

Avaliação da aplicabilidade do ensaio de compressão de anel à quente para determinar o coeficiente de atrito no ensaio de torneamento do aço ABNT 1045 por meio de análise estatística

Evaluation of the applicability of the hot ring compression test to determine the coefficient of friction in the ABNT 1045 steel machining test through statistical analysis

Thaís Ramos Capai Jardim¹ , Marcelo Araújo Câmara¹, Frederico de Castro Magalhães¹, Anderson Júnior dos Santos^{1,2}

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Av. Antônio Carlos, 6627 Pampulha, 30270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, 30421-169, Belo Horizonte, MG, Brasil.

e-mail: thaisrms@ufmg.br, marcelocamara@demec.ufmg.br, fredmag@demec.ufmg.br, andersonsantos@cefetmg.br

RESUMO

O atrito nas interfaces ferramenta/cavaco e ferramenta/peça é complexo dificultando a determinação do coeficiente de atrito nos processos de usinagem. Assim, vários ensaios tribológicos foram desenvolvidos para simular as condições de corte e determinar o coeficiente de atrito. Este trabalho apresentou análise comparativa do coeficiente de atrito entre o aço ABNT 1045 e WC-10Co revestido com AlCrN por meio de dois métodos: ensaio de torneamento e ensaio de compressão de anel à quente. O ensaio de torneamento foi realizado com corte oblíquo nas velocidades de corte 150 e 220 m/min. A aquisição dos sinais das componentes de força da usinagem por meio de um dinamômetro. O ensaio de compressão de anel foi realizado nas temperaturas de 200 e 400 °C. Os coeficientes de atrito foram obtidos por meio de modelos matemáticos. A análise estatística do coeficiente de atrito apontou equivalência do coeficiente de atrito no ensaio de torneamento na velocidade de corte 150 m/min com o ensaio de compressão de anel à quente 200 °C. Assim como no ensaio de torneamento na velocidade de corte 220 m/min com o ensaio de compressão de anel à quente 400 °C. A análise macrográfica do anel após a deformação no ensaio de compressão de anel observou a influência da temperatura de ensaio no deslocamento do raio neutro. A análise superficial dos anéis e das matrizes do ensaio de compressão foi realizada por meio de microscopia óptica (MO) e rugosidade Ra, onde observou-se o aumento da rugosidade após o ensaio e a presença de desgaste abrasivo.

Palavras-chave: Coeficiente de atrito; ensaio de compressão de anel à quente; ensaio de torneamento.

ABSTRACT

Friction at the tool-chip and tool-workpiece interfaces is complex, making it difficult to determine the coefficient of friction in machining processes. Thus, several tribological tests were developed to simulate the cutting conditions and determine the coefficient of friction. This work presents a comparative analysis of the coefficient of friction between ABNT 1045 steel and WC-10Co coated with AlCrN using two methods: machining test and hot ring compression test. The machining test was carried out with an oblique cut at the cutting speeds used in the test were 150 and 220 m/min. The acquisition of the signals of the machining force components by means of a dynamometer. The ring compression test was carried out at temperatures of 200 and 400 °C. Friction coefficients were obtained through a mathematical models. The statistical analysis of the coefficient of friction showed equivalence of the coefficient of friction in the oblique machining test at a cutting speed of 150 m/min with the hot ring compression test at 200 °C. As well as in the machining test at a cutting speed of 220 m/min with the hot ring compression test at 400 °C. The macrographic analysis of the ring after deformation in the ring compression test observed the influence of the test temperature on the displacement of the neutral radius. The surface analysis

of the rings and matrices of the compression test was performed using optical microscopy (OM) and roughness Ra, where an increase in roughness was observed after the test and the presence of abrasive wear.

Keywords: Coefficient of friction; hot ring compression test; machining test.

1. INTRODUÇÃO

Como uma das principais operações da indústria mecânica, a usinagem representa a produção de mais 15% componentes mecânicos dentre a indústria aeronáutica, aeroespacial, mineradora entre outras [1, 2]. Sendo assim, a tecnologia do corte tem desenvolvido para a alta precisão, eficiência, alto desempenho dos componentes e ambientalmente sustentável, grande parte desse desenvolvimento pode ser atribuído pelo avanço da teoria e aplicação do estudo da tribologia no corte para os desenvolvimentos de novos materiais e revestimentos [1].

A complexidade do atrito nas interfaces de contato entre a ferramenta/cavaco e ferramenta/peça é devida as extremas condições os quais são submetidos, como a alta temperatura (>1000 °C), grandes deformações plásticas (10^{-1}) e altas taxas de deformações ($\sim 10^6$ s⁻¹), complexas interações e contato (aderência/deslizamento) [1, 3–5]. Assim a compreensão do comportamento do atrito é limitada e de difícil determinação do coeficiente de atrito durante o corte. Com o avanço da tecnologia, diversos ensaios tribológicos experimentais foram desenvolvidos a fim para simular a condição de corte e determinar o coeficiente de atrito, como o ensaio pino-sobre-face, ensaio cilindro-sobre-face e pino-sobre-cilindro, porém estes métodos ainda são limitados e de difícil aplicabilidade [1, 6]. A fim de reduzir custos e melhorar o processo, vários modelos matemáticos e empíricos têm sido desenvolvido para viabilizar os processos de corte [1].

O ensaio de compressão de anel à quente é um ensaio tribológico em que é possível quantificar o coeficiente de atrito por meio da deformação plástica do anel. Não é necessário conhecer as propriedades intrínsecas do material estudado, dependendo somente das mudanças geométricas do anel após o teste. Este ensaio é usualmente aplicado em processos de conformação à quente, uma vez que consegue simular as condições de alta temperatura e grandes deformações [7–9]. Desta maneira, pode ser viável utilizar o ensaio de compressão de anel à quente para determinar o coeficiente de atrito no torneamento.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo principal verificar e validar a hipótese de que o coeficiente de atrito obtido pelo ensaio de compressão à quente tem resultado equivalente ao coeficiente de atrito obtido no ensaio de torneamento. Sendo assim, é necessário determinar o coeficiente de atrito entre o aço ABNT 1045 e o metal duro (WC-10Co) com revestimento de AlCrN, no ensaio de torneamento com velocidade de corte de 150 e 220 m/min e no ensaio de compressão de anel à quente com as temperaturas de 200 e 400 °C. E com isso, avaliar a correlação entre os resultados encontrados nos dois métodos de ensaio por meio de análise estatística utilizando o teste t para duas amostras independentes. Foi avaliado o efeito da deformação na seção transversal do anel e o comportamento tribológico por meio da análise superficial do anel ABNT 1045 e da matriz e de metal duro (WC-10Co) com revestimento de AlCrN, com auxílio de imagens de microscopia óptica (MO) e rugosidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o ensaio de torneamento foi utilizado um tarugo de aço ABNT 1045 recozido com dimensões: Ø 70 mm e 300 mm de comprimento. Esse aço foi escolhido por ser amplamente utilizado na indústria metal mecânica devido a sua boa resistência mecânica, temperabilidade e de fácil usinabilidade. Foi usada ferramenta de corte de metal duro com revestimento de AlCrN, com ângulo de saída e ângulo de inclinação da ferramenta de -6°. O ensaio foi realizado em duas velocidades de corte: 150 m/min e 220 m/min, para cada velocidade de corte foi utilizado uma ferramenta. O avanço de 0,1 mm.rev⁻¹ e a profundidade de corte de 1 mm foi utilizado para ambas as velocidades de corte.

O ensaio de torneamento foi feito com corte oblíquo e sem lubrificação, o teste foi realizado no torno CNC ROMI Centur 30S com potência máxima de 5,5 kW e rotação máxima de 3500 rpm com comando numérico Mach 9. Durante o ensaio de torneamento, foi realizada a aquisição dos sinais das componentes de força da usinagem por meio de um dinamômetro Kistler® modelo 9272. Os sinais captados são convertidos em tensão elétrica por meio amplificador Kistler® do modelo 5073. A aquisição dos dados foi feita pela placa aquisição de dados National Instruments® modelo NI USB-6366. A leitura das componentes de força foi feita por meio do software NI LabView SignalExpress® 2013. Com o Excel 2019® os dados obtidos foram tratados e analisados. O coeficiente de atrito no torneamento com corte oblíquo foi determinado segundo o modelo matemático proposto por GRZESIK *et al.* [10] expresso na equação 1:

$$\mu = \frac{F_f \cos \gamma_o - F_c \operatorname{sen} \gamma_o}{F_f \cos \lambda_s \operatorname{sen} \gamma_o + F_p \operatorname{sen} \lambda_s + F_c \cos \lambda_s \cos \gamma_o} \quad (1)$$

Onde, μ é o coeficiente de atrito e F_c , F_f e F_p é a força de corte, a força de avanço e a força passiva, respectivamente. λ_s é ângulo de inclinação da ferramenta e γ_o ângulo de saída da ferramenta.

Para o ensaio de compressão de anel foram utilizados 12 anéis de aço ABNT 1045 recozido e com dimensões com proporção 6:3:2, onde o diâmetro externo, diâmetro interno e espessura corresponde a 18, 9 e 6 mm, respectivamente. Foram utilizadas 24 matrizes de compressão de formato retangular (23 × 25 mm) com 3 mm de espessura de metal duro revestido com AlCrN pelo processo de *magnetron sputtering* de deposição física de vapor (PVD). Foi confeccionado um dispositivo que acomodasse o anel e o par de matrizes e que limitasse a deformação a 60% (Figura 1).

O ensaio de compressão de anel à quente foi realizado em prensa hidráulica com carga máxima de 400 kgf/cm² com sistema de aquecimento controlado e isolado, com potência máxima de 2400W. O conjunto dispositivo, matrizes e anel foram aquecidos. O ensaio foi realizado em duas temperaturas, sendo 200 e 400 °C. O coeficiente de atrito no ensaio de compressão de anel foi calculado por meio da equação 2, conforme AVITZUR [11]:

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}} \tag{2}$$

Onde m é a constante do fator de atrito.

O fator de atrito por sua vez, foi determinado pela equação 3, segundo AVITZUR [11].

$$m = \frac{-1}{2 \frac{R_o}{T} \left(1 + \frac{R_i}{R_o} - 2 \frac{R_n}{R_o} \right)} \ln \left[\frac{\left(\frac{R_i}{R_o} \right)^2 \frac{1 + \sqrt{1 + 3 \left(\frac{R_o}{R_n} \right)^4}}{1 + \sqrt{1 + 3 \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^4 + \left(\frac{R_o}{R_n} \right)^4}} \right] \tag{3}$$

Onde, R_n é o raio neutro, R_i é o raio interno final, R_o é o raio externo final do anel e T é a espessura inicial do anel. Por fim, o raio neutro (R_n) foi determinado segundo Rao e Sivaram [8], por meio da equação 4:

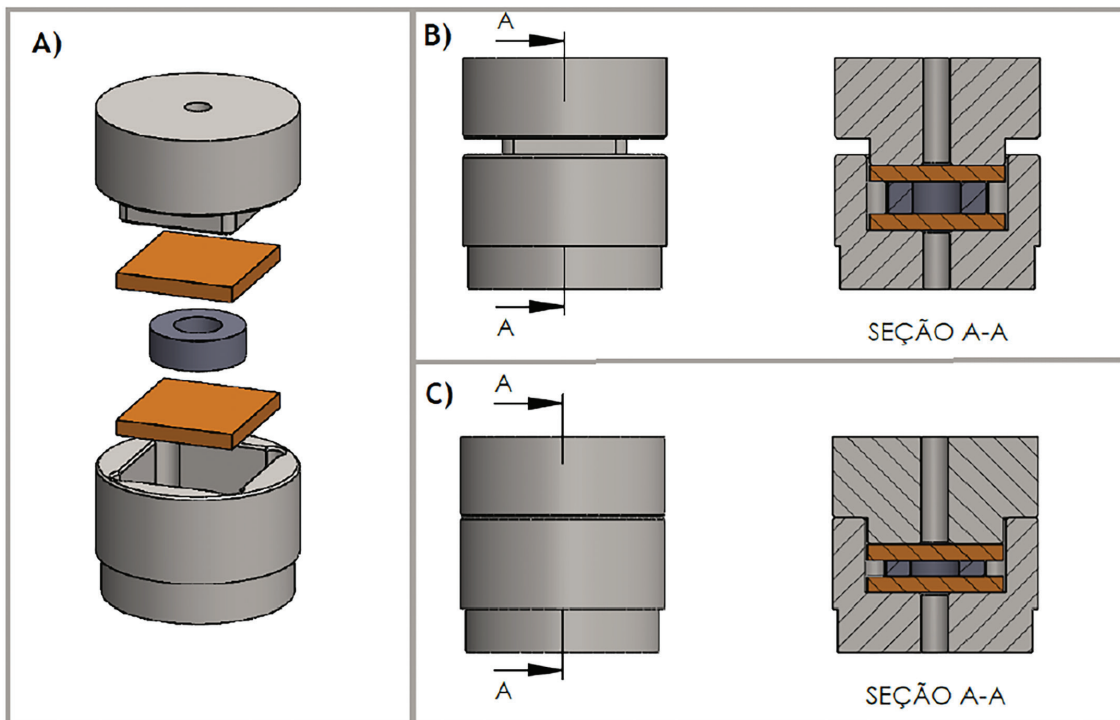


Figura 1: Montagem do dispositivo, matrizes e anel: a) Vista explodida; b) Montagem antes do ensaio; c) Montagem após o ensaio.

$$\left(\frac{R_n}{R_o}\right)^2 = \frac{\frac{R_i}{R_o} - \frac{\Delta R_i}{\Delta R_o}}{\frac{R_i}{R_o} - \frac{\Delta R_o}{\Delta R_i}} \quad (4)$$

Onde, ΔR_i é a variação do raio interno com a deformação e ΔR_o é a variação do raio externo com a deformação.

As superfícies das amostras foram investigadas a fim de observar o desgaste das amostras após o ensaio de compressão de anel à quente. A condição de desgaste das superfícies foi avaliada por meio de microscopia óptica (MO) e rugosidade Ra. A análise microestrutural do anel foi realizada após o ensaio de compressão à quente por meio de imagens via MO.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise microestrutural

Os esforços axiais juntamente com o atrito existente na interface matrizes/material presentes no ensaio de compressão de anel provocam deformações plásticas heterogêneas no anel. Essas deformações heterogêneas podem ser divididas em três zonas distintas: Zona I – Deformações praticamente nulas, Zona II – deformações intensas e Zona III deformações moderadas. Além disso, pode-se observar uma orientação na sua estrutura, resultando na fibragem do material. Tanto a formação das zonas distintas de deformação quanto a fibragem dependem das condições de atrito exclusivamente na interface matrizes/material [12–14]. O raio neutro (R_n), ou um plano neutro, pode ser identificado onde a velocidade relativa do anel e das matrizes é nula. Foram obtidas as imagens via MO da seção transversal dos anéis após a deformação de 60%. Mediante a um ensaio macrográfico foi possível identificar as três zonas de deformação assim como a fibragem dos anéis. Pode ser observado na Figura 2 a microestrutura da seção transversal dos anéis comprimidos à 200 e 400 °C, respectivamente. O lado direito da seção transversal apresentado nas Figuras 2a e 2b é a parte interna do anel. Segundo WOLLA *et al.* [14] o aumento da temperatura do ensaio de compressão favorecendo o escoamento do material na altura média do anel, isto é, em direção ao diâmetro interno, pois não há qualquer restrição (ausência de atrito). Tal comportamento pode ser observado na macrografia dos anéis, onde a linha do plano neutro do anel à 400 °C se encontra mais distante do diâmetro interno que a amostra do anel à 200 °C.

3.2. Análise superficial

3.2.1. Anel

Após o ensaio, foi feita a análise da superfície do anel a fim de verificar o efeito e os mecanismos de desgastes provocado pelo ensaio compressão à quente. Foram feitas 3 medidas de rugosidade em cada amostra antes e após o ensaio. A Tabela 1 apresenta o valor médio da rugosidade Ra do anel antes e depois do ensaio de compressão. Com o resultado das medições foi realizado o teste t para amostras pareadas para um nível de

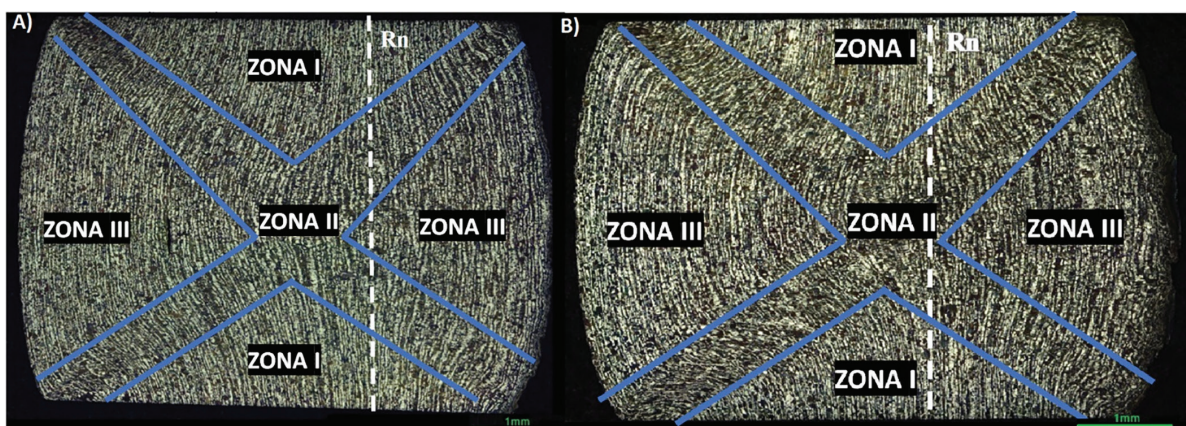


Figura 2: Seção transversal do anel deformado: a) 200 °C; b) 400 °C.

significância de 5%. Com isso, observou-se que houve aumento significativo na rugosidade superficial do anel em razão da compressão à quente, apresentando um p-valor igual a 0,000.

Para verificar se a temperatura de ensaio influenciou diretamente na rugosidade superficial das amostras, foi realizado o teste t para duas amostras para um nível de significância de 5% assumindo igualdade entre as variâncias. De acordo com o apresentado pela Tabela 2, o p-valor superior a 0,05, pode-se afirmar que a temperatura de ensaio não influenciou na rugosidade.

A área real de contato do anel/matriz é menor do que a área de contato aparente, devido a rugosidade presente nas superfícies. Durante o ensaio de compressão de anel, a carga aplicada deforma plasticamente os picos das asperezas da superfície do anel. Segundo PENG *et al.* [15] a superfície da ferramenta, ou seja, a matriz, pode ser considerada lisa e rígida o suficiente para não se deformar durante a compressão. Os picos das asperezas da superfície do anel sustentam inicialmente toda a carga aplicada. Como o ensaio de compressão não utilizou lubrificante, os vales das asperezas não são preenchidos, estes vales também são definidos como *open lubricant pockets* (OPL). Então, somente os picos da aspereza deformam plasticamente até se tornarem planos, com isso aumenta a área de contato real e o coeficiente de atrito [5].

A superfície dos anéis foi avaliada depois do ensaio de compressão à quente via microscopia óptica (MO). Foram analisadas as regiões próximas ao diâmetro interno e externo. As imagens obtidas com ampliações de 50 e 100× são apresentadas nas Figuras 3 e 4, o qual corresponde aos anéis conformados à 200 e 400 °C, respectivamente.

Pode observar-se nas Figuras 3 e 4, a presença de ranhuras com padrão circular que acompanha os perímetros interno e externo do anel. Estas ranhuras são a razão pela qual a rugosidade dos anéis aumentou significativamente depois do ensaio de compressão. Segundo BAO *et al.* [16] depois da conformação do anel, a área de contato do anel com a matriz pode ser definida como superfície de contato interno e superfície de contato externo, como mostra a Figura 5.

As ranhuras vistas nas Figuras 3 e 4 são, segundo BAO *et al.* [16] CHAN *et al.* [5] e ENGEL [17], a superfície de contato externo. Sendo uma região característica o qual concentram-se os OLPs, ou seja, vales

Tabela 1: Rugosidade Ra dos anéis antes e depois do processo de compressão à quente.

	ANTES	DEPOIS	TESTE DE HIPÓTESE H1: $\mu_1 - \mu_2 < 0$
Ra (μm)	0,054 ± 0,001	0,363 ± 0,147	p-valor: 0,000

Tabela 2: Rugosidade Ra dos anéis em razão da temperatura de ensaio de compressão de anel.

	200 °C	400 °C	TESTE DE HIPÓTESE: H1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$
Ra (μm)	0,368 ± 0,128	0,357 ± 0,176	p-valor: 0,908

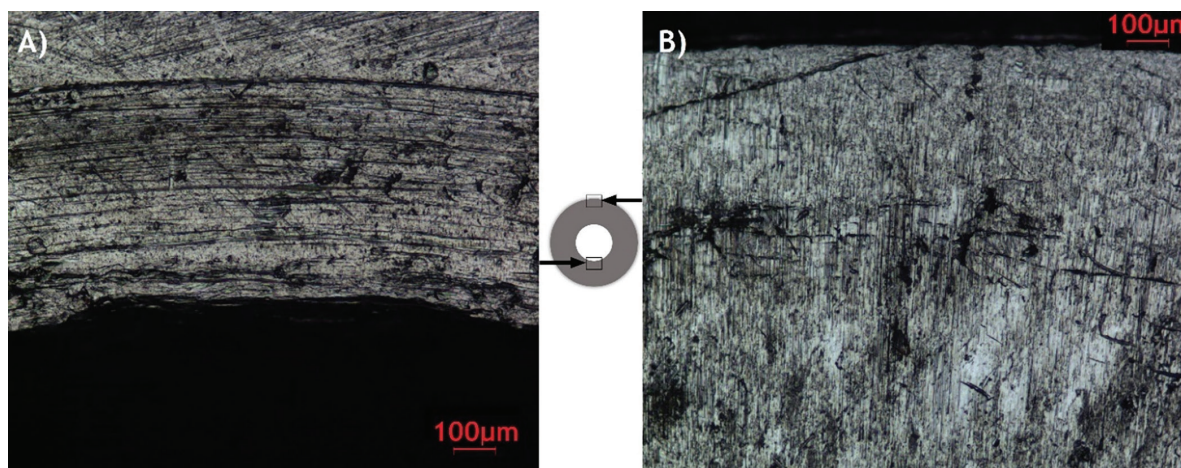


Figura 3: Imagem de MO com ampliação de 100× do anel conformado à 200 °C: a) Região próxima ao diâmetro interno; b) Região próxima ao diâmetro externo.

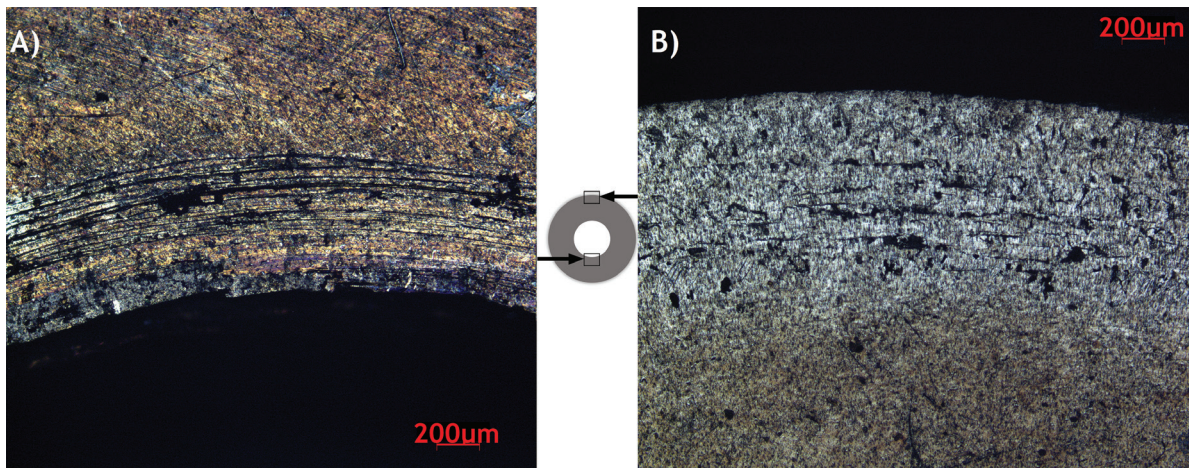


Figura 4: Imagem de MO com ampliação de 50× do anel conformado à 400 °C: a) Região próxima ao diâmetro interno; b) Região próxima ao diâmetro externo.

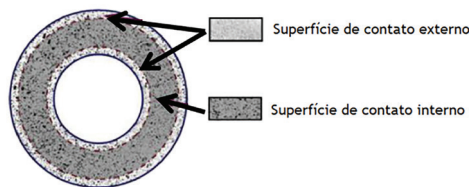


Figura 5: Superfície de contato externo e interno do anel [16].

que não foram deformados. Segundo ZHANG *et al.* [18], em uma deformação com lubrificação insuficiente ou sem lubrificação, estas ranhuras são acentuadas pela ferramenta mais dura que sulca a superfície do anel mais macia, produzindo uma espécie de ranhuras desiguais, profundas e densamente arranjadas. O estudo feito por MATSUMOTO *et al.* [19], realiza o ensaio de compressão à quente no aço AISI 1025 com camada de óxido de ferro (FeO) controlada. O ensaio é feito na temperatura de 1223 K e após a compressão é analisada a superfície do anel. Como resultado, MATSUMOTO *et al.* [19], observaram que a camada de FeO por ser frágil apresentou várias fissuras ao longo da superfície do anel, e estes foram achatados durante a compressão, formando sulcos na superfície. Desta forma, as ranhuras podem ser formadas por um ou a combinação de múltiplos mecanismos.

3.2.2. Matriz

Assim como foi feito com os anéis, verificou se houve aumento significativo da rugosidade depois do ensaio de compressão à quente, foi realizado o teste t para amostras pareadas para um nível de significância de 5% para todas as matrizes antes e após o ensaio de compressão de anel à quente. Conforme apresentado na Tabela 3, houve aumento significativo (p-valor igual a 0,000) na rugosidade superficial das matrizes em razão da compressão à quente.

Para verificar se a mudança de temperatura de ensaio influenciou diretamente na rugosidade das matrizes, foi realizado o teste t para duas amostras para um nível de significância de 5% assumindo igualdade entre as variâncias. De acordo com o apresentado pela Tabela 4, o resultado de um p-valor igual a 0,163, pode-se afirmar que a mudança da temperatura de ensaio não influenciou na rugosidade das matrizes.

Foram realizadas imagens de microscopia óptica (MO) nas matrizes após o ensaio de compressão. Observou-se que na superfície de contato externo entre matriz e o anel apresentou uma região de desgaste abrasivo, onde houve o desprendimento do revestimento de AlCrN do substrato de WC-10Co. A Figura 6 apresenta as imagens obtidas via MO da matriz utilizada no ensaio de compressão de anel à 200 °C, a Figura 7 apresenta as imagens obtidas da matriz utilizada no ensaio a 400 °C. Nas Figuras 6b e 7b nota-se defeitos na superfície das matrizes devido ao ensaio de compressão de anel.

3.3. Coeficiente de atrito

3.3.1. Ensaio de torneamento

Os valores das componentes das forças de usinagem obtidas no ensaio de torneamento são apresentados na Tabela 5.

Com os dados de forças obtidos, foi possível determinar o coeficiente de atrito conforme a Equação 1. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

3.3.2. Compressão de anel

Após o ensaio de compressão de anel, os anéis foram medidos por meio de paquímetro digital e a médias e os respectivos desvios-padrão das medições são apresentados na Tabela 7. A Tabela 7 também apresenta o valor correspondente de R_n para cada amostra, calculado por meio da Equação 4.

Uma vez determinados os valores médios de R_i , R_o , T e R_n é possível determinar os valores coeficiente de atrito por meio da Equação 2. O resultado do coeficiente de atrito é apresentado na Tabela 8.

3.3.3. Análise estatística

Com os valores de coeficiente de atrito obtidos pelo ensaio de compressão de anel e pelo ensaio de usinagem, foi realizado o teste de Anderson-Darling com o intuito de verificar se os valores apresentam uma distribuição normal. A Figura 8 apresenta os gráficos do teste de normalidade com os valores de coeficiente de atrito no ensaio de torneamento para cada velocidade de corte empregada no ensaio. Desta forma, o p-valor encontrado atestou que os valores apresentam uma distribuição normal.

Tabela 3: Rugosidade Ra das matrizes antes e depois do ensaio de compressão de anel.

	ANTES	DEPOIS	TESTE DE HIPÓESE: H1: $\mu_1 - \mu_2 < 0$
Ra (μm)	0,064 \pm 0,006	0,081 \pm 0,018	p-valor: 0,000

Tabela 4: Rugosidade Ra das matrizes em razão da temperatura de ensaio de compressão de anel.

	200 °C	400 °C	TESTE DE HIPÓESE: H1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$
Ra (μm)	0,086 \pm 0,022	0,076 \pm 0,013	p-valor: 0,163

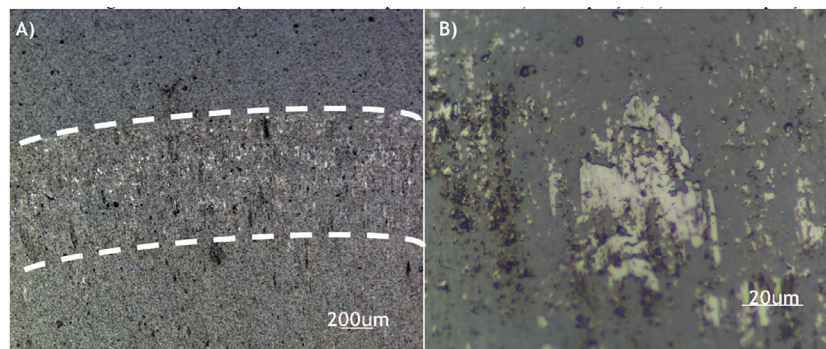


Figura 6: Matriz após o ensaio de compressão à 200 °C: a) 50× ampliação; b) 1000× de ampliação.

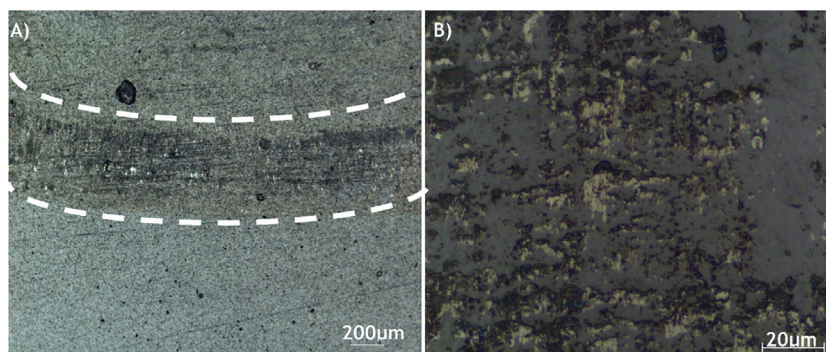


Figura 7: Matriz após o ensaio de compressão à 400 °C: a) 50× ampliação; b) 1000× de ampliação.

Tabela 5: Tabela de força de usinagem do ensaio de torneamento.

VELOCIDADE DE CORTE (m/min)	TESTE	FORÇA DE AVANÇO (N)	FORÇA DE CORTE (N)	FORÇA PASSIVA (N)
150	1	202,9	479,7	172,3
	2	179,5	419,8	130,2
	3	344,3	745,9	252,8
	4	250,1	518,3	163,6
	5	179,2	380,7	118,6
	6	350,8	750,3	214,5
220	1	345,7	543,4	198,2
	2	275,1	480,7	218,6
	3	350,8	605,9	192,5
	4	290,7	545	229,6
	5	369,4	601,6	210,9
	6	288,3	514,6	180,1

Tabela 6: Coeficiente de atrito do ensaio de torneamento.

VELOCIDADE DE CORTE (m/min)	TESTE	COEFICIENTE DE ATRITO (μ)
150	1	0,579
	2	0,581
	3	0,622
	4	0,645
	5	0,631
	6	0,625
220	1	0,833
	2	0,764
	3	0,760
	4	0,714
	5	0,805
	6	0,740

Tabela 7: Medidas dos anéis após a deformação para as temperaturas de 200 e 400 °C.

TEMPERATURA (°C)	AMOSTRA	R_i (mm)	R_o (mm)	T (mm)	R_n (mm)
200	1	3,05 ± 0,10	11,05 ± 0,09	3,60 ± 0,08	5,27
	2	3,05 ± 0,07	11,06 ± 0,12	3,50 ± 0,05	5,19
	3	4,00 ± 0,07	9,95 ± 0,05	4,50 ± 0,10	5,32
	4	3,90 ± 0,11	10,05 ± 0,05	4,20 ± 0,10	5,58
	5	3,95 ± 0,09	10,15 ± 0,07	4,40 ± 0,8	5,56
	6	3,90 ± 0,05	9,95 ± 0,10	4,50 ± 0,05	5,47
400	7	3,75 ± 0,12	10,20 ± 0,07	4,30 ± 0,05	5,59
	8	3,65 ± 0,10	10,10 ± 0,05	4,20 ± 0,07	5,72
	9	3,70 ± 0,05	10,10 ± 0,05	4,30 ± 0,08	5,72
	10	3,70 ± 0,08	10,10 ± 0,10	4,20 ± 0,10	5,56
	11	3,80 ± 0,07	10,20 ± 0,5	4,40 ± 0,10	5,67
	12	3,70 ± 0,10	10,05 ± 0,7	4,40 ± 0,12	5,73

Tabela 8: Resultado do coeficiente de atrito do ensaio de compressão de anel à quente.

TEMPERATURA (°C)	TESTE	COEFICIENTE DE ATRITO (μ)
200	1	0,602
	2	0,600
	3	0,627
	4	0,625
	5	0,566
	6	0,689
400	1	0,802
	2	0,802
	3	0,858
	4	0,717
	5	0,721
	6	0,878

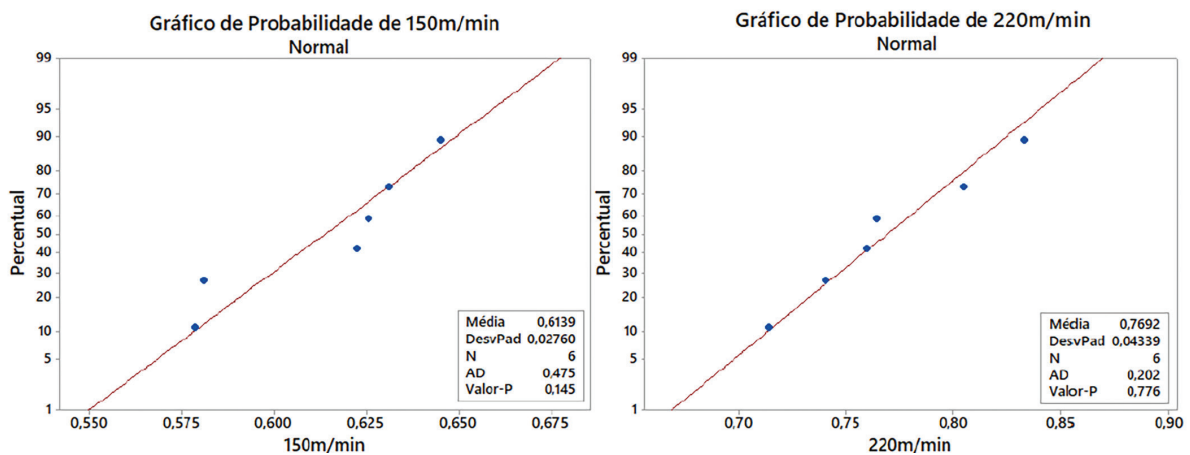


Figura 8: Teste de normalidade para o coeficiente de atrito no ensaio de torneamento.

O teste de normalidade de Anderson-Darling também foi empregado para os resultados obtidos no ensaio de compressão de anel. Com isso, o p-valor obtido pelo teste atesta que os valores do coeficiente de atrito na compressão de anel apresentam uma distribuição normal, conforme Figura 9.

Visto que os dados apresentam uma distribuição normal, foi realizado a análise das variâncias por meio do teste de Bartlett, conforme a Figura 10.

Os resultados mostraram que todos os coeficientes de atrito apresentaram variâncias iguais, ou seja, os testes realizados obtiveram o mesmo grau de variabilidade. Com isso, foi possível aplicar o teste t para duas amostras afim de atestar a igualdade entre os valores de coeficiente de atrito obtido pelo trabalho experimental. Com base no exposto por MONTGOMERY e RUNGER [20], primeiramente, delimitou-se a região de decisão do teste t. Com isso, observou-se que o grau de liberdade do teste é igual a 10 e o nível de significância adotado corresponde a 5%. Desta forma, a região de aceitação de H0 dentro da curva da distribuição t de Student é delimitada entre -2,23 a 2,23.

Primeiramente, verificou-se se houve diferença significativa entre o coeficiente de atrito encontrado no ensaio de torneamento adotando a velocidade de corte de 150 e 220 m/min. A Tabela 9 apresenta o resultado do teste, com isso nota-se que há evidências, ao nível de significância de 5%, para afirmar que as médias são diferentes. Portanto, pelo teste estatístico, a mudança na velocidade de corte alterou significativamente o coeficiente de atrito.

Foi realizado o teste para as duas condições de ensaio usadas no ensaio de compressão de anel à quente, a fim de verificar se a mudança de parâmetro influencia significativamente no coeficiente de atrito. Os resultados apresentados na Tabela 10 mostram que existem evidências significativas (p-valor = 0,000) para rejeitar

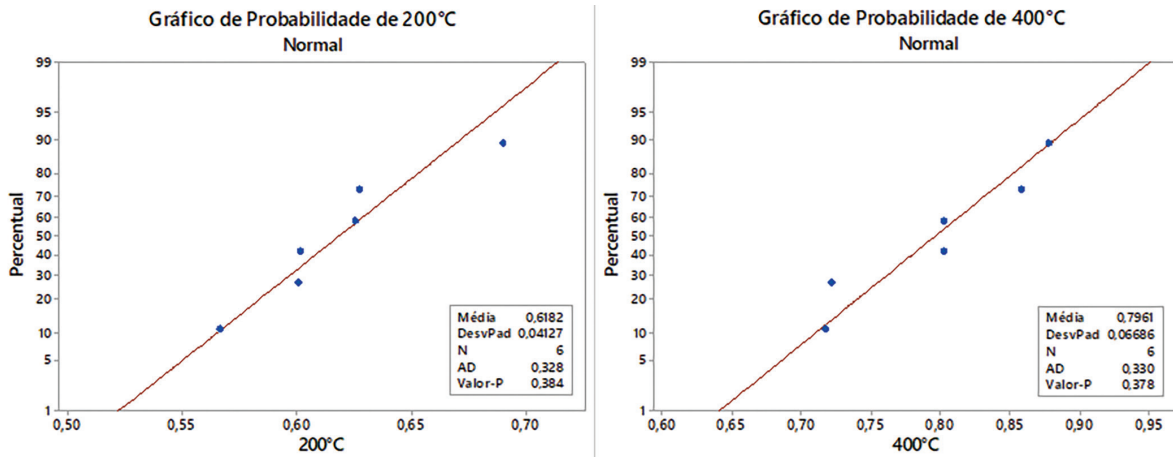


Figura 9: Teste de normalidade para o coeficiente de atrito no ensaio de compressão de anel.

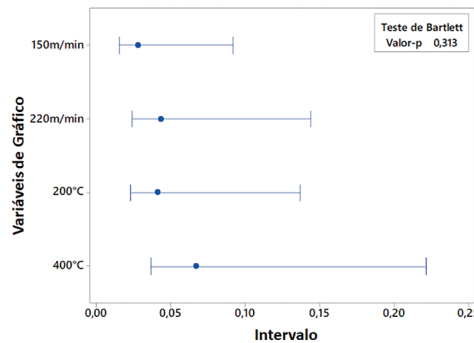


Figura 10: Teste de Bartlett para a igualdade de variâncias para os coeficientes de atrito dos ensaios de compressão e ensaios de torneamento.

Tabela 9: Teste t para as velocidades de corte no ensaio de torneamento.

150 m/min	220 m/min	VALOR-T	IC DE 95%	TESTE DE HIPÓTESES H1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$
0,614 ± 0,028	0,769 ± 0,043	7,40	(0,109; 0,202)	0,000

Tabela 10: Teste t para as temperaturas de ensaio no ensaio de compressão à quente.

200 °C	400 °C	VALOR-T	IC DE 95%	TESTE DE HIPÓTESES H1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$
0,618 ± 0,041	0,796 ± 0,067	-5,55	(-0,2494; -0,1065)	0,000

a hipótese nula em favor da alternativa. Ou seja, ao nível de significância de 5%, a temperatura tem uma forte influência no coeficiente de atrito, fazendo com que o coeficiente de atrito fosse diferente nas duas condições.

Visto que os parâmetros aplicados nos ensaios de torneamento e compressão de anel influenciaram diretamente no coeficiente de atrito, fez com que cada ensaio apresentasse um valor característico. Com isso, foi realizado o teste para comparar o coeficiente de atrito obtido no ensaio de compressão à quente à 200 °C e no ensaio de torneamento com velocidade de corte de 150 m/min. Como apresentado na Tabela 11, não existe diferença significativa no coeficiente de atrito encontrado nos testes (p-valor = 0,834). Portanto, com estes parâmetros (150 m/min e 200 °C) é possível estimar o coeficiente de atrito no torneamento pelo ensaio de compressão de anel à quente.

O teste foi realizado para verificar se o coeficiente de atrito obtido pelo ensaio de compressão de anel à 400 °C é correspondente ao coeficiente de atrito encontrado no ensaio de torneamento com velocidade de corte à 150 m/min. Como visto na Tabela 12, as médias do coeficiente de atrito não são correspondentes (p-valor = 0,000) e não podem ser equiparadas.

Tabela 11: Teste t para o ensaio de torneamento a 150 m/min e ensaio de compressão de anel à 200 °C.

150 m/min	200 °C	VALOR-T	IC DE 95%	TESTE DE HIPÓTESES H1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$
0,614 ± 0,028	0,618 ± 0,041	0,21	(-0,0408; -0,0495)	0,834

Tabela 12: Teste t para o ensaio de torneamento a 150 m/min e ensaio de compressão de anel à 400 °C.

150 m/min	400 °C	VALOR-T	IC DE 95%	TESTE DE HIPÓTESES H1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$
0,614 ± 0,028	0,796 ± 0,067	6,17	(0,117; 0,248)	0,000

Tabela 13: Teste t para o ensaio de torneamento a 220 m/min e ensaio de compressão de anel à 200 °C.

220 m/min	200 °C	VALOR-T	IC DE 95%	TESTE DE HIPÓTESES H1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$
0,769 ± 0,043	0,618 ± 0,041	-6,18	(-0,205; -0,097)	0,000

Tabela 14: Teste t para o ensaio de torneamento a 220 m/min e ensaio de compressão de anel à 400 °C.

220 m/min	400 °C	VALOR-T	IC DE 95%	TESTE DE HIPÓTESES H1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$
0,769 ± 0,043	0,796 ± 0,067	0,83	(-0,046; 0,100)	0,427

Então, foi realizado o teste para o ensaio de compressão à 200 °C e para o ensaio de torneamento com velocidade de corte igual a 220 m/min. Segundo o resultado apresentado na Tabela 13, existe uma diferença significativa entre as médias (p -valor = 0,000), assim não é possível afirmar que os coeficientes de atrito para estes parâmetros são correspondentes.

Por fim, foi realizado o teste t para o ensaio de torneamento com velocidade de corte à 220 m/min e ensaio de compressão de anel à 400 °C. Com isso, conforme Tabela 14, verificou-se que não há evidências significativas para afirmar que as médias são diferentes (p -valor = 0,427). Portanto para estes parâmetros (220 m/min e 400 °C), é possível estimar o coeficiente de atrito encontrado no ensaio de torneamento pelo ensaio de compressão de anel.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados nos testes de análise microestrutural, superficial bem como o ensaio de torneamento e ensaio de compressão de anel à quente, é possível concluir que:

- Observou-se um deslocamento do Rn do anel testado à 400 °C, onde o aumento da temperatura faz com que o fluxo de material se mova preferencialmente em direção ao diâmetro interno, por ter ausência de atrito.
- Com a análise superficial, observou-se um aumento significativo da rugosidade dos anéis e da matriz depois do ensaio de compressão de anel. A diferença de temperatura dos ensaios não provocou mudança significativa na rugosidade após o ensaio. Por meio das imagens obtidas na MO, foi possível observar um perfil de ranhuras característico com ensaio de compressão de anel.
- Por meio do ensaio de torneamento e do ensaio de compressão de anel à quente, foram obtidos os respectivos coeficientes de atrito. Com a análise estatística, observou-se que o coeficiente de atrito obtido com o ensaio de torneamento com velocidade de corte de 150 m/min, foi significativamente diferente do coeficiente de atrito encontrado com a velocidade de 220 m/min. Da mesma forma, o coeficiente de atrito encontrado no ensaio de compressão de anel à 200 °C foi significativamente diferente do encontrado na temperatura de 400 °C.

- Com a comparação do coeficiente de atrito do ensaio de compressão de anel à 200 °C e o coeficiente de atrito do ensaio de torneamento com velocidade de 150 m/min, estatisticamente não foi possível afirmar que os coeficientes de atrito são diferentes entre si. Afirmando que os coeficientes de atrito são diferentes indica um erro de 83,4% (p-valor 0,834). Sendo assim o coeficiente de atrito podem ser considerados iguais.
- Com a comparação do coeficiente de atrito do ensaio de compressão de anel à 400 °C e o coeficiente de atrito do ensaio de torneamento com velocidade de 220 m/min, estatisticamente não foi possível afirmar que os coeficientes de atrito são diferentes entre si. Assim, afirmando que os coeficientes de atrito são diferentes indica um erro de 42,7% (p-valor 0,427). Sendo assim o coeficiente de atrito podem ser considerados iguais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). Esta pesquisa foi financiada sob o Código 001. E a *Oerlikon Balzers*, pelo revestimento das amostras.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] LIANG, X., LIU, Z., WANG, B., *et al.*, “Friction behaviors in the metal cutting process: state of the art and future perspectives”, *International Journal of Extreme Manufacturing*, v. 5, pp. 1–38, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/2631-7990/ac9e27>
- [2] JAWAHIR, I.S., BRINKSMIEIER, E., M’SAOUBI, R., *et al.*, “Surface integrity in material removal processes: recent advances”, *CIRP Annals*, v. 60, n. 2, pp. 603–626, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.002>
- [3] CAKIR, E., OZLU, E., BAKKAL, M., *et al.*, “Investigation of temperature distribution in orthogonal cutting through dual-zone contact model on the rake face”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 96, n. 1-4, pp. 81–89, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-1479-3>
- [4] VANDANA, A.S., SUNDARAM, N.K., “Simulation of sinuous flow in metal cutting”, *Tribology Letters*, v. 66, n. 3, pp. 94, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11249-018-1047-5>
- [5] CHAN, W.L., FU, M.W., LU, J., “The size effect on micro deformation behaviour in micro-scale plastic deformation”, *Materials & Design*, v. 32, n. 1, pp. 198–206, 2011. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.011>
- [6] GRZESIK, W., *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling e applications*, 2 ed., USA, Elsevier, 2017.
- [7] MALE, A.T., DEPIERRE, V., “The validity of mathematical solutions for determining friction from the ring compression test”, *Journal of Lubrication Technology*, v. 92, n. 3, pp. 389–395, 1970. doi: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3451419>
- [8] RAO, K.P., SIVARAM, K., “A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 37, n. 1-4, pp. 295–318, 1993. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(93\)90098-Q](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(93)90098-Q)
- [9] SRIVASTAVA, A., SHRIVASTAVA, A., MISHRA, A.B., “Analysis of friction factor & coefficient of friction using ring compression test under various lubricants”, *International Journal of Engineering and Technical Research*, v. 9, n. 6, pp. 17–23, 2019. <http://dx.doi.org/10.31873/IJETR.9.6.2019.71>
- [10] GRZESIK, W., RECH, J., ZAK, K., “Determination of friction in metal cutting with tool wear and flank face effects”, *Wear*, v. 317, n. 1-2, pp. 8–16, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.05.003>
- [11] AVITZUR, B., “Forging of hollow discs”, *Israel Journal of Technology*, v. 2, n. 3, pp. 295–304, 1964. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.05.003>
- [12] DESALEGN, W., DAVIDSON, M.J., KHANRA, A.K., “Friction factor evaluation using experimental and finite element methods for Al-4%Cu preforms”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 23, n. 8, pp. 3058–3068, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-014-1063-z>
- [13] DUTTON, R., SEETHARAMAN, V., GOETZ, R., *et al.*, “Effect of flow softening on ring test calibration curves”, *Materials Science and Engineering A*, v. 270, n. 2, pp. 249–253, 1999. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00194-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00194-X)
- [14] WOLLA, D.W., DAVIDSON, M.J., KHANRA, A.K., “Evaluation of friction of powder metallurgical Al-4 wt% Cu preforms by employing ring compression test and FEM in hot compression test”, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 69, n. 5, pp. 1031–1041, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12666-015-0617-6>

- [15] PENG, L., LAI, X., LEE, H.J., *et al.*, “Friction behavior modeling and analysis in micro/meso scale metal forming process”, *Materials & Design*, v. 31, n. 4, pp. 1953–1961, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.040>
- [16] BAO, J., BAI, J., LV, S., *et al.*, “Interactive effects of specimen size and current density on tribological behavior of electrically-assisted micro-forming in TC4 titanium alloy”, *Tribology International*, v. 151, pp. 106457. 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106457>
- [17] ENGEL, U., “Tribology in microforming”, *Wear*, v. 260, n. 3, pp. 265–273, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2005.04.021>
- [18] ZHANG, D., YANG, G., ZHAO, S., “Frictional behavior during cold ring compression process of aluminum alloy 5052”, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.07.030>
- [19] MATSUMOTO, R., AKIYAMA, Y., DEGUCHI, H., *et al.*, “Influence of uneven interface between steel and oxide scale on deformation behavior of oxide scale in hot ring compression”, *Procedia Manufacturing*, v. 15, pp. 349–355, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.229>
- [20] MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C., *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*, 6 ed., Rio de Janeiro, LTC, 2016.