

OBTENÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO A FRIO PARA O AÇO AISI 4140 ATRAVÉS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO¹

Alex Sandro Matos de Oliveira²
Paulo Ricardo Böesch Júnior²
Diego Abich Rodrigues²
Vinícius Martins²
Lírio Schaeffer³

Resumo

Os processos de conformação mecânica a frio são largamente utilizados devido às propriedades mecânicas adquiridas pelas peças conformadas, como maior resistência mecânica, dureza superficial, acabamento e precisão dimensional. Dentre outras vantagens do processo podemos citar a complexidade de formas possíveis de serem obtidas e a eliminação ou redução de etapas posteriores como usinagem, por exemplo. No entanto para que se obtenham bons resultados deve-se considerar o comportamento do material durante a deformação. Neste trabalho são obtidas as curvas de escoamento a frio para o aço AISI 4140 através do ensaio de compressão, durante os ensaios foram utilizados diferentes lubrificantes a fim de verificar qual o mais eficiente na redução do atrito na interface matriz/peça, de forma a manter uma condição mais próxima da compressão uniaxial, necessária para a realização do ensaio.

Palavras-chave: Curva de escoamento; Conformação a frio; Ensaio de compressão; Aço AISI 4140.

OBTAINING THE COLD FLOW CURVE FLOW TO STEEL AISI 4140 BY COMPRESSION TEST

Abstract

The mechanical forming processes are widely used cold by the mechanical properties acquired by the formed parts such as mechanical strength, surface hardness, finish and dimensional accuracy. Among other advantages of the process we can cite the complexity of possible ways to obtain and the elimination or reduction of subsequent steps such as machining, for example. However in order to obtain good results one must consider the behavior of the material during deformation. In this work we obtained cold flow curves steel to AISI 4140 by the compression test, for testing different lubricants were used to verify which is the most effective in reducing friction at the interface die / piece, in order to maintain a condition closer to uniaxial compression, needed for the test.

Key words: Flow curve; Cold forming; Compression test; AISI 4140 steel.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Mestrando do PPGEM, Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; alex.sandro@ufrgs.br; paulo.boesch@ufrgs.br; diegoabich@yahoo.com.br.

³ Prof. Dr. -Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil; schaeffer@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

Os processos de conformação mecânica consistem basicamente na obtenção de produtos, acabados ou pré-acabados, através da deformação plástica, utilizando para isto tensões mecânicas responsáveis pela deformação, sem que haja remoção de material. Este processo apresenta como principais vantagens o aumento da resistência mecânica, devido principalmente ao encruamento, à redução de etapas posteriores de processamento, precisão dimensional, complexidade de formas entre outras. Quanto à temperatura de trabalho os processos de conformação mecânica podem ser classificados em, trabalho a quente, a morno e a frio.

O trabalho a quente é definido como a deformação sob condições de temperatura e taxa de deformação tais que processos de recuperação e recristalização ocorrem simultaneamente com a deformação, oferece vantagens quanto à tendência de o material escoar na matriz (ductilidade), menor energia necessária para deformação já que a tensão de escoamento decresce com o aumento da temperatura, homogeneização química, controle de tamanho de grão, eliminação da porosidade, além de um aumento da tenacidade, no entanto oferece algumas desvantagens como, a necessidade de equipamentos adicionais como fornos e controladores de temperatura, além disso, favorece reações químicas da peça com o ambiente, principalmente a formação de óxidos e possibilita menores tolerâncias dimensionais, devido principalmente à expansão térmica, e maior desgaste da ferramenta. O Forjamento a frio, é uma deformação plástica de metais, sem aquecimento, onde o material é forçado por compressão, a fluir entre uma matriz e um macho, resultando na obtenção de peças com forma e tolerâncias de precisão [1]. Oferece como principal vantagem o aumento da resistência mecânica devido à interação entre as discordâncias entre si e com outras barreiras, como contornos de grão, pode-se trabalhar com pequenas tolerâncias dimensionais, visto que não há dilatação térmica, apresenta como principal desvantagem a alta energia empregada para deformar o material, além do aumento da resistência a deformação durante o processo devido ao encruamento. O processo de conformação a morno encontra-se nas situações intermediárias as dos processos anteriormente citados.

Para obtenção das melhores propriedades para uma peça conformada mecanicamente alguns fatores devem ser considerados, dentre eles destaca-se a determinação da curva de escoamento. A determinação das curvas de escoamento de um dado material é de extrema relevância para os processos de conformação, pois possibilita a otimização do processo, definição precisa dos parâmetros de trabalho, aumento da vida útil da ferramenta etc. As mesmas são construídas a partir de ensaios mecânicos de compressão, tração ou torção. Para o processo de forjamento geralmente utiliza-se o ensaio de compressão para obtenção deste parâmetro por melhor representar as condições reais do processo [2].

As curvas de escoamento para conformações realizadas a frio podem ser representadas matematicamente pela Equação (1). Onde “ k_f ” é a tensão de escoamento, “ C ” é o coeficiente de resistência do material e “ n ” é o coeficiente de encruamento [2]. A tensão de escoamento k_f é um dos parâmetros fundamentais para os processos de conformação mecânica [3].

$$k_f = C * \varphi^n \quad (1)$$

A partir dos gráficos obtidos de forma experimental de tensão (σ) x deformação (φ), calcula-se o logaritmo de cada um destes e se constrói o gráfico $\log \sigma$ x $\log \varphi$. Estes gráficos mostram dados para deformação $\varphi > 0,2$, pois esta é a região de deformação

plástica e a região de interesse na conformação mecânica. A partir da linearização do gráfico acima, obtemos a equação da reta tangente (Figura 1).

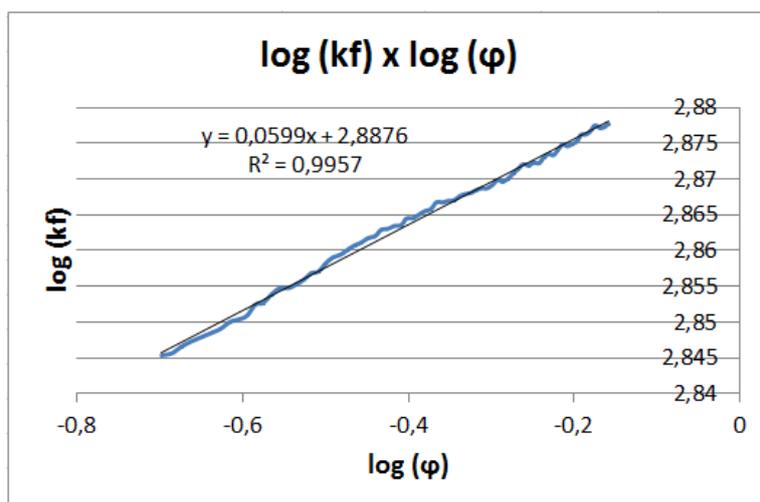


Figura 1. Gráfico $\log k_f \times \log \phi$ com a equação da reta tangente.

Outro fator a ser considerado no processo de conformação é a relação de atrito entre a peça e a ferramenta, o atrito ocorre principalmente devido à rugosidade ou imperfeições presentes na peça a ser trabalhada mecanicamente, o movimento relativo entre as superfícies é limitado devido ao contato sob pressão. A incidência do atrito implica em um aumento da força de deformação, deformação menos homogênea e conseqüentemente um aumento da propensão à fratura. Para minimizar estes efeitos podem ser aplicadas, a peça ou matriz, uma camada lubrificante a fim de reduzir as tensões que se opõem ao movimento relativo nesta interface [4]. Os lubrificantes, de maneira geral, devem apresentar características especiais para proporcionar uma boa lubrificação durante o processo. Estas características ajudam na melhora e evolução do processo, pois quanto menor for o atrito, melhor será a qualidade superficial da peça forjada e menor será o desgaste do ferramental [5].

Devido a grande importância de uma lubrificação eficiente para a realização deste trabalho tem como objetivos a definição do melhor lubrificante para a realização deste ensaio e também a definição da equação da k_f para o aço AISI 4140 na condição de processamento a frio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O ensaio foi feito com base na norma ASTM E 9 [6] para apenas uma velocidade e uma temperatura (ambiente), pois o equipamento disponível tem velocidade entre placas constante. A tensão de escoamento inicial da matéria prima foi de 42 Kgf/mm². O material utilizado nos ensaios experimentais foi um aço AISI 4140 (42CrMo4), este material a base de cromo- molibdênio tem a característica de endurecimento relativamente elevado e é entre os aços versáteis o mais extensamente utilizado em elementos de máquinas. O índice de cromo e molibdênio fornecem resistência elevada e melhoram as propriedades mecânicas como dureza. Esta classe é especialmente apropriada para forjamento. Na Tabela 1 é apresentada a composição química do Aço AISI 4140.

Tabela 1. Composição química do aço AISI 4140 [7]

AISI 4140	C	Si	Mn	Cr	Mo	P
% Min.	0,38	-	0,75	0,8	0,15	-
% Máx.	0,43	0,04	1,00	1,10	0,35	0,035

Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos a partir de uma barra de aço AISI 4140 trefilado, respeitando a relação $h_0/\varnothing_0 = 1,5$ deste modo evita-se a instabilidade devida à flambagem, uma vez que a norma sugere relações entre 0,8 e 2,0 para corpos-de-prova curtos, as dimensões são descritas na Figura 2, os corpos de prova tiveram sua rugosidade superficial controlada com o auxílio de um rugosímetro da marca Mitotoyo, modelo SJ-201P com medições de 5 (cinco) divisões em 0,25mm.

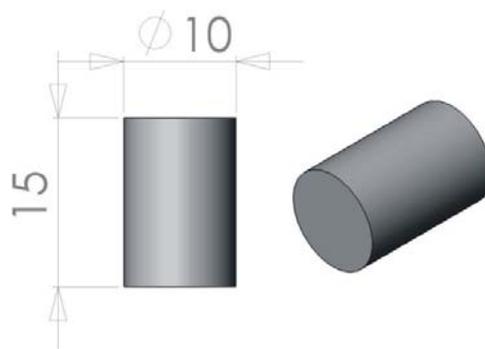


Figura 2. Dimensional dos corpos de prova utilizado nos ensaios.

Para a medição dos dados de força e deslocamento do ensaio utilizou-se uma célula de carga de 400 kN, com sensor de deslocamento adaptado (LVDT – Linear Voltage Displacement Transducer) (Figura 3). A célula de carga é baseada em tecnologia tradicional de extensometria em ponte de Wheatstone completa e foi calibrada com anel dinamométrico de capacidade de 400 kN. E posteriormente acoplados ao sistema de instrumentação móvel HBM Spider8 que foi utilizado como condicionador de sinais. Um computador portátil equipado com o sistema Catman Express fez a aquisição e o armazenamento dos dados, tornando possíveis cálculos posteriores.

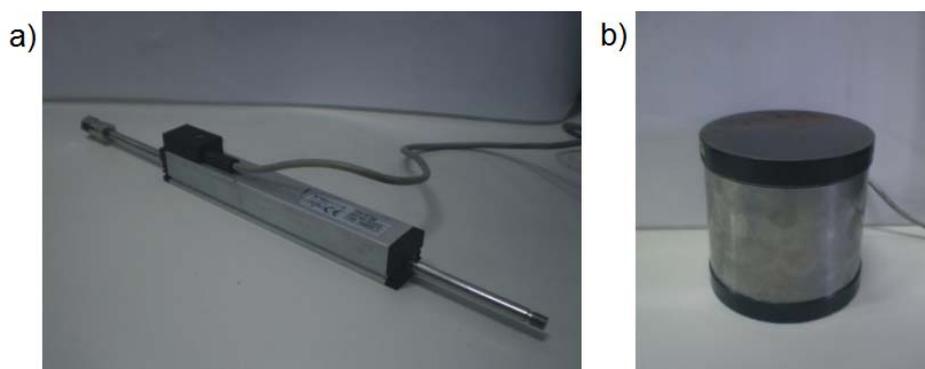


Figura 3. (a) sensor de deslocamento LVDT e (b) célula de carga.

As matrizes utilizadas no experimento foram fabricadas com material H13, sendo posteriormente temperadas em óleo. Para delimitar e calibrar as alturas de início e término de forjamento foram fabricados calços com as respectivas alturas de 15 mm (início do processo) e 6 mm (término do processo). Calços intermediários foram utilizados para calibrar o sensor de deslocamento. Os calços também foram

fabricados com material H13 e posteriormente temperados, tanto as matrizes quanto os calços alcançaram dureza de aproximadamente 52 HRC após tempera e revenimento. As ferramentas podem ser vistas na Figura 4.

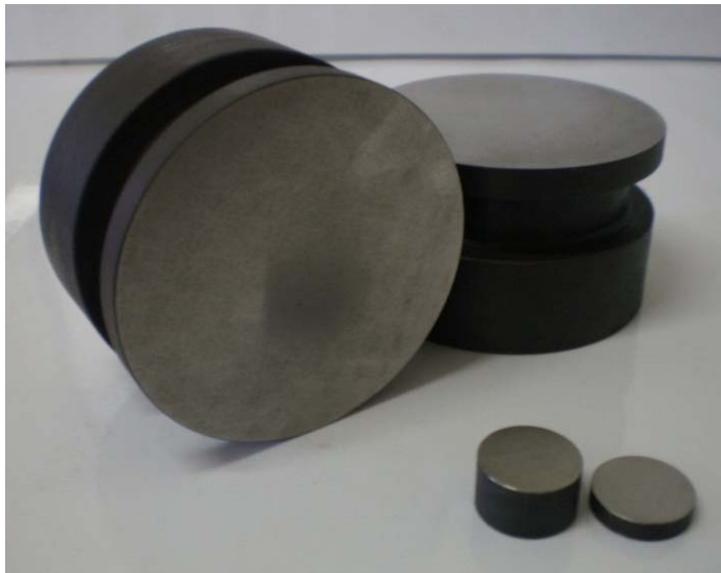


Figura 4. Matrizes e calços de H13 Temperados.

O equipamento utilizado no ensaio foi uma prensa EKA PHB-40 com capacidade de 400 kN. A mesa movimenta-se com velocidade constante entre placas de 6,5mm/s, proporcionando uma velocidade de deformação média em função da altura do corpo de prova. A influência da velocidade de deformação em temperatura ambiente tem pouca relevância [8].

Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente (conformação a frio) em um total de 24 corpos de prova, distribuídos uniformemente em 6 diferentes condições tribológicas. O que diferenciou cada uma delas foi à utilização de diferentes lubrificante e também sem lubrificação, os lubrificantes utilizados foram: spray silicone, filme de teflon (PTFE), polimérico a base de Poliamida, a base de grafite e óleo hidráulico, além da condição a seco.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Obtenção das Curvas de Escoamento e Equações

Com a utilização do sistema de aquisição de dados Spider 8, conectado à célula de carga e ao sensor de deslocamento LVDT, foi possível a obtenção de valores de força *versus* deslocamento. Os gráficos apresentados nas Figuras 5, 6 e 7 representam os valores encontrados para força x deslocamento para cada condição de conformação.

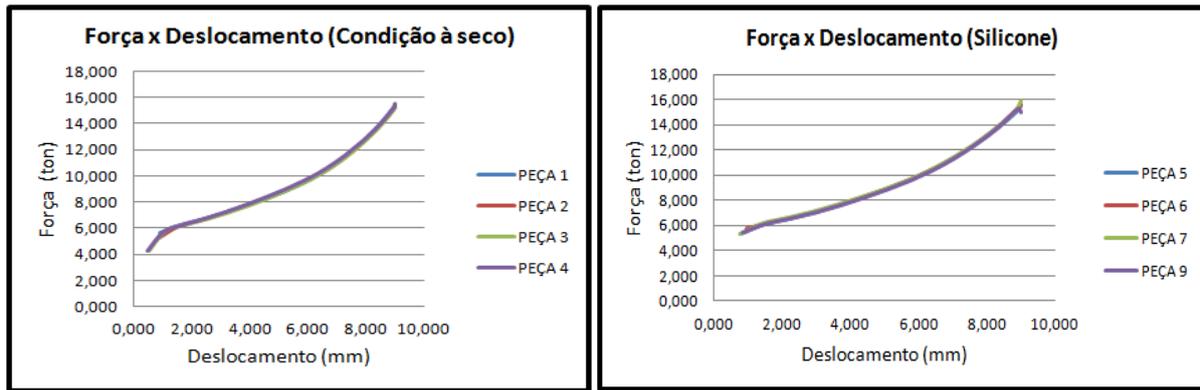


Figura 5 - Diagrama Força x Deslocamento para a Condição a Seco e Silicone.

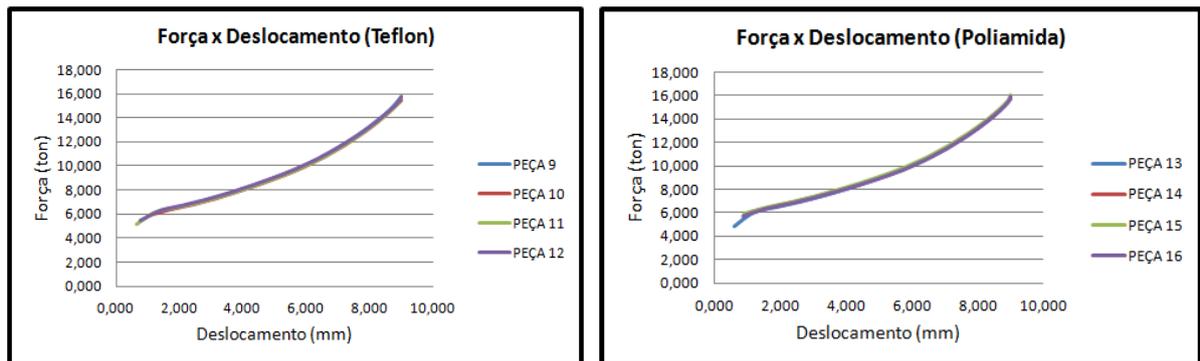


Figura 6 - Diagrama Força x Deslocamento para Teflon e Poliamida.

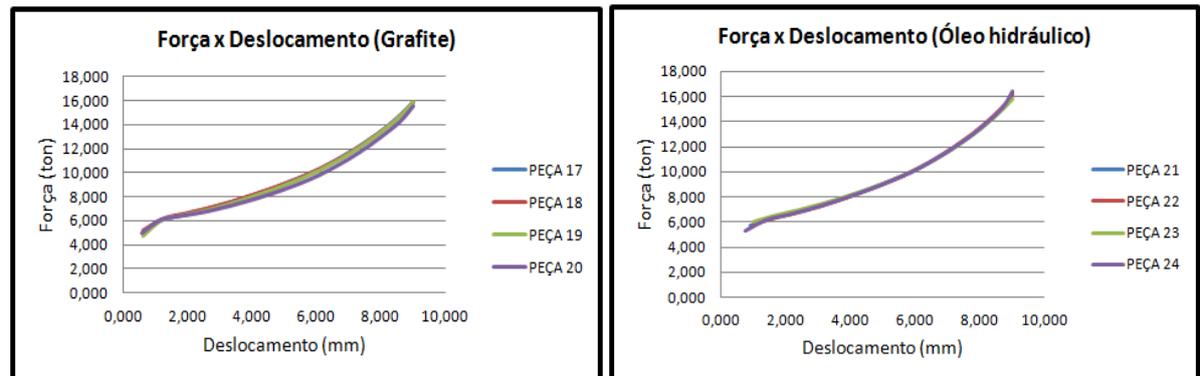


Figura 7 - Diagrama Força x Deslocamento para Grafite e Óleo hidráulico.

Para uma melhor visualização e comparação dos dados obtidos foi traçado um gráfico com todas as curvas de força x deslocamento para todas as condições de conformação Figura 8.

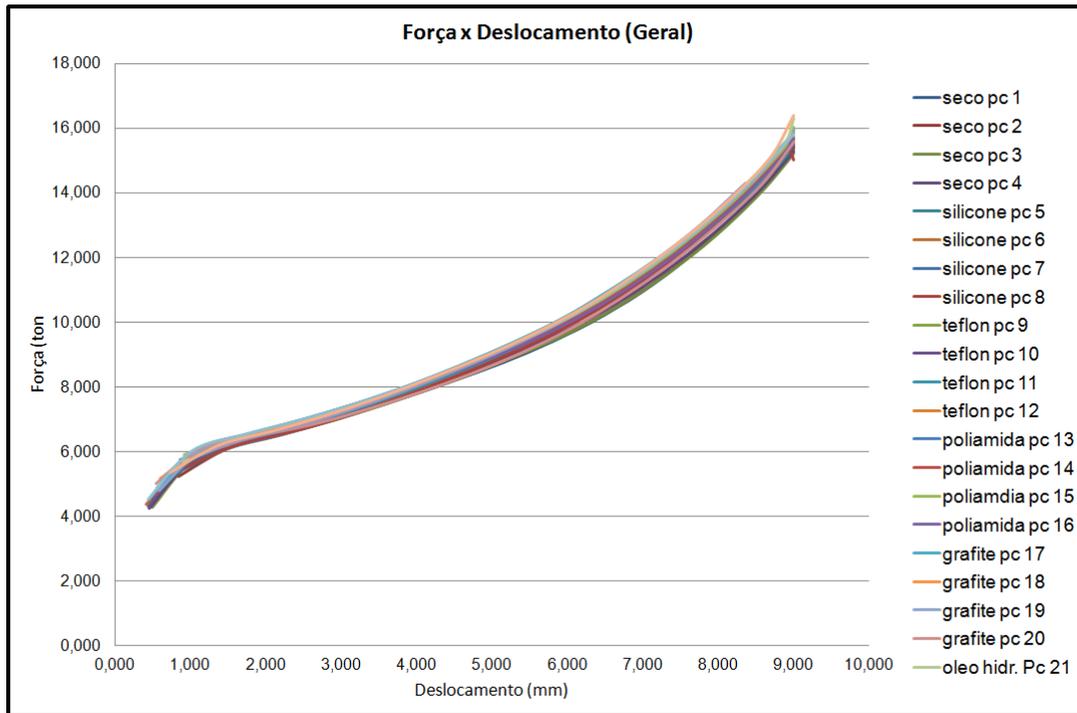


Figura 8 - Diagrama Força x Deslocamento para todas as condições juntas.

Com os dados de força e deslocamento, é possível calcular a altura do corpo de prova em cada instante de medição pela Equação (2), onde, h_i é altura instantânea, h_0 a altura inicial e Δ_0 é o deslocamento relativo entre as matrizes.

$$h_i = h_0 - \Delta h \quad (2)$$

A partir do cálculo de h_i é possível calcular a área instantânea do corpo de prova pela lei da Constância de Volume, descrita Equação (3), onde V_0 e V_i são o volume inicial e instantâneo do corpo de prova e A_0 e A_i são as áreas inicial e final, respectivamente.

$$\begin{aligned} V_0 &= V_i \\ A_0 h_0 &= A_i h_i \\ A_i &= \frac{A_0 h_0}{h_i} \end{aligned} \quad (3)$$

Com base nestes resultados é possível definir a deformação verdadeira (φ) pela Equação (4) e a atenção de escoamento (k_f) pela equação (5) em cada instante da deformação.

$$\varphi = \ln \frac{h_i}{h_0} \quad (4)$$

$$k_f = \frac{F}{A_i} \quad (5)$$

Desta forma podem ser plotadas as curvas tensão k_f x deformação (φ), para cada uma das condições de lubrificação proposta neste trabalho. Estas curvas podem ser vistas nas Figuras 9, 10 e 11.

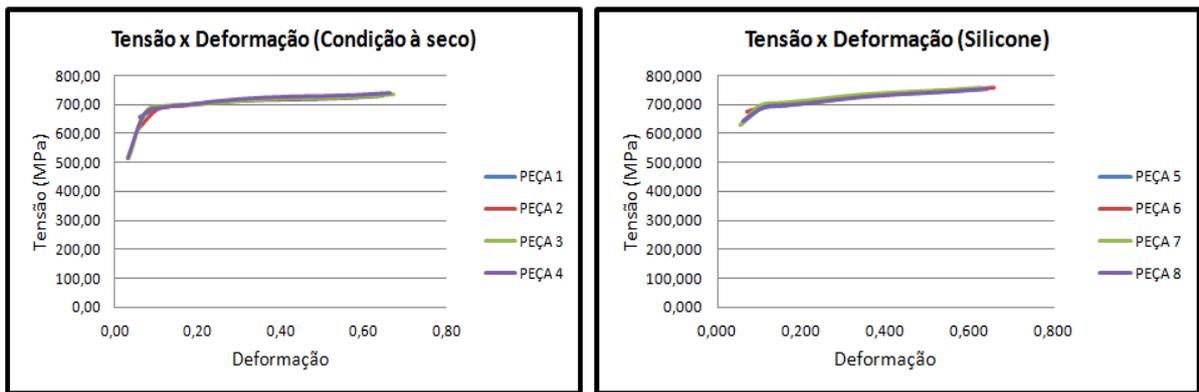


Figura 9 - Diagramas Tensão k_f (MPa) versus Deformação (ϕ) para a condição a Seco e Silicone.

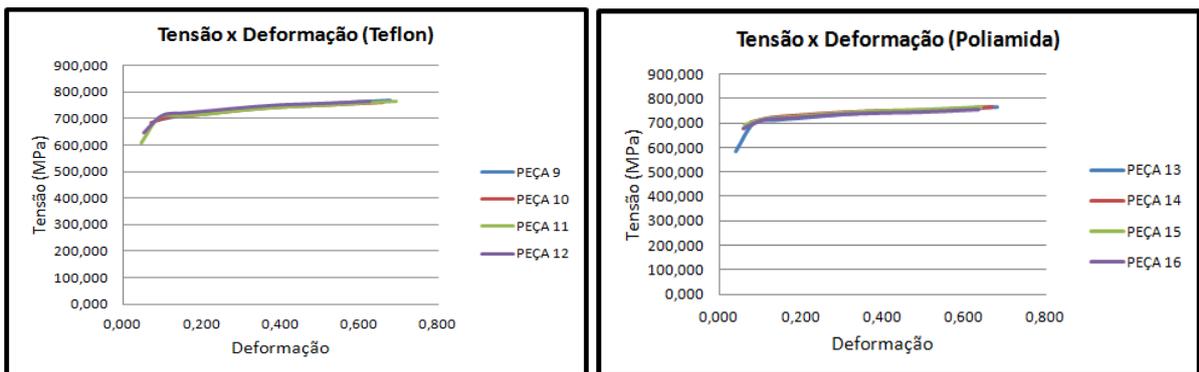


Figura 10 - Diagramas Tensão k_f (MPa) versus Deformação (ϕ) para Teflon e Poliamida.

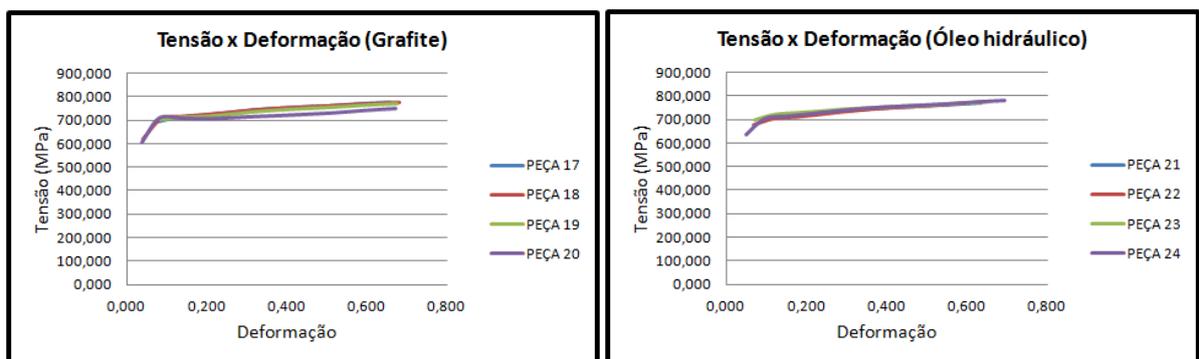


Figura 11 - Diagramas Tensão k_f (MPa) versus Deformação (ϕ) para Grafite e Óleo hidráulico.

O gráfico $k_f \times \phi$ descreve o comportamento plástico do material, sendo este conhecido como curva de escoamento. A curva de escoamento a frio pode ser representada pela equação $k_f = C * \phi^n$. Na Tabela 2 são mostradas as equações da reta e as respectivas equações para a tensão de escoamento para todas as condições de lubrificação propostas.

Tabela 2 - Equações de tensão de escoamento para todas as condições

Lubrificante	Equação da reta tangente	n	C	Eq. de resistência ao escoamento
Seco	$y = 0,0320 x + 2,8706$	0,0320	742,335	$k_f = 742,335 * \varphi^{0,0320}$
Silicone	$y = 0,0566 x + 2,8882$	0,0566	773,036	$k_f = 773,036 * \varphi^{0,0566}$
Teflon	$y = 0,0518 x + 2,8920$	0,0518	779,830	$k_f = 779,830 * \varphi^{0,0518}$
Poliamida	$y = 0,0436 x + 2,8878$	0,0436	772,325	$k_f = 772,325 * \varphi^{0,0436}$
Grafite	$y = 0,0566 x + 2,8941$	0,0566	783,610	$k_f = 783,610 * \varphi^{0,0565}$
Óleo Hidráulico	$y = 0,0593x + 2,8984$	0,0593	791,407	$k_f = 791,407 * \varphi^{0,0593}$

3.2 Análise do Atrito Através do Embarrilamento dos Corpos de Prova

A lubrificação é necessária para que se tenha um estado uniaxial de tensões, evitando que o corpo de prova fique na forma de um barril. A figura abaixo mostra os resultados da conformação para duas condições: sem lubrificante e com a utilização de lubrificantes. A formação de um raio maior para a condição a seco (maior embarrilamento) mostra que o uso de um lubrificante age de forma a diminuir o atrito entre peça e corpos de prova, fazendo com que a peça tenha apenas um pequeno embarrilamento.

Na Figura 12, são mostrados todos os raios resultantes da conformação para todas as seis condições de lubrificação propostas. Onde a Figura 12a) Seco, Figura 12b) Silicone, Figura 12c) Teflon, Figura 12d) Poliamida, Figura 12e) Grafite e Figura 12f) Óleo Hidráulico.

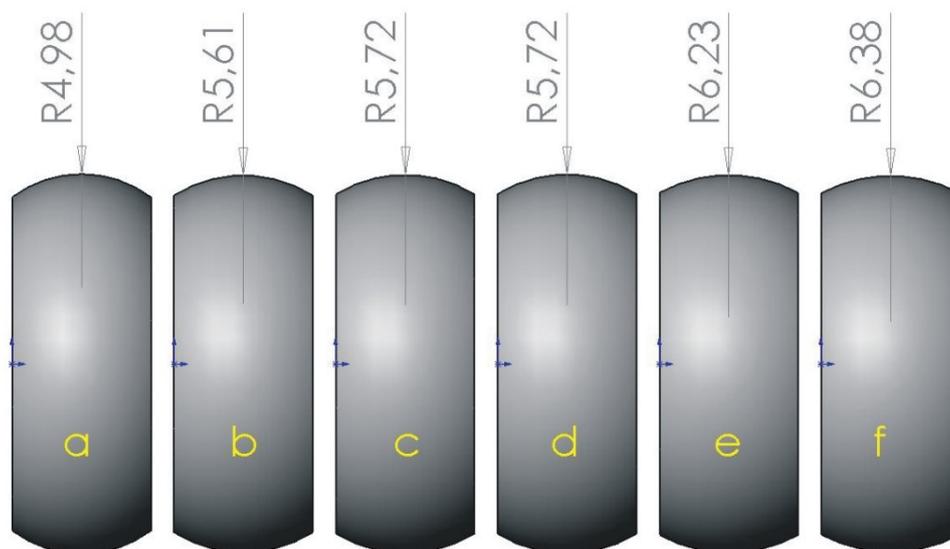


Figura 12 - Todos os corpos de prova com seus respectivos raios (embarrilamento).

Pode ser feita uma relação entre o raio do abaulamento e o coeficiente de atrito, quando temos um raio maior o coeficiente de atrito resultante é menor e consequentemente raios menores o coeficiente de atrito será maior.

Do ponto de vista da força máxima exigida no ensaio para comprimir os corpos de prova ela mostrou-se maior para os corpos de prova com menor atrito, isto pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 - Forças máximas e suas respectivas médias

Amostra	Força Máxima (tonf)	Força final média (tonf)
Seco - amostra 1	15,507	15,340
Seco - amostra 2	15,399	
Seco - amostra 3	15,233	
Seco - amostra 4	15,281	
Silicone - amostra 5	15,562	15,523
Silicone - amostra 6	15,552	
Silicone - amostra 7	15,949	
Silicone - amostra 8	15,027	
Teflon - amostra 9	15,720	15,694
Teflon - amostra 10	15,491	
Teflon - amostra 11	15,645	
Teflon - amostra 12	15,717	
Poliamida - amostra 13	15,825	15,797
Poliamida - amostra 14	15,693	
Poliamida - amostra 15	16,023	
Poliamida - amostra 16	15,874	
Grafite - amostra 17	15,852	15,849
Grafite - amostra 18	15,847	
Grafite - amostra 19	15,849	
Grafite - amostra 20	15,544	
Óleo hidráulico - amostra 21	16,294	16,312
Óleo hidráulico - amostra 22	16,264	
Óleo hidráulico - amostra 23	15,806	
Óleo hidráulico - amostra 24	16,377	

4 CONCLUSÃO

O conhecimento das curvas de escoamento dos materiais é de extrema importância dentro dos processos de conformação mecânica, pois a partir delas é possível prever como o material deformará plasticamente ao ser submetido aos esforços de conformação. O lubrificante óleo hidráulico mostrou-se mais adequado para a realização do ensaio, pois gerou um menor abaulamento na lateral do corpo de prova, considerando que pode ser feita uma relação entre o raio do abaulamento e o coeficiente de atrito. Enquanto a condição sem lubrificação mostrou-se a menos favorável a realização do ensaio. Quanto à força máxima exigida no ensaio para comprimir os corpos de prova, mostrou-se maior para os corpos de prova com menor atrito, no caso aqueles em que se utilizou óleo hidráulico como lubrificante, isto pode ser atribuído ao fato do diâmetro final do corpo de prova com menor atrito ser maior por ter escoado melhor nesta condição, com um maior diâmetro conseqüentemente a área e a força serão maiores ao final da compressão. As curvas obtidas neste trabalho são semelhantes às curvas obtidas por Lenhard Júnior com o trabalho sobre curva de escoamento do SAE-1050M a frio [4].

Nota-se nas curvas dos gráficos tensão x deformação uma boa repetibilidade e que o ensaio é apropriado para a determinação das equações das curvas de escoamento para a condição de processamento a frio, desde que utilizado um lubrificante adequado para a redução do coeficiente de atrito na interface matriz/peça e uma boa qualidade das superfícies das matrizes para reduzir a influência da rugosidade superficial.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e as instituições de apoio financeiro como CNPq e CAPES pelo projeto “Brazilian German Collaborative Research Initiative in Manufacturing Technology” (Bragecrim).

REFERÊNCIAS

- 1 CALLISTER, JR. Willian D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.
- 2 SCHAEFFER, L. Forjamento – Introdução ao Processo de Forjamento. Porto Alegre. Ed. Imprensa Livre 2ª edição, 2006
- 3 KNOLL, P.; LIMA, D.; SCHAEFFER, L.: Estudo descreve a obtenção da curva de escoamento do alumínio por ensaios de compressão. Corte & Conformação de Metais, Agosto 2007. p. 74-79.
- 4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL E PARÂMETROS DO PROCESSO NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE FORJAMENTO - Adalberto Luiz Lenhard Júnior
- 5 MARTINS, V.; SCHAEFFER, L.: Comparação entre lubrificantes pela verificação do atrito em alumínio e aço. Corte & Conformação de Metais, Março 2009. p. 44-63
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature: Standard Test Methods: ASTM E 9. Philadelphia: ASTM, 1998. v. 3.01. p. 99-106.
- 7 CATÁLOGO VILLARES METALS. Disponível em <http://www.villaresmetals.com.br> Acesso em 20 de Julho 2010.
- 8 ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. L. Conformação dos metais: fundamentos e aplicações. São Carlos: EESC-USP, 1999. p. 57-62.