



Forjamento em matriz aberta: aspectos de cálculo

O entendimento dos aspectos básicos do forjamento em matriz aberta, principalmente de suas equações, são fundamentais para que o processo resulte em produtos de qualidade e custos adequados.

O forjamento é um processo de conformação mecânica que tem como objetivo conferir forma ao metal através da aplicação de força. Partem-se de geometrias simples e maciças, como: blocos, barras ou pré-formas fundidas, que ao sofrerem deformação plástica adquirem propriedades mecânicas superiores aos demais processos de fabricação de uma peça, como fundição e usinagem, por exemplo. Além disso, proporciona grande aproveitamento de matéria-prima, microestrutura homogênea e sem porosidade, e fibramento favorável às propriedades mecânicas [1,2]. Na figura 1 pode ser visto um exemplo de forjamento em larga escala.



Figura 1 - Forjamento em matriz aberta de eixos de grande dimensão [3]

O forjamento em matriz aberta é o tipo de processo caracterizado pela compressão de uma massa metálica por uma matriz superior e uma inferior, deformando-se de maneira livre. Utilizando-se matrizes planas ou geometricamente simples, o processo é aplicável para produção de

peças de grande porte, como eixos para navios, barras e blocos utilizadas na indústria metal-mecânica; ou na preparação de forma para posterior processamento [2].

ASPECTOS SOBRE CÁLCULOS DE FORÇA NO FORJAMENTO

Tem-se no cálculo da força de forjamento a principal

ferramenta da indústria para especificação de processo. Entretanto a análise que envolve a fabricação de uma peça requer a observação de alguns aspectos básicos, pré-definidos ou não pelo engenheiro. Independentemente do tipo de forjamento abordado é imprescindível o conhecimento da tensão de escoamento do material, da temperatura de trabalho e da deformação verdadeira; sejam estes cálculos simplificados como, por exemplo, no forjamento em matriz aberta, ou mais complexos como no forjamento em matriz fechada.

Determinar a prensa mais adequada ao trabalho, avaliar a energia que será empregada em uma operação, garantir que uma peça possa ser fabricada, e projetar o ferramental são apenas algumas aplicações destes cálculos.

Parâmetros do Forjamento em Matriz Aberta

A fabricação de diversas peças de grandes dimensões somente é possível por forjamento em matriz aberta, como por exemplo, eixos e engrenagens para aerogeradores¹ de grande porte, que hoje chegam à 7 MW² de potência. A figura 2 mostra eixos forjados de grande porte

¹ Aerogerador: gerador elétrico integrado ao eixo de um cata-vento que converte energia eólica em energia elétrica. É um equipamento que tem se popularizado rapidamente por ser uma fonte de energia renovável e não poluente.

² MW: unidade de Megawatts. Mega (M) é um prefixo do Sistema Internacional de Unidades (SI) que indica que a unidade padrão foi multiplicada por um milhão. Adotado em 1960, o prefixo vem do grego μέγας e significa grande. Watt (W) é a unidade de potência do SI. É equivalente a um joule por segundo (1 J/s). A unidade do Watt recebeu o nome de James Watt pelas suas contribuições para o desenvolvimento do motor a vapor.



Figura 2 - Eixos maciços semi-acabados [3]

semi-acabados.

O avanço em termos de capacidade neste tipo de aplicação requer a criação de máquinas eficientes, através da melhoria das propriedades mecânicas dos componentes, permitindo redução de peso, haja vista a grande solicitação mecânica e aspectos estruturais de um aerogerador [2]. O alcance destes requisitos passa inevitavelmente pelo estudo da influência dos parâmetros de processo sobre as propriedades dos materiais.

Um dos principais parâmetros de forjamento em matriz aberta é a força de forjamento F , que é função da área de contato matriz/peça Ad e da resistência a deformação k_w [2]. A força F pode ser calculada por:

$F = Ad \cdot k_w$	Equação 1
--------------------	-----------

A área de contato Ad é expressa pela equação 2, onde S_b é a largura de contato matriz-peça (mordida ou avanço) e b_0 é a largura inicial da geratriz, que pode ser visualizada na figura 3 [2].

A resistência à deformação k_w é descrita por *Sbroshew* (equação 3), *Siebel* (equação 4), *Geleji* (equação 5).

$Ad = S_b \cdot b_0$ para seções retangulares	Equação 2
$Ad = S_b \cdot d_0$ para seções circulares	

$k_w = k_f \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{S_b}{h_1} \right)$	Equação 3
--	-----------

$k_w = k_f \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot S_b}{2 \cdot h_1} \cdot \frac{h_1}{4 \cdot d_0} \right)$	Equação 4
--	-----------

$k_w = k_f \cdot \left(1 - \frac{\mu \cdot S_b}{2 \cdot h_1} \right)$	Equação 5
--	-----------

onde μ é o coeficiente de atrito do par matriz/peça (~0,3 para aços).

A tensão de escoamento k_f , que é obtida experimentalmente através de ensaios de torção, tração ou compressão, é função da deformação φ , da velocidade de deformação $\dot{\varphi}$ e da temperatura T [1]. A deformação verdadeira ou logarítmica φ é calculada na altura h , na largura b e no comprimento l da barra, respectivamente por:

$\varphi_h = \ln \cdot \frac{h_1}{h_0}$	Equação 6
$\varphi_b = \ln \cdot \frac{b_1}{b_0}$	
$\varphi_l = \ln \cdot \frac{l_1}{l_0}$	

sendo a velocidade de deformação $\dot{\varphi}$ expressa por:

$\dot{\varphi} = \frac{V_f}{h}$	Equação 7
---------------------------------	-----------

A descrição detalhada de cada parâmetro de cálculo é dada na figura 3.

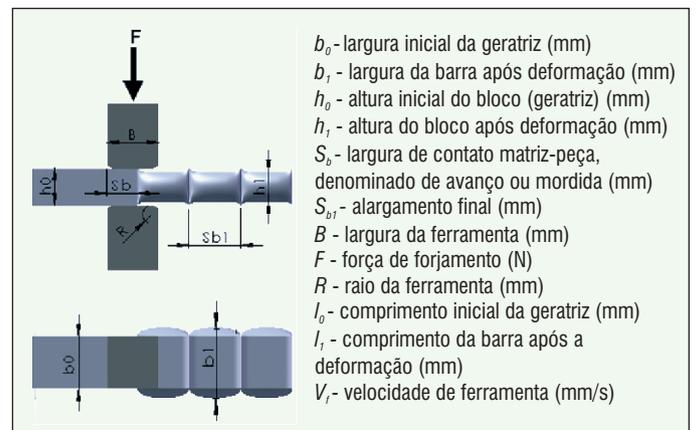


Figura 3 - Relações geométricas em matriz aberta [2]

Considerações sobre as deformações

Aplicando-se a Lei da Constância de Volume define-se que a soma das deformações verdadeiras é igual a zero:

$\varphi_h + \varphi_b + \varphi_l = 0$	Equação 8
---	-----------

Comumente na indústria é de interesse o conhecimento do alargamento na espessura e do alongamento no comprimento de uma barra após uma etapa de forjamento. O alongamento final b_1 pode ser calculado por:

$b_1 = b_0 \cdot \gamma^s$	Equação 9
----------------------------	-----------

Da mesma forma o alargamento final S_{b1} é dado por:

$S_{b1} = b_0 \cdot \gamma^{(1-s)}$	Equação 10
-------------------------------------	------------

onde:

S é o fator de alargamento;

γ é o grau de redução em altura.

O fator de alargamento S , é dado por:

$S = \frac{S_b}{S_b + b_0}$	Equação 11
-----------------------------	------------

O grau de redução de altura γ é dado por:

$\gamma = \frac{h_0}{h_1}$	Equação 12
----------------------------	------------

O limite máximo para S_b (mordida) é estabelecido pelo limite de capacidade de força da prensa. Para produtos ainda não acabados recomenda-se o uso de valores de $\frac{S_b}{b}$ entre 0,4 e 0,6 [2].

O trabalho ou a energia pode ser calculado em função do volume (V) pela seguinte fórmula [2]:

$T_r = k_f \cdot V \cdot \left[l_n \cdot \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{\mu \cdot V}{4 \cdot b_0} \left(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_0^2} \right) + \frac{b_0}{8 \cdot V} \cdot (h_0^2 - h_1^2) \right]$	Equação 13
---	------------

Curvas de escoamento

Dentre os diversos fatores que tem influência sob a conformação, a resistência à deformação, o atrito na interface peça/matriz e a geometria do sistema são os que exercem influência direta sob as tensões durante a deformação. Sendo a determinação destas tensões simplificada ou sofisticada, o método de cálculo sempre levará em conta a resistência ao escoamento do material. A resistência ao escoamento é descrita relacionando um grau de deformação a uma tensão correspondente, o que nos leva a construção de uma curva, através de ensaios mecânicos, sendo estes os de tração, compressão e torção [1, 2, 4]. A figura 4 apresenta um exemplo típico de gráfico de curva de escoamento gerado a partir de um ensaio de compressão a quente de um aço ABNT³ 4140.

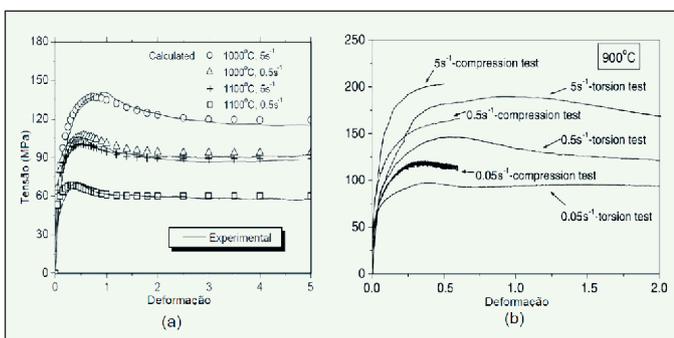


Figura 4 - (a) Curvas tensão de deformação a 1.000°C e 1.100°C; (b) Curvas tensão de deformação a 900°C [8]

Em especial no forjamento, é de interesse o levantamento de curvas de escoamento a quente. Nestas condições não se pode desprezar a variação da resistência a deformação com a velocidade de deformação.

É necessário, para a aquisição dos dados que gerarão a curva de escoamento a quente, o uso de um equipamento com algumas particularidades [1, 2, 5].

A curva de escoamento é definida como sendo a variação da tensão de escoamento (k_f) em função da temperatura (ϑ), da deformação (φ) e da velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$). A tensão de escoamento (k_f) é aquela aplicada a um corpo para que ocorra a deformação plástica [4]. A figura 5 demonstra esquematicamente a relação entre k_f e cada um dos fatores: temperatura, (ϑ), deformação (φ) e velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$).

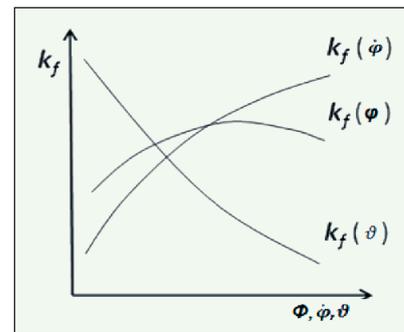


Figura 5 - Representação esquemática da influência sobre k_f da temperatura (ϑ), deformação (φ) e velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) [4].

Em deformação a quente, além da temperatura e da deformação, a velocidade de deformação exerce influência sobre o valor da tensão de escoamento, como pode ser observado na figura 5. A velocidade de deformação é dada por:

$\dot{\varphi} = \frac{\partial \varphi}{\partial t}$	Equação 14
---	------------

onde $\partial \varphi / \partial t$ representa a variação da deformação em função do tempo. Para o caso da compressão a fórmula pode ser escrita como:

$\dot{\varphi} = \frac{V_f}{h_i}$	Equação 15
-----------------------------------	------------

onde V_f é a velocidade da ferramenta e h_i é a altura instantânea. Um significativo número de pesquisadores no mundo tem tentado desenvolver equações constitutivas dos metais que representem o comportamento da tensão de escoamento, sugerindo modelos baseados em dados experimentais. Nesta área tem destaque os trabalhos de Hensel e Spitel, Misaka e Shida [7, 8].

Além dos aspectos matemáticos envolvidos no ensaio, existem aspectos técnicos que não podem ser negligenciados. Uma vez que se tenha um corpo-de-prova cilíndrico é necessário atenção a alguns detalhes específicos para este ensaio. Para evitar que o corpo de prova

³ABNT: fundada em 1940, a Associação Brasileira de Normas Técnicas é o órgão responsável pela normalização técnica no país, fornecendo a base necessária ao desenvolvimento tecnológico brasileiro. É uma entidade privada, sem fins lucrativos, reconhecida como único Foro Nacional de Normalização através da Resolução nº 07 do CONMETRO, de 24.08.1992.

saia do estado uniaxial de tensões é necessário que se tenha paralelismo entre as duas faces do corpo de prova que estarão em contato direto com a ferramenta [1, 4].

Máquinas para Forjamento em Matriz Aberta

Para a correta aplicação das fórmulas para cálculo de força e trabalho de forjamento anteriormente explanadas é necessário ainda o conhecimento de aspectos relacionados ao processo de forjamento.

Existem diferentes tipos de máquinas aplicadas ao forjamento em matriz aberta, tendo cada uma delas particularidades que determinam seu comportamento frente à energia envolvida no processo.

As máquinas para forjamento são classificadas, segundo Lange, 1985, pelo tipo específico de controle, podendo ser: prensas e martelos controlados por capacidade de trabalho ou energia; prensas controladas pela força e prensas controladas pelo deslocamento (golpe).

Prensas e martelos controlados por capacidade de trabalho ou energia (E_n)

A máquina desta categoria tem capacidade de trabalho ou energia definida, que é utilizado completamente no golpe de trabalho para a conformação da peça. Frequentemente é aplicado mais de um golpe para a total conformação da peça (figura 6). Martelos e prensas de fuso com volante pertencem a esta categoria.

Este tipo de equipamento tem como grande vantagem o baixo custo/benefício no que tange a geração de grandes forças e altas velocidades (3 à 8m/s) e simplicidade construtiva.

As desvantagens geralmente são: somente formas simples são possíveis de obtenção, forjamento de peças de pequeno porte e; dependência da habilidade do operador.

Prensas controladas pela força (F_n)

Este tipo de equipamento é capaz de fornecer força

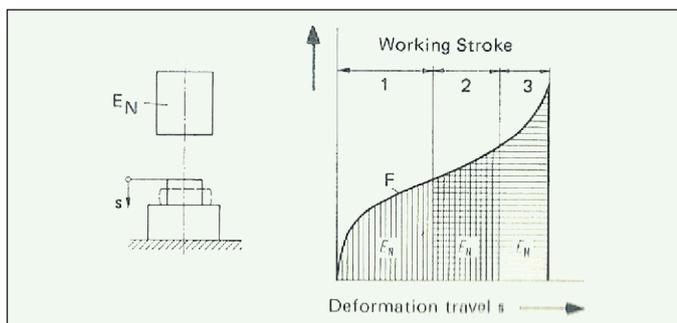


Figura 6 - Esquema de forjamento feito em três etapas em prensas controladas por capacidade de trabalho ou energia [1]

para o forjamento independentemente da posição do ferramental. A força fornecida tem seu limite na capacidade nominal da prensa F_n (figura 7). As prensas hidráulicas e prensas de fuso estão enquadradas nesta categoria.

Tem grande vantagem no que diz respeito a força máxima de forjamento e movimento linear. Suas desvantagens estão no custo e na baixa velocidade [1, 2].

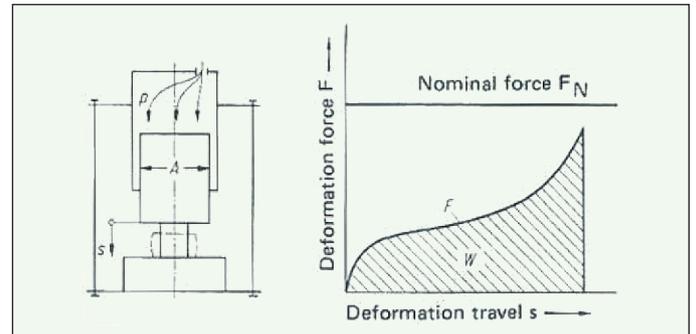


Figura 7 - Representação esquemática de uma prensa hidráulica e limite de força [1]

Prensas controladas pelo deslocamento

Equipamentos deste tipo também são chamados de prensas mecânicas porque tem a força de forjamento relacionada a transmissão mecânica de movimento. Prensas desta categoria têm um volante que determina a capacidade de trabalho e energia do equipamento. A magnitude da força de forjamento é dependente de posição do ferramental que é controlada pelo volante. Na posição final do curso a força seria teoricamente infinita [1]. As limitações de força deste tipo de equipamento estão esquematicamente representados nas figuras 8 e 9. Nesta categoria estão as prensas excêntricas e as de manivela (*crank*⁴).

As equações 16, 17 e 18 devem ser consideradas para a correta determinação de parâmetros de forjamento em prensas de manivela.

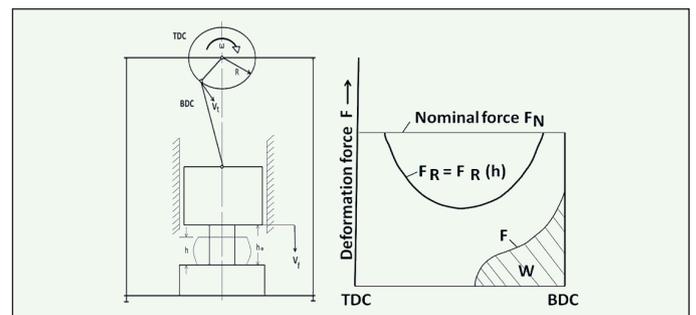


Figura 8 - Representação esquemática de uma prensa de manivela e limites de força [1]

⁴Crank: do inglês, significa manivela, excêntrico, virabrequim.

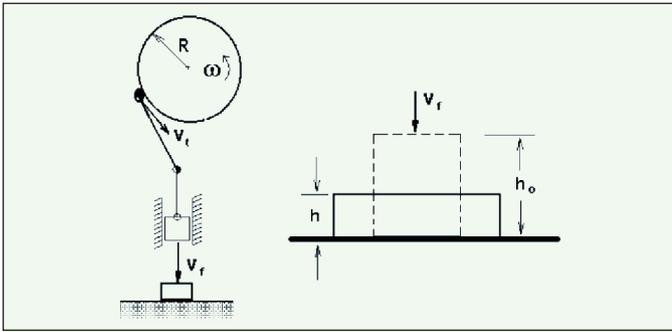


Figura 9 - Esquema de uma prensa de manivela [2]

$$\dot{\phi} = \frac{V_f}{h} \text{ [S}^{-1}\text{]} \quad \text{Equação 16}$$

$$V_F = V_i \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h_0 - h}{R}\right)^2} \quad \text{Equação 17}$$

$$\dot{\phi} = \frac{V_f}{h} \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h_0 - h}{R}\right)^2} \quad \text{Equação 18}$$

CONCLUSÃO

A determinação da força e energia de forjamento de uma peça é útil na especificação do maquinário necessário para execução da tarefa e periféricos, sendo também possível a estimativa dos custos de processo. A determinação destes dois parâmetros de forjamento depende, além de uma aplicação de cálculos básicos, da observação criteriosa do tipo de processo e fatores específicos.

A utilização dos modelos para determinação da resistência a deformação k_w pode ter uma utilização prática muito eficaz desde que se utilize valores de k_f previamente determinados experimentalmente.

AGRADECIMENTOS

À Capes - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior/CNPq - Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo financiamento do projeto BRAGECRIM. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS e ao IBF da Universidade Técnica de Aachen. Também a Aços Favorit e Grupo Gerdau. Ao professor Dr. Alexandre Rocha, professor Dr. Gilmar Batalha, professor Dr. Peter Standring, Dr. Alberto Brito, M.Sc. Diego Lima e engenheiro Tiago de Sá Gomes.

REFERÊNCIAS

- [1] Lange, K.; *Handbook of metal forming*. Ed McGraw-Hill, USA, 1985.
- [2] Schaeffer, Lírío; *Forjamento: introdução ao processo*. 2ª edição, Ed. Imprensa Livre. Porto Alegre, 2006.
- [3] <http://www.traderscity.com/>, acesso em 2010.
- [4] Brito, Alberto M. G.; Soares, Solange R.; Schaeffer, Lírío; *Curvas de Escoamento: Métodos de obtenção e aplicação*. Anais do XIII Seminário Nacional de Forjamento. Porto Alegre, 1993. Páginas 148-182.
- [5] Alve, M. L.; *Modelação numérica e análise experimental de operações de forjamento*. Lisboa: IST/UTL, 2004. Tese (Doutorado) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2004. Cito In: Brito, Alberto M. G.; Soares, Solange R.; Schaeffer, Lírío. *Curvas de escoamento: métodos de obtenção e aplicação*. Anais do XIII Seminário Nacional de Forjamento. Porto Alegre, 1993. p. 148-182.
- [6] Schaeffer, L.; *Curvas de escoamento como parâmetro fundamental para a simulação ao processo de forjamento*. Anais do XII Seminário Nacional de Forjamento. Porto Alegre, 1992. p. 167-177.
- [7] Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica - CBCM. *Curvas de escoamento - aço SAE 4140*. <http://www.ufrgs.br/ldtm/>, 2007. Cito In: Lima, D. R. S.; *Desenvolvimento de tecnologia de forjamento de aço AISI 8640 destinado à produção de brocas de perfuração*. 2007. 79 f. Dissertação de Mestrado. PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre.
- [8] Kima, S. I.; Leeb, Y.; Byon, S. M.; *Study on constitutive relation of AISI 4140 steel subject to large strain at elevated temperatures*. Journal of Processing Materials Technology, 140 ed. pp 84-89. Editora Elsevier. 2003.
- [9] Souza, S. A.; *Ensaio mecânicos de materiais metálicos*. 5ª edição. São Paulo. Editora Edgard Blücher. 1982.
- [10] ASTM A370. *Standard test methods and definition for mechanical testing of steel products*. American Society for Testing and Materials. EUA. 1997.

Gianpaulo Alves Medeiros - Engenheiro de Materiais. Mestrando em engenharia na área de processos de fabricação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Lírío Schaeffer - Engenheiro Mecânico e Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Doutor na área de Conformação Mecânica pela Universidade Técnica de Aachen na Alemanha (Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule - RWTH). Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS. Pesquisador na área de Mecânica, Metalurgia e Materiais do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), professor das disciplinas relacionadas aos processos de fabricação por conformação mecânica e vinculado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Energia (PPGEM) da UFRGS. Consultor *ad-hoc* da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, na Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Autor de vários livros sobre conformação mecânica.