

FATORES DE INFLUÊNCIA NO PROJETO DE MATRIZES PARA FORJAMENTO A QUENTE*

Luana De Lucca de Costa¹
Angela Selau Marques²
Lirio Schaeffer³

Resumo

A diversidade de aplicações dos produtos fabricados pelo processo de forjamento é atribuído a importante relação obtida entre a qualidade dos produtos e os custos de produção, entretanto, o custo do ferramental neste processo é expressivamente dispendioso. Estudos que envolvem a fabricação e manutenção das matrizes, em particular, a investigação das maneiras que gerem aumento do desempenho e da vida útil são de relevância acadêmica e fabril. Este trabalho explana os as particularidades que envolvem o projeto de matrizes para forjamento a quente em matriz fechada, tais como, ângulos de saída, linhas de partição, pré-formas, canais de rebarba, entre outros. O objetivo do estudo é reunir e esclarecer conceitos a fim de evitar erros de projeto e tornar o ferramental menos oneroso.

Palavras-chave: Ferramental; Projeto de Matrizes; Forjamento a quente; Matriz fechada.

FACTORS INFLUENCING THE DIE DESIGN FOR HOT FORGING

Abstract

A wide range of applications of the products manufactured by the forging process is related to the quality and production cost of the product, however, the fabrication dies used in this process are significantly expensive. Investigations on the fabrication dies, in particular, to increase their performance and durability are important for academic and industrial sectors. This study addresses the main factors involved in die design for hot forging closed die, such as draft angles, parting lines, preforms, etc. The aim of this work is to explain the influence of these factors on the fabrication dies to avoid design errors for making them cost effective.

Keywords: Fabrication tools; Die design; Hot forging; Closed die.

- ¹ Engenheira Mecânica, Mestre em Engenharia, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- ² Tecnóloga em Fabricação Mecânica, Mestre em Engenharia, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.
- ³ Engenheiro Mecânica, Doutor em Engenharia, Professor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais – PPGE3M, Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM, Diretor do Centro de Tecnologia – CT, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Rodrigues e Martins [1], a metodologia habitualmente seguida no projeto de componentes forjados em matriz fechada segue os seguintes preceitos:

- 1) Determinação do volume e peso da matéria prima;
- 2) Determinação da complexidade da forma da peça forjada;
- 3) Dimensionamento das matrizes de pré-forma e acabamento;
- 4) Determinação da carga e energia necessárias.

Este estudo irá expor aspectos sobre o item 3 referido acima, tratando dos principais fatores de influência e seu impacto sobre o produto forjado, sendo que, na indústria do forjamento, o custo de ferramentas pode constituir até 50% do custo total do componente. No que diz respeito a esta proporção, torna-se evidente que a redução do custo do componente exige cuidados especiais com o projeto e a manutenção das matrizes a fim de obter um aumento no desempenho e vida útil [2].

A durabilidade de uma ferramenta é influenciada por uma série de fatores, tais como a velocidade de deformação e a temperatura da peça forjada, o atrito entre a ferramenta e o material, a geometria da ferramenta, entre outros. Para que se obtenha um produto economicamente viável e de boa qualidade, é necessária uma boa inter-relação entre todos estes fatores [3].

Ao desenvolver o projeto de uma ferramenta procura-se maximizar a sua vida útil. Viecelli [4] cita alguns itens, apresentados na Figura 1, que podem afetar a durabilidade de uma ferramenta:

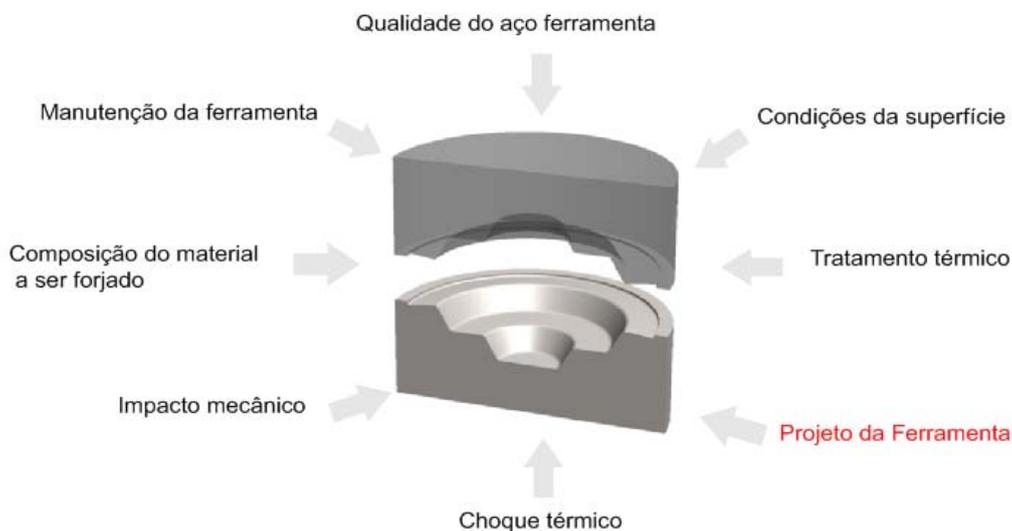


Figura 1. Parâmetros que afetam a vida de uma ferramenta [2].

Atualmente, a roto de fabricação das matrizes com auxílio da utilização de *softwares*, os projetistas definem a cavidade da matriz baseados no modelo CAD desenvolvido. Os *softwares* utilizados possuem recursos para desenvolver a matriz de forma rápida, mesmo em casos de peças com geometria complexa. O projeto final da matriz é transferido para a engenharia de processo, a qual fica encarregada da fabricação da matriz. A grande vantagem trazida pelos *softwares* é que todo este processo é feito de forma integrada. O modelo CAD é aberto em um *software* de CAM e este gera estratégias de usinagem, as quais serão responsáveis pela remoção do material até chegar à forma final da matriz. A utilização destas

tecnologias é crucial para o desenvolvimento de uma matriz que atenda aos requisitos de qualidade e de um processo economicamente viável [5].

2 CONSIDERAÇÕES SOBRE PROJETO DAS MATRIZES

Na sequência serão abordados os principais fatores relacionados ao projeto de matrizes contemplando, entre outros aspectos, espessuras mínimas admissíveis, raios de concordância, ângulos de saída, tolerâncias, formas e tamanhos dos canais de rebarba, linhas de partição, entre outros, que estes estão representados na Figura 2.

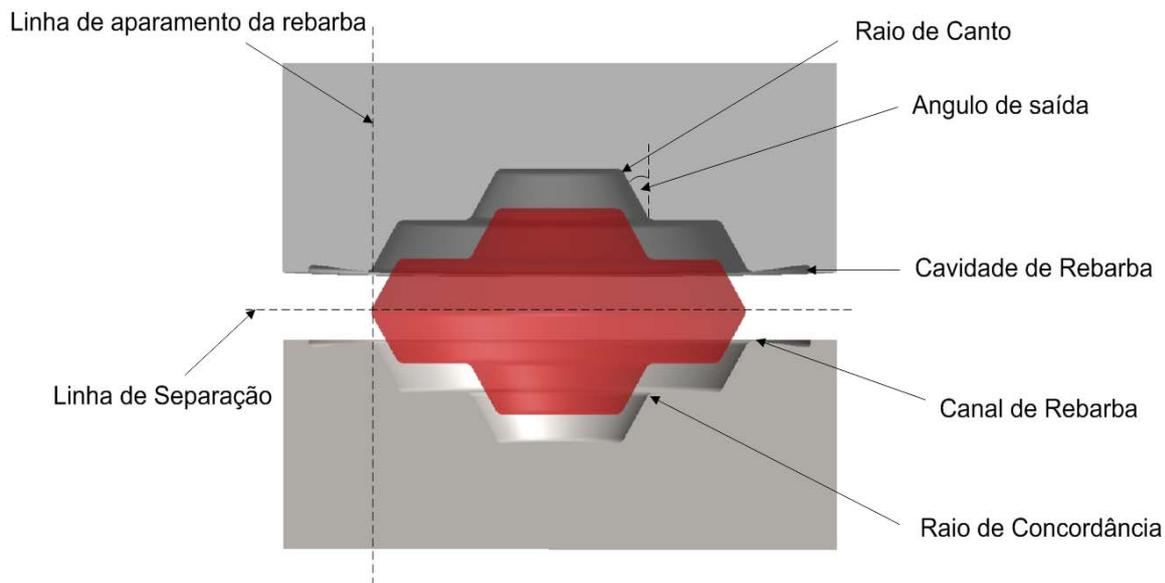


Figura 2. Representação esquemática dos principais elementos constitutivos de uma matriz [1].

2.1 Materiais

Os materiais utilizados na fabricação de matrizes para forjamento devem possuir elevada resistência ao desgaste e às solicitações de compressão. Para as matrizes que trabalham a quente devem ser considerados os aspectos relacionados com a manutenção das propriedades mecânicas do material. Devido as solicitações mencionadas, as matrizes devem ser construídas de materiais que apresentem as seguintes características [6]:

- Alta dureza;
- Elevada tenacidade;
- Resistência a fadiga;
- Alto limite de escoamento;
- Alta resistência mecânica a quente;
- Tolerância contra oscilações térmicas.

Os materiais mais utilizados na fabricação de matrizes para forjamento são os aços que contêm como principais elementos de liga o Cromo, o Tungstênio, o Molibdênio e o Vanádio [1,7]. No forjamento a quente são comumente utilizados aços H11 a H16, com dureza entre 45-55HRC após tratamento térmico, e H20 a H26, com dureza entre 43-52HRC após tratamento térmico [1,2].

2.2 Linhas de Separação de Matrizes

A linha de separação, também denominada linha de aparte ou linha de partição, corresponde ao contorno de fechamento da matriz superior e inferior. A forma e colocação da linha de separação são determinantes no custo final das matrizes, nos ângulos de saída, nas linhas de fluxo e na definição e concepção de projeto de apartamento de rebarba [1].

Segundo Shaeffer [3], a escolha e o posicionamento correto desta linha pode influenciar difersos fatores do projeto, tais como:

- Facilidade de fechamento das matrizes e extração das peças;
- Preenchimento da cavidade;
- Formação de defeitos e dobras;
- Quantidade de material perdido em rebarba;
- Extensão e detecção de desalinhamentos;
- Posicionamento da geratriz na matriz;
- Tolerâncias das peças forjadas.

Para geometrias simples e simétricas esta linha é reta e situa-se no centro geométrico da peça, já em geometrias mais complexas a linha pode ser curva e irregular em relação ao plano de forjamento [1].

Os critérios mencionados são apenas para orientação, alguns deles, em casos específicos, são até contraditórios e por isto recebem a qualificação de “preferenciais” ou “ideais”, o único critério que deve imperiosamente ser obedecido é o primeiro, a aplicação dos demais deverá sempre regida pelo bom senso do projetista [8].

Em função do fluxo de material, a Figura 3 mostra a influência da linha de separação em combinação com a linha de rebarba. Observa-se que o posicionamento da linha de separação tem influencia direta nas linhas de fluxo da peça acabada.

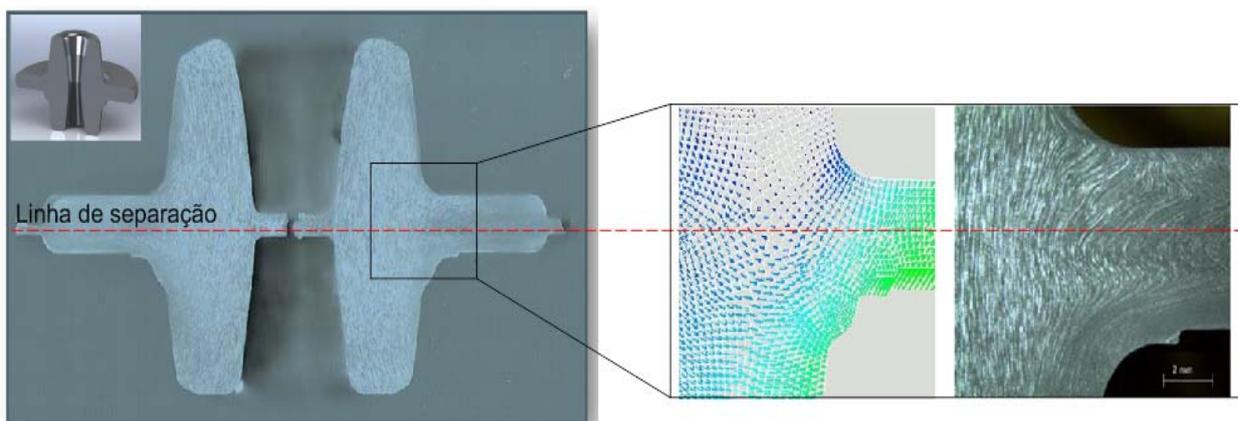


Figura 3. Efeito da linha de separação no fluxo do material e comparação das linhas de fluxo obtidas a partir de *software* de simulação por elementos finitos [9].

2.3 Canal e Cavidades de Rebarba

Na etapa final do forjamento, ao iniciar-se a formação da rebarba, em virtude da presença do estrangulamento ou “garganta da rebarba” entre as duas matrizes, as

ensões compressivas na cavidade das matrizes elevam-se consideravelmente para que haja o preenchimento de todas as partes dessa cavidade [1,10].

Ao iniciar a formação da rebarba, a força aumenta rapidamente até que a cavidade seja completamente preenchida. É nesta fase do processo que os detalhes de maior complexidade da matriz definem a força do forjamento e também onde a pressão no interior da matriz garante o forjamento completo da peça. No caso do forjamento a quente, o resfriamento que ocorre no material presente no canal de rebarba faz com que o aclave da curva seja mais acentuado nesta região, conforme mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** [1,9,11].

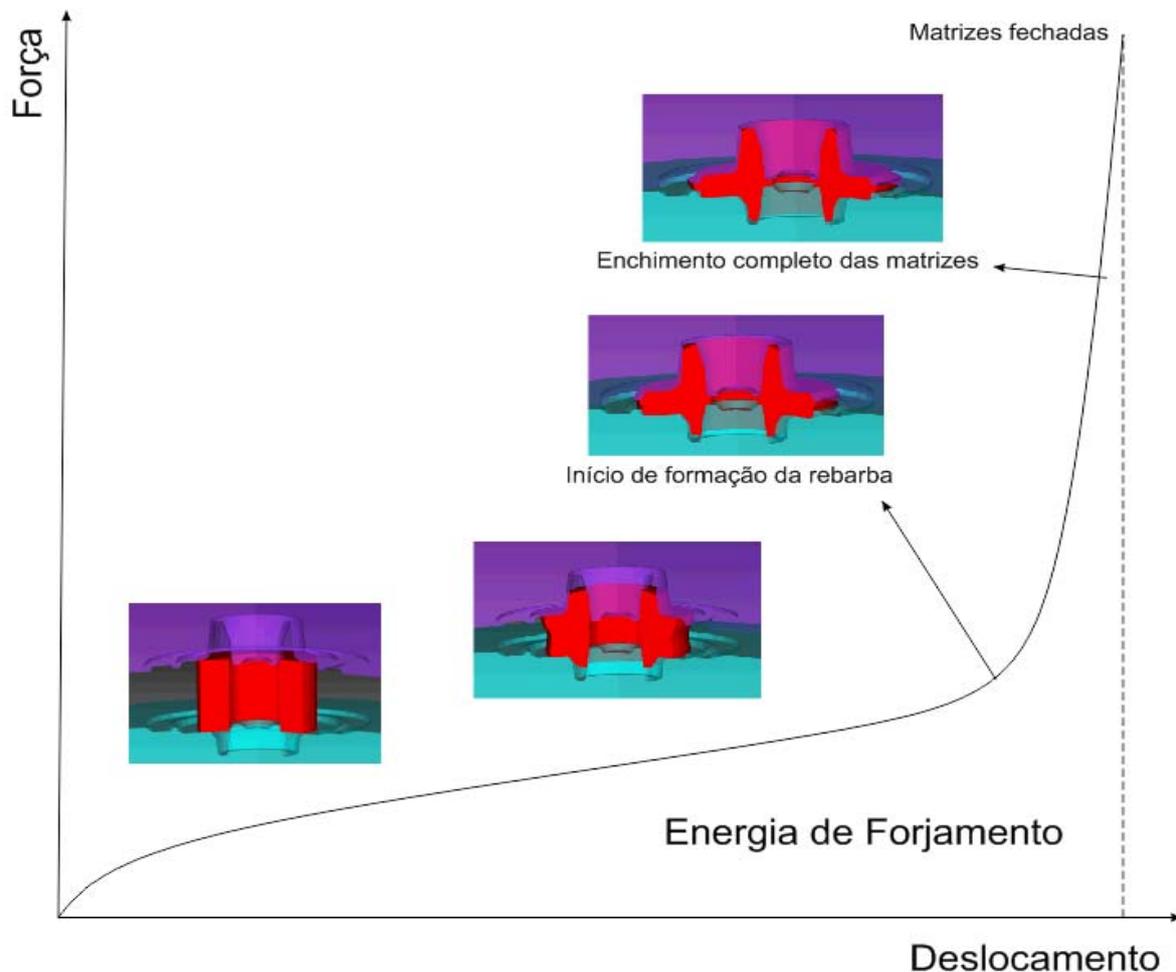


Figura 4. Evolução da força de forjamento com o deslocamento da matriz [1,9].

O escoamento do material através do canal de rebarba deverá ser mais difícil do que o preenchimento dos detalhes internos da matriz. Além disso, o volume de material no interior da matriz deve ser suficiente para assegurar o seu preenchimento [11,12]. Segundo Santaella [13] a espessura da rebarba é um dos parâmetros geométricos mais influentes no processo de desgaste das matrizes de conformação a quente. Sendo assim deve-se ter atenção para que o mesmo seja projetado adequadamente.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta quatro tipos de canais de rebarbas e a Tabela dá as recomendações sobre as dimensões. Se a espessura do canal de rebarba for muito pequeno e existir excesso de material no interior aumenta

a energia necessária para o forjamento que induz pressões mais elevadas sobre as cavidades da matriz e desgastes mais acentuados na região dos canais de rebarba. Ainda, se espessura da rebarba for muito elevada o material pode fluir demasiadamente para a região da rebarba e não preencher totalmente a cavidade, ocasionando uma peça defeituosa [1,10].

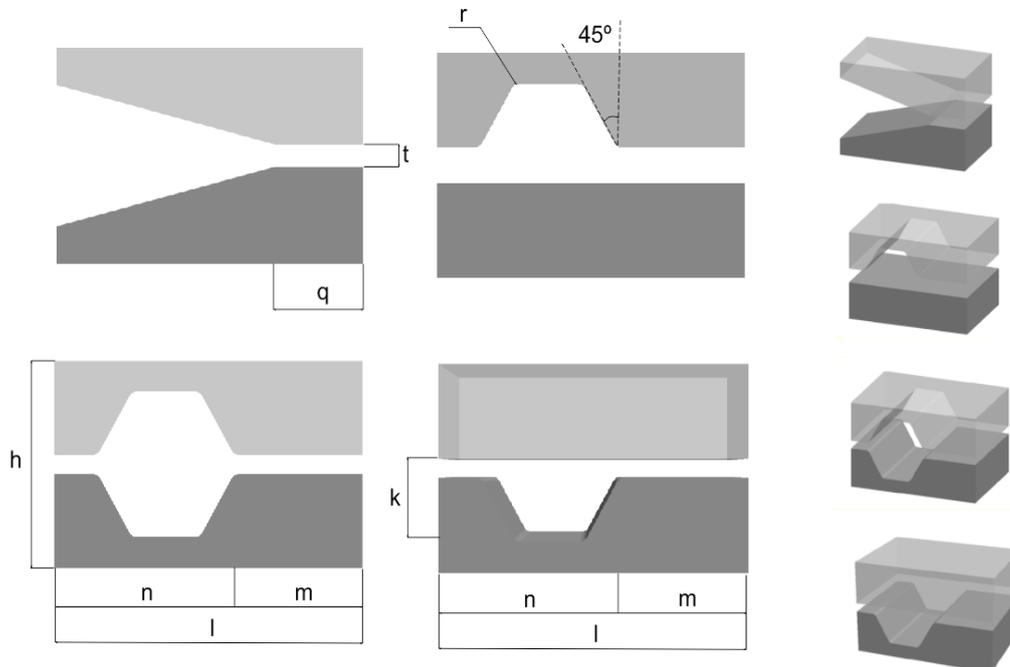


Figura 5. Geometria dos canais e cavidades de rebarba (Relaciona-se com a Tabela 1).

Tabela 1. Dimensões para os diferentes tipos de canais de rebarba [1].

	Tipo de canal em milímetros		
	Pequeno	Médio	Grande
l	15	25	35
m	4	5	6
n	11	20	29
h	5	8	10
k	3.5	5	6.5
r	2.5	4	5
q	2	3	4
t	2	2.5	3

2.4 Ângulos de Saída, Raios de Canto, Raios de Concordância e Sobremetal

A utilização de ângulos de saída na matriz é necessária para que facilite a extração da peça da matriz. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra como ângulos de saída são adicionados ao desenho da peça de modo a obter-se projeto ideal do forjado. A especificação correta dos ângulos de saída é muito importante para evitar que a peça fique presa na matriz, o que ocasionaria períodos de paralisação de produção, fracasso do projeto e, ainda, contatos prolongados entre a peça e a matriz pode ocorrer uma diminuição da dureza da matriz e, com isso, o aumento do desgaste [3,9]. O cuidado com o uso de ângulos adequados é importante porque a utilização de ângulos maiores faz aumentar a quantidade de sobremetal. Além disso, a existência de grandes ângulos maiores que os

necessários aumentam a dificuldade de preenchimento de cavidades profundas e também eleva o tempo de usinagem das peças forjadas. Os ângulos de saída interiores devem variar entre 5 e 10°, enquanto os exteriores entre 3 e 7° [1].

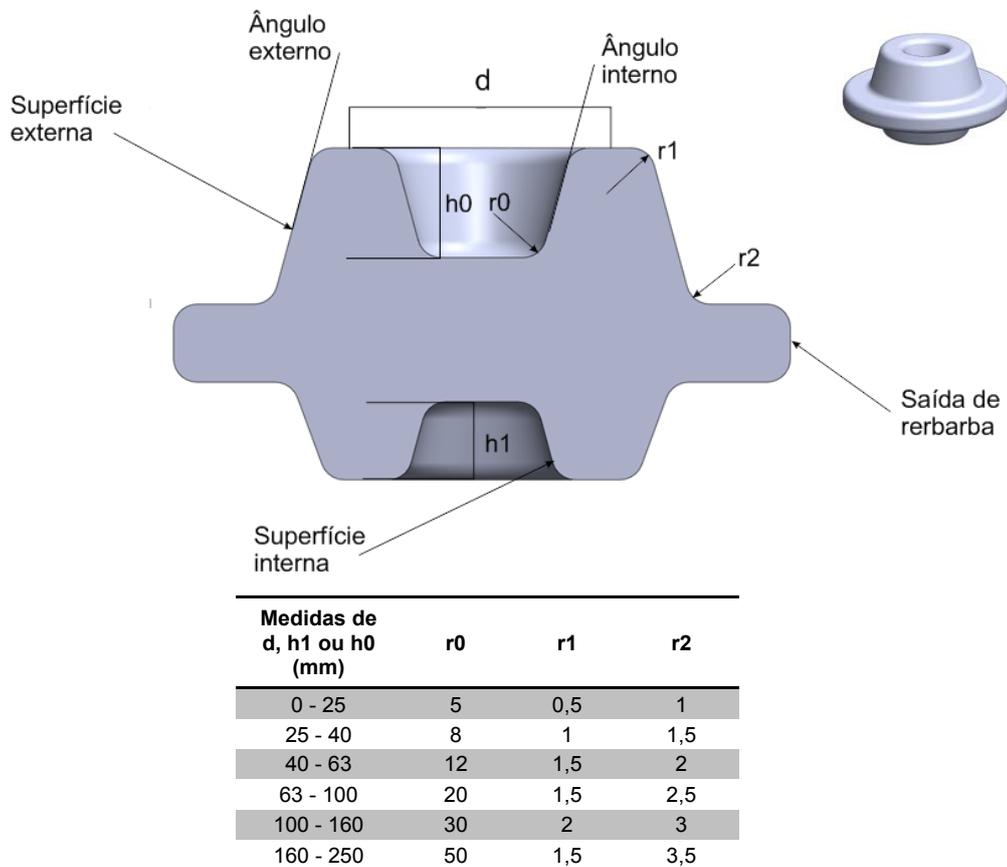


Figura 6. Ângulos de saída e raios que devem ser adicionados à peça [9].

No forjamento a quente as peças apresentam, geralmente, defeitos superficiais, oxidação e uma fina camada descarbonetada. Por esse motivo é aconselhável que se adicione as dimensões do forjado, por exemplo, cerca de 5 mm em diâmetro no caso de peças circulares, de modo que a usinagem possa assegurar uma boa qualidade de superfície a peça acabada. Alguns valores de sobremetal são apresentados na Tabela 2 [1].

Tabela 2. Sobremetal recomendado para realização de usinagem [1].

Comprimento ou diâmetro (mm)	Sobremetal (mm)
0-20	0,5-1,0
20-80	1,0-1,5
80-150	1,5-2,0
150-200	2,0-3,0

A Figura 7 é um exemplo de peça projetada com uso dos padrões dimensionais apresentados nesta seção.



Figura 7. Exemplo de flange projetado conforme padrões dimensionais apresentados [9].

2.5 Contração dos Materiais Forjados a Quente

Em peças forjadas a quente é necessário levar em consideração a contração que irá ocorrer pelo resfriamento que depende do material e temperatura de forjamento. Desta forma, a cavidade na matriz deverá ser projetada ligeiramente maior que as dimensões da peça. Como valores práticos pode-se adotar os apresentados na Tabela 3 [6, 3]:

Tabela 3. Medidas de contração (%)

Material	Fator de contração
Alumínio	1,5~1,8
Bronze	~1,6
Latão	1,2~1,5
Cobre	~0,8
Aço carbono	1,2~1,5

2.6 Dimensionamento dos Blocos para Matrizes

As dimensões do bloco devem ser calculadas em função dos esforços mecânicos a que a matriz estará sujeita, mas como uma primeira aproximação utilizam-se como valores mínimos os constantes na Tabela 4.

Os valores constantes na segunda coluna são para espessura mínima de parede em matrizes com apenas uma impressão. No caso de matrizes com mais de uma impressão a espessura mínima de parede é dada pela terceira coluna e o valor de “h” deve ser o menor dentre as impressões. Para altura mínima do bloco, a quarta coluna apresenta valores os e, neste caso, se o bloco possuir múltiplas impressões deve ser utilizado o “h” da maior impressão [6].

Tabela 4. Referências dimensionais de espessuras mínimas.

Profundidade e da impressão h (mm)	Espessura mínima de parede a (mm) entre aresta exterior e impressão	Espessura mínima de parede a (mm) Impressão e Impressão	Altura mínima do bloco da matriz H (mm)
6	12	10	100
10	20	16	100
16	32	25	125
25	40	32	160
40	56	40	200
63	80	56	250
100	110	80	315
125	130	100	355
160	160	110	400

2.7 Pinos Guia e Saída de Ar

Para facilitar o posicionamento e alinhamento das matrizes, evitando possíveis deslocamentos, ou ainda minimizar pressões laterais, faz-se uso dos pinos guias. Na Figura 8 está representado um exemplo do posicionamento dos pinos guias e na Tabela 5 estão relacionados valores orientativos para o dimensionamento dos pinos.



Figura 8. Representação das cavidades para pinos guias [14].

Outro fator de grande relevância no forjamento em matriz fechada é o possível acúmulo de ar nas cavidades da matriz durante o forjamento. Durante o escoamento e preenchimento das cavidades pelo material sendo conformado pode ocorrer o “aprisionamento” de ar nas extremidades das cavidades, o que ocasiona o preenchimento incompleto. Para evitar este problema, utiliza-se, pequenos furos na matriz superior e inferior denominados saídas de ar.

Tabela 5. Valores orientativos para dimensionamento dos pinos guias [3].

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

Na Figura 9 estão representados os principais elementos do projeto de uma matriz para o forjamento de um flange.

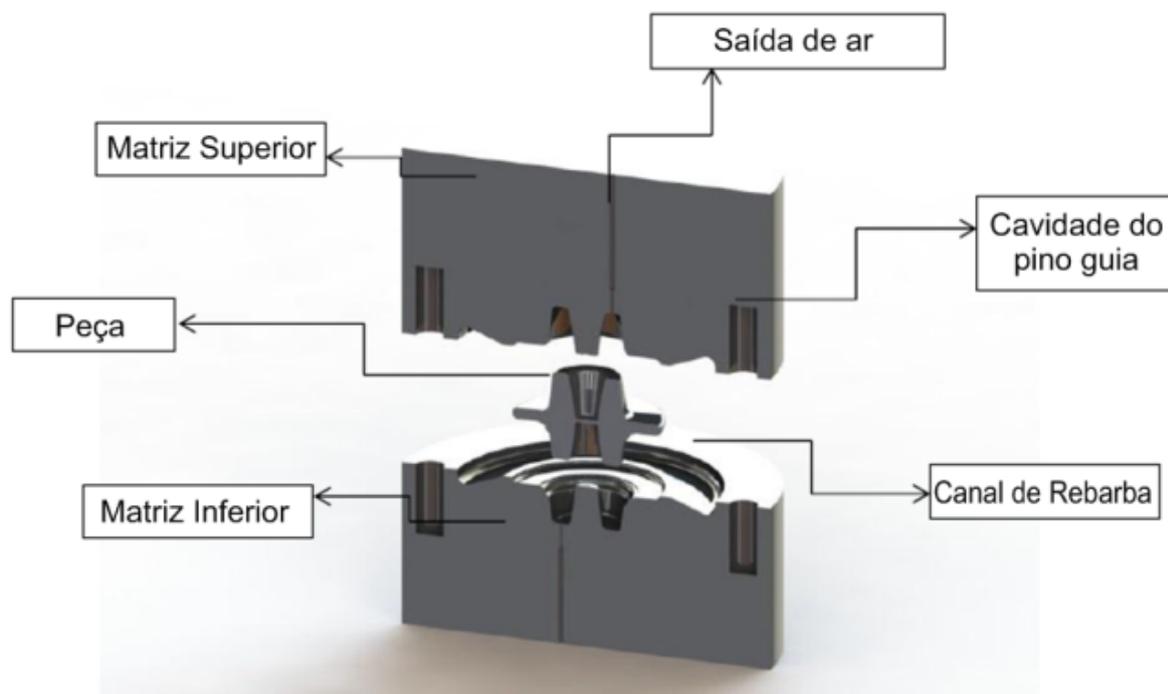


Figura 9. Representação dos principais elementos do forjamento em matriz fechada [9].

2.8 Considerações sobre Auxílio da Simulação Numérica Computacional

Nos últimos anos, a indústria de conformação mecânica experimentou um grande avanço na área de projeto devido ao aprimoramento dos programas de simulação numérica. Até meados da década de 90, a maioria dos programas possibilitava a simulação do processo de forjamento para peças de simetria axial e outras onde o fluxo de material pudesse ser aproximado como ocorrendo em apenas duas dimensões (deformação plana) [15].

Atualmente, pode-se dizer que os programas de simulação tornaram-se uma ferramenta essencial para o desenvolvimento e otimização da tecnologia dos processos de deformação plástica e inúmeros programas comerciais, baseados em diferentes métodos de solução, estão disponíveis no mercado [16].

O método de elemento finito é uma excelente ferramenta para a solução de problemas de projeto de engenharia. O princípio deste método consiste em dividir a peça em geometrias pequenas de forma a facilitar a solução matemática envolvida no processo utilizado. Quanto mais refinada for a malha maior a precisão dos resultados apresentados, porém mais demorado são os cálculos e a apresentação

do resultado [17]. A Figura 10 demonstra a malha, pequenas geometrias com as características citadas acima.

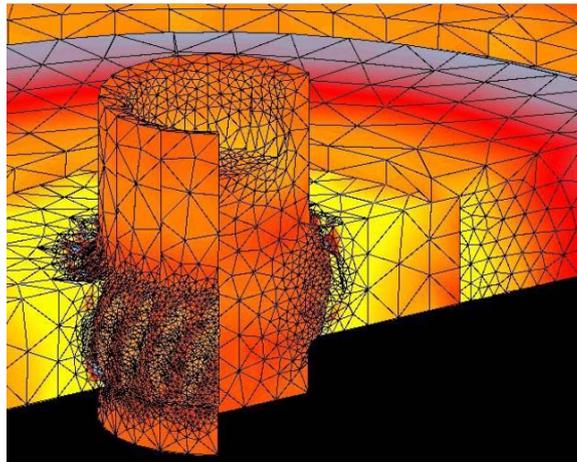


Figura 10. Exemplo de malha de elemento finito [9,18].

As principais informações que podem ser obtidas com a simulação são: deformação da geometria, incluindo a deformação da malha em cada passo, gráficos da distribuição da tensão, da velocidade, da temperatura. O escoamento do material e o preenchimento da cavidade de uma matriz, entre outros [19].

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a Capes pelo financiamento das bolsas de pesquisa e do projeto de Cooperação Internacional BRAGECRIM. Em especial, ao Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito pela ajuda e incentivo de sempre.

REFERÊNCIAS

- 1 Rodrigues, J; Martins,P. Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica, Vol II. Lisboa: Escobar Editora, 2005.
- 2 Brucelle, O; Bernhart, G. Methodology for service life increase of hot forging tools. Journal of Materials Processing Technology. 1999; Vol 87, pp. 237–246.
- 3 Schaeffer, L. Conformação Mecânica. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- 4 Viecelli, A. Projeto de matrizes fechadas de forjamento a quente para peças axissimétricas com rebarba auxiliado pelo computador. Dissertação de Mestrado, 1995 Porto Alegre, RS: PPGEM/UFRGS.
- 5 Mawussi, K. B; Tapie, L. A knowledge base model for complex forging die machining. Computers & Industrial Engineering. 2011; pp. 84-97.
- 6 Apresentações de aulas. LdTM – UFRGS, disponível em www.ufrgs.br/ldtm.
- 7 Santaella, M. Fatores de influência no desgaste de matrizes de forjamento a quente de bielas automotivas, 2009. DEMa - FEM. Campinas/SP: UNICAMP.
- 8 Acesso digital: <http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/Apostila.pdf>. Março, 2015.
- 9 Marques, A. S. Estudo do forjamento de peças vazadas a partir de geratriz tubular. Dissertação de mestrado. PPGE3M – UFRGS, 2013.
- 10 Fereshteh-sanjee, F.; Jaafari, M. Analytical, numerical and experimental analyses of the closed-die forging. Journal of Materials Processing Technology. 2002, pp. 334–340.
- 11 Dieter, G. E. Metalurgia Mecânica. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

- 12 Tomov, B., Radev, R., & Gagov, V. Influence of flash design upon process parameters of hot die forging. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, Vol. 157–158, pp. 620–623.
- 13 Santaella, M. Fatores de influência no desgaste de matrizes de forjamento a quente de bielas automotivas, 2009. DEMa - FEM. Campinas/SP: UNICAMP.
- 14 Costa, L. L.; Aplicação do sistema cad/ cae/cam para o forjamento a quente em matriz fechada de geometria de média complexidade. *Revista Forje*, Abril – Jun, 2015.
- 15 Roque, C. M. Aplicação do Método dos Elementos Finitos no planejamento da Sequência de Forjamento a Frio. 1966, UNICAMP, Campinas/SP.
- 16 Colombo, T. Análise numérica do forjamento em matriz aberta para a produção de eixos vazados. UFRGS - PPGEM, 2012, Porto Alegre/RS.
- 17 Almeida, F.J. O projetista pode tirar mais proveito do Método de Elementos Finitos. *Máquinas e Metais*, 2000, n 412, p. 116-127.
- 18 Euroforge, 2013. Acesso em 26 de Agosto de 2013, disponível em <http://www.euroforge.org>:
- 19 Deform (2011). User's Manual