

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL (Ra) SOBRE ASPECTOS TRIBOLÓGICOS: DESLIZAMENTO DE PINO DE METAL DURO (WC-Co) SOBRE AÇO ABNT 4340 SEGUNDO A NORMA ASTM G99-05

Bárbara Cristina Mendanha Reis, babi_mreis@hotmail.com¹

Glaycon Rodrigo Amaral, rodrigopcpwm@gmail.com²

Ana Paula de Carvalho Costa, costa.anacarvalho@gmail.com³

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br⁴

¹Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Produção (DEP), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG

²Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), Rua do Rosário, 1081, Angola, CEP 32604-115, Betim, MG

³Faculdade Pitágoras, Av. Juscelino Kubitschek, 229, Centro, CEP 32600-225, Betim, MG

⁴Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG

Resumo: Entre os erros microgeométricos, encontra-se a rugosidade caracterizada pelas pequenas asperezas presentes em uma superfície. Sabe-se que a rugosidade determina a área de contato, a tensão do contato e bolsões para lubrificantes. O presente trabalho busca identificar a influência da rugosidade superficial (Ra) sobre o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste entre o metal duro e o aço ABNT 4340 quando submetidos a condições de atrito em ensaio de pino sobre disco. Foi realizado o contato entre pinos de metal duro sem revestimento contra discos de aço ABNT 4340 com os mesmos valores dimensionais, mas com valores de rugosidade superficial distintos. O primeiro disco apresentava superfície polida ($Ra = 0,05 \mu m$) e os demais valores de Ra próximos de $0,274 \mu m$ e $0,592 \mu m$, respectivamente. Os testes foram realizados no Tribômetro modelo Microtest, MT/60/NI, utilizando os seguintes parâmetros: carga normal de 8N, ambiente não lubrificado, velocidade periférica de 70 m/min e rotações de 391 rpm. Para a análise estatística dos dados, utilizou-se o modelo de Análise de Variância (ANOVA). Os resultados mostraram que o coeficiente de atrito foi influenciado pela rugosidade (Ra), sendo que, com o aumento da distância deslizada, esse parâmetro deixa de influenciar o coeficiente de atrito. Para aquisição de imagens e caracterização das superfícies, empregaram-se MEV e EDS, respectivamente. De maneira geral, para todos os discos, notou-se a abrasão como mecanismo de desgaste predominante; no entanto, em relação aos pinos, as análises EDS dos seus topos indicaram a presença de elementos do aço ABNT 4340 - fato que ilustra o desgaste adesivo.

Palavras-chave: rugosidade, coeficiente de atrito, desgaste, MEV, EDS

1. INTRODUÇÃO

A força conhecida como atrito pode ser definida como a resistência encontrada por um corpo ao mover-se sobre outro, seja no deslizamento ou no rolamento (Hutchings, 1992). Trabalhos recentes (Alat et al., 2016; Bobzin, 2016) relatam a importância do estudo das características dos pares tribológicos para melhorias em sistemas produtivos, tais como nuclear e ferramentas de usinagem, por exemplo. A relação entre a força de atrito F e a carga normal W é estabelecida por meio do coeficiente de atrito (μ), conforme a Eq.(1).

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (1)$$

Sobre a relação do coeficiente de atrito e a superfície de um material, Rabinowicz (1995) afirmou que existe uma ideia de que a força de atrito é independente da rugosidade das superfícies deslizantes; porém, trata-se de uma grande simplificação. O mesmo autor, por meio de um experimento com o par tribológico cobre-cobre deslizando em um ambiente não lubrificado, com uma velocidade de deslizamento de 0,01 mm/s e carga de 9,8N, demonstrou que a rugosidade superficial influenciava o coeficiente de atrito, como pode ser observado na Fig. (1). Quando o sistema apresentava superfícies muito lisas, o atrito tendia a ser elevado, porque a área real de contato crescia excessivamente (Região I), ao passo que, com superfícies muito ásperas (Região III), o atrito era alto devido à necessidade de sobrepor

uma superfície sobre as asperezas da outra. Na faixa intermediária de rugosidade (Região II), que normalmente é utilizada na prática de engenharia, o atrito era mínimo e quase independente da rugosidade.

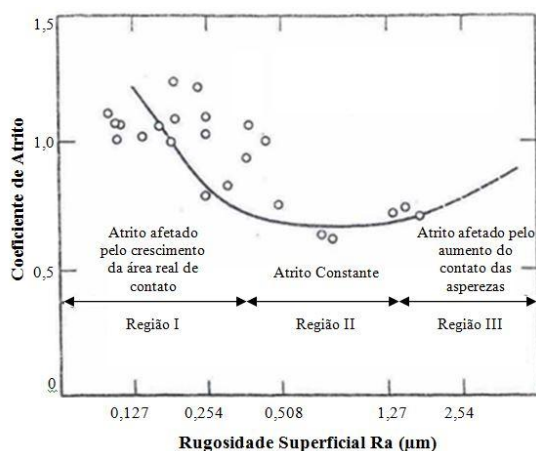


Figura 1. Comparação entre os resultados do coeficiente de atrito em função de Ra, de Rabinowicz (1955).

Svahn, Kassman-Rudolphi e Wallén (2003) elaboraram um experimento cujos resultados corroboram o trabalho descrito na Fig.(1). Os autores afirmaram que o uso de revestimentos de baixa tensão de cisalhamento em elementos de máquina estava aumentando constantemente, sendo, por vezes, necessário o polimento para o desempenho ideal do elemento de máquina revestido, cuja técnica é demorada e cara. Diante deste contexto, os autores propuseram analisar o efeito da rugosidade superficial no coeficiente de atrito em testes de deslizamento de esfera sobre disco. Cada disco apresentava um valor de rugosidade média quadrática (Rq), a dizer: 390, 220, 120, 68, 7 nm. Em todos os testes, as superfícies mais lisas conduziram a um menor coeficiente de atrito; porém, abaixo de 120 nm, o atrito era menos influenciado pela rugosidade da superfície.

Caracterizados as superfícies e o ambiente circundante e, assim, determinado o atrito característico daquela situação, é fundamental avaliar o desgaste e os mecanismos que ocorrem nestas superfícies. Conforme a norma ISO 3685 (1993), desgaste é uma mudança da forma original resultante da perda gradual de material. Na tribologia, desgaste é definido como a destruição de uma ou ambas as superfícies, envolvendo perda progressiva de material (Hutchings, 1992).

O desgaste é um processo complexo, resultante de diferentes processos que podem ocorrer isolados ou de forma interdependente. Na tribologia, é possível salientar quatro mecanismos de desgaste: adesivo, abrasivo (a dois ou a três corpos), corrosivo ou por fadiga superficial. Em relação à classificação, é possível defini-lo como leve ou severo. O primeiro resulta em superfícies extremamente suaves, enquanto o segundo, em superfícies rugosas, com ranhuras profundas. Outra diferença está no tamanho das partículas: no desgaste leve, são produzidas partículas extremamente pequenas, e, no severo, as partículas são grandes, com diâmetro médio acima de 0,01 mm (Hutchings, 1992).

O modelo simples para o desgaste sugere que a quantidade de material removido de um corpo deslizante deve depender da distância deslizada e da pressão nominal (carga normal sobre a área de contato nominal) sobre a região de contato. Porém, o ponto de partida para o estudo do desgaste está na equação de Archard, conforme mostra a Eq.(2).

$$Q = \frac{kW}{3H} \quad (2)$$

Onde:

Q = volume de material desgastado por unidade de deslizamento;

W = carga normal aplicada;

H = dureza superficial da aspereza mais mole;

k = coeficiente de desgaste adimensional.

Conforme a Equação (2), a perda de material por meio do desgaste é proporcional à distância deslizada ao tempo do ensaio e à carga aplicada. Entretanto, a taxa de desgaste é independente da área de contato aparente para um dado carregamento.

Jiang e Arnell (2000) analisaram o efeito da rugosidade da superfície do substrato sobre o comportamento de desgaste do revestimento de DLC (carbono tipo diamante) em um aço ferramenta M42 durante um teste de pino sobre disco em ar seco. Após a deposição, a rugosidade do revestimento era de aproximadamente a metade da rugosidade da superfície do substrato original. Enquanto o comportamento do atrito não foi aparentemente afetado, a taxa de desgaste

dos revestimentos cresceu significativamente com o aumento da rugosidade da superfície do substrato, sendo que, após a rugosidade média (Ra) exceder $0,93\mu\text{m}$, a taxa de desgaste elevou-se rapidamente. Acima de tal rugosidade, os autores afirmaram que o mecanismo de desgaste dominante alterou-se de adesivo para abrasivo, ocorrendo posterior fragmentação do revestimento. Por fim, a taxa de desgaste aumentou com a elevação na carga total para as superfícies mais rugosas; entretanto, isto era quase invariante com aumento na carga para revestimentos nas superfícies de substrato mais lisas.

A fim de esclarecer dúvidas sobre o atrito e o desgaste durante o teste tribológico, pode-se estudar o running-in; porém, são poucas as pesquisas nesta área, devido à sua complexidade. Running-in é o desgaste benéfico que ocorre no movimento relativo inter-superfícies de atuação que resulta em sua conformidade e desempenho melhorado (MEZGHANI et al., 2013). Estes autores mostraram que, mesmo o running-in sendo fortemente associado à lubrificação, a rugosidade é um elemento importante no desgaste das superfícies de materiais durante a etapa de running-in, mencionando também que o desgaste durante o período transitório depende da altura da rugosidade da superfície, assim como o modo de distribuição ordenada do perfil de rugosidade.

Este trabalho teve como objetivo identificar como os parâmetros de entrada (rugosidade e distância deslizada) afetam o coeficiente de atrito, a força de atrito e a taxa de desgaste durante deslizamento de pino de metal duro (WC-Co) sobre aço ABNT 4340, segundo a norma ASTM G99-05. As análises foram fundamentadas em conceitos técnicos e estatísticos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o conjunto de testes, baseados na norma ASTM G99-05 (2010) e realizados no Laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais, foi utilizado o Tribômetro Microtest, modelo MT/60/Ni, para o ensaio de pino pressionado de encontro à superfície de um disco plano, conforme ilustra a Fig. (2a). Os pinos eram cilíndricos, de topo esférico de metal duro (WC-Co), grão ultrafino e dimensões descritas na Fig. (2b), cujas características são descritas na Tab.(1). Por fim, os discos eram de aço ABNT 4340, sendo que cada um deles apresentava as dimensões descritas na Fig. (2c) e dureza de 222HV. Cada disco possuía um valor de rugosidade superficial distinto, porém a sua composição química era semelhante, como indicado na Tab.(2).

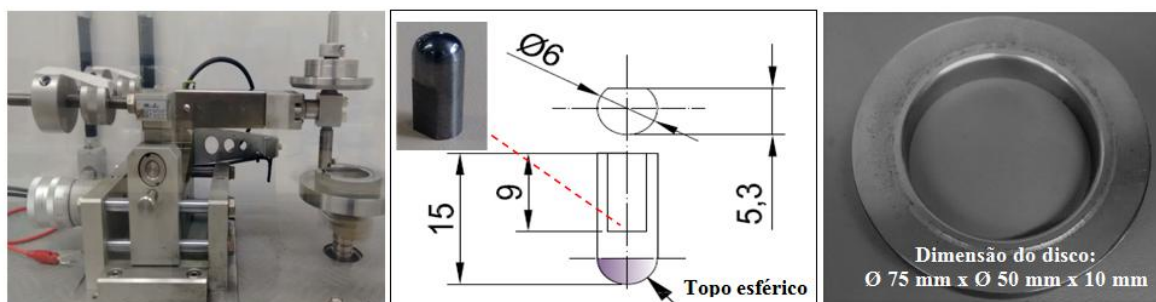


Figura 2. Montagem do Experimento: (a) Tribômetro, (b) Pino de Metal Duro, (c) Disco em aço ABNT 4340.

Tabela 1. Características dos pinos de Ceraziti América Latina (2016).

Código ISO	Aglutinante [%m]	Densidade [g/cm ³]	Dureza HV30-HRA	K_{IC} [MPa* m ^{1/2}]	Tensão de ruptura transversal [MPa]
K10	8,2	14,55	1930 - 93,7	9,2	4400

Tabela 2. Faixa de composição química do aço ABNT 4340 de ASM International (1997).

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
0,38–0,43	0,15–0,35	0,60–0,80	≤ 0,035	≤ 0,040	0,70–0,90	0,20–0,30	1,65–2,00

Os valores de rugosidade (Ra, Rq e Rz) de cada disco foram coletados com um rugosímetro Mitutoyo, modelo Surftest 301, empregando um comprimento de amostragem de 0,25 mm e comprimento de avaliação de 1,25 mm - para os valores de Ra entre 0,02 e 0,1 μm - e um comprimento de amostragem de 0,8 mm e comprimento de avaliação de 4 mm, para os valores de Ra entre 0,1 e 2 μm . Após cada conjunto de testes realizado, a rugosidade foi medida em cinco pontos equidistantes do corpo, e o valor médio foi calculado (Tab.(3)). O parâmetro de rugosidade utilizado na análise estatística foi o desvio médio aritmético (Ra). A fim de ajustar o equipamento, o rugosímetro foi verificado com um padrão antes da medição.

Tabela 3. Rugosidade Superficial (Ra) dos discos.

Disco	Rugosidade Superficial (Ra) (μm)	Classe de Rugosidade
1	0,050	N2
2	0,274	N4
3	0,592	N5-N6

Durante os testes, foram utilizados os seguintes parâmetros experimentais: carga aplicada de 8N, ambiente não lubrificado, velocidade periférica de 70 m/min e rotações de 391 rpm. Por meio do software Nanovea Tribometers, foi possível a aquisição dos dados referentes ao coeficiente de atrito, força de atrito, número de revoluções e distância percorrida, além dos gráficos sobre a relação entre coeficiente de atrito e número de revoluções.

Para a análise dos resultados, foi empregada a análise de variância (ANOVA). Posteriormente, foram construídos os gráficos de efeito principal e interação dos parâmetros de saída com o intervalo de confiança de 95%, para possibilitar a comparação entre a influência da rugosidade e da distância deslizada sobre o coeficiente de atrito.

A fim de analisar o desgaste dos pinos e dos discos, buscou-se quantificar o material removido por meio da pesagem antes do início do teste e logo após o seu término, de maneira a produzir intervalos semelhantes em uma balança Shimadzu, modelo AX200. Priorizou-se, também, a utilização de técnicas que permitissem a caracterização das superfícies desgastadas, sendo que, neste trabalho, optou-se pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) e pela análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Todas as imagens e análises foram feitas no Instituto Politécnico (IPUC) da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Inicialmente, as amostras foram inseridas numa solução Etanol PA em um ultrassom Branson, modelo 1800, por 10 minutos, para a limpeza. Foi utilizado um microscópio JEOL, modelo JSM-IT300, como instrumento para a técnica de microscopia eletrônica de varredura, a qual permitiu a obtenção de uma imagem ampliada da amostra a partir da interação de um feixe de elétrons com o material (Oréfice, Pereira, Mansur, 2012). O microscópio eletrônico de varredura utilizado para esta análise possuía um equipamento de microanálise acoplado, um detector do EDS Oxford Instruments, modelo X-MaxN, o que possibilitou levantar os elementos presentes. Para a geração e o tratamento dos dados obtidos pelas técnicas de caracterização, empregou-se o software AZtec.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados, discutindo-se a sua análise estatística.

3.1. Análise Estatística dos Resultados do Coeficiente de Atrito em função da Rugosidade Superficial

Todas as análises estatísticas deste trabalho foram feitas no software MINITAB, versão 17. Antes da realização da análise de variância (ANOVA), foi verificada a adequação do modelo por meio da análise de resíduos. Uma vez comprovada a adequação do modelo, realizou-se a ANOVA com o intuito de verificar a influência dos parâmetros rugosidade (Ra) e distância deslizada, bem como a combinação destes sobre o coeficiente de atrito (μ). Na análise estatística, para todas as variáveis de resposta, considerou-se $\alpha = 0,05$, isto é, um intervalo de confiança de 95%. Por meio da Tab.(4), é possível visualizar a ANOVA para o coeficiente de atrito gerado.

Tabela 4. ANOVA para o coeficiente de atrito.

Interações	Parâmetro(s)	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Valor
Linear	Rugosidade	0,6300	0,31499	48,70	0,000
	Distância Deslizada	6,9521	1,39042	214,97	0,000
Segunda Ordem	Rugosidade* Distância Deslizada	2,6532	0,26532	41,02	0,000

Observa-se, na Tabela (4), que o parâmetro de coeficiente de atrito foi influenciado por todos os efeitos principais e também pela interação de segunda ordem ($p \leq 0,05$). Esse resultado determina que diferentes especificações de rugosidade superficial implicam em valores distintos de coeficiente de atrito. No entanto, essa diferença é possível de ser verificada somente até certo número de rotações, uma vez que, ultrapassado este limite, o substrato exposto ao ensaio já não apresenta diferença entre seus valores de rugosidade.

A Figura (3) apresenta o gráfico de interação para o coeficiente de atrito. Quanto à interação Rugosidade*Distância deslizada, a superfície polida (0,05 μm) foi a que apresentou o menor coeficiente de atrito - até 50 metros. Após este valor, verificou-se uma taxa de crescimento acentuada até 75 m, e, a partir de tal ponto, μ apresentou padrão constante. O comportamento dessa inclinação foi atribuído à grande diferença entre a rugosidade

superficial e as camadas subjacentes. Até a distância de 50 m, observou-se que a superfície retificada ($0,592 \mu\text{m}$) apresentou menor μ quando comparada à superfície com R_a de $0,274 \mu\text{m}$; mas, a partir de 50 m, a superfície mais rugosa exibiu os maiores valores de μ . Acredita-se que esse comportamento pode ser explicado pela presença de algum filme óxido, pois todas as superfícies, após 75m, exibem comportamento de μ estável.

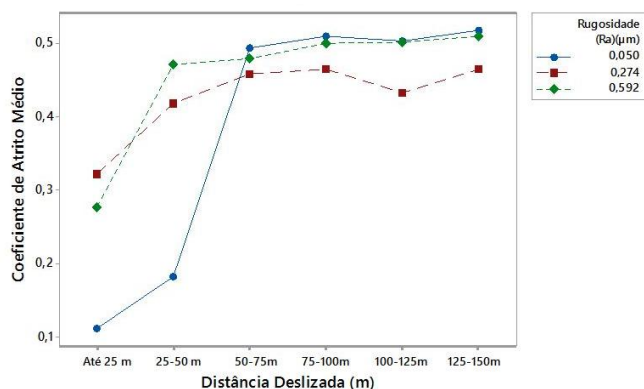


Figura 3. Gráfico de interação para o coeficiente de atrito (Rugosidade e Distância Deslizada).

3.2. Análise do Coeficiente de Atrito em função do comportamento do running-in

De acordo com os valores de rugosidade, cargas e velocidades previamente definidos, a Tabela (5) descreve a distância percorrida e o número total de rotações em que se realizou o contato pino sobre disco, assim como os valores médios para força de atrito (F_{at}) e coeficiente de atrito (μ) identificados.

Tabela 5. Parâmetros e resultados obtidos nos ensaios.

Rugosidade do Anel (μm)	Carga Aplicada (N)	Distância Percorrida (m)	Nº total de rotações	μ_{max}	F_{at} (N)
0,050	8	2180,77	12184,43	0,52	4,15
0,274	8	2238,00	11136,54	0,49	3,95
0,592	8	2238,22	11137,63	0,53	4,25

A partir da Tabela (5), nota-se que os três discos apresentaram valores próximos de μ e F_{at} , o que corrobora as análises anteriores, de que, após certo número de rotações, a diferença entre as rugosidades superficiais deixa de existir. A Figura (4) compara o valor de μ ao longo de todo ensaio para os três discos em estudo. Percebe-se que, em todas as condições (a), (b) e (c), o coeficiente de atrito se estabiliza com valores próximos a partir de 1000 rotações.

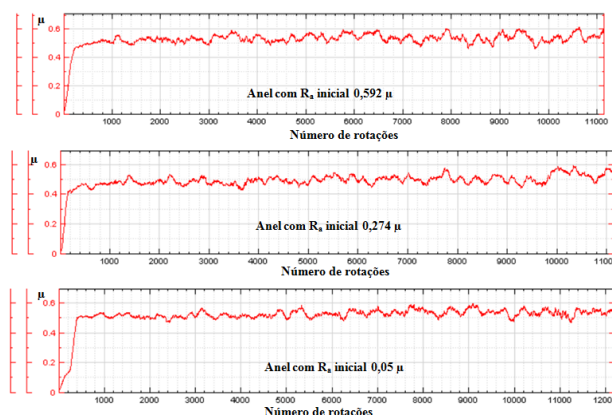


Figura 4. Comportamento do coeficiente de atrito para os discos

Como observado por meio da análise estatística, a rugosidade superficial apresenta influência sobre o coeficiente de atrito somente até um determinado valor de distância deslizada, pois, ultrapassado este valor, os substratos apresentam os mesmos índices de rugosidade. Nesse sentido, foi fundamental verificar o comportamento do running-in para cada curva, a fim de complementar as informações da taxa de desgaste absoluto com o conhecimento de tais alterações. Blau, na década de 1980, por meio de um levantamento da literatura sobre tribologia, estabeleceu oito formas comuns do running-in e as relacionou ao comportamento do atrito versus tempo. Comparando as conclusões de

Blau (2009), os comportamentos apresentados na Fig. (4) e os dados do software Nanovea Tribometers (até 600 rotações), elaboraram-se as imagens descritas pela Fig. (5).

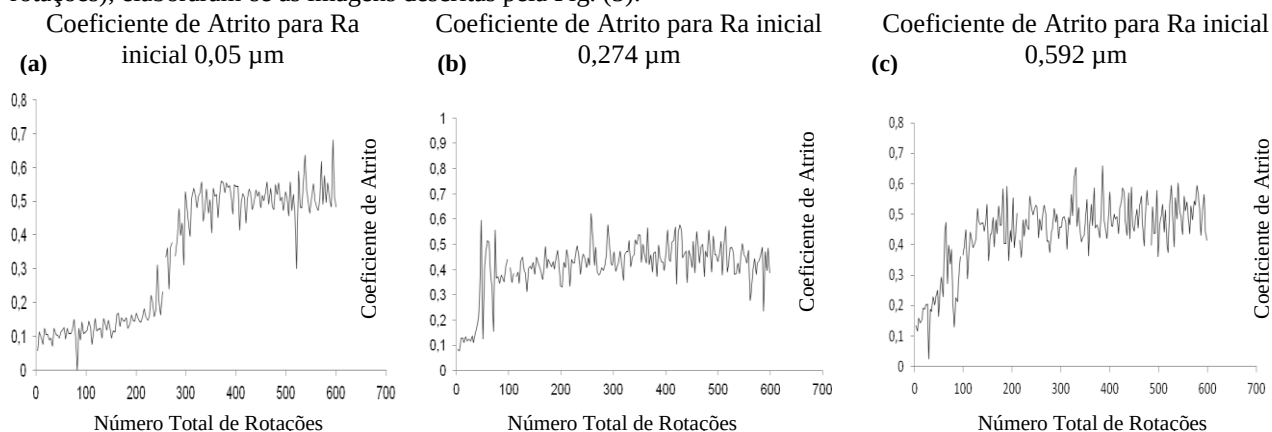


Figura 5. Possíveis causas para o atrito, de acordo com o comportamento do running-in versus n° de rotações para discos de rugosidade média (Ra) inicial: (a) 0,05 µm, (b) 0,274 µm e (c) 0,592 µm.

Observa-se que a superfície polida Fig.(5a) apresenta um aspecto de running-in bastante distinto dos demais - fato explicado pelo desgaste subsuperficial, conforme Blau (2009). O autor afirma que as fissuras crescem até que os detritos sejam produzidos, e estes criam, então, terceiros corpos, que induzem a transição rápida do atrito. Para a superfície da Fig.(5b), nota-se uma taxa de desgaste inicial alta até que as asperezas mais afiadas sejam desgastadas, tornando-se mais suaves. Por fim, para a superfície mais rugosa Fig.(5c), o aspecto do running-in remete a uma superfície contaminada, na qual um filme fino de contaminante foi desgastado da superfície do disco, uma vez que, na superfície rugosa, a camada de filme óxido estava depositada por entre os vales das asperezas.

3.3. Coeficiente de Desgaste

Com a finalidade de descrever a severidade do desgaste dos discos, o coeficiente de desgaste adimensional (k), relacionado pela Eq. (2), foi calculado para os três discos utilizando-se as informações citadas anteriormente sobre a carga aplicada, a distância total percorrida no ensaio, a dureza do pino, a massa específica dos discos e a perda de massa em cada disco. Os valores encontrados são apresentados na Tab. (6).

Tabela 6. Coeficiente de desgaste para os três discos utilizados.

Disco	Variação Massa do disco (g)	Volume Desgastado (mm ³)	Distância percorrida (mm)	Taxa de Desgaste do Disco (mm ³ /mm)	Coeficiente de Desgaste
Ra= 0,05 µm	0,0187	2,4006	2180770	$1,1008 \times 10^{-6}$	$8,9407 \times 10^{-4}$
Ra= 0,274 µm	0,0398	5,1058	2237990	$2,28141 \times 10^{-6}$	$1,8530 \times 10^{-3}$
Ra= 0,592 µm	0,0179	2,2949	22382180	$1,0253 \times 10^{-7}$	$8,3276 \times 10^{-5}$

De acordo com Hutchings (1992), os valores de k podem variar em cinco ordens de grandeza (10^{-2} a 10^{-7}), o que torna possível classificar o desgaste como severo (valores de 10^{-2} a 10^{-3}) ou suave (10^{-6} a 10^{-8}). O disco que sofreu menor taxa de desgaste e que, portanto, apresentou o menor coeficiente de desgaste foi o disco com a maior rugosidade inicial. O disco com a rugosidade intermediária sofreu desgaste severo, e os demais apresentaram o coeficiente de desgaste entre as ordens de grandeza 10^{-4} a 10^{-5} , indicando um desgaste intermediário.

3.4 Variação de Massa dos Discos e dos Pinos

Na Figura (6a), pode ser observada a variação de massa para o disco, sendo que a maior perda de massa foi verificada quando se utilizou o disco com a rugosidade média de 0,274 µm. Já a menor perda de massa ocorreu para o disco com maior rugosidade - fato esperado, dado que este disco foi o que apresentou menor coeficiente de desgaste, conforme se observa na Tab. (6). Constatou-se que ocorreu a perda de massa nos pinos utilizados nos discos que possuíam rugosidade média de 0,05 e 0,592 µm; entretanto, inferior em relação à perda de massa dos respectivos discos, o que é justificável pela maior dureza do metal duro em relação ao aço ABNT 4340. Para o pino utilizado sobre o disco com Ra 0,274 µm, verificou-se uma variação negativa, o que significa que a adesão de material do disco superou a

perda de material do pino - condição explicada pela presença de desgaste severo. Ressalta-se que, em relação ao balanço de massa, existe uma diferença entre a soma das massas iniciais dos pinos e discos e a soma das suas massas finais, devido à perda de material na forma de debris (óxidos) e a partículas perdidas durante o processo de deslizamento.

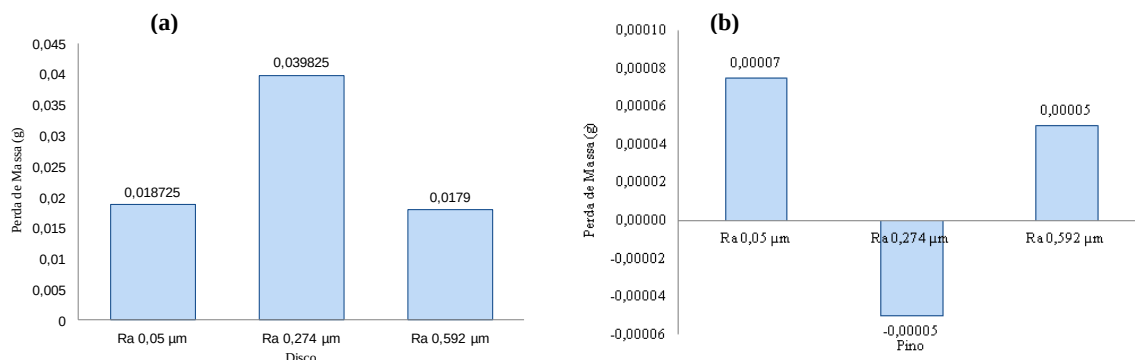


Figura 6. Variação da massa: (a) dos discos e (b) dos pinos.

3.5 Desgaste dos Discos e dos Pinos

Os desgastes nos discos de aço ABNT 4340 podem ser observados na Fig. (7). A largura do canal para o disco polido é a maior, quando comparada às demais. Esta afirmação é justificada pelo fato de que o disco polido apresentou o maior valor de coeficiente de desgaste adimensional, como foi detalhado.

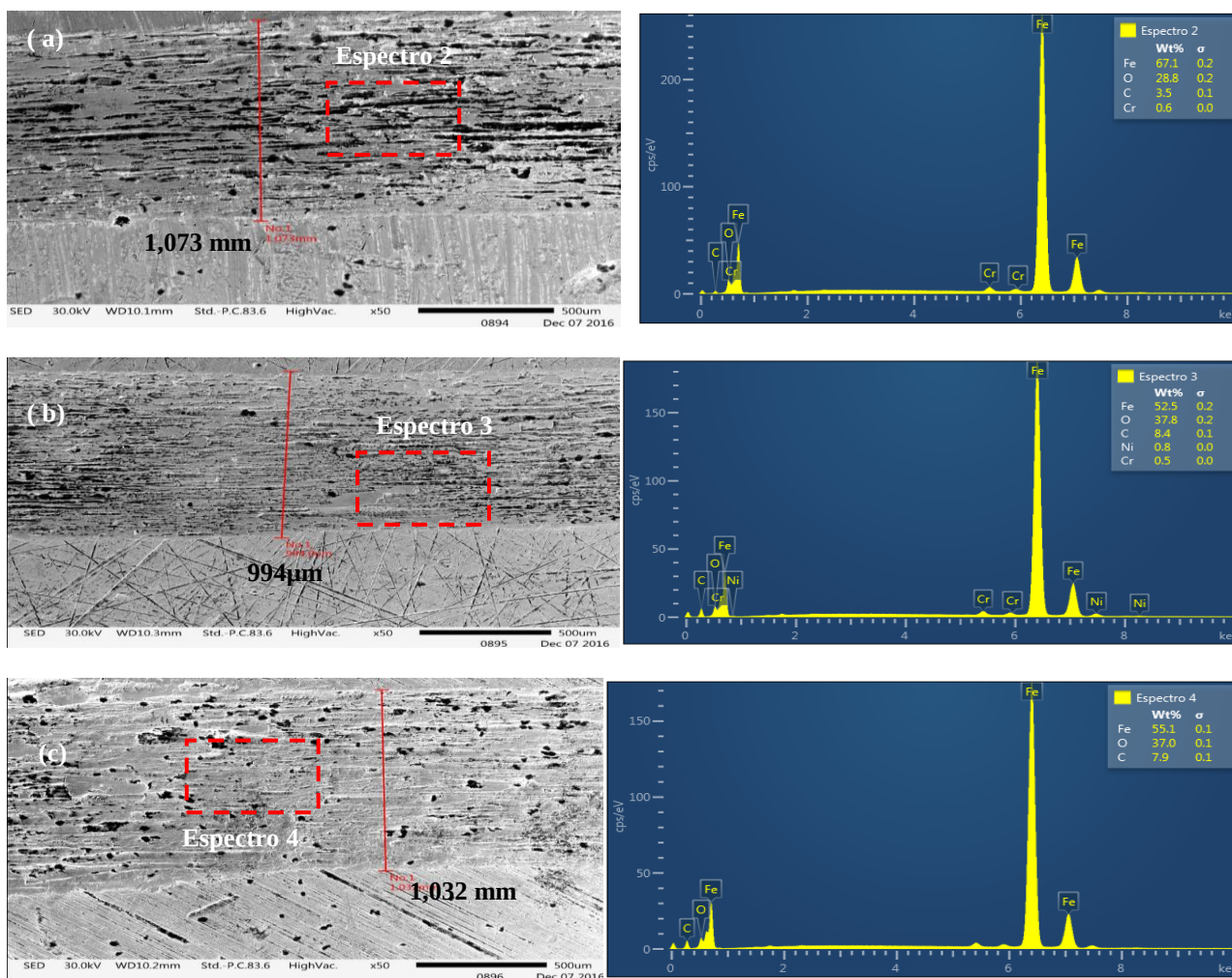


Figura 7. Imagens MEV e EDS dos canais produzidos nos discos com Ra inicial (a) 0,05 μm , (b) 0,274 μm e (c) 0,592 μm .

Por meio da Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), é possível afirmar que não ocorreu desgaste adesivo em nenhum dos três canais, devido à ausência de elementos característicos do pino de metal duro: tungstênio, carbono e cobalto. No entanto, ocorreu desgaste abrasivo em todos os canais, dada a presença de sulcos (Fig.(7)). O desgaste abrasivo acontece quando as asperezas de uma superfície dura ou rugosa (abrasão a dois corpos) ou partículas duras (abrasão a três corpos) deslizam em uma superfície com dureza inferior, causando deformação plástica ou fratura sobre ela (Bharat, 2013). O mesmo autor afirma que a característica deste mecanismo de desgaste é a formação de superfícies com ranhuras ou sulcos, o que corrobora as ilustrações da Fig.(7).

Por meio da Figura (8), pode-se observar que, para os três pinos utilizados, houve adesão do aço ABNT 4340 em seus topos, conforme ilustra a análise EDS. De acordo com Machado et al.(2015), o mecanismo de desgaste adesivo ocorre quando fragmentos microscópicos são arrancados da superfície macia e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface.

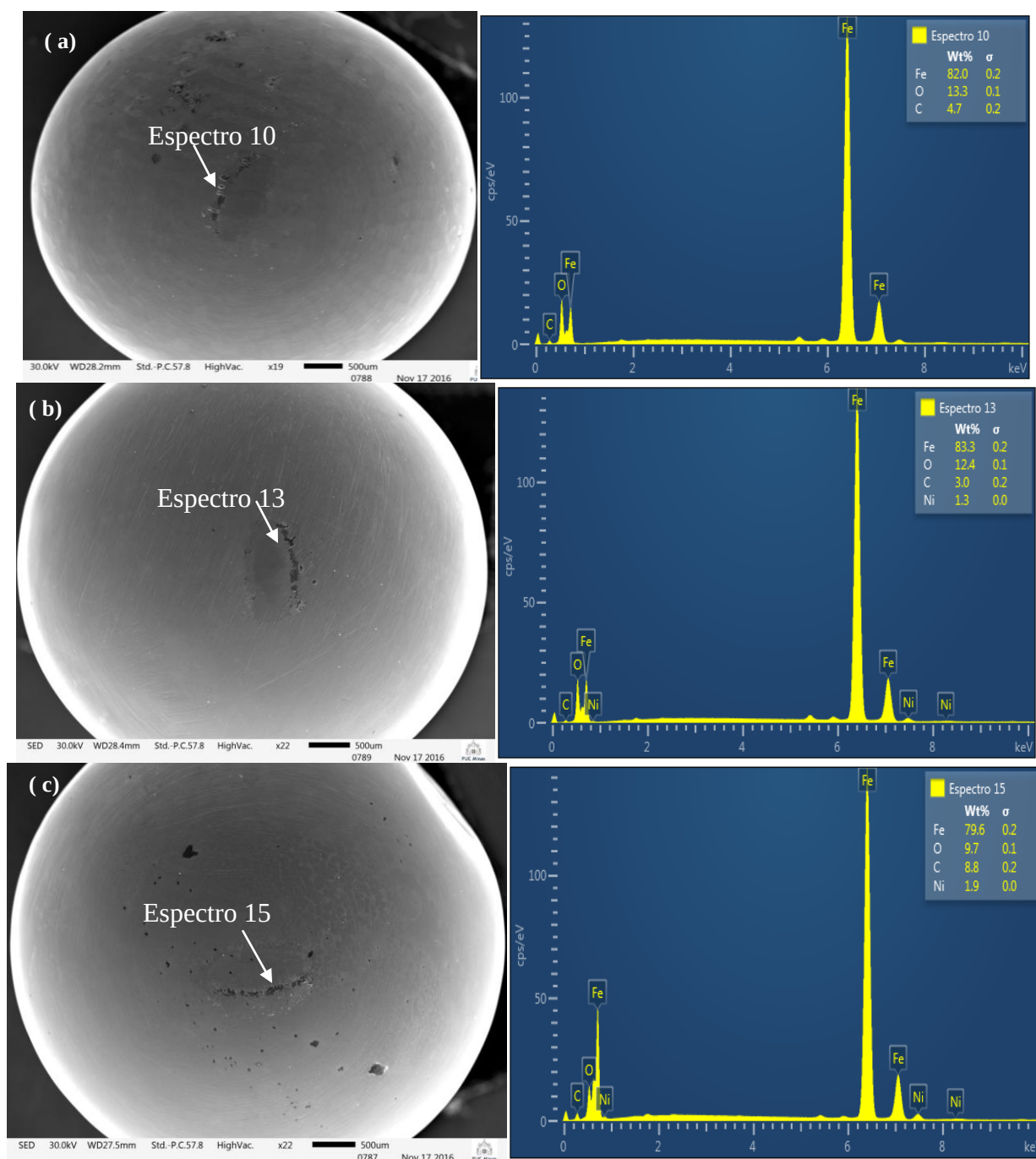


Figura 8. Imagens MEV e EDS da região de desgaste nos pinos utilizados nos discos com Ra inicial (a) 0,05 μm , (b) 0,274 μm e (c) 0,592 μm .

4. CONCLUSÕES

Em relação aos testes e condições utilizadas, concluiu-se que:

- a rugosidade superficial tem influência direta sobre o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste;
- a rugosidade superficial apresenta influência sobre o coeficiente de atrito até certo valor de distância deslizada, porque, após isso, os substratos não apresentam diferença evidente em relação a este parâmetro de erro microgeométrico;
- para as condições estudadas, os menores valores para a taxa de desgaste do disco e o coeficiente de desgaste foram encontrados para o disco com a maior rugosidade;
- os coeficientes de desgaste indicaram um desgaste moderado para as condições utilizadas para os discos com rugosidade 0,05 μm e 0,592 μm . Para o disco com rugosidade 0,274 μm , o valor do coeficiente de desgaste indicou a ocorrência de desgaste severo, e, por isso, este foi o disco que perdeu a maior quantidade de massa (Fig. 6, (a));
- para todos os discos, notou-se que o mecanismo de desgaste predominante foi o abrasivo; no entanto, em relação aos pinos, a adesão foi o mecanismo de desgaste observado.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desta pesquisa agradecem a assistência dos Departamentos de Engenharia Mecânica e Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais pela disponibilização dos Laboratórios de Automação e Usinagem e do Laboratório de Tribologia, respectivamente. Agradecem também ao Instituto Politécnico (IPUC) da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pela disponibilização do microscópio eletrônico de varredura. E, à Capes, pelo financiamento.

6. REFERÊNCIAS

- Alat, E. et al., 2016, “Multilayer (TiN, TiAlN) ceramic coatings for nuclear fuel cladding”, *Journal of Nuclear Materials*, v. 478, p. 236–244.
- ASM International. *Materials Selection and Design*. In: *ASM Handbook*. EUA: ASM International, 1997. v. 20.
- ASTM (American Society for testing and Materials) G99-05, “Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-disc apparatus.” 5 ed. 2010. 5 p. Disponível em <[http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?G99+05\(2010\)](http://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?G99+05(2010))>. Acesso em: 10 nov. 2015.
- Bharat, B., 2013, “Introduction to Tribology”, Second Edition, New York, John Wiley & Sons.
- Blau, P. J. “Friction science and technology: from concepts to applications”. 2nd ed. USA: Ed. CRC Press, 2009, 436p.
- Bobzin, K., 2016, “High-performance coatings for cutting tools”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*.
- Ceratizit América Latina Ltda. ToolMaker Solutions. São Paulo, 2016.
- Hutchings, I. M. “Tribology: friction and wear of engineering materials”. London: Ed. Edward Arnold, 1992, 273 p.
- ISO Standard 3685. “Tool life testing with single – point turning tools”. 2.ed. 1993.
- Jiang, J., Arnell, R.D., 2000, “The effect of substrate surface roughness on the wear of DLC coatings”. *Journal of Wear*, v. 239, pp. 1–9.
- Machado, A.R. et al., 2015. “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 2015.
- Mezghani, I., Demirci, I., Yousfi, M. e Mansori, E. 2013. “Running-in wear modeling honed surface for combustion engine cylinder liners”. *Wear* 302. pp. 1360–1369
- Rabinowicz, E. *Friction and wear of materials*. 2nd ed. USA: John Wiley & Sons. 1995. 315 p.
- Svahn, F., Kassman-rudolphi, A., Wallén, E., 2003, “The influence of surface roughness on friction and wear of machine element coatings”. *Wear* 254. Pp. 1092–1098
- Oréfice, R. L.; Pereira, M. M.; Mansur, H. S.; *Biomateriais: fundamentos e aplicações*. 1ed. 1reimpr. Rio de Janeiro: Cultura Médica: Guanabara Koogan, 2012.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SURFACE ROUGHNESS (R_a) ON TRIBOLOGICAL ASPECTS: CEMENTED CARBIDE PIN (WC-Co) SLIDING ON AISI 4340 STEEL ACCORDING TO THE NORM ASTM G99-05

Bárbara Cristina Mendanha Reis, babi_mreis@hotmail.com¹

Gláycen Rodrigo Amaral, rodrigopcpwm@gmail.com²

Ana Paula de Carvalho Costa, costa.anacarvalho@gmail.com³

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br⁴

¹Federal University of Minas Gerais (UFMG), Department of Production Engineering (DEP), Avenue Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG

²Pontifical Catholic University de Minas Gerais (PUC-MG), Street of Rosário, 1081, Angola, CEP 32604-115, Betim, MG

³College Pitágoras, Av. Juscelino Kubitschek, 229, Centro, CEP 32600-225, Betim, MG

⁴Federal University of Minas Gerais (UFMG), Department of Mechanical Engineering (DEMEC), Avenue Antônio Carlos, 6627, Pampulha, CEP 21270-901, Belo Horizonte, MG

Abstract: Among the microgeometric errors is the roughness characterized by the small asperities present on a surface. It is known that the roughness determines the contact area, the contact tension and pockets for lubricants. The aim of the present work is to identify the influence of the surface roughness (R_a) on the friction coefficient and wear rate between the hard metal and the ABNT 4340 steel when subjected to friction conditions in the test of the pin on disk. Contact was made between uncoated carbide pins against ABNT 4340 steel discs with the same dimensional values but with different surface roughness values. The first disc had a polished surface ($R_a = 0.05 \mu\text{m}$) and the others R_a values were approximately $0.274 \mu\text{m}$ and $0.592 \mu\text{m}$, respectively. The tests were carried out in the MT / 60 / NIH Tribometer, using the following parameters: normal load of 8N, non-lubricated environment, peripheral velocity of 70 m / min and rotations of 391 rpm. For the statistical analysis of the data, we used the Analysis of Variance (ANOVA) model. The results showed that the coefficient of friction was influenced by the roughness (R_a) and with the increase of the slipped distance this parameter no longer influences the coefficient of friction. SEM and EDS were used for image acquisition and characterization of surfaces. In general, for all disks, abrasion was observed as the predominant wear mechanism, however, in relation to the pins, EDS analyzes of the tops of these indicated the presence of AISI 4340 steel elements, which illustrates the adhesive wear.

Key words: roughness, friction coefficient, wear, MEV, EDS