

INTERFACE PEÇA-FERRAMENTA NA CONFORMAÇÃO MECÂNICA: CONCEITOS REFERENTES AO ATRITO

Costa, L. L.¹
Zottis, J.²
Lisboa, C. P.³
Schaeffer, L.⁴

- ¹ Mestre em Engenharia, Luana De Lucca de Costa, UFRGS - PPGE3M, luana.lucca@ufrgs.br
² Mestre em Engenharia, Juliana Zottis, UFRGS - PPGE3M, juliana.zottis@ufrgs.br
³ Engenheira Mecânica, Camila Pereira Lisboa, UFRGS, camila.lisboa@ufrgs.br
⁴ Professor Titular, Dr. Lirio Schaeffer, UFRGS - PPGE3M, schaeffer@ufrgs.br

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo

O movimento relativo entre a peça e as ferramentas nos processos de conformação origina o atrito. Esse é um dos principais fatores de influência no processo, uma vez que atua de forma direta na deformação plástica da peça produzida. Ainda, atua diretamente na definição das cargas e tensões transferidas para as ferramentas e no acabamento superficial das peças. Este estudo traz uma revisão dos modelos de Amonton-Coulomb, Prandtl e Waheim-Bay capazes de descrever o atrito na interface da peça-ferramenta nos processos de conformação mecânica.

Palavras-chave: Atrito; Conformação mecânica; Deformação plástica.

TOOL-PART INTERFACE IN THE METAL FORMING PROCESS: FRICTION CONCEPTS

Abstract

The relative movement between a part and tools in the metal forming processes causes friction. It is one of the main influencing factors in the process, it acts directly as a plastic deformation of the produced piece. In addition, it influences the definition of force and tensions applied to the tools and in the superficial finishing of the parts. Herein, we study the Amonton-Coulomb, Prandtl and Waheim-Bay models, capable of describing the friction at the interface between tool and part in the metal forming process.

Key words: Friction; Metal forming; Plastic deformation.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de conformação mecânica dos metais alteram a forma de um corpo metálico, inicialmente de forma simples, para uma forma definida e mais complexa de forma permanente a partir da aplicação de tensões externas ocasionando, além de mudanças dimensionais e de forma, alterações das propriedades mecânicas e estruturais dos metais [1,2].

Nos processos por conformação direta, uma força é aplicada à superfície do material provocando o escoamento do metal em direção perpendicular à direção de compressão. Os principais exemplos deste tipo de processo são o forjamento e a laminação. Já nos processo por compressão indireta as forças compressivas são

desenvolvidas pela reação do material com a matriz por meio da aplicação de outra força primária que são frequentemente trativas, e as forças compressivas indiretas, desenvolvidas pela reação do material com a matriz, atingem valores elevados. A trefilação de fios e tubos, a extrusão e o embutimento profundo representam processos de compressão indireta. O estiramento representa processos de conformação por tração, onde a chapa metálica fina é dobrada, formando os contornos da matriz sobre a aplicação de forças trativas. O dobramento envolve a aplicação de momentos fletores à chapa, enquanto o cisalhamento envolve a aplicação de forças cisalhantes de magnitude suficiente para romper o metal do plano de cisalhamento [3,4]. A representação destes processos é apresentada na Figura 1.

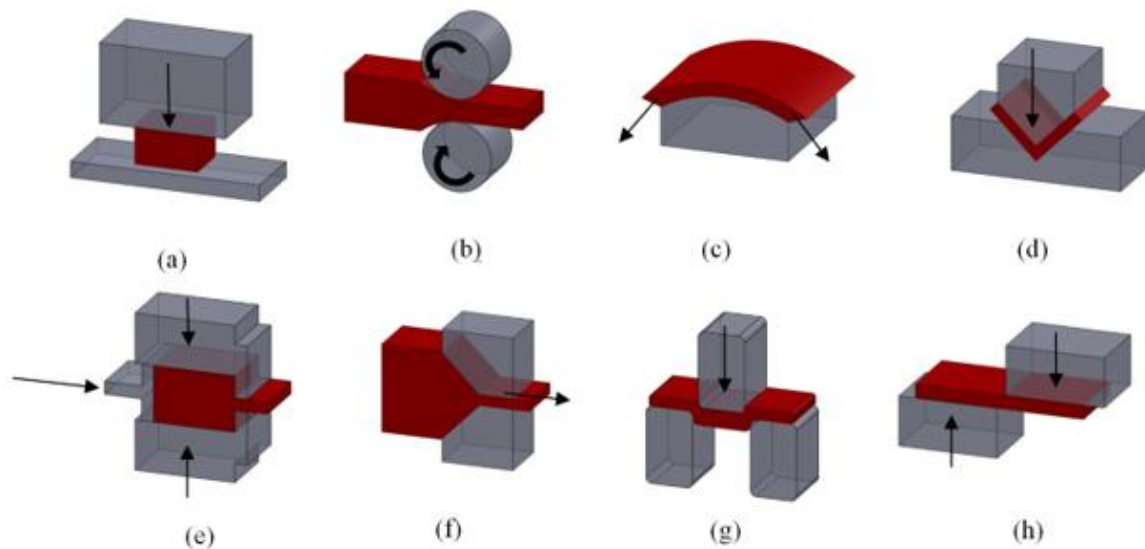


Figura 1- Representação dos processos típicos de conformação: (a) Forjamento, (b) Laminação, (c) Estiramento, (d) Dobramento, (e) Extrusão, (f) Trefilação, (g) Embutimento Profundo, (h) Cisalhamento [1].

O movimento relativo entre a peça e as ferramentas nos processos de conformação mecânica origina o atrito. Esse é um dos principais fatores de influência no processo, uma vez que atua de forma direta na deformação plástica da peça produzida. As razões para a grande relevância do atrito nos processos de conformação foram enumeradas por [5] *apud* [6].

- O atrito influencia diretamente a definição das cargas para conformação, assim como, nas tensões transferidas para as matrizes (ferramentas), ou seja, traz consequências tanto na vida da ferramenta quanto no escoamento do material, sendo o seu efeito reduzido por meio da utilização de lubrificantes;
- Existe uma dependência da integridade e do acabamento superficial da peça na formação do filme lubrificante adequado; caso o filme seja rompido a peça e as ferramentas sofrem danos superficiais.
- A atuação do atrito na relação entre o lubrificante e os componentes da máquina, nas considerações de custo e na conservação de energia.

Ressalta-se que tanto o atrito quando o desgaste, referido em tópico anterior, não são propriedades intrínsecas dos materiais e, sim, da interação dos componentes do sistema tribológico [7]

2 MODELOS DE DESCRIÇÃO DO ATRITO

Os modelos capazes de descrever o atrito na interface da peça-ferramenta descritos nos parágrafos anteriores, apesar de amplamente utilizados, apresentam limitações, dependendo do processo de conformação em estudo [8]. Podem-se ressaltar os aspectos de cada um deles examinando as Figuras 2 e 3.

- Modelo de atrito de Amonton-Coulomb (μ): indicado para casos em que a pressão de contato seja baixa, visando, por exemplo, processos de conformação com contato entre peça e ferramenta em deslizamento, tais como, laminação, trefilação de arames e conformação de chapas. Sendo aplicado, então, quando a tensão normal média na peça é menor ou igual à tensão de escoamento $\bar{\sigma}_N \leq k_f$ [6].
- Modelo de atrito de Prandtl (m): aplicado em processos de conformação nos quais a pressão normal de contato atinge um valor muito maior que a tensão de escoamento da peça $\bar{\sigma}_N \gg k_f$. Os processos de forjamento e extrusão são exemplos onde são assumidos altos valores de pressão. Por outro lado, a utilização desse modelo esbarra na dificuldade do atrito não depender do estado de tensões na interface. Nesse caso as tensões de atrito na interface são superestimadas em processos com baixas tensões normais [6,8,9]. O modelo de atrito de Prandtl é encontrado na literatura, também, como lei do atrito constante e modelo do atrito de Tresca.
- Modelo de atrito de Waheim-Bay (f): foi desenvolvido como tentativa de superar as dificuldades dos modelos acima citados. Em termos práticos assume que o atrito é proporcional à tensão normal quando a relação entre a pressão normal aplicada e a tensão de escoamento do material é menor que 1,5. Quando a relação é maior que 3,0 o atrito assume um valor constante. O fator de atrito de Waheim-Bay é expresso na literatura por f [6,8,9].

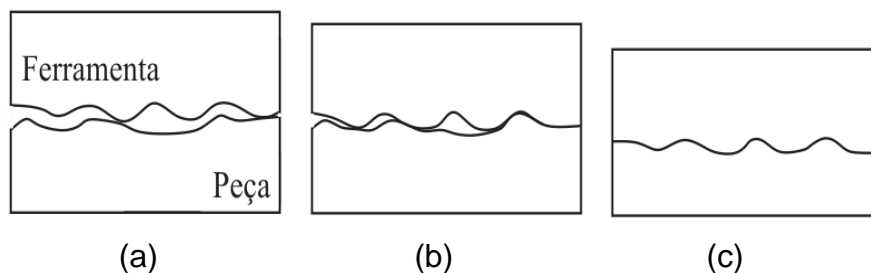


Figura 2 - Interação entre a ferramenta e a peça: (a) com baixa pressão de contato; (b) com pressão de contato moderada; (c) com alta pressão de contato [5] apud [6].

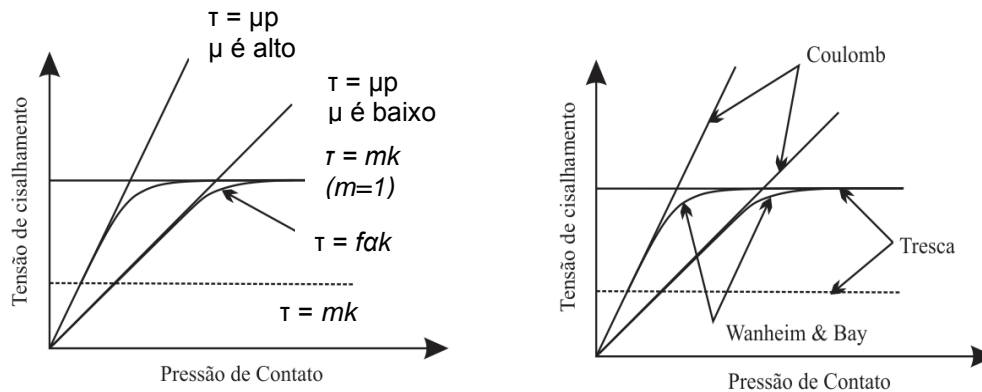


Figura 3 – Representação dos três modelos de atrito considerados mais representativos das situações características nos processos de conformação mecânica [5] *apud* [6].

2.1 Coeficiente de atrito

Conforme a teoria de Amonton-Coulomb, relativa a mecânica de contato entre corpos sólidos, o coeficiente de atrito, μ , é definido como o quociente entre a força tangencial, F , necessária para realizar o movimento relativo entre as superfícies e a força normal aplicada, P , ou seja:

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\tau}{\sigma_N} \quad \text{Equação 1}$$

Onde, τ é a tensão de cisalhamento e σ_N é a tensão normal de contato entre as superfícies.

Nesta teoria, o aspecto mais importante prende-se ao fato do coeficiente de atrito ser independente das áreas real e aparente de contato, sendo unicamente proporcional as forças aplicadas e conseqüentemente às tensões desenvolvidas entre as superfícies [8].

2.2 Fator Interfacial de atrito

A teoria de adesão descrita por [10] determina que a tensão de cisalhamento máxima na interface de contato entre o material e a ferramenta é a tensão limite de elasticidade do material em cisalhamento puro. Entretanto, sabe-se que nos processos de conformação mecânica a tensão de contato entre o material e a ferramenta pode superar em muito este valor. Assim, verifica-se pela Equação 2 que uma vez atingida a tensão de escoamento em cisalhamento do material, um aumento no valor da tensão normal implica na diminuição do atrito. Nesse caso, em que altas tensões de contato estão envolvidas, o atrito deve ser contabilizado por:

$$m = \frac{\tau}{k} \quad \text{Equação 2}$$

Onde m é o fator de atrito, τ é a tensão de cisalhamento na interface material/ferramenta e k é a tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro.

Essa forma alternativa de contabilizar o atrito determina que a tensão de cisalhamento devida ao atrito é independente da tensão de contato entre as superfícies e é conhecida como lei de Prandtl. Os valores limites para o fator de atrito, m , são: $m=0$, quando não existe atrito e $m=1$, para condições de aderência. Sempre que as tensões de contato sejam muito elevadas, onde o coeficiente de atrito, μ , deixa de ser significativo, a lei de Prandtl deve ser aplicada. No entanto, sua utilização em situações com tensões de contato reduzidas pode levar a estimativas exageradas do valor da tensão de cisalhamento devido ao atrito [10].

3 LUBRIFICAÇÃO

O uso de lubrificantes entre as superfícies metálicas em um processo de conformação mecânica permitem a redução do atrito e desgaste, podem distinguir-se quatro tipos de lubrificação: (i) hidrodinâmica, (ii) de fronteira, (iii) sólida e (iv) o atrito seco (ausência de lubrificantes).

Na lubrificação hidrodinâmica o contato direto entre as superfícies é totalmente eliminado. A carga normal aplicada no contato entre as superfícies é suportada pela película lubrificante, sendo o coeficiente de atrito muito reduzido ($\mu = 0,001-0,02$) e determinado pela viscosidade do lubrificante [10].

A medida que a pressão normal, σ_N , aumenta ou a rugosidade, R_a , é maior ou a velocidade relativa, v_r , e/ou viscosidade, η , do fluido diminuem, reduz-se a espessura da camada lubrificante, podendo passar a existir contatos ocasionais entre as asperezas microscópicas da superfície, resultando no aumento do coeficiente de atrito e do desgaste. A Figura 4 mostra a curva de Stribeck [11] onde é possível observar a evolução do coeficiente de atrito quando há transição entre regimes de lubrificação.

A lubrificação de fronteira caracteriza-se pelo lubrificante não ser capaz de assegurar uma película contínua ao longo da interface de contato entre as duas superfícies. Dependendo da espessura e da resistência relativa da película de lubrificante, na prática, o coeficiente de atrito pode variar entre $0,1 < \mu < 0,4$. Lubrificantes de extrema pressão foram desenvolvidos para superar os problemas de falta de eficiência dos lubrificantes orgânicos, característicos de de lubrificação, com regimes de elevada pressão e temperaturas [12].

O mecanismo de lubrificação através de película sólida caracteriza-se pela completa separação das superfícies através de uma película sólida com baixa resistência mecânica aos esforços de corte decorrente do movimento relativo entre as superfícies [10].

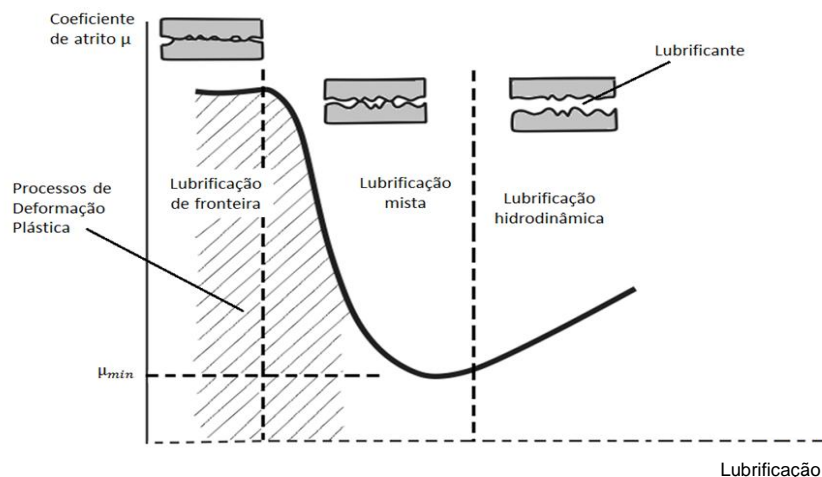


Figura 4 – Curva de Stribeck demonstrando a transição entre os regimes de lubrificação hidrodinâmica e de fronteira. Os processos de conformação mecânica possuem regimes de lubrificação situados no interior da região assinalada e tracejada [10].

A rugosidade superficial é de extrema importância para a eficiência de um regime de lubrificação, devido a criação de reservatórios de lubrificantes entre picos e vales superficiais [12]. É desejável que a peça e não a ferramenta seja a superfície mais rugosa, pois caso contrário as peças podem ser danificadas pela superfície de maior dureza e rugosidade da ferramenta. Rodrigues e Martins [10] citam que as ferramentas devem possuir rugosidade em torno de $0,40\mu\text{m}$.

A interdependência entre o coeficiente de atrito, μ , e a rugosidade superficial, R_a , foi amplamente estudada para diversos processos de conformação mecânica com diferentes materiais de peças e ferramentas, citam-se nas áreas de estampagem a frio e a quente as pesquisas encontradas na literatura [12,13,14,15,16].

4 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO: TESTE DO ANEL

No ensaio de compressão do anel, a altura e os diâmetros externo e interno são conhecidos e utilizados para determinar o coeficiente de atrito na interface entre o corpo de prova e a matriz. A variação do diâmetro interno em função do percentual de redução na altura (compressão). Durante a compressão, uma redução do diâmetro interno representa o aumento do atrito, ou seja, quanto maior for o atrito interfacial, menor será o diâmetro interno do corpo de prova ao final do ensaio.

A Figura 5 exibe as características mencionadas anteriormente: (a) anel deformado com baixo atrito, apresentando aumento do diâmetro interno e (b) anel deformado com alto atrito, apresentando redução do diâmetro interno [17].

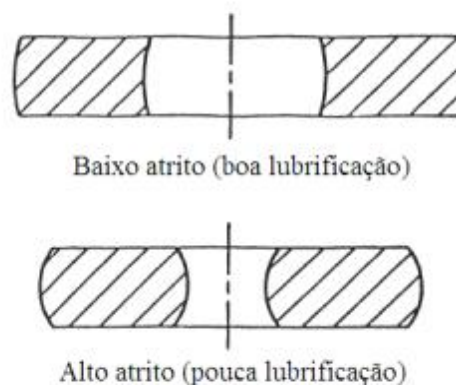


Figura 5 – Efeito do atrito sobre o fluxo do metal durante o teste compressão do anel.

A primeira abordagem do ensaio do anel foi publicada por Hawkyard e Johnson [18] em 1967, onde curvas teóricas obtidas analiticamente e as curvas experimentais obtidas por Male e Cockroft [19] foram comparadas.

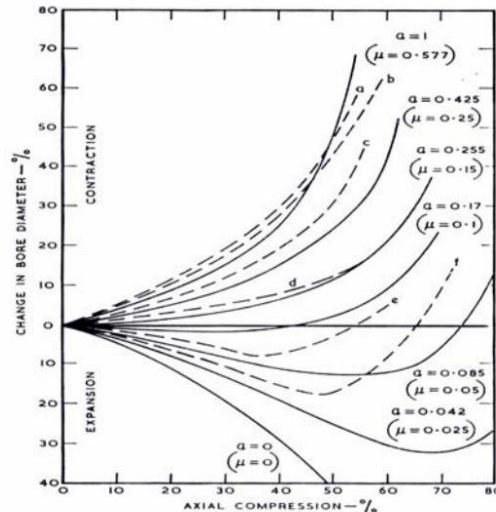


Figura 6 – Gráficos das curvas experimentais (tracejadas) e teóricas (cheia) dos valores de atrito em termos de μ [18].

Atualmente, curvas de calibração são obtidas através de softwares de simulação numérica, tais como, DeForm®, Forge®, e Simufact.Forming®. A partir dessas curvas, os valores experimentais são plotados sobre elas e, ao comparar os resultados, o valor de μ corresponde a curva de maior aproximação. Na Figura 7 é mostrado um gráfico com as curvas de calibração dos ensaios de compressão do anel realizados no software Simufact.forming para anéis de alumínio AA6351 [20].

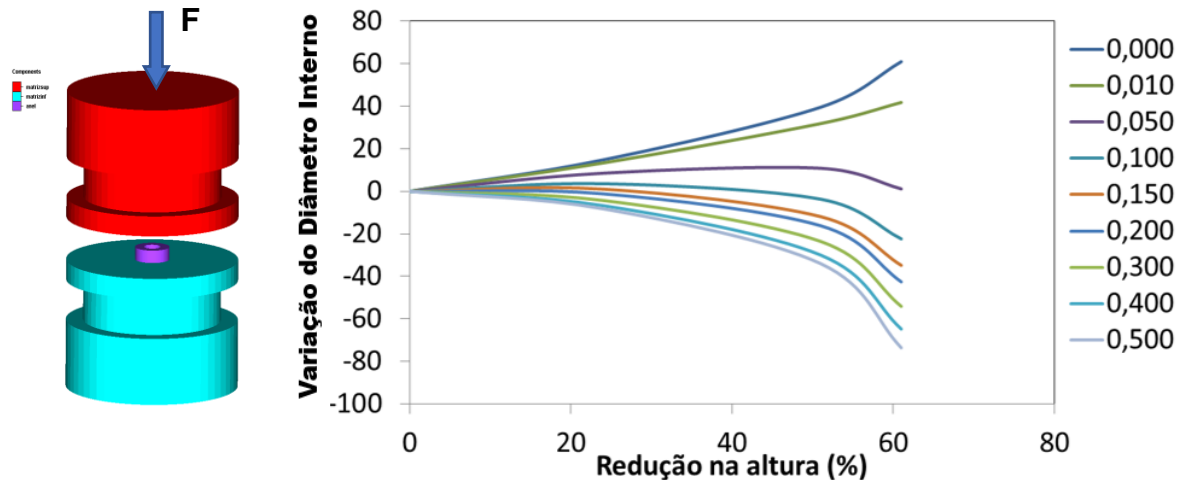


Figura 7 – Gráficos das curvas de calibração para anéis de alumínio AA6351 e matriz de H13 dos valores de atrito em termos de μ [20].

Agradecimentos

Os autores agradecem as agências de fomento: Capes pelo apoio financeiro ao projeto BRAGECRIM (CAPES-AUXPE-2203/2015) e ao CNPq pela bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. Ed: Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1981.
- 2 HELMAN, H., CETLIN, P. R. Fundamentos Da Conformação Mecânica Dos Metais. 2ª Edição Ed: Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- 3 FROTA JR., R. T. Avaliação dos parâmetros do processo de forjamento a quente em matriz aberta pelo método dos elementos finitos. Dissertação de Mestrado - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, 2009.
- 4 CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica. Ed: McGraw-Hill, São Paulo, SP, Brasil, 1986.
- 5 VALBERG, H. S. Applied metal forming including FEM analysis (1º ed.). United Kingdom: Cambridge University Press, 2010.
- 6 SERIACOPI, V. Simulação numérica do campo de tensões na microestrutura do aço ferramenta AISI H13 durante o forjamento a quente. São Paulo: Dissertação de Mestrado – USP, 2013.
- 7 RADI, P. A., SANTOS, V. S., BONETTI, L. F., TRAVA-AIROLDI, V. J. Tribologia, conceitos e aplicações. XIII ENCITA. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007. Disponível em: <http://www.bibl.ita.br/xiiiencita/FUND18.pdf>.
- 8 BRITO, A. M. Análise teórico experimental dos processos de expansão, redução e inversão de extremidades de tubos de parede fina em matriz. Porto Alegre - BR: Tese de doutorado – UFRGS, 2006.
- 9 RODRIGUES, J., MARTINS, P. Tecnologia Mecânica: Tecnologia da deformação Plástica. (Vol. I). Lisboa, Portugal: Escolar Editora, 2010.
- 10 PETERSEN, S. B., MARTINS, P. A., BAY, N. Friction in bulk metal forming: a general friction model vs. the law of constant friction. Journal of Materials Processing Technology, 66, p. 186-194, 1997.
- 11 WOYDT, M., WÄSCHE, R. The history of the Stribeck curve and ball bearing steels: The role of Adolf Martens. Wear, 268(11-12), p. 1542-1546, 2010.
- 12 FERRARINI, J. L. (2014). Análise e determinação do coeficiente de atrito no processo de estampagem profunda. Porto Alegre: Tese de doutorado - UFRGS.
- 13 MULVIHILL, M., SUTCLIFFE, P. Effect of tool surface topography on friction with carbon fibre tows for composite fabric forming. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 93, p. 199-206, 2017.
- 14 GATES, N., & FATEMI, A. Friction and roughness induced closure effects on shear-mode crack growth and branching mechanisms. International Journal of Fatigue, 92, p. 442-458, 2016.
- 15 KARBASIAN, H., TEKKAYA, A. A review on hot stamping. Journal of Materials Processing Technology, p. 2130-2118, 2010.
- 16 KONDRATIUK, J., KUHN, P. Tribological investigation on friction and wear behaviour of coatings for hot sheet metal forming. Wear, 270(11-12), p. 839-849, 2011.
- 17 BOESCH, P. B., MARTIS, V., SCHAEFFER, L. Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: uma revisão. Revista Thema, Vol 8 (01), 2011.
- 18 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.
- 19 MALE, A.T., DEPIERRE, V., "The Validity of Mathematical Solutions for Determining Friction From the Ring Compression Test", Journal of Lubrication Technology, July, p. 389-395, 1970.
- 20 COSTA, L. L. Ensaio de Compressão do Anel. Notas de Aula. Laboratório de Conformação Mecânica, 2016.