

Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: uma revisão

Paulo Ricardo Böesch Júnior¹
Vinicius Martins²
Lírio Schaeffer³

RESUMO: A avaliação das condições tribológicas na interface peça/ferramenta é geralmente determinada experimentalmente durante o processo de conformação ou em ensaios com o uso de amostras de pequena escala de várias formas. Um ensaio largamente aceito - particularmente para processos de conformação de volume, tal como forjamento, extrusão e laminação - é o ensaio de compressão de um anel. A popularidade do teste pode ser atribuída à sua conveniência prática, incluindo o fato de que atrito pode ser avaliado somente a partir da deformação, em detrimento de outras técnicas que envolvem medidas de forças ou mudanças dimensionais da amostra. Este artigo apresenta uma revisão sobre o ensaio de compressão do anel, com a apresentação de sua metodologia e de seus resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de atrito; ensaio de compressão do anel; lubrificação; simulação numérica.

ABSTRACT: The evaluation of the tribological conditions at the interface part / tool is usually determined experimentally during the forming process or in tests using samples of small scale in various ways. A widely accepted test, particularly for forming processes of volume, such as forging, extrusion and lamination, compression testing is a ring. The popularity of the test can be attributed to its practical convenience, including the fact that friction can be assessed only after the deformation, rather than using other techniques that involve measurements of forces and dimensional changes of the sample. This article presents an overview of the ring compression test presenting the methodology and results.

KEYWORDS: Friction coefficient; ring compression test; lubrication; numerical simulation.

1 Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - UFRGS

2 Professor do Instituto Federal Sul-rio-grandense - Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - UFRGS

3 Doutor em Conformação Mecânica, Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS

1. INTRODUÇÃO

A importância do atrito em processos de conformação de metais a quente não pode ser subestimada, pois contribui para o sucesso ou o fracasso do processo de conformação. Na laminação a quente, por exemplo, o atrito é necessário na interface entre a peça e os rolos, a fim de transmitir energia de deformação do trabalho para a peça, apesar de que o atrito excessivo tende a restringir o nível de deformação, resultando em elevados esforços nos laminadores e altos torques no eixo. Além disso, se o nível de atrito for muito baixo, ocorre a derrapagem ou mesmo a peça não conseguirá entrar no rolo. O atrito é um dos mais significativos fenômenos físicos, e influencia na conformação de metais; em comparação com a metalurgia e os mecanismos de transferência de calor, porém, esse fenômeno permanece sendo pouco entendido. Apesar de existir um grande número de testes que foram desenvolvidos, é difícil medir o atrito [1]; além disso, poucos testes são adequados para aplicações de conformação de metal a quente.

Nos materiais deformáveis plasticamente, os valores de pressão de trabalho e as forças de processos não são influenciados apenas pelas propriedades do material, mas também por condições de atrito de contato. Essa influência é refletida nas alterações microestruturais dos materiais, no desgaste da ferramenta e no aumento da energia necessária para a conformação [2]. O coeficiente de atrito e o desgaste em processos de conformação dependem basicamente de três parâmetros: materiais envolvidos, topografia dos corpos e condições de trabalho [3]

Com a crescente utilização de elementos finitos para solucionar os problemas relacionados à conformação de metal a quente, surge a necessidade de um melhor conhecimento do comportamento do atrito na interface, ou seja, sua interferência na taxa de deformação e temperatura, sendo necessário tal conhecimento a fim de melhorar o grau de precisão dos modelos de processo [4].

O resultado da simulação numérica do processo dependerá das condições de contorno, que são relacionadas com o atrito na interface. Além disso, o passo fundamental na modelagem física do processo é a seleção do lubrificante adequado, com a finalidade de estabelecer condições reais de similaridade entre o processo e a modelagem, validando os resultados [3].

Todas as pesquisas tribológicas nos processos de conformação foram realizadas em duas direções, sendo a primeira a definição do mecanismo de fricção por meio de leis e teorias sobre o atrito e o desenvolvimento de métodos para a integração dessas definições em modelos de processos de conformação e de avaliação quantitativa de indicadores de atrito. Para obter uma descrição matemática de atrito interfacial que ocorre no processo de conformação, são aplicadas as seguintes leis e teorias sobre o atrito:

1. Lei de Amonton e Coulomb

$$\tau = \mu p, \quad 0 \leq \mu \leq 0.577$$

onde μ representa o coeficiente de atrito, e p a pressão normal de contato.

2. Lei do atrito constante

$$\tau = mk, \quad 0 \leq m \leq 1$$

onde m representa o fator de atrito ou fator de proporcionalidade e varia de 0 (condições de atrito nulo) a 1 (condições de atrito máximo geralmente com ocorrência do fenômeno de adesão), k corresponde à tensão de corte máxima do material.

3. Teorias de adesão, que levam em consideração a rugosidade real de contato das superfícies

No primeiro modelo (1), o atrito é proporcional à pressão normal p , e a proporcionalidade medida é expressa através do coeficiente de atrito μ . Ele tem importância apenas em áreas de pequena pressão normal. O segundo modelo de atrito (2) assume a tensão tangencial constante de atrito de contato superficial, proporcional ao coeficiente de atrito m que, na realidade, é o caso da existência de grandes pressões normais. Tem sido apontado, em muitos artigos que tratam de atrito, que ambas as leis não têm o significado geral.

Wanheim e outros desenvolveram o modelo de atrito que tem a importância geral e abrange todas as áreas de pressão. O modelo é baseado na análise da deformação plástica da peça de trabalho, com rugosidade ideal, com ângulo de inclinação inicial γ_0 entre placas planas lisas da ferramenta. A formulação matemática e a análise da deformação plástica do modelo são realizadas pela teoria de linha-deslizante. O modelo de Wanheim-Bay é expresso analiticamente como: $\tau = f\alpha k$ (3) onde α é a relação entre a área real e aparente de contato, f é fator de atrito e k é a tensão de escoamento em cisalhamento. A ilustração gráfica desse modelo de atrito é apresentada nos artigos [5] e [6]. É evidente que tal modelo de atrito representa a combinação de duas leis, porque em pequenas pressões a tensão de atrito é proporcional à pressão e em grandes pressões a tensão tangencial é constante. A vantagem desse modelo é que o mesmo apresenta as verdadeiras condições de contato, inclusive em áreas de média tensão. O modelo de atrito (ver a equação 3) foi testado experimentalmente, através da determinação das tensões tangenciais e normais em processos de compressão livre [7], extrusão e laminação [5]. A maior congruência de resultados experimentais e numéricos apareceu na aplicação de fricção do modelo de Wanheim-Bay (3).

2. O ENSAIO DO ANEL

Dentre os métodos para medir o coeficiente de atrito, o teste de compressão do anel ganhou ampla aceitação nas últimas duas décadas. Foi originado por Kunogi [8] e posteriormente aprimorado e apresentado de forma útil por Male e Cockcroft [9]. Essa técnica utiliza as alterações dimensionais de uma amostra de teste para quantificar o coeficiente de atrito. Quando um anel liso é comprimido entre duas placas planas, um alto atrito resulta em um fluxo interno do material; um baixo atrito resulta em escoamento do material, como esquematicamente mostrado na FIG. 1.

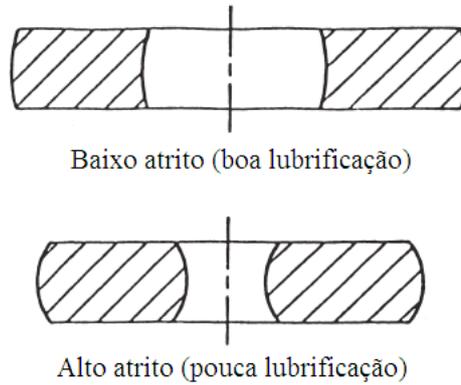


FIGURA 1. Efeito do atrito sobre o fluxo do metal durante o teste compressão do anel [10].

Para um determinado percentual de redução da altura do anel durante o teste de compressão, haverá uma variação do diâmetro interno da amostra; através dessa medição, é possível, indiretamente, conhecer o fator de atrito na interface peça/matriz. Se a amostra tem a dimensão do diâmetro aumentada durante a deformação, o atrito é baixo; se o diâmetro interno da amostra diminui durante a deformação, o atrito é alto. Usando essa relação, os coeficientes de atrito podem ser plotados em curvas específicas [10].

As curvas de calibração de atrito foram geradas por Male e Cockcroft [9], e foram plotadas com o percentual de redução do diâmetro interno do corpo de prova em função do percentual de redução em altura, para diferentes graus de coeficiente de atrito em uma mesma temperatura, como mostrado na FIG. 2.

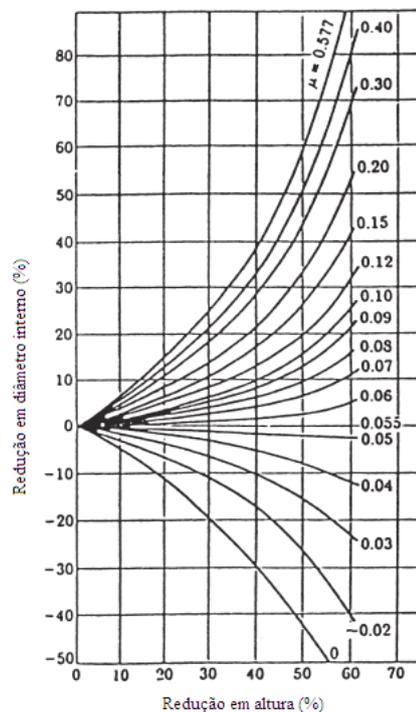


FIGURA 2. Curvas de calibração para a determinação de atrito em termos de μ [9].

Por outro lado, a simulação matemática pode ser usada para avaliar a deformação do material, a tensão distribuição de tensões, a taxa de deformação, a exigência de força e a probabilidade de qualquer defeito no material [11]. Assim, o uso combinado dos modelos físicos experimentais e simulações numéricas permitem um simples e eficaz meio para estudar o mecanismo de fricção em condições de grande deformação plástica [12].

3. FATORES QUE PODEM INFLUENCIAR NO COEFICIENTE DE ATRITO

Male [13] verificou a influência das condições da superfície entre as amostras e as matrizes no ensaio do anel. Foram feitos estudos (com alumínio, titânio, latão alfa sem lubrificação e latão alfa lubrificado), em temperatura ambiente, variando-se a velocidade da prensa (0,0025; 2; 300 pol./seg.) e o tipo de lubrificante (grafite como lubrificante sólido, lanolina como lubrificante sólido mole e parafina como lubrificante líquido). Verificou-se que, em condições de temperatura ambiente, o coeficiente de atrito do latão alfa resultou um pouco menor que o coeficiente de atrito do cobre. Esse efeito foi atribuído à presença de zinco no latão alfa. Para se determinar tal efeito, foram realizados ensaios com anéis produzidos a partir de uma série de ligas de cobre-zinco. Durante a análise dos resultados, verificou-se uma dependência direta do coeficiente de atrito com o teor de zinco na liga de material. Isso pode ser visto na FIG. 3

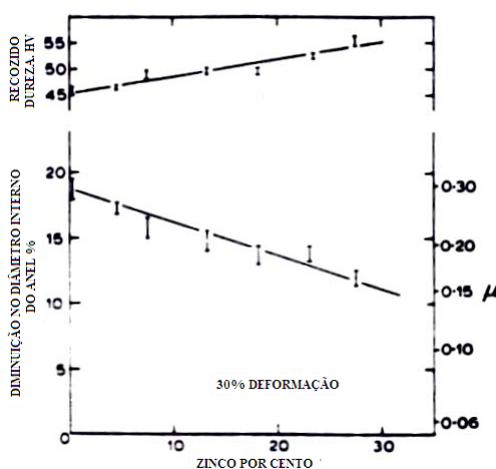


FIGURA 3: Coeficiente de atrito (μ) em função do teor de zinco em ligas de cobre-zinco, obtido de Male [13].

Wang e Lenard [14] fizeram uma série de experimentos com anéis em aço ligado ao Nb (nióbio) e V (vanádio). Os anéis ensaiados possuíam as relações dimensionais de 6: 3: 2, para os diâmetros externos, internos e altura, respectivamente, e foram normalizados a uma temperatura de 1000°C antes dos ensaios. A temperatura usada para os ensaios foi entre 900 e 975°C e, como lubrificante, foi utilizado o Deltaglaze 19, que é um lubrificante a base de vidro. As taxas de deformação usadas no ensaio foram de 0,005; 0,05; 0,5; 5 s⁻¹.

Os resultados foram inseridos, em um gráfico, com a curva de calibração obtida por um método analítico baseado no modelo de Avitzur, conforme indicado na FIG. 4.

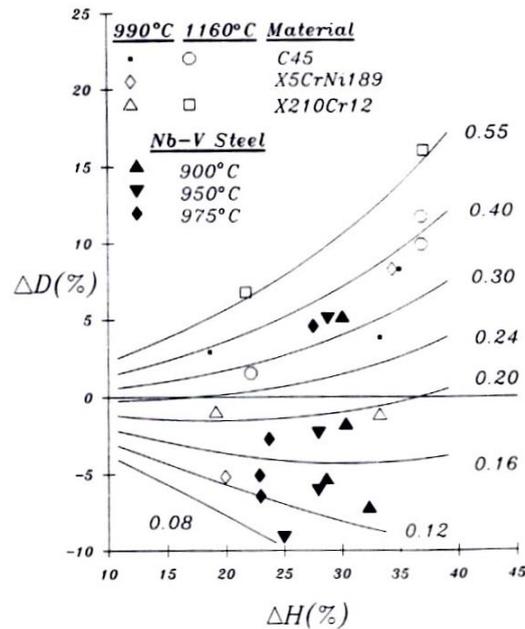


FIGURA 4: Gráfico com fator de cisalhamento de atrito m , de vários tipos de aço em uma curva de calibração analítica, obtido de Wang e Lenard [14].

Como resultado, foi verificado que a taxa de deformação, temperatura e a formação de carepa são os parâmetros mais significativos no forjamento do anel e interferem diretamente no fator de cisalhamento de atrito(m).

4. A ABORDAGEM ANALÍTICA DO ENSAIO DO ANEL

Hawkyard e Johnson [15] desenvolveram a primeira abordagem analítica para o ensaio do anel. Foi feita uma comparação entre as curvas teóricas obtidas por este método analítico e as curvas experimentais obtidas por Male e Cockroft [9], conforme mostrado na FIG. 5.

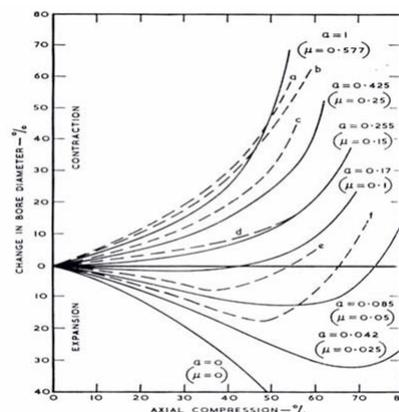


FIGURA 5: Gráfico comparativo com valores teóricos, obtido de Hawkyard e Johnson [15].

O Gráfico comparativo tem valores teóricos (linha cheia) do coeficiente de atrito (μ) ou do fator de cisalhamento de atrito (m), no gráfico representado por (α), onde $\alpha p = \mu k$, com valores experimentais (linha tracejada) para os materiais: a) aço sem lubrificante; b) cobre sem lubrificante; c) aço sem lubrificante e matrizes polidas; d) cobre lubrificado com grafite; e) latão lubrificado com lanolina; e f) alumínio lubrificado com parafina, obtido de Hawkyard e Johnson [15].

Verificou-se que as formas das curvas teóricas apresentaram uma boa concordância com as curvas experimentais, obtidas por Male e Cockroft [9]. Também foi verificado que, para valores do coeficiente de atrito (μ) maiores que 0,15 ou próximos à região de aderência, onde $\mu = 0,577$, ocorre um considerável ajuste entre as predições do modelo analítico com os experimentos de Male e Cockroft [9], e que há uma dispersão maior na região de baixo atrito e grandes deformações.

5. GEOMETRIA ALTERNATIVA PARA TESTE DE COMPRESSÃO DO ANEL

Com a evolução dos programas de simulação do processo de conformação que se utilizam de métodos de elementos finitos, tornou-se necessária a obtenção de maior conhecimento sobre as condições do atrito na interface entre matriz e a peça, para que os resultados de simulação se tornassem mais precisos. Essa necessidade incentivou novas pesquisas sobre o ensaio do anel e, nesse sentido, busca-se uma melhor adaptação dos modelos de atrito inseridos nos programas com os valores obtidos experimentalmente. Desse modo, novas geometrias começaram a ser testadas e seus resultados comparados com os ensaios executados, usando-se o modelo convencional de anel.

Um trabalho contendo uma série de simulações feitas com base no modelo de atrito desenvolvido por Wanhein-Bay foi apresentado por Petersen, Martins e Bay [16]. Nesse estudo, é proposta a seguinte equação para o atrito:

$$\tau_i = f \mu k \quad (4)$$

Na equação acima, f é o fator de atrito, podendo variar de 0, condição sem atrito e $f = 1$, se houver a condição de aderência e (α) é a relação entre a área de contato real e a área aparente entre a matriz e a peça. Na prática, o fator (f) é obtido experimentalmente e (α) é calculado de acordo com expressões analíticas de Wanhein-Bay. Foram comparados com ensaios feitos com amostras em forma semicônica, com amostras de anéis na forma convencional e com amostras de 27 anéis de uma nova forma geométrica, conforme indicado na FIG. 6.

$$A:B:C:D = 6:4:3:2$$

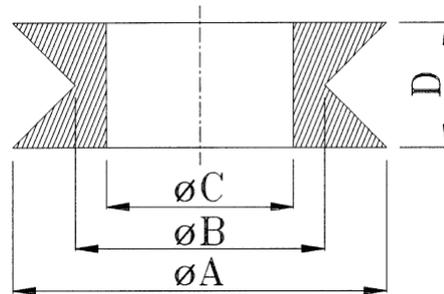


FIGURA 6: Geometria proposta por Petersen, Martins e BAY para calibração do modelo de atrito em condições de baixos níveis de pressão [16].

Em todos os casos, as amostras foram feitas em alumínio puro e os ensaios foram feitos sem lubrificação. Os resultados mostraram uma diferença dos valores obtidos do coeficiente de atrito, quando simulados usando-se o modelo de atrito da equação 2 e da equação 4. Os autores consideram o modelo da FIG. 6 do anel mais sensível para condições em que a pressão normal p sobre a área de contato assume valores baixos, $p/\sigma < 1$ onde p é a pressão normal e σ é a tensão normal.

Petersen, Martins e Bay [17] deram continuidade aos experimentos e realizaram novos ensaios, comparando os resultados obtidos com o novo modelo de anel, mostrado na FIG. 6, aos resultados obtidos através de ensaios com a forma convencional do anel.

Na FIG. 7 podem ser vistos os resultados com anéis na forma convencional, com curvas de calibração obtidas com os modelos de atrito conforme equação 2 (linha cheia) e equação 4 (linha tracejada), segundo Petersen, Martins e Bay.

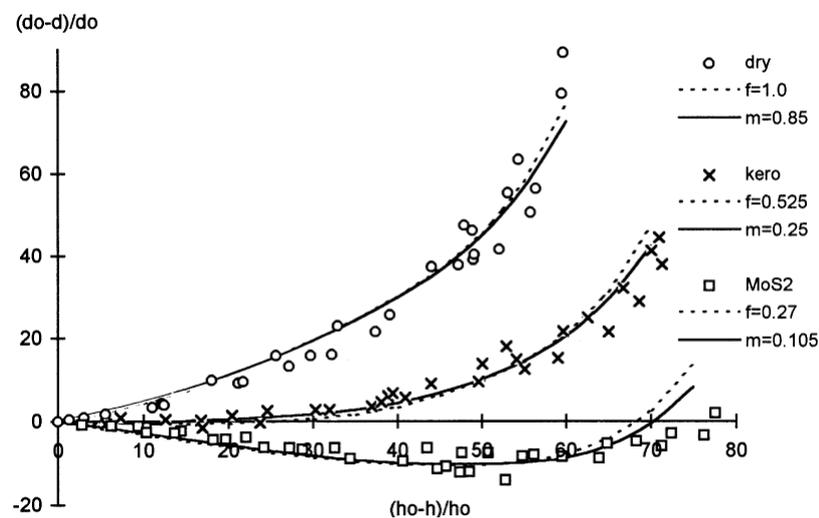


FIGURA 7: Ensaio do anel com as curvas de calibração [17].

As curvas de calibração foram obtidas fazendo-se a simulação pelo método de elementos finitos, levando-se em consideração os dois modelos de atrito (modelo da equação 2 e o modelo da equação 4). Porém, neste novo experimento, foi levado em consideração o fator lubrificação; os ensaios foram feitos a seco e com dois lubrificantes, querosene e MoS2.

Nas FIG. 8 e 9 podem ser vistos os resultados obtidos nos ensaios do anel com a forma geométrica alterada mostrada na FIG. 6.

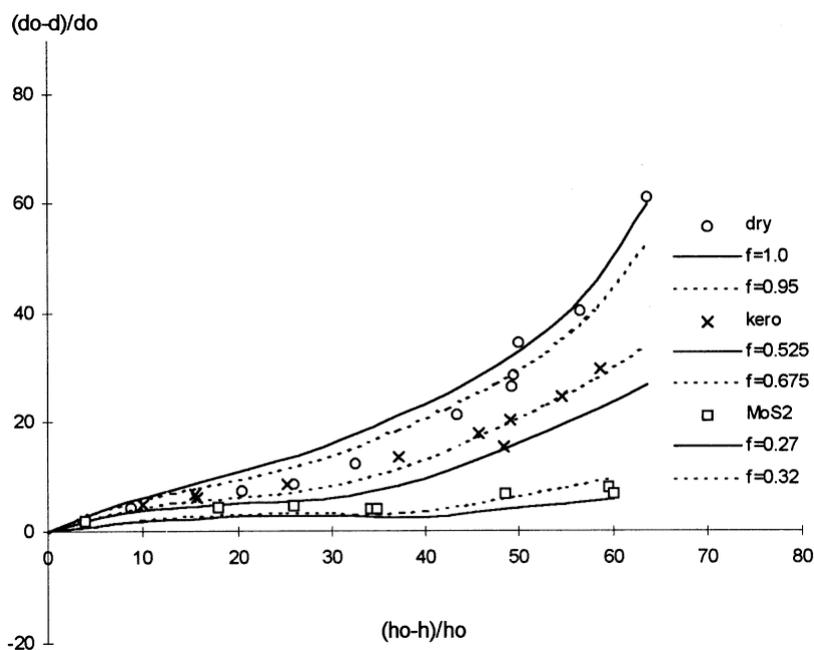


FIGURA 8: Resultados obtidos no ensaio do anel com forma de acordo a FIG. 6 e curva de calibração adotando-se o modelo de atrito conforme equação 4 [17].

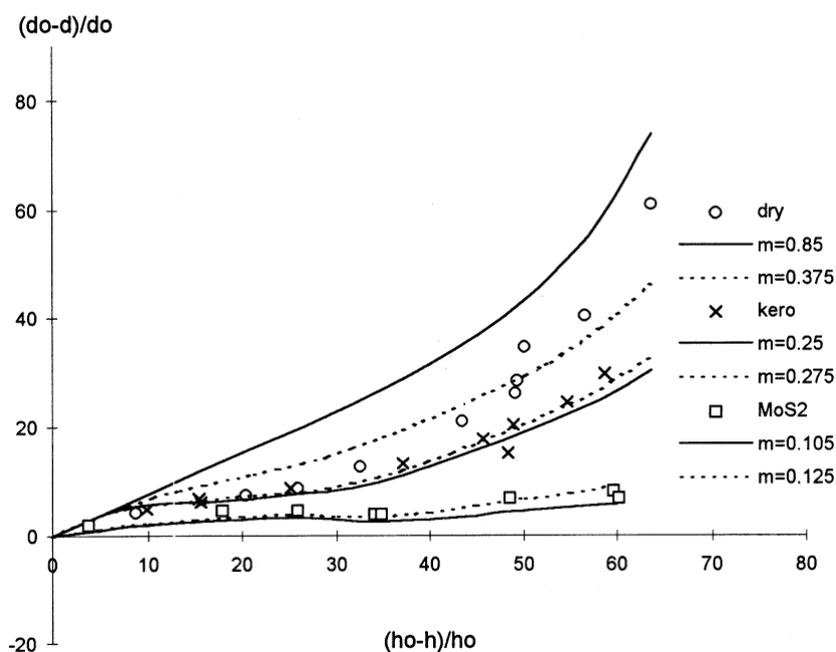


FIGURA 9: Resultados obtidos no ensaio do anel com forma de acordo com a FIG. 6 e curva de calibração adotando-se o modelo de atrito conforme equação 2 [17].

Esses ensaios foram feitos por Petersen, Martins e BAY nas mesmas condições do ensaio com a forma convencional do anel e o processo de simulação para obtenção das curvas de calibração.

Com os resultados obtidos, puderam-se fazer as seguintes observações:

- Para os ensaios com a forma convencional do anel, com os resultados demonstrados na FIG. 7, as curvas de calibração obtidas em ambos os modelos de atrito não apresentam diferenças significativas e há boa convergência dos resultados práticos. Porém, observou-se uma maior dispersão, principalmente para altos valores de deformação na altura.

- Nos ensaios com a forma geométrica do anel modificada, conforme mostrado na FIG. 6 e indicado nas FIG. 8 e 9, observou-se uma boa correspondência entre os resultados obtidos usando-se o querosene e o MoS_2 e a curva de calibração obtida através do processo de simulação adotando-se os dois modelos de atrito (equações 2 e 4). Porém, os resultados dos ensaios feitos a seco mostraram-se mais próximos das curvas de calibração, adotando-se o modelo de atrito da equação 4. Isso reforça a importância do conhecimento do modelo de atrito a ser adotado em processos de simulação e, também, da comprovação desse modelo através de ensaios.

6. CONCLUSÃO

O método de ensaio anel representa ser uma técnica altamente confiável e é também o mais aplicado método indireto de estimativa de atrito na interface matriz/ material. Os dados obtidos através dessa técnica podem ser aplicados para todo tipo de processo de fabricação. A mudança de diâmetro interno na compressão do anel representa, de forma indireta, o coeficiente de atrito na interface matriz/material.

Na modelagem física do processo pela aplicação de materiais de modelagem, a seleção de um lubrificante adequado é um passo crucial e deve ser executada meticulosamente. Os resultados da modelagem e sua transferência para os processos reais dependem muito do contato com semelhanças de condições de atrito no processo.

Em temperatura ambiente, o efeito da taxa de deformação no coeficiente de atrito é controlado pela quantidade de contaminantes na superfície de contato entre a matriz e o anel, e pelo filme de óxido presente na amostra do anel.

Para o ensaio a seco, ou com um lubrificante sólido, a velocidade da prensa não tem efeito sobre o coeficiente de atrito. Entretanto, quando se usa um lubrificante sólido mole ou um lubrificante líquido, um aumento na velocidade da prensa aumenta a eficiência da lubrificação, promovendo uma camada grossa de lubrificante e possibilitando, assim, o aumento da taxa de deformação antes da ruptura desta camada.

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 Reserch Initiative in Manufacturing Technology” (BRAGECRIM).

Referências bibliográficas

- [1]. J.A. SCHEY, **Tribology in Metalworking - Friction, Lubrication and Wear**, American Society for Metals, 1983.
- [2] MANDIĆ, V.; STEFANOVIĆ, M.; **Friction studies utilizing the ring – compression test - Part I**. 8th International Tribology Conference, (2003) 46-51
- [3] BOWDEN, F.P.; TABOR, D., **The friction and lubrication of solids**. At the Clarendon Press, Oxford, (1950).
- [4] RUDKINS, N.T.; HARTLEY, P.; PILLINGER, I.; PETTY, D.; **Friction modelling and experimental observations in hot ring compression tests**. Journal of Materials Processing Technology 60 (1996) 349-353
- [5] BAY, N.; **Friction stress and normal stress in bulk metal forming processes**, Jour. of Mater. Proc. Tech, 14 (1987), 203-223.
- [6] WANHEIM, T.; BAY, N.; PETERSEN, A.S.; **A theoretically determined model for friction in metal working processes**. Wear, 28 (1974), 251-258.
- [7] BAY, N.; GERVED, G.; **Tool/Workpiece interface stresses in simple upsetting**, Jour. of Mater. Proc. Tech, 14 (1987), 263-282.
- [8] KUNOGI M. **A new method of cold extrusion**. J Sci Res Inst Tokyo, 50; (1956); 215–46.
- [9] MALE, A.T.; COCKCROFT, M.G.; **A method for the determination of the coefficient of friction of metals under condition of bulk plastic deformation**. J Inst Metals (1964–1965);93:38–46.
- [10] SOFUOGLU, H.; RASTY, J.; **On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test**. Tribology International 32 (1999) 327–335
- [11] S. KOBAYASHI, S.-I. OH, T. Altan, **Metal Forming and the Finite Element Method**, Oxford University Press, (1989).
- [12] ROBINSON, T.; OU, H.; ARMSTRONG, C.G.; **Study on ring compression test using physical modelling and FE simulation**. Journal of Materials Processing Technology 153–154 (2004) 54–59
- [13] MALE, A.T. **Variations in friction coefficients of metals during compressive deformation**. Journal of the Institute of Metals, V. 94, p. 121-125, (1966).
- [14] WANG, F.; LENARD, J.G. **An experimental study of interfacial friction-hot ring compression**. Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 114, p. 13-18, (1992).
- [15] 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. 163-182, (1967).
- [16] PETERSEN, S.B.; MARTINS, P.A.F.; BAY, N. **Friction in bulk metal forming: A general friction model vs.the law of constat friction**. Journal of Materials Processing Technology, V. 66, p. 186-194, (1997).
- [17] PETERSEN, S.B.; MARTINS, P.A.F.; BAY, N.; **An alternative ring-test geometry for the evaluation of friction under low normal pressure**. Journal of Materials Processing Technology 79 (1998) 14–24