

TRIBOLOGIA APLICADA A LAMINAÇÃO – EFEITO DA TOPOGRAFIA NO ATRITO DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA MEDIDO COM O ENSAIO DE COMPRESSÃO DO ANEL¹

Mario Vitor Leite²
Gilson Teixeira Cornélio²
Philip von Pritzelwitz³
Amilton Sinatora³

Resumo

O presente trabalho se concentra no estudo de um fenômeno presente na maioria dos processos de conformação mecânica: o atrito. Foram realizados ensaios de compressão do anel para medir o efeito da topografia de ferramentas de aço ABNT H13 no coeficiente de atrito durante a conformação de anéis de aço ABNT 1020. Após uma sucinta revisão sobre a presença do atrito na conformação mecânica, foram apresentados resultados mostrando que as topografias estruturadas resultaram em valores de coeficiente de atrito maior para todos os níveis de deformação, quando comparados aos valores obtidos com as ferramentas de topografia não estruturada. Esse trabalho comprova a necessidade de se conhecer o valor de atrito em processos de conformação mecânica, de modo a permitir redução de potência em equipamentos, inclusive com redução de custos.

Palavras-chave: Método de ensaio; Atrito; Conformação mecânica; Topografia.

TRIBOLOGY IN METALWORKING – EFFECT OF TOPOGRAPHY AND FRICTION IN METALWORKING MEASURED BY THE RING COMPRESSION TEST

Abstract

This paper concentrates in the study about the most presented phenomenon in the metalworking processes: the friction. It was done a ring compression test using a H13 ABNT steel anvil to determine the topography effect into friction coefficient in the conformation of a 1020 ABNT steel ring. After several revisions about the presence of the friction in the metalworking, some results had been presented showing that textured topographies had resulted in friction values bigger for all deformation levels, when compared with the values gotten with non-textured tools. This paper indicates the needs of knowing the friction value in metalworking processes, in order to allow power reduction in equipment, including costs reduction.

Key words: Test procedure; Friction; Metalworking; Topography.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Gerdau – Villares Rolls, Rod. Luiz Dumont Villares, km 2 - Cx. Postal: 162. Pindamonhangaba.

³ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária. São Paulo.

1 INTRODUÇÃO

Tribologia, do grego *tribos* (τριβος) que significa roçar-esfregar, foi enunciada pela primeira vez no Comitê do Departamento Britânico da Educação e Ciência, em 9 de março de 1966 e definida como a “Ciência e Tecnologia de superfícies que se interagem em movimento relativo – e práticas e assuntos correlatos.”⁽¹⁾

A aplicação de conhecimentos tribológicos pode resultar em benefícios como na redução do consumo de energia ou na redução do consumo de materiais que sofrem com o desgaste.⁽²⁾ O presente trabalho está concentrado numa abordagem tribológica do fenômeno de atrito presente nos processos de conformação mecânica, como no caso da laminação, e apresenta resultados medidos do coeficiente de atrito em função de dois diferentes níveis de topografia de uma ferramenta de conformação.

Apresenta-se ainda neste trabalho uma sucinta revisão da literatura sobre o atrito na conformação plástica e o atrito na laminação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A presença do atrito na tribologia fica mais evidente quando se apresenta o significado desta palavra em latim, *atritus*, que significa *adterro*, que pode ser traduzida como esfregar alguma coisa sobre outra.⁽³⁾ No *Glossary of terms and definitions in the Field of Friction, Wear and Lubrications: Tribology* o atrito é definido como uma força resistente tangencial a interface que surge entre dois corpos quando, sob a ação de uma força externa, um corpo se movimenta ou tende a se movimentar em relação à superfície do outro.⁽⁴⁾

Na conformação mecânica todas as considerações sobre o atrito assumem a Lei do Atrito de Coulomb,⁽⁴⁾ onde a força de atrito F é proporcional a carga normal P e pode ser expressa pela seguinte relação:

$$F = \mu P \quad \text{Eq. 1.}$$

onde μ é o coeficiente de atrito.

Na conformação mecânica é comum expressar a força de atrito F e a carga normal P em termos de força por unidade de área, ou seja, dividindo estas pela área aparente de contato entre a ferramenta e o material conformado, assim a Eq. 1 fica da seguinte forma:

$$\tau_i = \mu p \quad \text{Eq. 2.}$$

Onde τ_i é a tensão média de cisalhamento na interface devido ao atrito e p a pressão normal.

A Lei de Atrito de Coulomb é satisfeita enquanto τ_i aumenta proporcionalmente ao aumento de p e sob estas condições predomina o atrito por deslizamento. Quando τ_i atinge o valor da tensão de cisalhamento (τ_f) do material conformado, este ao invés de deslizar contra a superfície da ferramenta, irá cisalhar numa região interna do material, a uma determinada distancia a partir da superfície de contato. Nestas condições, onde $\tau_i > \tau_f$, predomina o atrito designado na literatura por colamento.

Uma vez que τ_f é igual a $0,577\sigma_f$, de acordo com o critério de escoamento de von Mises, onde σ_f é a tensão de escoamento, $\mu_{\max} = 0,577$, desde que $p = \sigma_f$. Como na maioria dos processos de conformação mecânica, p atinge valores múltiplos de σ_f e como τ_f permanece constante com o aumento de p , o valor de μ aparentemente diminui. Segundo Schey⁽⁴⁾ esta consideração é mais aceita que aquela onde se diz não haver movimento relativo na interface, o que em algumas vezes resulta em baixos valores estabelecidos de μ .

As dificuldades em estabelecer valores adequados de μ levaram vários pesquisadores a descrever τ_i da seguinte forma:

$$\tau_i = m\tau_f \quad \text{Eq. 3.}$$

onde m é o fator de cisalhamento de atrito o qual tem um valor de $m=0$ para uma interface livre de atrito e $m=1$ para a condição de atrito por colamento.⁽⁴⁾

A importância do atrito sobre os processos de conformação é principalmente observada quando em condições onde a relação do raio da peça deformada sobre sua altura torna-se cada vez maior. Nestas condições a presença do atrito resulta num aumento de pressão relativa ao limite de escoamento superior a dez vezes.⁽⁵⁾

São vários os fatores que afetam o atrito na conformação mecânica, na laminação a quente, por exemplo, os fatores que afetam o atrito são: a presença de carepa, a presença de uma fina camada de água ou vapor entre o metal e o cilindro e modificações topográficas no cilindro devido ao desgaste.⁽⁶⁾

Determinar o valor do coeficiente de atrito tem sido o objetivo e vários trabalhos de pesquisa por décadas, ainda atualmente são utilizados valores estimados ou medidos por volta da última década de 30.

Conforme Wusatowski,⁽⁶⁾ os métodos utilizados para estimar o coeficiente de atrito médio na laminação, médio pois este deve variar ao longo do arco de contato, são baseados no ângulo de mordedura e no máximo valor de deslizamento a frente. Neste último caso, o coeficiente de atrito medido é aquele para o qual onde os cilindros deslizam sobre material laminado e existe somente uma direção para a força de atrito, ou seja, o ponto neutro coincide com o plano de saída.

A Figura 1 apresenta o croqui do aparato para a determinação do coeficiente de atrito pelo método de máximo deslizamento atribuído a Pavlov.⁽⁷⁾

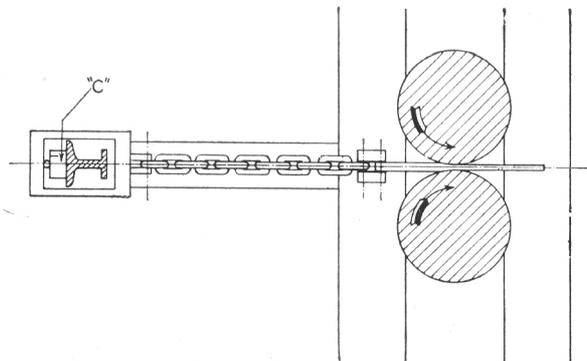


Figura 1. Aparato desenvolvido por Pavlov para medir o atrito na laminação. Neste arranjo a balança em "C" mede a força aplicada na barra pelos cilindros que é transmitida a balança pela corrente.⁽⁷⁾

Os trabalhos dedicados as medidas do coeficiente de atrito tornam os valores cada vez mais específicos para uma dada condição. Por exemplo, na laminação a quente podem ser encontrados valores de coeficiente de atrito entre 0,21 a 0,67 que por sua vez estão relacionados a vários fatores como a composição química do cilindro, seu acabamento superficial e a formato do produto laminado.

O correto valor do coeficiente de atrito pode resultar em economia na potencia consumida do motor. Esta economia pode ser estimada, assumindo como exemplo um caso de laminação à quente de uma placa e observando a modificação da força de laminação em função da alteração no coeficiente de atrito. Um aumento da força de laminação resulta num aumento proporcional na potência consumida do motor. A seguir, apresenta-se um exemplo do efeito de modificações no coeficiente de atrito na magnitude da força de laminação.

Seja o calculo da força de laminação segundo o método de Ekelund.⁽⁶⁾

$$F = b_m \sqrt{R(h_1 - h_2)} \left[1 + \frac{1,6\mu \sqrt{R(h_1 - h_2)} - 1,2(h_1 - h_2)}{h_1 + h_2} \right] \left(\sigma_f + \frac{2\eta v_m \sqrt{\frac{h_1 - h_2}{R}}}{h_1 + h_2} \right) \quad \text{Eq. 4.}$$

A Eq. 4 pode ser definida da seguinte forma: a força de laminação é igual a área projetada de contato, multiplicada por uma função do atrito e pelo limite de escoamento mais um coeficiente de plasticidade multiplicado por uma função da taxa de deformação.⁽⁶⁾

Apresenta-se na Tabela 1 a legenda e os valores assumidos para as dimensões da chapa e do cilindro⁽⁸⁾ para exemplo de calculo de cada variável da Eq. 4.

Tabela 1. Variáveis da equação 4 e valores para o exemplo de calculo da força de laminação segundo o método de Ekelund

VARIÁVEIS		VALORES PARA O EXEMPLO
geométricas	b ₁	59,4 mm
	b ₂	67,7 mm
	h ₁	21,2 mm
	h ₂	13,4 mm
	R	150 mm
processo	t	1000 °C
	v _m	2000 mm/s
	ϕ	7,5 kgf/mm ²
	ψ	0,04 kg*s/mm ²
atrito	μ	0,55
	μ	0,44

Para o exemplo foram utilizados dois valores de coeficiente de atrito recomendados por Ekelund, para laminação a quente, μ₁ = 0,55 quando o cilindro é

rugoso e para o cilindro polido, o valor do coeficiente de atrito deve ser 20% menor, ou seja, $\mu_2 = 0,44$.^(6,8)

Dessa forma, os valores de Força de laminação obtidos para cada coeficiente de atrito pode ser encontrado na Tabela 2.

Tabela 2. Resultado das forças de laminação para diferentes valores de coeficiente de atrito segundo o método de Ekelund

Força de laminação para μ_1	Força de laminação para μ_2
29.742 kgf	26.507 kgf

Pode ser observado na Tabela 2 que a redução de 20% no valor do coeficiente de atrito resulta numa redução de 11% no valor da força de laminação. O valor mais adequado do coeficiente de atrito permite realizar modificações no processo de laminação. Outro exemplo baseado na força de laminação pelo método de Ekelund permite estabelecer uma relação entre o acabamento superficial e o raio do cilindro.

Considerando-se que a força de laminação, com raio do cilindro igual a 150 mm e acabamento superficial que resulta num coeficiente de atrito de 0,44, é igual a 26.500 kgf. Uma vez que o raio do cilindro estiver, por exemplo, 15% menor, a força de laminação será reduzida em 11%. Neste caso a solução para recuperar os 11% de força de laminação perdida em função da redução do raio do cilindro, é aumentar sua rugosidade para obter um coeficiente de atrito de 0,55.

Na busca por valores confiáveis de coeficiente de atrito, apresentam-se a seguir os resultados obtidos em duas condições de acabamento superficial. Para isso foi utilizado um método clássico, o ensaio de compressão do anel, para medir o efeito do acabamento superficial no atrito presente em condições de conformação mecânica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Ensaio de Compressão do Anel

O ensaio de compressão do anel consiste em conformar um corpo de prova no formato de anel contra ferramentas de faces planas.⁽⁹⁾

Os primeiros trabalhos que utilizavam a geometria do anel foram aqueles realizados por Kunogi e Kudo, *apud* Kudo.⁽¹⁰⁾ Kunogi utilizou o método para realizar uma análise qualitativa do efeito de lubrificantes no processo de extrusão.⁽¹¹⁾

Male e Cockcroft⁽¹¹⁾ foram os primeiros a estabelecer de forma experimental uma relação entre as alterações geométricas no formato do anel com o atrito entre a ferramenta e o anel.

Avitzur⁽¹²⁾ apresenta uma solução analítica para a relação entre o atrito e o padrão de deformação do anel. A Figura 2 apresenta as características de deformação de dois anéis idênticos reduzidos em proporções idênticas (ΔT_0). Um anel é lubrificado e conformado em condições de baixo coeficiente de atrito enquanto que o outro não foi lubrificado, ou seja, conformado em condições de atrito mais elevado.⁽¹³⁾

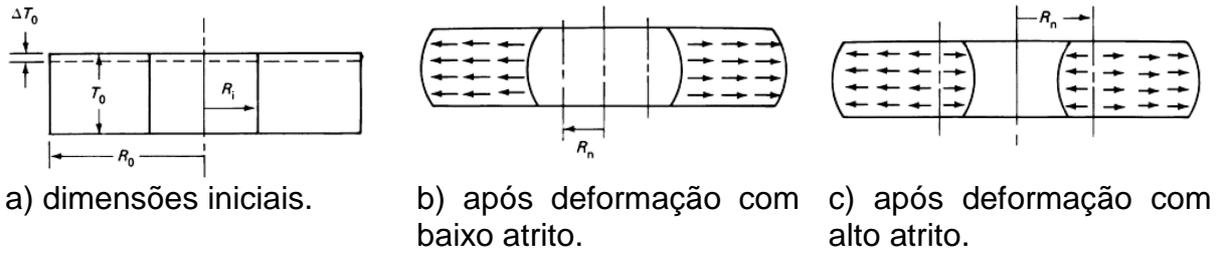


Figura 2. Comportamento de deformação do anel durante ensaio de compressão.⁽¹³⁾

Pode ser observado na Figura 2 que em condições de alto atrito, todos os pontos com raio $R > R_n$ são deslocados radialmente para fora e sua posição radial aumenta enquanto que todos os pontos de raio $R < R_n$ são deslocados em direção ao centro. Os pontos localizados onde o raio $R = R_n$, permanecem estacionários, e assim este raio é chamado de raio neutro. Na condição de elevado atrito $R_n > R_i$.⁽¹³⁾

Na condição de baixo atrito $R_n < R_i$ e dessa forma todos os pontos são deslocados radialmente para fora.⁽¹³⁾

Quando um anel é conformado e todos os parâmetros geométricos são obtidos experimentalmente, incluindo o valor de R_n , Avitzur⁽¹²⁾ apresenta uma solução para o valor do fator de cisalhamento de atrito m .

Para $R_n \leq R_i$,

$$\left(\frac{R_n}{R_o}\right)^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - (R_i/R_o)^4 x^2}{\sqrt{x(x-1)[1 - (R_i/R_o)^4 x]}} \quad \text{Eq. 5.}$$

Onde

$$x = \left\{ \frac{R_o}{R_i} \exp \left[-m \frac{R_o}{T} \left(1 - \frac{R_i}{R_o} \right) \right] \right\}^2 \quad \text{Eq. 6.}$$

Para $R_i \leq R_n \leq R_o$,

$$2m \frac{R_o}{T} \left(1 + \frac{R_i}{R_o} - 2 \frac{R_n}{R_o} \right) + \ln \left[\left(\frac{R_i}{R_o} \right)^2 \frac{(R_n/R_o)^2 + \sqrt{3 + (R_n/R_o)^4}}{(R_n/R_o)^2 + \sqrt{3(R_i/R_o)^4 + (R_n/R_o)^4}} \right] = 0 \quad \text{Eq. 7.}$$

Male e DePierre⁽¹⁴⁾ apresentaram uma solução combinada entre resultados experimentais e analíticos que resultou nas curvas de calibração para uma geometria padrão de anel (6:3:2 – que representa a relação entre os diâmetros externo, interno e altura).

3.2 Materiais e Equipamentos Utilizados no Ensaio de Compressão do Anel

O ensaio de compressão do anel foi realizado numa prensa hidráulica instrumentada com uma célula de carga com capacidade máxima de 300 kN utilizada para monitorar a força de compressão.

Os anéis foram obtidos a partir de uma barra cilíndrica de aço ABNT 1020, com dureza de $138 \pm 19 \text{ HV}_5$, e relações geométricas conforme a do padrão estabelecido no trabalho de Male e DePierre⁽¹⁴⁾ (6:3:2), isto é, diâmetro externo de 18 mm, diâmetro interno de 9 mm e altura de 6 mm.

As ferramentas de face plana foram produzidas em aço ABNT H13 com dureza de $561 \pm 16 \text{ HV}_{30}$.

Os testes de compressão foram realizados sem lubrificação sob temperatura ambiente e velocidade de descida da ferramenta superior constante em 0,06 mm/s.

As variáveis estudadas no ensaio foram: a força de conformação e as condições topográficas das ferramentas. Foram estabelecidas quatro forças de conformação, 100 kN, 145 kN, 185 kN e 250 kN.

Um par de ferramentas apresentava uma topografia aleatória, obtida por polimento, com rugosidade média $R_a = 0,003 \mu\text{m}$, enquanto que o segundo par de ferramentas apresentava uma topografia estruturada, obtida por torneamento, com rugosidade média $R_a = 30 \mu\text{m}$, conforme apresentado na Figura 3.

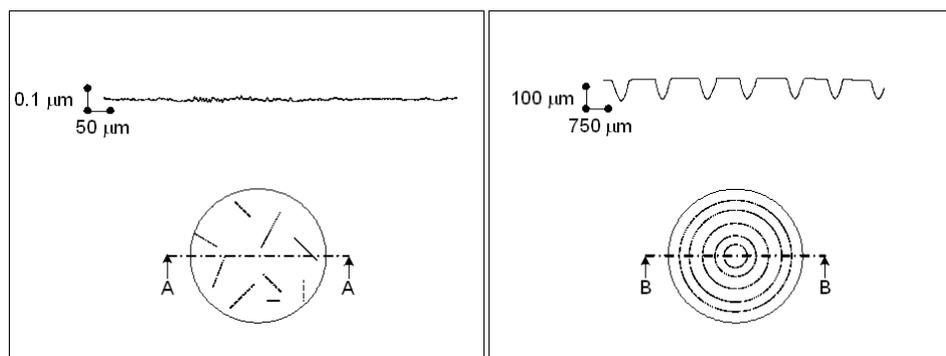


Figura 3. Topografia das ferramentas estudadas no ensaio de compressão do anel.

Para cada ensaio correspondente uma condição topográfica da ferramenta e força de conformação, foram feitas sete repetições utilizando-se sete anéis, os resultados correspondem a média dos sete valores medidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos com as medidas da variação geométrica dos anéis após os ensaios.

Tabela 3. Valores medidos de redução em altura ΔT e redução no diâmetro interno ΔD_i em função da força de conformação e topografia da ferramenta.

TOPOGRAFIA ALEATÓRIA (POLIDA)				TOPOGRAFIA ESTRUTURADA (TORNEADA)			
carga	teste N.	$-\Delta T$ (%)	ΔD_i (%)	carga	teste N.	$-\Delta T$ (%)	ΔD_i (%)
250 kN	1	39	24	250 kN	1	36	28
	2	39	26		2	37	26
	3	39	27		3	36	27
	4	39	26		4	36	28
	5	39	27		5	36	28
	6	40	26		6	36	27
	7	38	26		7	36	27
185 kN	1	29	15	185 kN	1	28	17
	2	29	15		2	27	17
	3	30	18		3	26	17
	4	29	16		4	27	17
	5	30	17		5	25	17
	6	29	16		6	26	17
	7	29	16		7	26	17
145 kN	1	20	8	145 kN	1	19	9
	2	21	8		2	19	10
	3	21	8		3	18	10
	4	20	8		4	18	10
	5	20	8		5	19	10
	6	21	8		6	19	9
	7	19	8		7	19	9
100 kN	1	9	3	100 kN	1	8	3
	2	9	2		2	8	3
	3	10	3		3	8	3
	4	10	3		4	8	3
	5	10	3		5	8	3
	6	10	3		6	8	3
	7	10	3		7	8	3

A Figura 4 apresenta a variação do diâmetro interno e altura durante a conformação para os diferentes níveis de força e topografia.

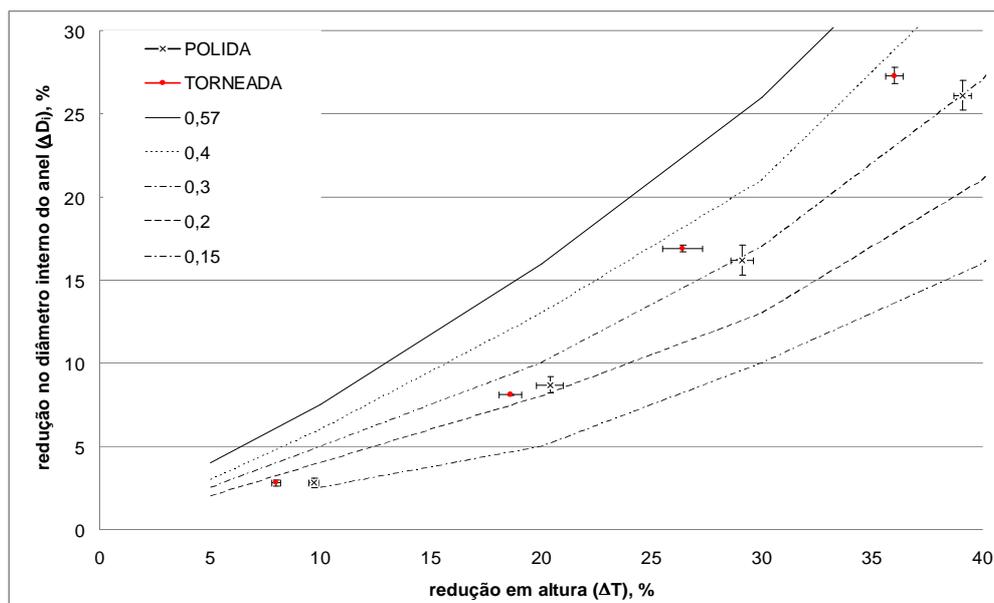
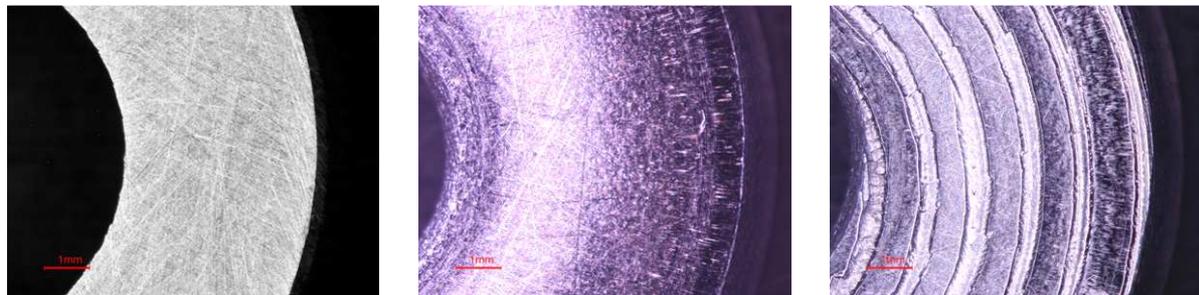


Figura 4. Resultados experimentais do ensaio de compressão do anel e curvas de calibração conforme o trabalho de Male e Cockroft.⁽¹¹⁾

Pode ser observado na Figura 4 que a função da força de compressão constante os maiores níveis de deformação foram obtidos nos anéis conformados com as ferramentas polidas. Uma vez que os materiais são os mesmos, estes resultados sugerem que uma maior quantidade de energia deve ser empregada para superar a resistência interfacial imposta pela topografia estruturada e assim obter os mesmos níveis de conformação daqueles anéis conformados com as ferramentas polidas.

Ainda na Figura 4 pode ser observado que, para as ferramentas polidas, o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da redução de altura entre 10% e 20% e a partir de 30% de redução atinge o valor de 0,3 que é equivalente a aquele obtido com 40% de redução. O mesmo comportamento pode ser observado para os testes com as ferramentas de topografia estruturada onde os valores de μ são maiores que aqueles obtidos com as ferramentas polidas.

A Figura 5 apresenta as características superficiais dos anéis antes e após o ensaio de compressão.



a) superfície do anel lixado antes do ensaio ($R_a = 0,36 \mu\text{m}$). b) após ensaio com a ferramenta polida e 250 kN ($R_a = 0,17 \mu\text{m}$). c) após o ensaio com a ferramenta torneada e 250 kN ($R_a = 29,5 \mu\text{m}$).

Figura 5. Características superficiais dos anéis antes e após ensaio de compressão.

As características superficiais do anel antes do ensaio de compressão (Figura 5 a) são características de uma superfície metálica lixada, porém após ensaio de compressão esta característica não é evidente, conforme apresentado nas Figura 5 (b) e (c). Para descrever as características superficiais dos anéis após o ensaio será utilizado a Figura 6.

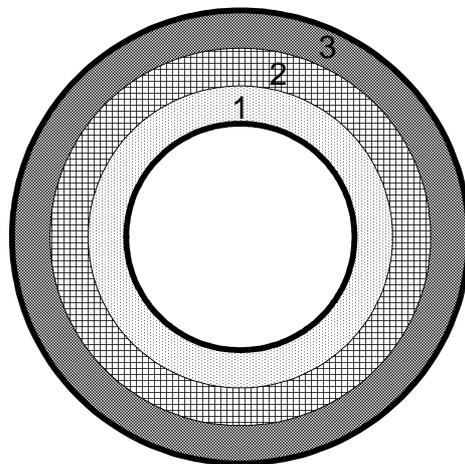


Figura 6. Representação esquemática da superfície do anel da Figura 5 (b) dividido em três regiões.

Marcas do processo de lixamento permanecem após o teste de compressão, principalmente na região central do anel, referente a região 2 da Figura 6. A permanência das marcas de lixamento é uma forte evidência de que esta região da superfície do anel não se movimenta em relação a ferramenta e uma vez que não há movimento relativo este comportamento pode ser descrito pelo atrito de colamento.

Na região 3 da Figura 6 o deslizamento entre o anel e a ferramenta é identificado pelos riscos radiais e o atrito por deslizamento deve prevalecer nesta região. A região 1 da Figura 6 não apresenta de forma evidente a presença de deslizamento e muito pouco a presença de marcas do processo de lixamento.

A Figura 7 apresenta em seção transversal a microestrutura do anel após conformação com 250 kN e com a ferramenta polida.

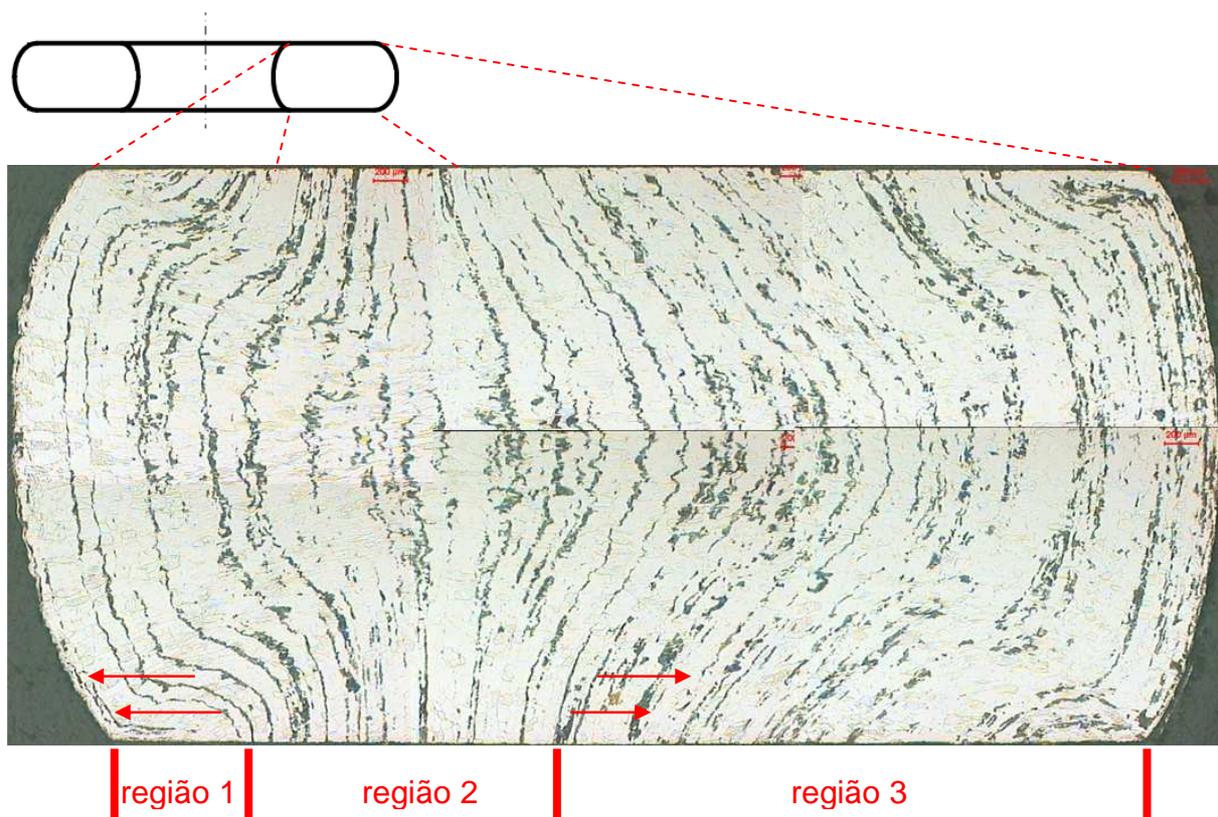
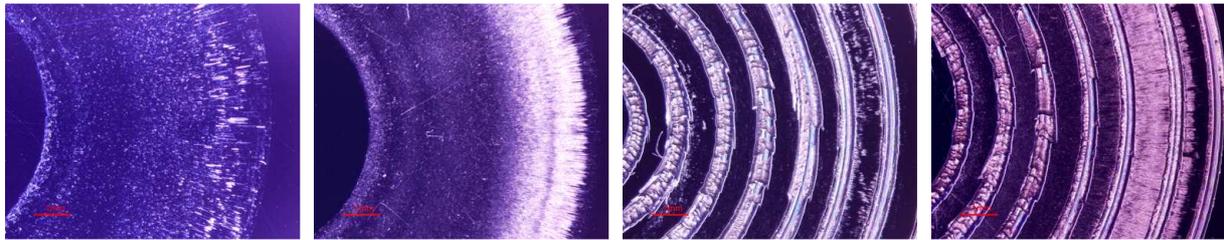


Figura 7. Seção transversal do anel conformado a 250 kN na ferramenta polida.

Pode ser observado na Figura 7 que há deformação orientada na direção do centro do anel (representada pelas setas que apontam para a esquerda) na região abaixo da superfície correspondente a região 1 da Figura 6. Por outro lado, há pouca deformação na região da seção transversal correspondente a região 2 da Figura 6 e maior deformação orientada na direção do raio externo do anel (representada pelas setas que apontam para a direita) na região da seção transversal correspondente a região 3 da Figura 6.

A Figura 8 apresenta as macrografias das superfícies das ferramentas no início e no final dos ensaios.



a) ferramenta polida após o primeiro ensaio de compressão. 250 kN ($R_a = 0,027 \mu\text{m}$)
 b) ferramenta polida após o último ensaio de compressão. 250 kN ($R_a = 0,16 \mu\text{m}$).
 c) ferramenta torneada após o primeiro ensaio de compressão. 250 kN ($R_a = 30 \mu\text{m}$).
 d) ferramenta torneada após o último ensaio de compressão. 250 kN ($R_a = 30 \mu\text{m}$).

Figura 8. Características superficiais das ferramentas no início e fim dos ensaios de compressão.

As modificações superficiais que ocorrem nas ferramentas são independentes das características topográficas. A principal característica observada são os riscos semelhantes aqueles observados na região 3 do anel. Estes riscos aumentam de intensidade com o decorrer dos ensaios. Estas evidências permitem associar a cada uma das regiões um mecanismo predominante responsável pelo valor do coeficiente de atrito que na região 3 é o riscamento. Na região 2 a observação da ferramenta e do anel sugere que não houve movimentação do material na interface ferramenta-anel indicando que o atrito nesta região é estático. Nas demais como houve movimento relativo ele é cinemático.

Esta alteração topográfica é mais evidente na matriz polida, pois a rugosidade média R_a antes dos ensaios era igual $0,003 \mu\text{m}$ e após o último ensaio foi de $0,16 \mu\text{m}$. Vale ressaltar que este aumento de rugosidade não resultou num aumento no valor medido do coeficiente de atrito ao longo do ensaio. Porém houve aumento no valor medido de rugosidade ao longo do ensaio quando foram comparadas as ferramentas polidas com aquelas torneadas.

5 CONCLUSÃO

As conclusões que podem ser listadas com os resultados do ensaio de compressão do anel, utilizado para investigar o efeito da topografia de ferramentas planas de aço H13 durante a conformação de anéis de aço ABNT 1020, são as seguintes:

- para uma dada força de deformação pode se obter maiores deformações nos anéis com as ferramentas polidas quando comparadas àquelas torneadas;
- para ambas as ferramentas o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da deformação;
- o coeficiente de atrito é maior com a ferramenta torneada que aquele obtido com a ferramenta polida para todos os níveis de deformação;
- existem três regiões distintas no anel e na ferramenta. Em cada uma delas predomina um mecanismo (riscamento) ou modo particular (estático ou cinemático) de manifestação do fenômeno de atrito;
- o aumento da rugosidade média (R_a) em duas ordens de magnitude de $0,003 \mu\text{m}$ para $0,16 \mu\text{m}$ não afetou de forma significativa o coeficiente de atrito.;
- neste trabalho pode-se formular a hipótese de que a modificação do coeficiente de atrito depende não somente da magnitude das amplitudes topográficas como também da sua orientação.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Professor Dr. Ronald Lesley Plaut pela utilização do equipamento para ensaios de compressão e lhe desejam sinceros votos de saúde.

REFERÊNCIAS

- 1 JOST, H.P. Tribology – origin and future. *Wear*, 136, 1990. p. 1-17.
- 2 SINATORA, A. Tribologia: Um resgate histórico e o estado da arte. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- 3 SHELLER, I. J. G., LEXICON – TOTIUS LATINITATIS – A dictionary of the latin language. Translated by J.E. Riddle.
- 4 SCHEY, J. A., Tribology in metalworking – friction, lubrication and wear. American Society for Metals, 2a. edição, 1984, 736 p.
- 5 DIETER, G. E., Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill Book Company, 4 ed., 1988, 751 p.
- 6 WUSATOWSKI, Z., Fundamentals of rolling. Pergamon press, 1969, 679 p.
- 7 UNDERWOOD, L. R., The Rolling of Metals, London, 1952.
- 8 SHAEFFER, L., Introdução à Conformação Mecânica dos Metais. 1ª. Edição, Porto Alegre, Editora da Universidade, 1983, 125 p.
- 9 ALTAN, T., OH, S-I, GEGEL, H. L., Conformação de Metais – Fundamentos e aplicações. Traduzido por COELHO, R. T., EESC-USP, 1999, 366 p.
- 10 KUDO H., Some analytical and experiential studies of axi-symmetric cold forging and extrusion – I. *International Journal Mechanical Science*, Vol. 2, 1960, pp. 102-127.
- 11 MALE, A. T., COCKCROFT, M.G. A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation. *Journal of the Institute of Metals*, 93, 1964-65, p. 38-46.
- 12 AVITZUR, B., Metal Forming: Processes and Analysis, McGraw-Hill, 1968, 500 p.
- 13 American Society for Metals. Friction, lubrication and wear technology. In: *Metals Handbook*, Vol. 18, 942 p., 1992.
- 14 Male, A. T.; DePierre, V., The validity o mathematical solutions for determining friction from the ring compression test. *Journal of Lubrication and Technology*, 1970, p 389 – 397.