



LIRIO SCHAEFFER

Introdução ao projeto de ferramentas para forjamento a quente em matriz fechada

O processo de forjamento é largamente utilizado na obtenção de peças metálicas por forjamento. Todavia, para que a ferramenta apresente bom desempenho, são necessários alguns cuidados no desenvolvimento do projeto da ferramenta.

Desde a sua descoberta, ficou evidente para o ser humano que os metais seriam vitais para a sua sobrevivência. Logo, os procedimentos para transformá-los em produtos acabados passaram a ser elementos significativos na supremacia de um povo sobre outro. Há centenas de anos antes de Cristo, o ouro, a prata, o cobre, o bronze e o zinco já eram transformados em jóias, armas e outros artefatos domésticos.

O forjamento é um dos processos empregados para transformar metais do estado bruto (geralmente obtidos por processos da siderurgia) em peças acabadas com propriedades mecânicas, acabamento superficial e custo competitivo para emprego nas mais variadas aplicações.

Os produtos forjados vão desde uma simples agulha ou componentes eletrônicos até peças sofisticadas empregadas nas indústrias automobilística, agrícola, médica, de eletrodomésticos, aeroespacial e outras.

Apesar de o Brasil deter uma das maiores reservas mundiais de matérias-primas, ainda encontra-se fundamentalmente em um estágio de exportador desses produtos primários. A transformação destas matérias-primas, por exemplo, através do processo de forjamento, agrega maior valor aos produtos acabados.

O conhecimento em profundidade do processo de forjamento permitirá às empresas brasileiras elevar sua competitividade.

O processo de forjamento a quente pode ser realizado de diversas maneiras. Na Figura 1 é possível vi-

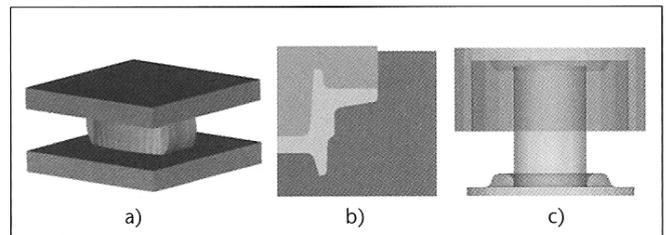


Figura 1 - Exemplos de matriz para forjamento: a) aberta; b) fechada com rebarba e; c) fechada sem rebarba. [1]

sualizar uma matriz de forjamento aberta (a), uma matriz fechada com rebarba (b) e uma matriz fechada sem rebarba (c).

A fabricação de componentes através do processo de forjamento caracteriza-se pelo grande aproveitamento da matéria-prima (eliminando perdas que originam sucata) e pela produção econômica de produtos que exigem propriedades mecânicas e tolerâncias dimensionais.

As peças forjadas apresentam uma microestrutura homogênea, livre de porosidades e com um fibramento favorável às propriedades mecânicas exigidas em muitos componentes.

No forjamento a durabilidade de uma ferramenta e o fluxo de material na zona de deformação são influenciados por uma série de fatores como, por exemplo, a tensão de escoamento, a velocidade de deformação, a deformação, o atrito entre material e ferramenta e sua geometria. O perfeito inter-relacionamento de todos esses parâmetros pode levar à obtenção de um produto

- Facilidade do fechamento das ferramentas;
- Preenchimento das ferramentas;
- Minimização de formação de defeitos;
- Redução da formação de dobras (*overlapping*);
- Diminuição da quantidade de material perdido na rebarba;
- Determinação do ângulo de saída e, em consequência, do peso do forjado;
- Posicionamento da geratriz na matriz e;
- Obtenção de tolerâncias adequadas das peças forjadas.

Quando ao fluxo de material, a Figura 4 mostra a influência da linha de repartição em combinação com a linha de rebarba. Observa-se que o posicionamento da linha de repartição tem influência nas linhas de fluxo da peça acabada.

Uma avaliação precisa do fluxo de material durante o processo de forjamento, onde se considera a quantidade de material que se desloca para fora da matriz através da garganta de rebarba, é extremamente importante no projeto de matrizes. Neste sentido até um coeficiente de atrito baixo (boa lubrificação) pode causar a fuga de material através da garganta de rebarba em vez de preencher as cavidades desejadas, internamente na matriz. Uma espessura muito pequena da garganta de rebarba aumenta a resistência ao escoamento (kw). Nesta situação ocorre um resfriamento mais rápido o que, por sua vez, também ocasiona um aumento da resistência ao escoamento.

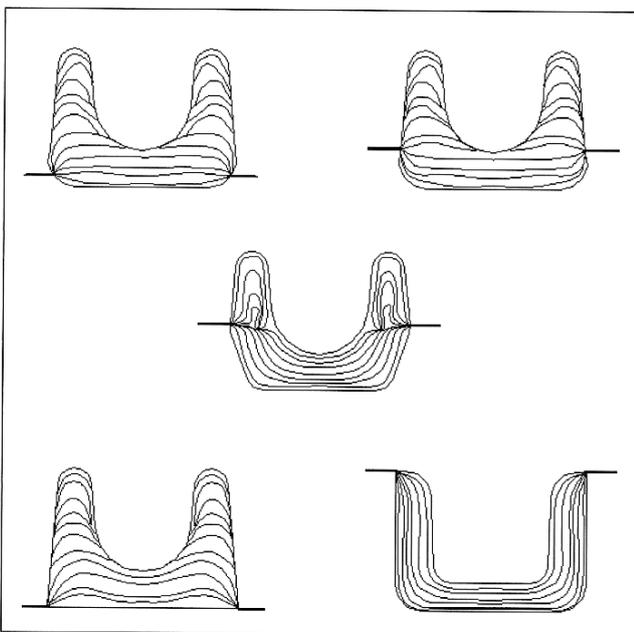


Figura 4 - Efeito da linha de repartição no fluxo do material

Ângulos de saída

A especificação correta dos ângulos de saída, demonstrados na Figura 5, é muito importante, pois pode evitar o trancamento da peça na matriz e com isso tempos de paralisação de produção.

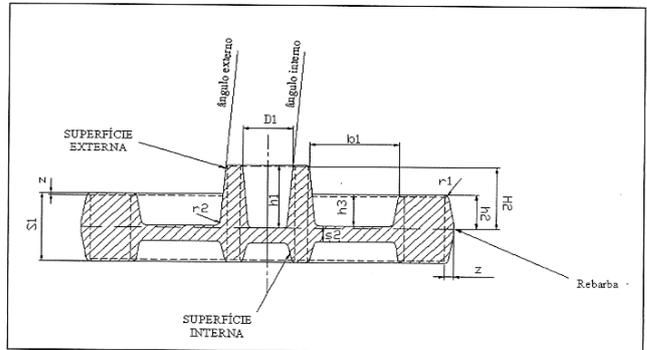


Figura 5 - Ângulos de saída [7]

Em contatos prolongados entre o material e a matriz pode ocorrer uma diminuição da dureza da matriz e com isso aumento do desgaste. Por outro lado a necessidade de aumento dos ângulos faz crescer a quantidade de sobremetal. A existência de ângulos aumenta a dificuldade de preenchimento de cavidades profundas e aumenta o tempo de usinagem das peças forjadas. A Tabela 1 mostra sugestões de ângulos de saída para diferentes equipamentos.

Equipamentos	Paredes internas			Paredes externas		
	Inclinação	Ângulo	Aplicação	Inclinação	Ângulo	Aplicação
Martelos	-	-	-	1:6	9°	Peças com costeletas altas
	1:6	9°	Regra geral	1:10	6°	Regra geral
Prensas	1:10	6°	Punções baixos	1:20	3°	Peças planas
	1:6	9°	Grandes profundidades	1:10	6°	Peças planas
Máquinas Horizontais	1:10	6°	Regra geral	1:20	3°	No punção
	1:20	3°	Com extrator	1:50	1°	Com extrator
	-	-	-	1:20	3°	Na matriz superior
	1:20	3°	Conf. Profundidade	1:50	1°	Regra geral
	Até 1:50	0° a 3°	Furo ou saliência	-	0°	Nas superfícies de agarras

Tabela 1 - Ângulos de saída para forjamento de aço em matriz fechada [7]

A Tabela 2 apresenta orientações de ângulos de saída também para outros materiais [4].

As linhas tracejadas da Figura 5 indicam as dimensões após a usinagem da peça forjada. Quando o equipamento possui extratores os ângulos podem ainda ser reduzidos.

economicamente competitivo e de melhor qualidade.

Para o projeto de um ferramental existem modelos de cálculos e teorias que ajudam a integrar, de um lado, as relações existentes entre o equilíbrio físico e os mecanismos de deformação e de outro, o desenvolvimento de produtos para uma melhor competição econômica. A manipulação dos parâmetros através de modelos de cálculo é o único meio para otimizar um processo e deixar de trabalhar apenas de forma empírica, como comumente é visto nas indústrias de forjaria. A quantidade de variáveis é tão grande que não se consegue apenas de forma experimental aperfeiçoar um processo de fabricação.

Neste trabalho procura-se mostrar as variáveis de processo e são fornecidas algumas informações para o dimensionamento das matrizes para o forjamento a quente em matriz fechada.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para dar início ao estudo, são apresentados na Figura 2 os principais parâmetros envolvidos no processo de forjamento. Observa-se a complexidade que pode envolver estudos aprofundados deste tema. Alguns desses parâmetros como tensões, grau e velocidade de deformação, temperatura, curva de escoamento e coeficiente de atrito são abordados de forma introdutória neste trabalho.

Os fundamentos e esclarecimentos com demonstrações mais aprofundadas podem ser vistos em trabalhos anteriores [2, 3]. Os parâmetros abordados são aqueles possíveis de quantificar. Com a avaliação destes parâmetros e o relacionamento dos mesmos com o processo será possível efetuar preliminarmente o aperfeiçoamento das etapas de trabalho.

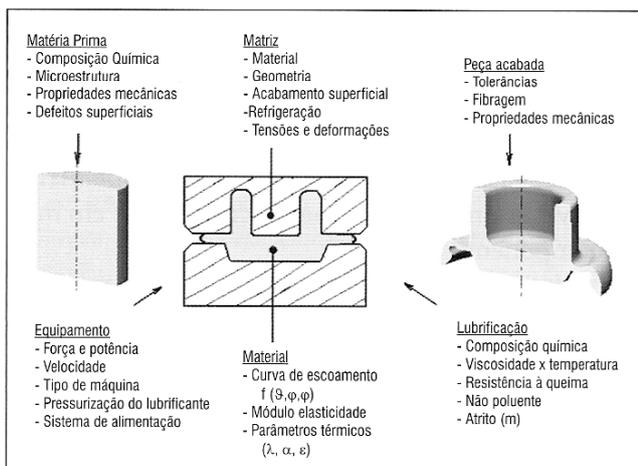


Figura 2 - Principais parâmetros do processo de forjamento

Na Figura 2, temos que a curva de escoamento é função de:

- ϑ - Temperatura
- $\dot{\varphi}$ - Velocidade de deformação
- φ - Deformação

Os parâmetros térmicos são:

- λ - Coeficiente de condutibilidade térmica
- α - Coeficiente de condutibilidade ferramenta/peça
- ε - Emissividade.

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DAS FERRAMENTAS

A seguir são abordadas, de uma forma geral, algumas particularidades do complexo tema que é o projeto das ferramentas. Esse assunto é analisado com maior profundidade no guia desenvolvido pela "Drop Forging Research Association" [4].

A avaliação do projeto de matrizes de forjamento para operação a partir da automação computacional pode ser encontrada no trabalho de A. Viecelli [5]. O principal objetivo de um projeto ideal é maximizar a vida do ferramental. A Figura 3 demonstra vários parâmetros que podem afetar a durabilidade de uma ferramenta.

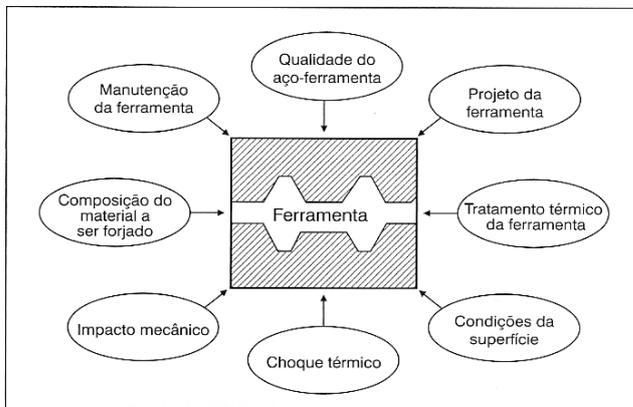


Figura 3 - Projeto da ferramenta em conjunto com parâmetros que afetam a vida de uma matriz [5]

Na seqüência são abordados alguns aspectos que servirão de subsídio inicial no projeto de ferramentas para forjamento.

Linha de repartição das matrizes

É a linha ou plano que divide a peça entre a ferramenta superior e a ferramenta inferior. A escolha e o posicionamento correto da linha de partição ou linha de repartição das matrizes pode influenciar em vários fatores:

Material	Ângulo
Aços	5° a 7°
Ligas de alumínio	0° a 7°
Ligas de titânio	5° a 7°
Ligas resistentes ao calor	5° a 7°

Tabela 2 - Ângulos de saída para matrizes de forjamento [3]

Dimensionamento de costeletas, bases e raios

Em relação à espessura da base t , a Figura 6 mostra os valores recomendados para forjamento de aço para

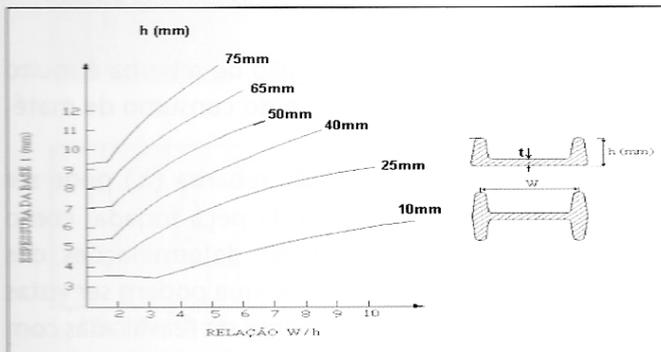


Figura 6 - Influência da altura da costeleta em função da espessura da base [3]

diferentes alturas de costeletas (h) em função da largura da base (w).

A Figura 7 apresenta a nomenclatura dos raios em produtos forjados, onde r é o raio de canto, R é o raio de filete e H é a altura da costeleta.

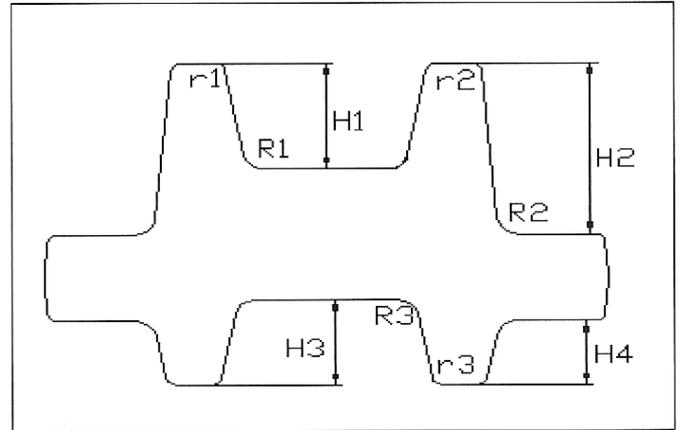


Figura 7 - Nomenclatura dos raios em peças forjadas

A Figura 8 mostra valores orientativos para aplicação no desenvolvimento do projeto de produto na determinação de raios de filete e de canto.

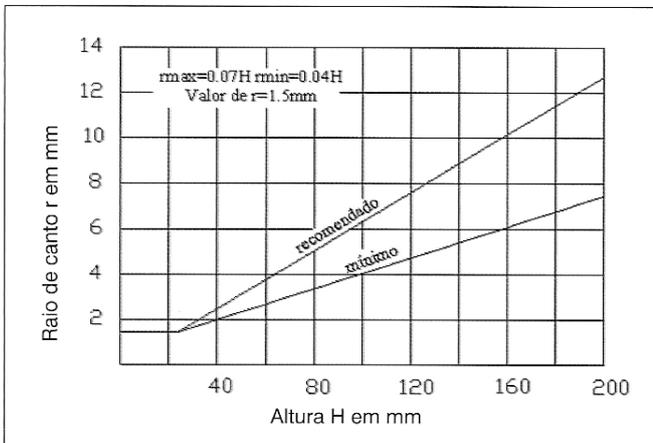
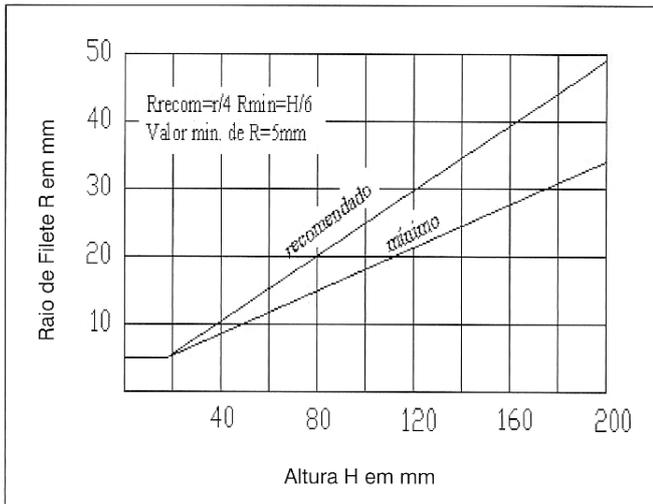


Figura 8 - Gráficos dos valores recomendados para raios em produtos forjados [3]

Considerações sobre a região de rebarba

A rebarba se apresenta como um excesso de material ao redor do forjado e está situada no plano da linha de repartição. A geometria e o dimensionamento da passagem denominada de garganta da rebarba usada nas matrizes de forjamento, demonstrada na Figura 9, tem, basicamente, três funções durante o processo:

- 1 - Restringir o fluxo lateral do metal, forçando o material a encher totalmente a cavidade da matriz;
- 2 - No estágio final do processo, quando a cavidade está cheia, permitir que o metal escape para o alojamento;
- 3 - Regular as tensões de forjamento sobre a matriz.

A alta pressão normal na garganta de rebarba, devido à diminuição da altura (h_r) e a restrição do fluxo do material pela passagem ao longo da largura da base (w), tende a aumentar as tensões na matriz. Em compensação, permite considerável redução na quantidade de material requerido para formação da peça final.

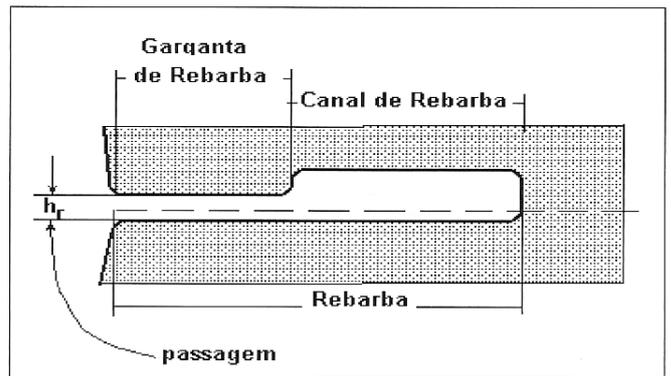


Figura 9 - Canal de rebarba e alongamento do excesso de material

A correta determinação da região de rebarba é muito importante para a minimização do consumo de matéria-prima.

A espessura da garganta de rebarba (h_r) pode ser estimada em função do peso da peça forjada, como demonstrado na Figura 10. As determinações das dimensões da região da rebarba, que podem ser vistas na Figura 5, devem posteriormente ser reavaliadas com o cálculo da força de forjamento ou da distribuição das tensões na ferramenta. Se a capacidade máxima de força da prensa disponível está longe de ser atingida, pode-se diminuir a altura da rebarba (h_r) e, desta forma, reduzir a quantidade de matéria prima utilizada. Isso significa redução de sucata e diminuição do custo do forjado.

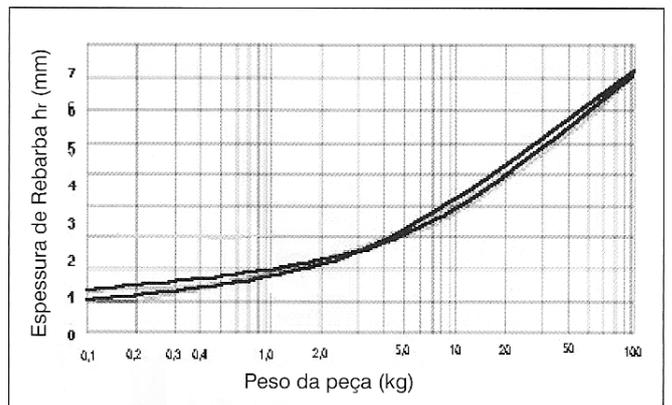


Figura 10 - Relação entre espessura da garganta de rebarba e o peso da peça forjada [7]

A espessura da rebarba (h_r) pode ainda ser determinada, em função da área projetada (A_p) da gravura ou da peça forjada [9] por:

$$h_r = 0,015 \cdot \sqrt{A_p}$$

Nesse caso a área projetada da peça (A_p) não deve considerar a rebarba.

Dimensionamento dos blocos de matrizes

A Figura 11 mostra as principais dimensões que devem ser consideradas no projeto de uma ferramenta para forjamento.

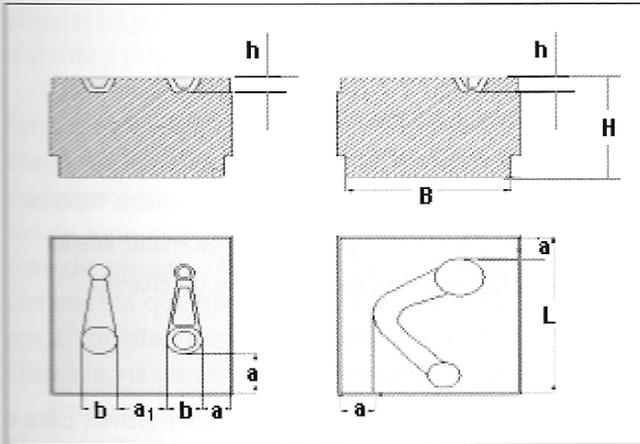


Figura 11 - Valores típicos de referência para dimensionamento do bloco de matrizes [9]

Sendo:

h = Profundidade da cavidade

b = Largura da cavidade

a = Distâncias entre gravura e limite de bloco

a_1 = Distâncias entre gravuras

H = Altura do bloco (ou matriz)

L = Comprimento do bloco

B = Largura do bloco

A Tabela 3 apresenta valores característicos para o posicionamento da gravura na matriz.

h (mm)	a (mm)	a_1 (mm)	H (mm)
6	12	10	100
10	32	25	125
40	56	40	200
100	110	80	315

Tabela 3 - Valores característicos para projeto

Estes são valores de referência com ênfase para as distâncias mínimas entre a lateral do bloco e o posicionamento da gravura (dimensão a) e também a distância mínima entre uma gravura e outra (dimensão a_1).

O mau dimensionamento da posição da gravura no bloco da ferramenta pode levar a fratura (Figura 12).

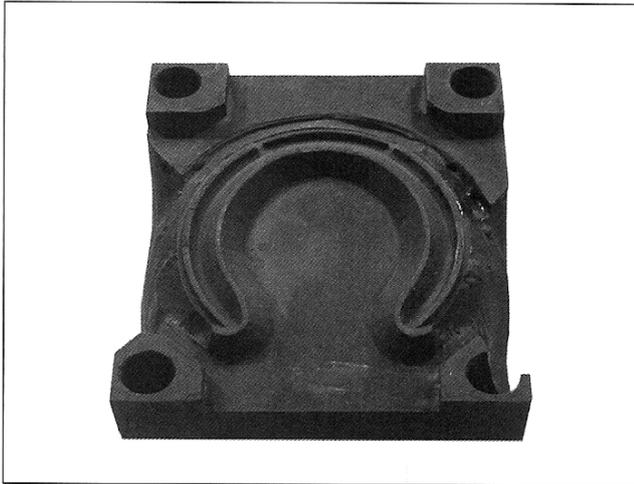


Figura 12 - Fratura de uma matriz por mau dimensionamento

Colocação de pinos-guia

Com o objetivo de compensar possíveis deslocamentos da matriz inferior em relação à matriz superior ou ainda para minimizar pressões laterais usam-se pinos-guias nas ferramentas.

A Figura 13(a) mostra esquematicamente os pinos-guias posicionados em uma matriz. Podem-se usar dois pinos em posições diametralmente opostas em vez de quatro pinos-guias.

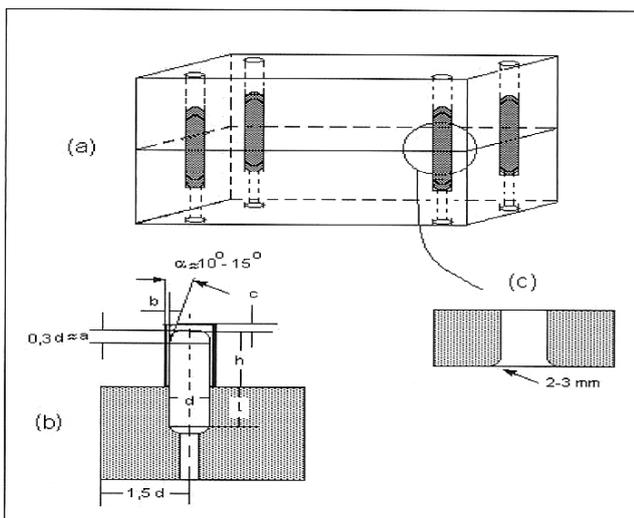


Figura 13 - a) Esquema de posicionamento de pinos-guia [10]
b) dimensionamento dos pinos-guia; c) raio de canto

Na Figura 13(b) encontram-se medidas orientativas para projeto de alojamento de pinos-guia. Na Figura 13(c) encontra-se a recomendação de raio de canto para o alojamento do pino-guia.

Sendo:

d = diâmetro do pino-guia

$a \approx 0,3.d$, representando a altura do chanfro

b = folga lateral recomendada

c = folga de fundo recomendada

h = altura de penetração do pino-guia na matriz superior

l = altura de penetração do pino-guia na matriz inferior

$\alpha \approx 10^\circ$ a 15° , representando o ângulo do chanfro

A Tabela 4 sugere alguns valores orientativos para o dimensionamento dos pinos-guias.

A colocação de pinos-guias não apresenta um custo elevado e podem ser facilmente substituídos quando desgastados.

Largura ou diâmetro da matriz (mm)	Diâmetro do pino-guia d (mm)
200	60
300	70
400	80
500	90
600	100
800	120
1000	140

Tabela 4 - Valores característicos para pinos guia

PROCEDIMENTOS DE PROJETO

O processo de desenvolvimento de uma ferramenta para forjamento é composto de diversas fases, conforme demonstra a Figura 14 (pg. 28).

Inicia-se com a definição da peça a ser produzida. Essa peça é geralmente obtida a partir de um sistema de projeto auxiliado por computador - CAD (Computer Aided Design). Já nesta fase é aconselhável proceder a simulação computacional do processo de fabricação, objetivando corrigir e otimizar detalhes da peça durante o desenvolvimento da mesma.

Essa análise é realizada com sistemas de engenharia auxiliada por computador - CAE (Computer Aided Engi-

neering). É através da simulação do processo que se torna possível um perfeito estudo para possíveis reduções de custos (minimização da matéria prima e redução de desgaste de ferramenta) com a otimização da zona de rebarba. Também é possível identificar a forma geométrica ideal da pré-forma para obter a melhor distribuição de massa com a finalidade de conseguir o completo preenchimento das cavidades. A simulação pode ainda indicar o surgimento de dobras durante o forjamento.

Com base no desenho final da peça, o técnico de forjaria especifica a forma geométrica do forjado. Nesta etapa são levados em conta ângulos de saída da peça e da ferramenta, raios mínimos permitidos em ferramentas de forja, material da peça, além de outros parâmetros de projeto. Assim é definida a forma inicial da ferramenta que dará origem a peça forjada. Definida a peça forjada, passa-se à determinação da geratriz (*blank*) e, na seqüência, à região da rebarba.

Após conclusão do dimensionamento da ferramenta, executam-se os cálculos para especificar o equipa-

mento para forjamento da peça por meio de fórmulas de cálculo ou modelos como a Teoria Elementar da Plasticidade.

Na fase seguinte, quando todos os parâmetros de projeto da ferramenta estão definidos, inicia-se a confecção propriamente dita, através de usinagem da ferramenta. Em função da complexidade das peças, atualmente a grande maioria das ferramentas é confeccionada a partir de máquinas operatrizes computadorizadas - *CNC (Computer Numeric Control)*. Para a operação dessas máquinas, é necessário desenvolver programas de usinagem a partir de sistemas de fabricação auxiliada por computador - *CAM (Computer Aided Manufacturing)*.

AGRADECIMENTOS

A execução dos trabalhos da área de forjamento é realizada pelo Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) com o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) aos quais deixa-

mos aqui registrados os agradecimentos.

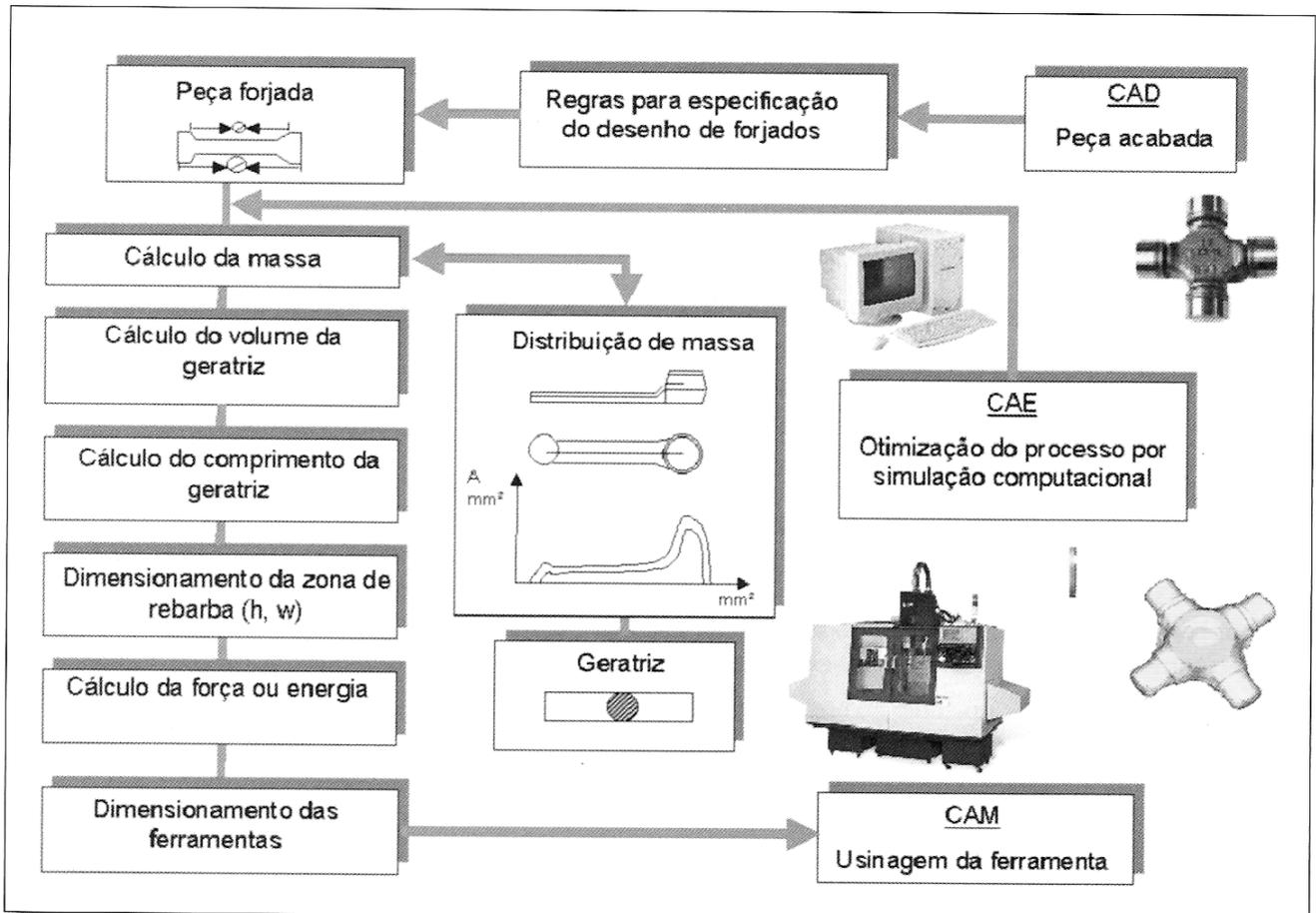


Figura 14 - Fluxograma dos procedimentos para o projeto de ferramentas simples

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MSC Superforge, 2005
- [2] Schaeffer, L.; *Conformação dos Metais - Metalurgia e Mecânica*, Editora Rigel, Porto Alegre, 1995
- [3] Schaeffer, L.; *Conformação Mecânica*, Imprensa Livre, Porto Alegre, 1999
- [4] Thomas, A.; *Die Design*, Drop Forging Research Association Ltd., Sheffield, 1981
- [5] Viecelli, A.; *Projeto de matrizes fechadas de forjamento a quente para peças axissimétricas com rebarba auxiliado pelo computador*, Dissertação de Mestrado, PPGEM/UFRGS, 1995
- [6] Schruoff, I.; Pannes, W.; *Thyrotherm 2999 EFS Supra: The new Hot-work Tool Steel for Highest Performance in the Forging Industry*, Anais da IV Conferência Internacional de Forjamento, Porto Alegre, 2000, pg. 175-186
- [7] Lange, K.; Meyer-Nolkemper, H.; *Gesensschmieden*, Springer Verlag, 1977
- [8] Thomas, A.; *Projeto de Matrizes*, ABM São Paulo, 1986
- [9] Tschätsch, H.; *Praxiswissen Umformtechnik*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlags, Braunschweig/Wiesbaden, 1997
- [10] Lange, K.; *Handbook of Metalforming*, McGraw-Hill Book Company, 1985
- [11] Kaessberg, H.; *Gesensschmieden von Stahl*, Werkstattbücher (herausgeber H. Haake), Heft 31, Springer Verlag, Berlin, 1950

Lirio Schaeffer - Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Engenheiro Mecânico pela UFRGS, com Doutorado na área de conformação pela Universidade Técnica de Aachen/Alemanha (RWTH - Aachen). Pesquisador na área de mecânica, metalurgia e materiais do CNPq, professor das disciplinas relacionadas aos processos de fabricação por conformação mecânica da UFRGS e está vinculado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Energia desta Universidade. Autor dos livros *Conformação Mecânica*, *Conformação dos Metais: Metalurgia e Mecânica*, *Problemas Práticos de Conformação Mecânica*, *Forjamento: Introdução ao Processo e Conformação de Chapas Metálicas*.