

COMPORTAMENTO DO COEFICIENTE DE ATRITO NO AÇO AISI 4140 EM TESTE DE COMPRESSÃO DO ANEL COM DIFERENTES LUBRIFICANTES¹

Alex Fabiano Bueno²

Vinícius Martins³

Paulo Ricardo Böesch Júnior⁴

Daiana Mello Margutti⁴

Estela Knopp Kerstner⁴

Lírio Schaeffer⁷

Resumo

O ensaio do anel é um método de avaliação importantíssimo na determinação do coeficiente de atrito devido ao seu baixo custo e excelente resultado. Tendo sua aplicabilidade na determinação de lubrificante de melhor desempenho ou na obtenção do coeficiente de atrito real utilizado nos software de simulação. Este trabalho apresenta a evolução do comportamento do coeficiente de atrito do aço AISI 4140 através dos resultados do teste de compressão do anel. Foram comparados na condição sem lubrificação e diferentes lubrificantes na temperatura de 1.200°C. Os resultados mostraram a eficiência de cada uma das condições de lubrificação analisadas. Os resultados experimentais serão comparados com os obtidos através da simulação numérica.

Palavras-chave: Coeficiente de atrito; Teste de compressão do anel; Lubrificação; Simulação numérica.

BEHAVIOR OF FRICTION COEFFICIENT IN AISI 4140 IN RING COMPRESSION TEST WITH DIFFERENT LUBRICANTS

Abstract

The ring test is an important evaluation method for determining the coefficient of friction due to its low cost and excellent results. Taking your applicability in the determination of lubricant for best performance or to obtain the real friction coefficient used in the simulation software. This paper presents the evolution of the behavior of friction coefficient of AISI 4140 test results through the compression ring. We compared the condition without lubrication and lubricants at various temperature of 1200°C. The results showed the efficiency of each of the lubrication conditions analyzed. The experimental results are compared with those obtained by numerical simulation.

Key words: Friction coefficient; Ring compression test; Lubrication; Numerical simulation.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Doutorando do PPGEM. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil. alex.bueno@ufrgs.br

³ Professor do Instituto Federal Sul-rio-grandense – IFSul – Campus Sapucaia do Sul. Doutorando do PPGEM. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. viniushiper@yahoo.com.br

⁴ Mestrando do PPGEM. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil. paulo.boesch@ufrgs.br daiana.margutti@ufrgs.br estelakerstner@yahoo.com.br

⁵ 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 de um modo geral e em especial o forjamento de metais a quente traz uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas do material quando comparados com produtos produzidos por outros processos de transformação como a usinagem e a fundição.

Entender o efeito das variáveis envolvidas no processo de forjamento é importante para o sucesso e o avanço tecnológico necessário da indústria do forjado. O atrito interfacial peça-matriz durante o processo de conformação interfere diretamente na vida das matrizes, qualidade do produto e capacidade dos equipamentos empregados no processo.

Para amenizar os efeitos do atrito são adicionadas finas películas de lubrificantes, os quais apresentam baixa tensão de cisalhamento na interface peça-matriz visando reduzir as tensões que se opõe ao escoamento do material.⁽¹⁾

As propriedades mecânicas obtidas pelo processo de forjamento garantem uma condição ideal para diversos tipos de peças, que necessitam de alta resistência e possuem geometrias complexas.⁽²⁾

A conformação de metais e ligas produzidas por forjamento pode ser executada de dois modos tradicionais, forjamento em matriz aberta (forjamento livre) e forjamento em matriz fechada, neste segundo caso, ainda, podendo ser com ou sem a formação de rebarba. A escolha do modo a ser empregado dependerá da geometria da peça e do nível de precisão requerido da mesma. Existem casos em que a utilização dos dois modos se faz necessário, sendo nestas situações empregado o forjamento em matriz aberta como um pré-recalque, ou aproximação da geometria para o forjamento em matriz fechada.⁽³⁾ Geralmente, o forjamento em matriz aberta é realizado a quente e destinado a produção de peças de grande porte em lotes pequenos, posteriormente estas peças sofrem operação de usinagem para acabamento e ajuste dimensional.⁽⁴⁾

De uma forma geral, os materiais utilizados na fabricação de peças forjadas são aços de baixa e média liga, pode-se citar os aços baixa liga da família 41XX. Os aços desta família são ligados ao Cromo (~1%) e ao Molibdênio (~0,2%) atingindo alta resistência através de tratamentos térmicos de têmpera e revenido. Os principais aços desta família são AISI 4130, 4140 e 4145, sendo o segundo muito empregado na produção de peças automotivas.⁽⁵⁾

Nos processos de conformação de metais aplica-se uma pressão nas matrizes e esta é transmitida para o material que encontra-se alojado entre as mesmas. Realizando tal deformação se obtém um movimento relativo entre o ferramental e o material, é nesta interface que se observa o atrito. Podem-se verificar três tipos básicos de pressões que regem a condição de atrito em conformação mecânica para metais, são elas: Condição a seco (sem lubrificante); condição hidrodinâmica (camada espessa de lubrificante na interface); lubrificação de contorno (lubrificação intermediária entre as anteriores).⁽⁶⁾

A Figura 1 exhibe a tensão tangencial em função da pressão normal para os valores do coeficiente de atrito (μ) e para valores do fator de cisalhamento (m).

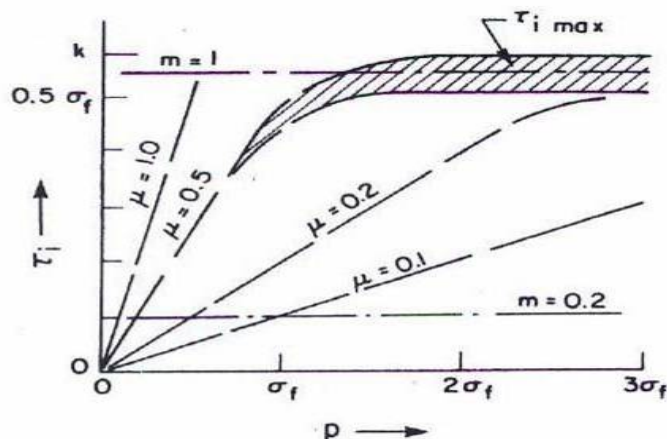


Figura 1. Valores do coeficiente de atrito e do fator de atrito.⁽⁶⁾

Os modelos matemáticos de atrito são empregados após a realização de algum método de ensaio que vise à determinação do atrito. Existem inúmeros métodos para determinação do atrito, pode-se citar o ensaio do anel descrito por Kunogi⁽⁷⁾ e o ensaio do tubo cônico proposto por Kopp e Phillip.⁽⁸⁾

O ensaio do anel consiste na compressão de um corpo de prova em forma de anel entre matrizes planas, enquanto sua variação percentual da altura e o diâmetro interno são controlados. A variação do diâmetro interno do anel verificado após o ensaio é usada para determinar o atrito interfacial. Para condição ideal, ou seja, atrito nulo, o anel se deforma como um disco sólido, com cada ponto superficial fluindo radialmente para fora em uma velocidade proporcional a sua distância do centro. Se o atrito for maior que zero o anel sofre um “efeito de barril” (embarrelamento) em suas paredes, isto se deve pela resistência ao escorregamento interfacial da relação peça-matriz, as condições citadas podem ser verificadas na Figura 2.⁽⁹⁾

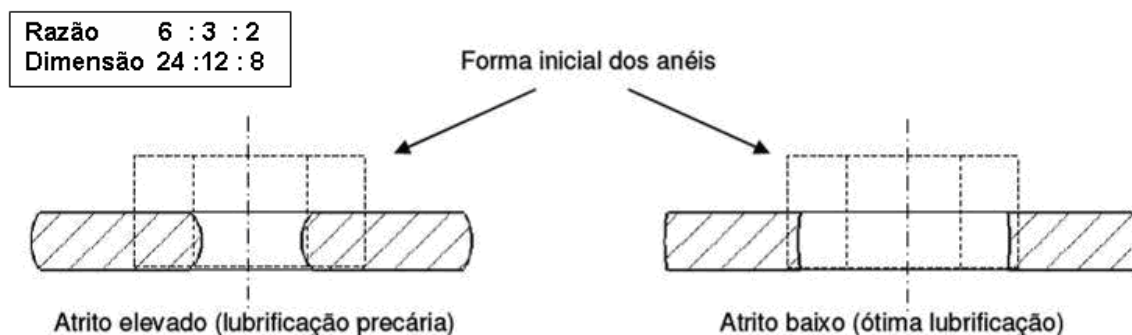
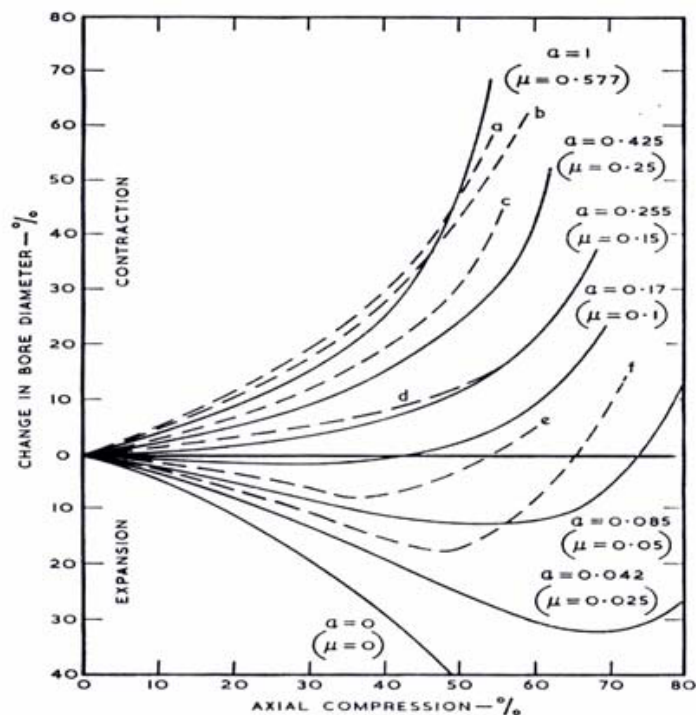


Figura 2. Efeito do atrito no escoamento do material durante o ensaio do anel.⁽¹⁰⁾

Os primeiros testes com anéis são atribuídos a Kunogi.⁽⁷⁾ O método foi desenvolvido posteriormente por Male e Cockroft⁽¹¹⁾ que introduziram uma calibração experimental para determinar o coeficiente de atrito (μ). Male e Depierre⁽¹²⁾ utilizaram o método do limite superior como tratamento matemático para determinação do fator de atrito m no ensaio do anel. A Figura 3 apresenta a primeira abordagem analítica para o ensaio do anel, desenvolvida por Hawkyard e Johnson,⁽¹³⁾ onde foi realizada uma comparação entre as curvas teóricas, obtidas por este método analítico e as curvas experimentais obtidas por Male e Cockroft.⁽¹¹⁾


 Figura 3. Abordagem analítica sobre curvas teóricas.⁽¹³⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir de barras comerciais do aço liga AISI 4140, foram confeccionados corpos de prova em formato de anel com dimensões conforme mostra a Figura 4.

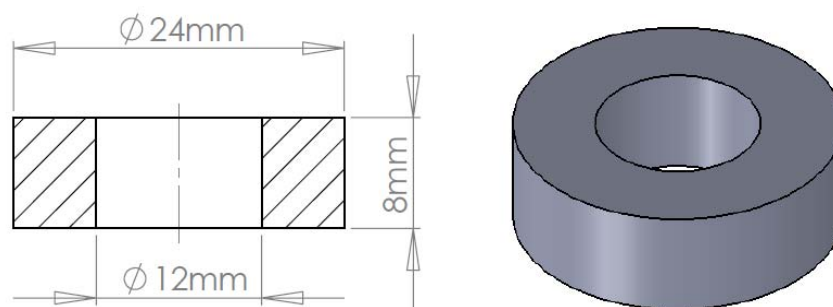


Figura 4. Corpo de prova utilizado.

A composição do aço AISI 4140 pode ser vista na Tabela 1.

 Tabela 1. Composição química do aço AISI 4140⁽¹⁴⁾

	C	Si	Mn	Cr	Mo
AISI 4140	0,40	0,25	0,90	0,95	0,20

Foram preparados 27 corpos de prova onde foram testadas as seguintes condições: lubrificante a base de grafite, lubrificante sintético a base de poliamida e sem lubrificação (a seco).

Os testes de compressão foram realizados entre matrizes planas na prensa EKA com velocidade de 3,7 mm/s e capacidade de 392,3 kN (40 ton), a uma temperatura de 1200°C e com deformações próximas de 20%, 40% e 60%.

As curvas de calibração foram obtidas no software MSC Simufact.forming 9.0, em função do modelo de atrito de Amonton-Coulomb (μ). Para a construção destas curvas foram realizadas séries de simulações onde o atrito iniciou em zero, sofrendo incrementos de um em um décimo até 0,50 μ . O registro de cada simulação de compressão do anel foi realizado em seis instantes ao longo do curso da prensa, na definição destes foi considerado um intervalo de 10% de redução em altura do corpo de prova até 60%.

Posteriormente os modelos conformados foram exportados em formato STL para software de CAD onde foi medida de forma mais prática a variação do diâmetro interno em função da redução em altura para cada valor de atrito.

3 RESULTADOS E DISCUÇÃO

Conforme o percentual de redução em altura aumenta, verifica-se uma redução cada vez mais significativa do diâmetro interno da amostra ensaiada, com isso pode ser observado que como era esperado apesar da aplicação de lubrificantes o atrito não foi completamente eliminado, mas sim reduzido, isto pode ser visto na Figura 7, onde é apresentado respectivamente um corpo de prova não conformado, e outros a 20%, 40% e 60% em redução na altura.



Figura 7. Corpo de prova não conformado e corpos de prova ensaiados.

A Figura 8 apresenta os valores obtidos nos experimentos para as três condições propostas em comparação com as curvas calibradas. Para cada ponto plotados sobre as curvas foram realizados três ensaios, sendo cada um dos pontos é o resultado da média dos resultados nos ensaios obtidos para cada uma das condições tribológicas propostas e para os níveis de redução citados anteriormente.

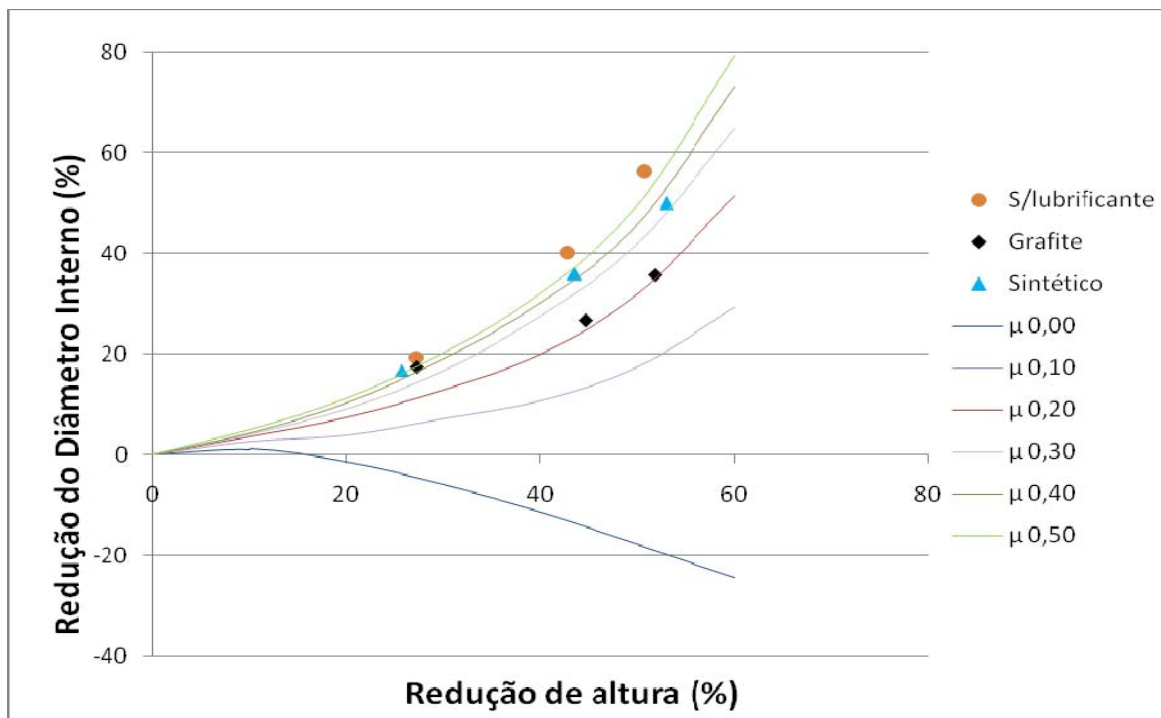


Figura 8. Valores obtidos nos experimentos para o aço AISI 4140.

Observa-se que com baixa deformação, os corpos de prova ensaiados apresentaram desempenho similar com o coeficiente de atrito em torno de $\mu = 0,5$. Os corpos de prova sem lubrificação obtiveram coeficiente de $\mu = 0,57$, que é o máximo da escala de Amonton-Coulomb em todos os níveis de deformação.

Com níveis médios de deformações, o lubrificante sintético apresentou coeficiente de atrito $\mu = 0,4$ enquanto o lubrificante a base de grafite obteve coeficiente aproximado de $\mu \approx 0,2$.

Para grandes deformações, o comportamento dos corpos de prova lubrificadas com grafite apresentou $\mu = 0,2$, já os corpos de prova ensaiados com o lubrificante sintético a base de poliamida obteve $\mu \approx 0,3$.

Demonstrando que o lubrificante a base de grafite pode ser indicado para o trabalho em grandes níveis de deformação em faixas de temperatura elevada, oferecendo vantagens sobre o lubrificante sintético a base de poliamida que ao ser submetido a temperaturas elevadas acaba degradando-se e com isso suas propriedades lubrificantes são prejudicadas.

Outro fator importante observado foi a formação de óxidos na superfície do corpo de prova, estes óxidos dificultam a ação dos lubrificantes na redução do atrito interfacial, sendo também um dos grandes problemas encontrados no forjamento a quente do aço AISI 414.

4 CONCLUSÃO

O lubrificante de grafite foi à melhor alternativa para redução de atrito em forjamento a quente, devido à sua estabilidade em alta temperatura e elevados níveis de deformação mantendo o coeficiente de atrito $\mu \approx 0,2$. O lubrificante sintético a base de poliamida apresentou desempenho inferior ao lubrificante a base de grafite devido a degradação do mesmo, pois com médias deformação apresentou coeficiente de $\mu = 0,4$ melhorando seu efeito de lubricidade com alta deformação atingindo $\mu \approx 0,3$. O coeficiente de atrito do corpo de prova sem lubrificação atingiu o



máximo valor da escala ficando $\mu = 0,57$. Isto denota a necessidade do uso de lubrificação no processo de forjamento a quente para a obtenção de peças de alta qualidade e redução de custo.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 MARTINS, V.; SCHAEFFER, L. Comparação entre lubrificantes pela verificação do atrito em alumínio e aço - Revista Corte e Conformação de Metais - Março/2009 - Páginas: 44 – 63
- 2 BÖRDER, C. Análise do coeficiente de atrito no ensaio do anel para o forjamento a quente. Trabalho de curso do Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo 2005.
- 3 FERREIRA, R. A. S.; Conformação Plástica: Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos. Recife. Editora Universitária da UFPE, 2006. p 20-80.
- 4 OLIVEIRA, R. A.; KOLLER, L.A.; SCHAEFFER, L. Evaluation of two commercially-available lubricants by means of ring test to AA6061 F aluminum alloys. Materials research, v. 6, n. 4, 2004, p. 591-597.
- 5 LIMA, F. B. Microestrutura e Tenacidade de Aços Baixa Liga Tipo 41XX – Uma Abordagem Quantitativa. Rio de Janeiro 2006, 188 p. COPPE/UFRJ.
- 6 SCHEY, A.; J. Tribology in metalworking: friction, lubrication and wear. Ohio: 2^a edição, 1984, p. 1-130.
- 7 “KUNOGI, H. (1954) J. Sci. Res. Inst, Japan, 30, p. 6392.” Cit. in: RUDKINS, N. T.; HARTLEY, P.; PILLINGER, I.; PETTY, D.. Friction Modelling and Experimental Observations in Hot Ring Compression Tests. Journal of Materials Processing Technology, v. 60, n. 1/4, p. 349-353, junho 1996.
- 8 KOPP, R.; PHILLIP, F. Physical parameters and boundary conditions for the numerical simulation of hot forming process. Steel Research, 1992. v. 63, n. 9, p. 392-398.
- 9 ALTAN, T.; OH, S.I.; GEGEL, H. Conformação de metais; Fundamentos e aplicações. Tradução de Reginaldo Teixeira Coelho. São Carlos; EESC-USP. 1999. 350 p
- 10 MARTELLO, L. Análise da Influência de Parâmetros no Forjamento da Liga de Alumínio AA6351. Dissertação para Obtenção de Título de Mestre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2006. 93 p.
- 11 MALE, A. T.; COCKCROFT, M. G.. Method for the Determination of the Coeficient of Friction of Metal Under Conditions of Bulk Plastic Deformation. Journal of the Institute of Metals, v. 93, n. 2, p.38-46, 1964.
- 12 MALE, A. T.; DEPIERRE, V.. Validity of Mathematical Solutions for Determining Friction from Ring Compression Test. Journal of Lubrication Technology, v. 92, n. 3, 389-397, julho 1970.
- 13 HAWKYARD, J.B.; JOHNSON, W. An Analysis of the changes in geometry of a short hollow cylinder during axial compression. Int.J.Mech.Sci.Pergamon Press V. 9, p. 16418/3-182, 1967.
- 14 Catálogo Villares Metals. Disponível em <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/996_PTBR_HTML.htm>. Acesso em 10 dez. 2010.