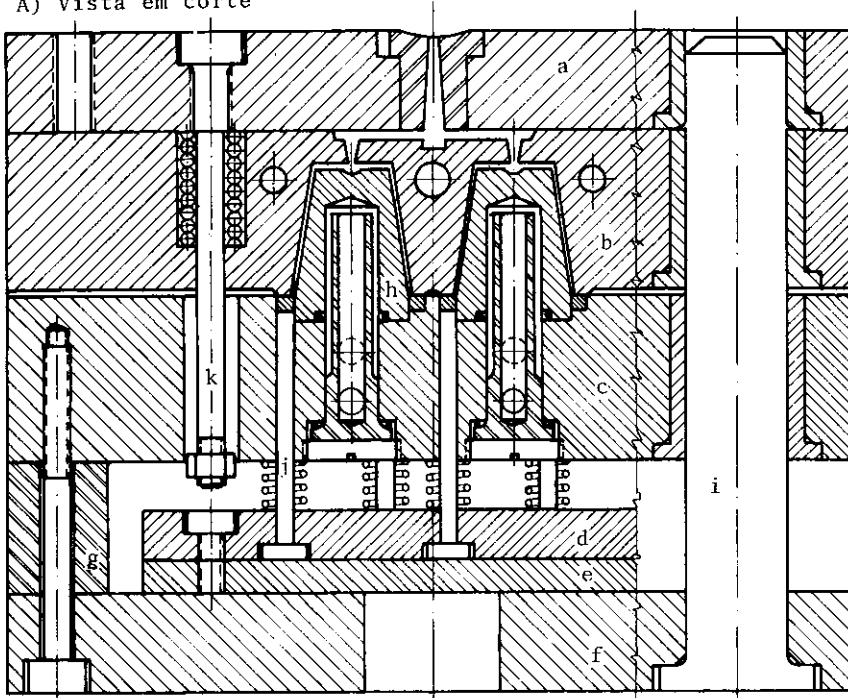
A 125 ciclos por hora, ter-se-á um consumo horário de 22,12 N/h, valor que se situa bem abaixo dos 104 N/h assegurados pela injetora em condições conservadoras.

7.2.E. A CONCEPÇÃO DO MOLDE

Em decorrência do que foi visto até aqui, o molde toma, ainda que provisoriamente, a forma dada na Figura 7.5.

Pode-se, agora, estabelecer soluções para problemas técnicos de operação, como sejam a definição de diversos elementos da ferramenta, o sistema de extração, o sistema de refrigeração, etc.. Estabelecidas essas soluções, pode-se passar à etapa do dimensionamento definitivo, durante a qual

A) Vista em corte



B) Contraplaca dos extratores

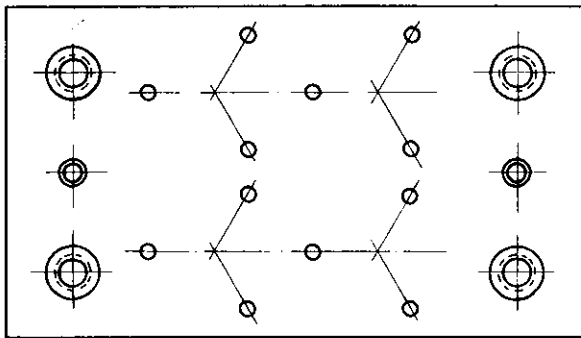


Figura 7.5 - Concepção da ferramenta - 1a. parte: vista em corte; contraplaca dos extratores. a) Placa de base anterior; b) Placa das cavidades; c) Placa dos machos; d) Contraplaca dos extratores; e) placa dos extratores; f) Placa de base posterior; g) Bloco separador; h) Machos, com sistema de refrigeração; i) Colunas de guia; j) Extratores; k) Limitadores de curso.

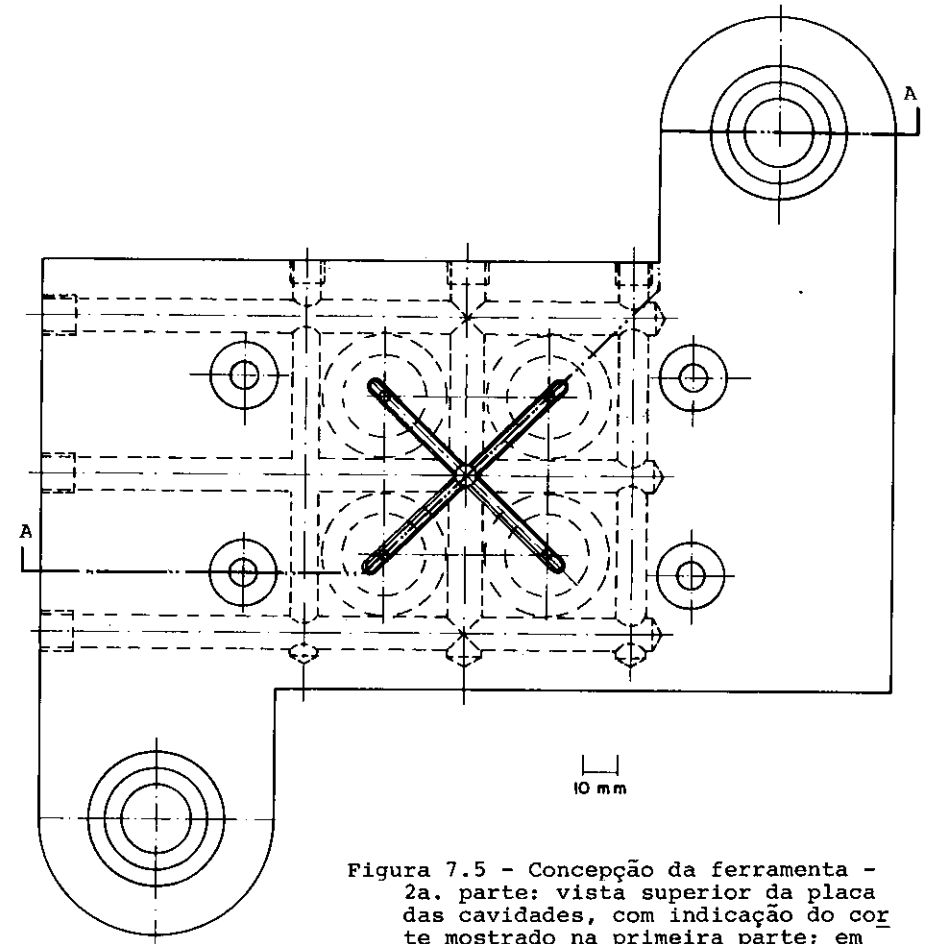


Figura 7.5 - Concepção da ferramenta - 2a. parte: vista superior da placa das cavidades, com indicação do corte mostrado na primeira parte; em tracejado mostram-se os canais de refrigeração.

se farão, também, as opções definitivas quanto aos sistemas de refrigeração e de extração, assim como a especificação dos elementos normalizados (molas, parafusos, colunas e buchas de guia, etc.).

Trata-se de um molde típico de três placas, com machos postigos (para simplificação e barateamento da usinagem). A refrigeração da placa das cavidades é feita pela circulação de água.

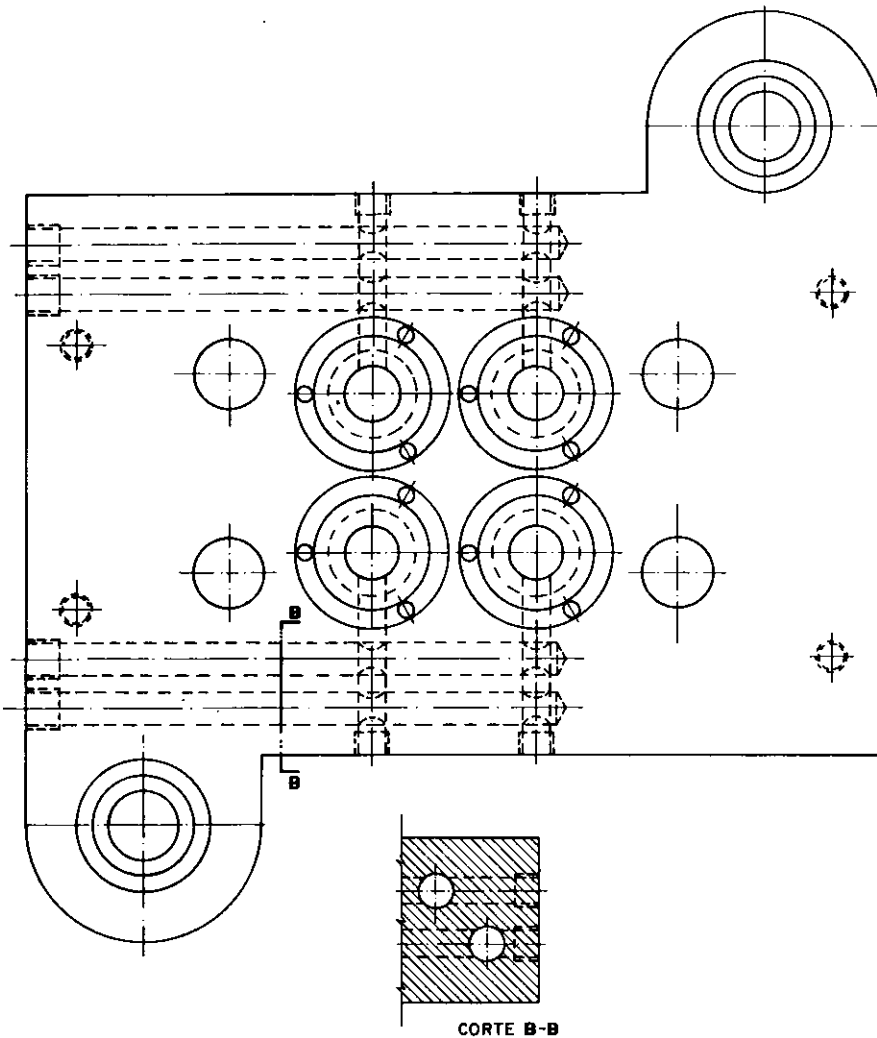


Figura 7.5 - Concepção da ferramenta - 3a. parte: vista superior da placa dos machos, com indicação dos pinos e anéis de extração, e, em tracejado, dos canais de refrigeração.

culação de água por canais perfurados nos sentidos longitudinal e transversal da placa, com tampões nas extremidades das perfurações transversais. Perfurações semelhantes na placa dos machos trazem a água até as buchas escamoteáveis alojadas no interior de perfurações praticadas na base inferior dos machos. A água de refrigeração ascende pelo interior dessas buchas e extravasa pela folga existente entre estas e o macho, daí sendo removida. Todos os pontos de alimentação e retorno da água de resfriamento estão alojados no mesmo lado da ferramenta, a fim de que as respectivas mangueiras não interfiram com a operação da mesma.

7.2.F. FORÇA DE FECHAMENTO

A pressão no cilindro principal (de injeção) é expressa por

$$p_i = p_l \left(\frac{d_a}{d_c} \right)^2$$

onde p_l é a pressão de linha (gerada pela bomba ou suprida através dos acumuladores); d_a e d_c são, respectivamente, os diâmetros do êmbolo de acionamento e do cilindro principal (Figura 7.6). Para os dados do problema,

$$p_i = 3 \left(\frac{200}{80} \right)^2 = 18,75 \text{ MPa.}$$

A pressão nas cavidades do molde, dado o comportamento não pascalino do material plastificado, corresponde a

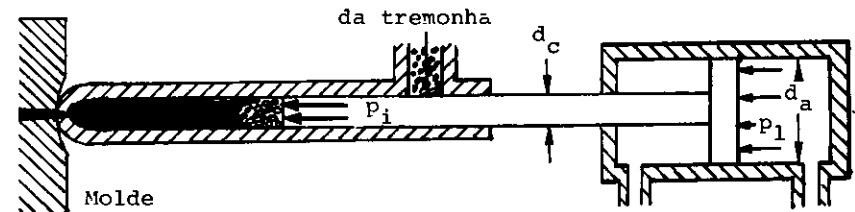


Figura 7.6 - Multiplicação de pressão na moldagem por injeção.

$$p_c = \left(\frac{1}{3} \text{ a } \frac{1}{2} \right) p_i,$$

onde o fator a adotar depende das dimensões, das espessuras e da complexidade do moldado (sendo menor para moldes pequenos ou simples, e para maiores espessuras de parede).

No problema em pauta tem-se peças pequenas e de forma geométrica simples. O único limitante pode residir na pequena espessura de parede da manta lateral, de sorte que é razoável tomar

$$p_c = 0,4 p_i = 7,5 \text{ MPa.}$$

Essa pressão será exercida sobre uma área comprimida que pode ser obtida da projeção das peças na direção de moldagem:

$$A_c = 4 \frac{\pi}{4} 36^2 = 4072 \text{ mm}^2,$$

portanto a força de moldagem, $P = p_c A_c$, pode ser calculada como

$$P = 7,5 \times 4072 = 30540 \text{ N} \\ = 30,54 \text{ kN.}$$

A força de fechamento que a injetora assegura aos moldes (100 kN) é, portanto, plenamente suficiente para o serviço.

7.2.G. CURSO

O curso requerido para a abertura dos moldes e para a extração das peças e do restolho corresponde a, pelo menos, o dobro da altura das peças, mais a altura total do restolho, que se pode tomar da Figura 7.4. Assim,

$$h \geq 2 \times 40 + 48 = 128 \text{ mm,}$$

e esse valor se situa nos limites possíveis da máquina disponível.

7.2.H. RESFRIAMENTO DOS MOLDES

A quantidade de calor a ser extraída da ferramenta por hora de operação é expressa pela equação

$$Q = G_h q,$$

que já foi vista à página 182, na qual G_h é a quantidade de material injetada por hora, e q é a quantidade de calor que deverá ser extraída por unidade de peso de moldado, que pode ser obtida, para o material específico, da Tabela 8 (Página 174). Tem-se, pois,

$$G_h = 22,12 \text{ N/h} \quad \text{e} \quad q = 120 \text{ kJ/N,}$$

donde

$$Q = 120 \times 22,12 = 2654,4 \text{ kW.}$$

Essa quantidade de calor deverá ser removida pela água de refrigeração, num fluxo mínimo dado pela equação

$$G_a = \frac{Q}{1536 \eta (t_g - t_a)},$$

também vista à página 182, onde se esclarece sobre os elementos que intervêm.

Para o sistema de refrigeração adotado neste projeto (com circulação da água em perfurações nos próprios blocos dos moldes) pode-se adotar uma eficiência da ordem de 60%. Supondo que a água de refrigeração seja alimentada a uma temperatura de 20°C, aquecendo-se até 40°C, tem-se

$$G_a = \frac{2654,4}{1536 \times 0,6 (40 - 20)} = 0,144 \text{ kN/h,}$$

o que corresponde a 14,4 litros de água por hora, ou seja, a aproximadamente 0,115 litros de água por ciclo de moldagem. Tal volume de água não apresenta problemas para ser implementado, de sorte que o projeto não apresenta dificuldades executivas sob este aspecto.

7.2.1. TEMPO DE RESFRIAMENTO

Essa quantidade de água deve ser suprida às placas das cavidades e dos machos, através das canalizações ilustradas na Figura 7.5. Crítico será o resfriamento dos machos, dadas as precárias condições de evacuação de calor que os mesmos apresentam. A execução oca, com as buchas ilustradas na Figura 7.5, assegura uma eficiente refrigeração, apresenta boa manutenibilidade e dispensa maiores comentários.

O tempo necessário ao resfriamento dos moldes, sob condições adequadas de refrigeração, é calculado pela equação

$$\theta = - \frac{t^2}{2\pi\alpha} \ln \left[\frac{\pi \left(\frac{t_d}{t_i} - \frac{t_m}{t_m} \right)}{4 \left(\frac{t_d}{t_i} - \frac{t_m}{t_m} \right)} \right] \quad s$$

já dada à página 183.

Admite-se que os moldes sejam operados, como é usual, a uma temperatura (t_m) da ordem de 50°C. Os demais intervenientes da equação podem ser obtidos da Tabela 8:

Temperatura de distorção:	90°C
Temperatura de injeção:	250°C
Difusividade térmica:	0,079 mm ² /s.

É possível, assim, obter uma relação entre o tempo requerido para o resfriamento e a espessura local do moldado:

$$\theta = - \frac{t^2}{2\pi \cdot 0,079} \ln \left[\frac{\pi \left(\frac{90}{250} - \frac{50}{50} \right)}{4 \left(\frac{90}{250} - \frac{50}{50} \right)} \right] = 3,729 t^2 \quad s$$

Daí tira-se:

LOCAL	t (mm)	θ (s)
Manta lateral das peças	1	3,7
Fundo das peças	2	15
Restolho	3	34

Levando-se em conta que a lateral dos copos apresenta suficiente resistência à distorção após cerca de quatro segundos de resfriamento, e que os mesmos não serão solicitados pela placa do fundo, verifica-se que o ciclo anteriormente definido para a moldagem é compatível, havendo tempo suficiente para a injeção, o resfriamento, a abertura do molde e a extra

ção dos moldados. É claro que se deve contar com alguma deformação da árvore de alimentação, cuja espessura (3 mm) requer tempos consideravelmente maiores de resfriamento. Mas isso não afeta a qualidade dimensional das peças moldadas.

7.2.J. DIMENSIONAMENTO

A força de moldagem (30,54 kN) é o dado fundamental para a verificação das dimensões mínimas das placas (já que as mesmas já foram dimensionadas em função de outros aspectos do projeto). Serve, também, para dimensionar os demais elementos da ferramenta. Mas a análise de tensões e o dimensionamento estão além do escopo deste livro.

7.3. CRÍTICAS AO PROJETO

O projeto, como foi apresentado, precisa agora ser aperfeiçoado.

O duto de resfriamento que passa entre as cavidades resulta muito próximo à superfície das mesmas, podendo produzir resfriamentos localizados, que são indesejáveis. Consta-se, pois, que há necessidade de aumentar o espaçamento entre as cavidades, tornando mais longos os canais de distribuição. É necessário, igualmente, baixar o canal de refrigeração, para que o mesmo não fique tão próximo à árvore de distribuição. Há, também, que dimensionar os dutos de refrigeração.

É preciso, ainda, melhorar a solução dada à fixação dos machos e ao sistema de pinos e anéis de extração. Essas alterações em pouco irão afetar os cálculos já realizados, mas poderão determinar um aumento nas dimensões externas da ferramenta.

Finalmente, é ainda necessário especificar os materiais que serão adotados na construção das diversas peças.

A Figura 7.7 mostra uma versão melhorada da ferra-

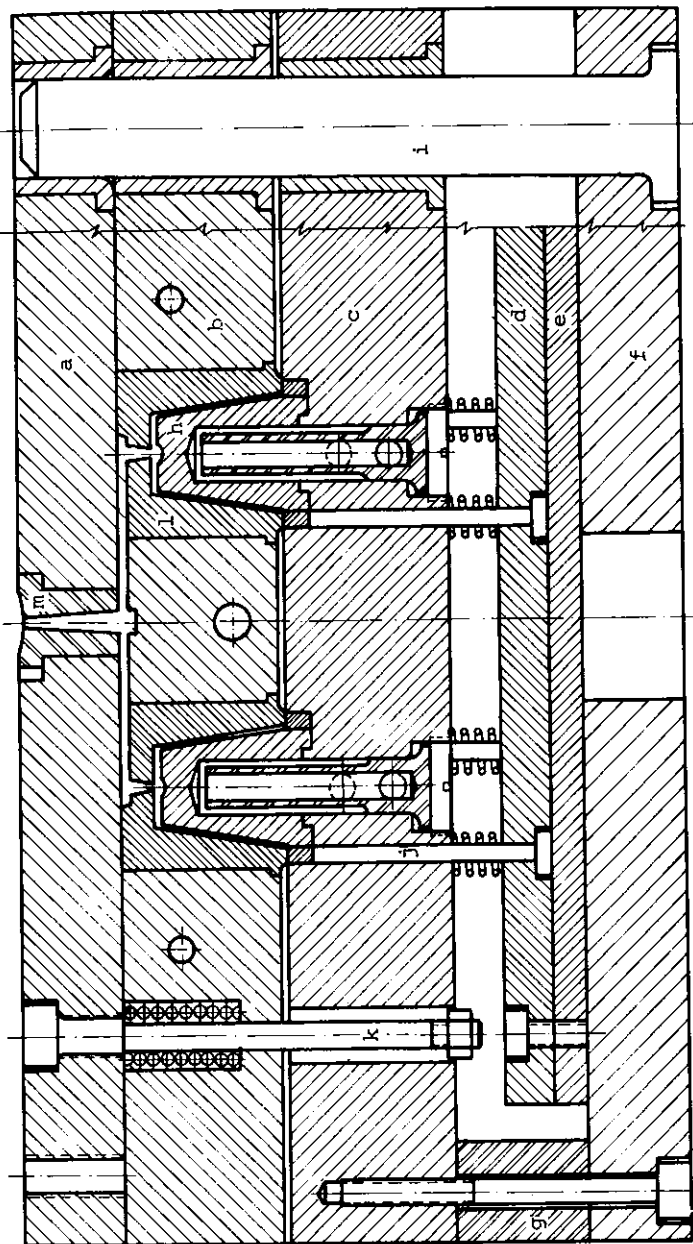


Figura 7.7 - Versão melhorada do projeto da ferramenta. a) Placa de base anterior; b) Placa das cavidades; c) Placa dos machos; d) Contraplaca dos extratores; e) Placa dos extratores; f) Placa de base posterior; g) Bloco separador; h) Machos com sistema de refrigeração; i) Colunas de guia; j) Extratores; k) Limitadores de curso; l) Insertos das cavidades; m) Bucha de injeção.

menta, incorporando modificações que consideram as críticas apresentadas acima.

Nesta versão é duplicado o comprimento da extensão horizontal dos canais de distribuição. Isso representa uma adição de aproximadamente 1620 mm^3 ao consumo de material por ciclo de moldagem, que passa a ser de 21500 mm^3 , correspondendo a $0,191 \text{ N/ciclo}$ (menos de 20 g/ciclo), o que equivale a um consumo horário de $23,92 \text{ N}$ de material.

Com esse dado a necessidade de água de refrigeração passa a ser de $0,156 \text{ kN/h}$, correspondendo a $0,125$ litros por ciclo de moldagem.

Pelo que se observa na Figura 7.7, apenas os machos (h), os insertos das cavidades (l) e a bucha de injeção (m) terão de ser confeccionados em aço resistente ao calor, podendo as demais peças ser de aço comum ao carbono (exceto, evidentemente, as buchas de guia).

Finalmente cabe lembrar que no dimensionamento das cavidades há que definir dimensões e tolerâncias de usinagem que levem na devida conta a contração das peças ao resfriar.