

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DESLIZAMENTO NO SISTEMA TRIBOLÓGICO AÇO ABNT 1045/METAL DURO EM COMPARAÇÃO COM O SISTEMA FOFO NODULAR/METAL DURO

Filipe Figueiredo dos Santos, filipe_fsantos@hotmail.com¹

Adelti Assis Silva, adelti.assis@hotmail.com¹

João André Monteiro, joaoandremonteiro@hotmail.com¹

Alexandre Mendes Abrão, abrao@demec.ufmg.br¹

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

Geralda Cristina Durães de Godoy, gcgodoy@demet.ufmg.br²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte - MG, CEP 31270-901

²Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte - MG, CEP 31270-90

Resumo: Estudos que analisam o comportamento tribológico de materiais são de suma importância para a resolução de problemas de engenharia. Neste trabalho são estudadas as propriedades tribológicas de materiais de amplo uso na engenharia, a saber: metal duro, aço ABNT 1045 e ferro fundido nodular, sendo que estes dois últimos, por possuírem propriedades mecânicas próximas, são utilizados em aplicações similares. Para isso, foram realizadas duas análises comparativas de comportamento tribológico utilizando ensaios do tipo Pino sobre Disco. Na primeira foram utilizados os mesmos parâmetros de ensaio de um trabalho da literatura que estudou o deslizamento entre metal duro e aço ABNT 1045, porém com uma velocidade de deslizamento cinco vezes maior e analisou-se a influência desse aumento da velocidade de deslizamento sobre o coeficiente de atrito e o desgaste nas superfícies do disco de aço ABNT 1045 e do pino de metal duro. Posteriormente, analisou-se, com estes mesmos parâmetros, o coeficiente de atrito e o desgaste do disco de ferro fundido nodular (no lugar do disco de aço ABNT 1045) deslizando-se contra o pino de metal duro. O aumento da velocidade de deslizamento do pino de metal duro sobre o aço ABNT 1045 em cinco vezes provocou um aumento do coeficiente de atrito em cerca de quatro vezes (devido ao aumento significativo da temperatura na interface de contato) e do coeficiente de desgaste em cerca de sete vezes, enquanto o sistema se manteve em desgaste leve. Já a utilização do ferro fundido nodular no lugar do aço ABNT 1045, nessas mesmas condições de deslizamento contra o metal duro, levou à queda do coeficiente de atrito em 42,22%, devido à presença de grafita na estrutura do ferro fundido nodular, e ao aumento do coeficiente de desgaste em cerca de trinta e oito vezes, colocando o sistema em desgaste severo devido à maior abrasão e adesão no contato.

Palavras-chave: Tribologia, desgaste, ensaio Pino sobre Disco, aço ABNT 1045, ferro fundido nodular.

1. INTRODUÇÃO

Conforme afirmado por Franco (2014), o conhecimento das propriedades tribológicas de materiais é de grande importância para o desenvolvimento de formas de melhoria da vida útil de componentes mecânicos que, em grande maioria, trabalham em contato com outros componentes durante seu funcionamento.

O ensaio Pino sobre Disco é muito utilizado para avaliar o desempenho tribológico de contatos de deslizamento entre metais em escala de laboratório (Bortoletto *et al.*, 2013). Frequentemente, este experimento é empregado para avaliar o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste de sistemas tribológicos que merecem maiores investigações. O desgaste pode ser avaliado em termos de perda de massa ou modificações da geometria dos corpos em contato.

Segundo Hutchings e Shipway (2017), investigações em laboratório são normalmente feitas para examinar os mecanismos pelos quais o desgaste ocorre ou para simular aplicações práticas e fornecer informações relativas à taxa de desgaste e ao coeficiente de atrito. Na investigação proposta foram simulados os contatos de deslizamento e medidos a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito entre pares de materiais muito utilizados na engenharia, o metal duro (WC-Co), o aço ABNT 1045 e o ferro fundido nodular, e foram examinados os mecanismos de desgaste presentes.

O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise tribológica de desgaste e coeficiente de atrito por meio do ensaio Pino sobre Disco do contato de metal duro com aço ABNT 1045 sem tratamento superficial nas mesmas condições utilizadas por Franco (2014) com a exceção da velocidade de deslizamento, que foi aumentada em cinco vezes visando

avaliar sua influência sobre o desgaste e o coeficiente de atrito desse par de materiais, e realizar outro ensaio com estas mesmas condições para um contato entre metal duro e ferro fundido nodular visando comparar os resultados obtidos em termos de desgaste e coeficiente de atrito utilizando o aço ABNT 1045 e o ferro fundido nodular, materiais que possuem aplicações similares, em contato com o metal duro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Processos de desgaste ocorrem por perda de material e/ou dano superficial e podem ser classificados em desgaste por deslizamento, rolamento, oscilação, impacto ou erosão, dependendo da cinemática do sistema (Zum Gahr, 1987). O foco deste trabalho é o desgaste por deslizamento a seco, como é o caso para o ensaio Pino sobre Disco.

O processo de desgaste em deslizamento é bastante complexo e três problemas principais devem ser considerados: tensões e danos mecânicos, efeitos térmicos, reações químicas e interações da superfície (Hutchings e Shipway, 2017). Tensões presentes entre as superfícies em contato resultam em danos mecânicos aos materiais por deformação plástica ou fratura no nível das asperezas ou em níveis mais macroscópicos.

O comportamento do contato tribológico é relacionado ao comportamento de todo o sistema, não apenas aos materiais e depende das interações complexas entre as superfícies, que podem mudar com o tempo à medida que o contato se desenvolve (Hutchings e Shipway, 2017). Os principais aspectos a serem considerados nos testes são os materiais em contato, a forma e a dimensão das amostras, a carga aplicada, a velocidade de deslizamento e a condição do ambiente onde o teste foi realizado. É importante entender as características mecânicas e químicas do contato e basear hipóteses e modelos nesse conhecimento e na observação da natureza da degradação.

Quando duas superfícies estão em contato, uma ou ambas sofrem desgaste e assim, diversas formulações foram investigadas para descrever os diferentes mecanismos envolvidos neste fenômeno. Uma formulação comum foi proposta por Archard (Bortoleto *et al.*, 2013). De acordo com Archard e Hirst (1956), quando condições de equilíbrio são atingidas nas superfícies, as taxas de desgaste dos materiais são independentes da área de contato aparente, diretamente proporcionais à carga aplicada, a menos que uma mudança na carga cause uma mudança nas condições da superfície, e se mostram inversamente proporcionais à dureza do material mais macio. Estas regras se aplicam tanto para o desgaste leve ou quanto para o severo.

Zum Gahr (1987) afirma que os mecanismos básicos observados em processos de desgaste são adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica. Em muitos casos se observa uma combinação desses mecanismos. A deformação plástica não é, normalmente, considerada um mecanismo, mas tem um papel importante em muitos processos de desgaste.

Inicialmente, durante o deslizamento entre duas superfícies não há abrasão, porém algumas condições de desgaste por deslizamento podem produzir detritos que causam desgaste por abrasão no contato (Hutchings e Shipway, 2017). A partícula formada, normalmente, é composta por partes dos dois materiais em contato, porém ela pode também ser composta por apenas um, dependendo do sistema tribológico (Mendes, 2009). O dano por desgaste causado pela partícula formada durante o deslizamento pode ser explicado pelo modelo da Fig. 1 em que a partícula, encruada pelo seu processo de formação, encontra-se endurecida e produz desgaste abrasivo caracterizado pelo sulcamento.

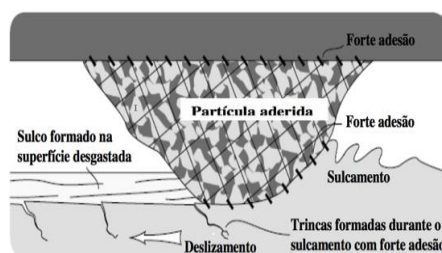


Figura 1. Mecanismo de desgaste por partículas encruadas no deslizamento (Stachowiak e Batchelor, 2000).

Segundo Rabinowicz (1995), atrito é a resistência ao movimento que existe quando um objeto sólido se move, ou tenta iniciar o movimento, tangencialmente em relação à superfície de outro que ele toca. Ele é manifestado como uma força, exercida por qualquer dos corpos em contato.

Amontons e Coulomb desenvolveram as três leis de atrito a seco em que se afirma que a força de atrito é diretamente proporcional à carga aplicada, independente da área de contato aparente e independente da velocidade de deslizamento (Hutchings e Shipway, 2017). Estas três leis fornecem uma estrutura quantitativa para a consideração do atrito entre materiais, porém, em aplicações práticas, é necessário verificar diversos outros aspectos que podem fazer com que o atrito existente não siga essas três leis (Rabinowicz, 1995). A primeira e segunda lei são geralmente bem obedecidas, já para a terceira lei o caso é diferente, a velocidade de deslizamento geralmente tem grande influência.

Desenvolvimentos da formulação de atrito para considerar as forças adesivas e forças de deformação na interface dos materiais em contato indicaram que o coeficiente de atrito é proporcional à resistência ao cisalhamento do material menos resistente, inversamente proporcional à dureza do material mais macio e aumenta com o ângulo de rugosidade

(Rabinowicz, 1995; Hutchings e Shipway, 2017). Apesar dessa formulação ter se mostrado essencialmente correta, a análise do coeficiente de atrito por meio dela é muito simplificada para os processos de atrito em aplicações práticas.

A presença de filmes lubrificantes ou óxidos pode fazer com que o atrito seja influenciado pelas propriedades desses filmes, promover menor área de contato real entre as superfícies, reduzir a energia de superfície e, com isso, reduzir o coeficiente de atrito (Rabinowicz, 1995). No início do deslizamento ocorre o crescimento das junções e, como consequência, aumento da área de contato real e do coeficiente de atrito. Um aumento da velocidade de deslizamento altera as condições e propriedades dos materiais na interface em função do aumento da temperatura, causado pelo fato da energia dissipada em atrito aparecer em forma de calor.

Segundo Hutchings e Shipway (2017), quando a temperatura de um metal em deslizamento é aumentada, as propriedades mecânicas mudam, a taxa de oxidação e outras reações químicas na superfície aumentam e pode ocorrer transformação de fase, tudo isso influencia o atrito. No deslizamento entre aço inoxidável austenítico e níquel puro se observa que o aumento da ductilidade dos metais em função do aumento da temperatura produz um aumento constante do coeficiente de atrito até 750° C, quando se forma na interface um filme espesso de óxido de níquel que faz o atrito atingir rapidamente seu menor valor. Comportamento similar é observado em aços, uma camada de Fe_3O_4 fornece atrito mais baixo do que uma camada de Fe_2O_3 ; o óxido predominante formado é função da temperatura e da composição da liga. A transformação de fase tem influência nas propriedades mecânicas dos materiais e pode resultar em grandes mudanças na condição de atrito. A mudança mais drástica ocorre quando o metal se aproxima da fusão e sua resistência cai rapidamente, o resultante aumento da adesão e da ductilidade nos pontos de contato aumenta significativamente o atrito. Quando o material se funde, porém, a força de atrito cai devido à perda da resistência ao cisalhamento.

Apenas há influência significativa da rugosidade sobre o atrito quando ela é muito baixa e a área de contato entre os materiais cresce excessivamente, ou quando o ângulo de rugosidade é muito alto e o material é muito mais duro do que o outro em contato, produzindo excessiva deformação deste (Rabinowicz, 1995). Porém, em valores de rugosidade normalmente utilizados na prática de engenharia, a força de atrito independe da rugosidade.

O aço ABNT 1045, amplamente utilizado na fabricação de eixos e peças, é um aço de médio teor de carbono, com resistência mecânica e dureza Brinell na faixa de 570 e 700 MPa e 170 e 210 HB, respectivamente (Moreira, 2011).

Feres (2011) afirma que o ferro fundido nodular com matriz perlítica obtido por fundição contínua horizontal pode ser utilizado para substituir os aços de médio carbono. O método elimina defeitos comuns durante a fundição convencional como rechupes, gases e inclusões. Destaca-se que as vantagens do ferro fundido nodular em relação ao aço são a menor densidade (cerca de 10% menor) e a melhor usinabilidade, devido à grafita presente na estrutura que facilita a quebra do cavaco e tem efeito lubrificante, o que diminui o coeficiente de atrito na interface peça/ferramenta.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Ensaio Pino sobre Disco foram realizados sem lubrificação em um tribômetro MicroTest modelo MT/60/NI para a determinação do coeficiente de atrito e do desgaste dos pares metal duro/aço ABNT 1045 e metal duro/ferro fundido nodular em uma condição de deslizamento a seco. A variação de massa dos pinos e discos foi medida em uma balança Shimadzu modelo AX200 com precisão de 0,1 mg e com capacidade máxima de medição de 200 g.

Nos dois pares testados, o material utilizado para o pino foi o metal duro (WC-Co) código ISO K10 e utilizou-se em um par o disco de aço ABNT 1045 e no outro par, o disco de ferro fundido nodular. Cada par de materiais foi testado duas vezes realizando-se, dessa forma, uma réplica para cada teste sem reutilização de amostra.

Para a realização dos testes de acordo com o planejamento experimental, foram utilizados quatro pinos de metal duro, dois discos de aço ABNT 1045 e dois discos de ferro fundido nodular. Os discos de aço ABNT 1045 foram fabricados com diâmetro de 51,2 mm e espessura de 8 mm, e os discos de ferro fundido nodular com diâmetro de 53,7 mm e espessura de 8 mm, e cada superfície de contato com o pino foi retificada. Os pinos, por sua vez, foram fabricados com ponta esférica polida e diâmetro de 6 mm. Amostras de cada pino e disco são mostradas na Fig. 2.

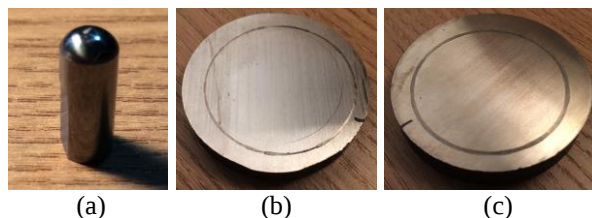


Figura 2. Pino de metal duro (a), disco de aço ABNT 1045 (b) e disco de ferro fundido nodular (c).

Em cada disco foram realizadas duas medidas de dureza Brinell uma no raio de 20 mm, utilizado no ensaio Pino sobre Disco, e outra no centro com o objetivo de avaliar a homogeneidade do material e verificar se cada par de amostras possui propriedades similares. Utilizou-se no teste de dureza, carga de 187,5 kg e esfera de 2,5 mm de diâmetro. Além disso, analisou-se a microestrutura dos discos na seção transversal com e sem ataque de Nital 4%.

Nos ensaios Pino sobre Disco, o maior desvio aritmético médio (R_a) permitido para os corpos em contato é de $0,8 \mu\text{m}$. Portanto, a rugosidade (R_a) da face onde o teste foi feito em cada disco foi medida antes dos ensaios utilizando-se um rugosímetro Taylor Hobson Precision modelo Surtronic 25 para garantir que ela era menor ou igual a $0,8 \mu\text{m}$.

Em Franco (2014), as condições do ensaio Pino sobre Disco foram: temperatura ambiente (25°C), distância de deslizamento de 1500 m, carga de 10 N e velocidade de deslizamento de 0,2 m/s. Com isso, para atender ao objetivo deste trabalho, aplicou-se a mesma carga de 10 N e buscou-se realizar o deslizamento pela mesma distância de 1500 m, porém foi selecionada uma velocidade de deslizamento cinco vezes maior (1,0 m/s). Neste trabalho, o contato do pino ocorreu no raio de 20 mm a partir do centro do disco, resultando na escolha da rotação de 477,46 rpm em todos os testes. Para percorrer a distância de deslizamento de 1500 m a essa velocidade, cada teste foi configurado para ter a duração de 25 min em temperatura ambiente (aproximadamente 25°C). Durante o teste, a força de atrito foi medida a cada 0,516 s por meio do *software* Nanovea Tribometer acoplado ao tribômetro e os valores de coeficiente de atrito foram calculados continuamente, também pelo *software*, pela razão entre a força de atrito e a carga normal.

O tribômetro utilizado possui um sistema de segurança que interrompe o ensaio caso o coeficiente de atrito medido no contato do pino com o disco atinja um valor igual ou superior a 3. Durante a realização dos testes, apenas o teste com a amostra #2 (aço ABNT 1045) durou a distância estabelecida de 1500 m. Os coeficientes de atrito entre os pinos e as amostras #1 (aço ABNT 1045), #3 (ferro fundido nodular) e #4 (ferro fundido nodular) atingiram um valor igual ou superior a 3 e os testes foram interrompidos pelo sistema após 235,89 m, 124,81 m e 122,40 m, respectivamente.

Após a realização dos quatro testes, foram avaliadas as superfícies de deslizamento em cada disco e pino utilizado por meio de um microscópio ótico para a busca de informações relativas ao contato entre os materiais nas condições selecionadas, principalmente evidências que indicassem os mecanismos de desgaste presentes durante o contato.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização dos materiais

As medidas de dureza realizadas na parte posterior dos discos conforme Fig. 3 são mostradas na Tab. 1.



Tabela 1. Resultados de dureza Brinell.

Amostra	Dureza [HB]	
	Centro (C)	Raio (R)
Aço ABNT 1045 (#1)	207	207
Aço ABNT 1045 (#2)	207	207
Ferro fundido nodular (#3)	229	229
Ferro fundido nodular (#4)	229	229

Figura 3. Posições de medição da dureza nos discos.

A microestrutura das amostras não mostrou alterações significativas em cada par de materiais. O aço ABNT 1045 ampliado em 100x apresentou inclusões globulares e estrutura composta por perlita e ferrita, conforme mostrado nas Figs. 4a e 4b. O ferro fundido nodular demonstrou 100% de nodularidade, matriz perlítica com aproximadamente 20% de ferrita e contagem de nódulos igual a $250/\text{mm}^2$, conforme mostrado na Figs. 4c e 4d.

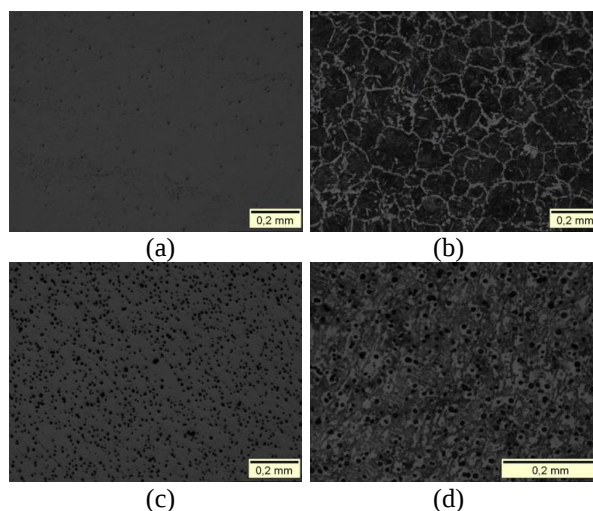


Figura 4. Microestrutura do aço ABNT 1045 sem (a) e com (b) ataque de Nital 4% e a microestrutura do ferro fundido nodular sem (c) e com (d) ataque de Nital 4%.

4.2. Rugosidade

Os parâmetros de rugosidade Ra (desvio médio aritmético), Rz (altura máxima do perfil) e Rt (altura total do perfil) da superfície de cada disco foram medidos em três posições diferentes antes dos testes, e na Tab. 2 são apresentados os valores médios encontrados. Conforme verificado na Tab. 2, os valores de Ra de todas as superfícies em que seriam realizados os testes no tribômetro são inferiores ao valor limite máximo de 0,8 μm .

Tabela 2. Valores médios de Ra, Rz e Rt medidos nas superfícies dos discos antes dos ensaios.

Amostra	Ra médio [μm]	Rz médio [μm]	Rt médio [μm]
Aço ABNT 1045 (#1)	0,36	2,53	3,17
Aço ABNT 1045 (#2)	0,44	3,03	3,63
Ferro fundido nodular (#3)	0,25	1,37	1,77
Ferro fundido nodular (#4)	0,39	2,43	2,93

Conforme indicado por Machado *et al.* (2009), para a medição das rugosidades foram atendidas as recomendações da norma ISO 4288 relativas aos comprimentos de amostragem e de avaliação em função da rugosidade encontrada.

4.3. Coeficientes de atrito

A Figura 5 mostra a variação do coeficiente de atrito no contato entre metal duro e as amostras #1 e #2 de aço ABNT 1045. A partir destes dados, foram calculadas as médias dos coeficientes de atrito em cada caso e, com elas, a média geral do coeficiente de atrito do contato do metal duro com o aço ABNT 1045 cujo valor é 1,35.

Os resultados obtidos por Franco (2014) para o coeficiente de atrito entre metal duro e aço ABNT 1045 sem tratamento superficial nas mesmas condições impostas aos espécimes deste trabalho, porém a velocidade de deslizamento de 0,2 m/s na distância percorrida de 1500 m, são mostrados na Fig. 6.

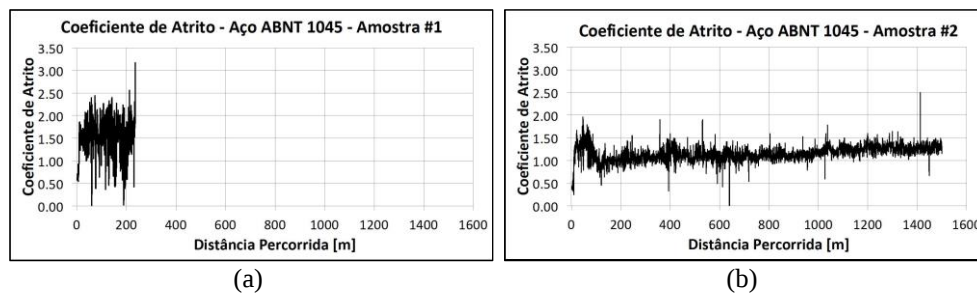


Figura 5. Variação do coeficiente de atrito para as amostras #1 (a) e #2 (c) de aço ABNT 1045.

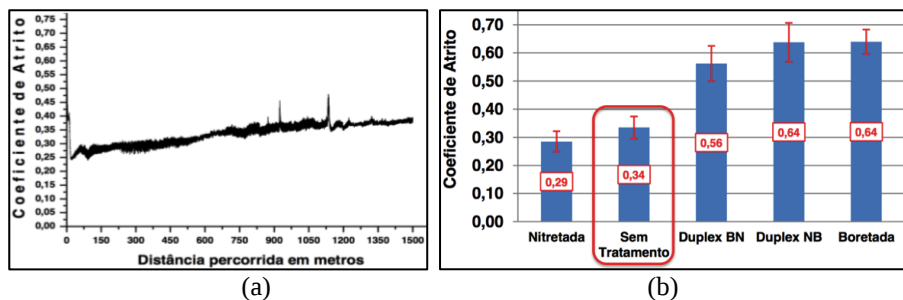


Figura 6. Variação do coeficiente de atrito (a) e coeficiente de atrito médio (b) no ensaio Pino sobre Disco entre metal duro e aço ABNT 1045 sem tratamento superficial (Franco, 2014).

Comparando-se os coeficientes de atrito médios do contato entre metal duro e aço ABNT 1045 obtidos neste trabalho e em Franco (2014), verifica-se que o aumento da velocidade de deslizamento em cinco vezes (de 0,2 m/s para 1,0 m/s) elevou o coeficiente de atrito médio do contato em cerca de quatro vezes, isto é, de 0,34 para 1,35. Isto pode ser explicado pelo aumento da temperatura na interface, que produziu um aumento da ductilidade e da adesão do material do disco nos pontos de contato com o pino e, como consequência, aumentou o coeficiente de atrito, de forma similar ao que ocorre com o aumento da temperatura no deslizamento entre aço inoxidável austenítico e níquel puro.

Além disso, Han *et al.* (2017) demonstrou que para um sistema de freio, a quantidade de calor gerada por atrito é diretamente proporcional a velocidade angular. Aplicando o mesmo conceito para o ensaio Pino sobre Disco realizado,

o aumento da velocidade influenciou diretamente a temperatura na interface de contato. Buckley (1981) afirmou que, com grande frequência, mudanças na velocidade de deslizamento produzem mudanças no coeficiente de atrito e relacionou também a velocidade de deslizamento com a temperatura da superfície. Outro ponto abordado é que mudanças físicas, metalúrgicas e químicas na superfície podem influenciar o coeficiente de atrito.

Em relação ao comportamento do coeficiente de atrito ao longo da distância percorrida, verifica-se uma similaridade entre os resultados deste trabalho e os de Franco (2014). Inicialmente, há um rápido aumento do coeficiente de atrito que pode ser devido à quebra dos óxidos da superfície do material, que apresentam baixo coeficiente de atrito em comparação com o do contato direto entre metais. Em seguida, ocorre uma redução também acelerada e, à medida que a distância aumenta, o coeficiente de atrito vai aumentando gradativamente até o fim do ensaio, o que pode ser devido às constantes alterações tribológicas do contato entre disco e pino durante o deslizamento.

Segundo Rabinowicz (1995), a variação regular do coeficiente de atrito entre dois valores extremos bem definidos verificada nas Figs. 5 e 6 ao longo de toda distância percorrida é causada pelo fenômeno *stick-slip* presente na interface de contato entre os materiais. Houve uma diferença do comportamento do coeficiente de atrito da amostra #1 em relação à #2, porém, nas análises para a qualificação do material mostradas anteriormente, a única diferença notada entre elas foi relacionada à rugosidade que, segundo Rabinowicz (1995), não influencia o coeficiente de atrito desde que esteja dentro de valores típicos utilizados na prática de engenharia, como é o caso das amostras utilizadas.

Na Figura 7 são mostrados os comportamentos do coeficiente de atrito do contato entre metal duro e as amostras #3 e #4 feitas de ferro fundido nodular. Com esses dados, foram calculadas as médias dos coeficientes de atrito relativos a cada amostra e, com elas, calculou-se a média geral do coeficiente de atrito desse contato cujo valor é 0,78.

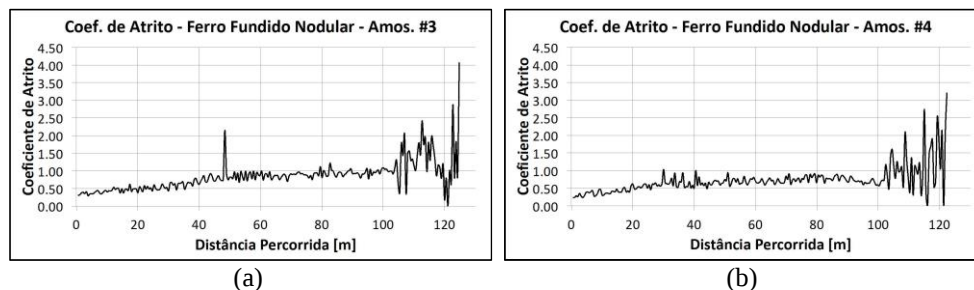


Figura 7. Variação do coeficiente de atrito para as amostras #3 (a) e #4 (b) de ferro fundido nodular.

Em relação ao contato entre metal duro e aço ABNT 1045, verifica-se que, com a utilização do ferro fundido nodular, o coeficiente de atrito médio do contato com o metal duro à velocidade de 1,0 m/s é reduzido em 42,22%, de 1,35 para 0,78. Isto pode ser explicado pela presença de grafita na estrutura do ferro fundido, que pode agir como um lubrificante sólido. Conforme informado por Rabinowicz (1995), as ligas multifásicas têm condições de deslizamento especialmente boas quando a fase menos proeminente é mais macia que a outra. Neste caso, a fase mais macia pode agir como lubrificante sólido e reduzir o atrito e o dano superficial. Este é o caso de ferros fundidos que contêm grafite.

O baixo atrito da grafita, presente na microestrutura do ferro fundido nodular mostrada na Fig. 4, é associado com sua estrutura lamelar e fraca ligação interplanar, mas nem todos os compostos com estas características possuem baixo atrito, dessa forma esta característica não pode ser atribuída apenas a esses fatores (Hutchings e Shipway, 2017).

O comportamento do coeficiente de atrito no contato com o ferro fundido nodular se mostrou significativamente diferente em relação ao que foi observado com o aço ABNT 1045. A alta variação encontrada a partir da distância de, aproximadamente, 105 m pode ser justificada por uma forte adesão entre o pino e disco e pelo fenômeno *stick-slip*.

4.4. Desgaste

Em cada ensaio, o contato ocorreu por deslizamento puro e se verifica pelos gráficos de coeficiente de atrito que o regime permanente foi atingido antes da interrupção. Dessa forma, o modelo de Archard pode ser aplicado para uma análise comparativa entre os desgastes observados. A taxa de desgaste de Archard (Q) é expressa pela Eq. (1), onde K é o coeficiente adimensional de desgaste, W é a carga normal e H é a dureza do material mais macio (Hutchings e Shipway, 2017).

$$Q = K \frac{W}{H} \quad (1)$$

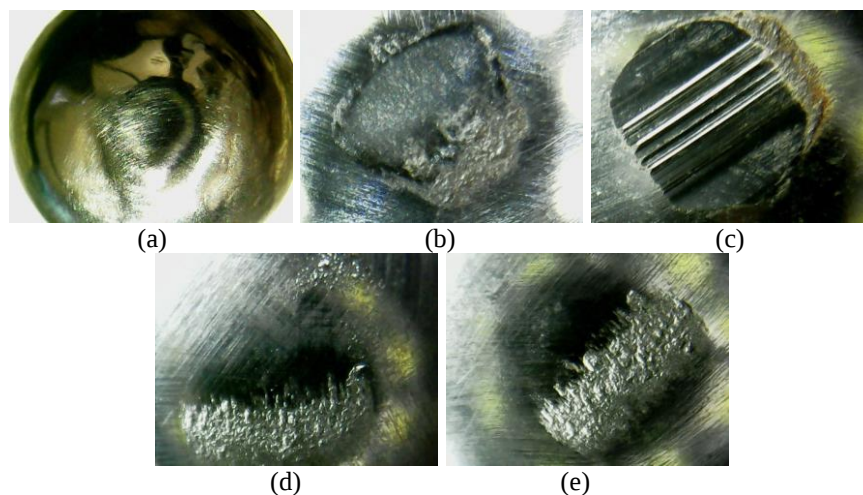
Com base na variação de massa dos discos medida em cada teste e na dureza dos materiais, distância percorrida e carga normal, as taxas e os coeficientes de desgaste médios foram calculados pelo modelo de Archard. Além disso, foram calculados a taxa e o coeficiente de desgaste relativos ao teste realizado por Franco (2014) a partir dos dados apresentados por ele de volume de material removido (VMR), dureza do material, distância percorrida e carga normal, 0,155 mm³, 237 HV, 1500 m e 10 N, respectivamente, visando a comparação entre os resultados. Os valores de Q e K calculados para os discos são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Taxas (Q) e coeficientes de desgaste (K) médios calculados para este trabalho e para Franco (2014).

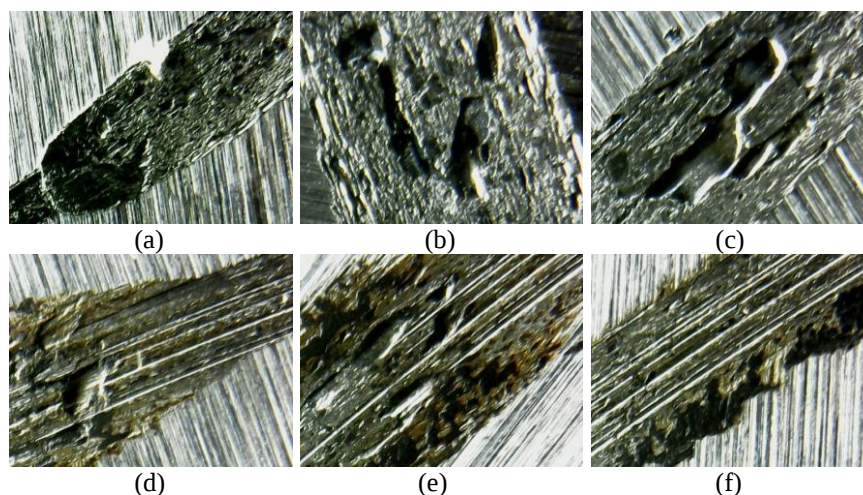
Material	Q[mm ³ /m]	K
Aço ABNT 1045	8,44E-04	1,71E-04
Aço ABNT 1045 (Franco, 2014)	1,03E-04	2,40E-05
Ferro fundido nodular	2,91E-02	6,54E-03

De acordo com Hutching e Shipway (2017), os valores de coeficiente de desgaste (K) classificados como desgaste severo se encontram na faixa da ordem de 10^{-2} a 10^{-3} e os classificados como desgaste leve na faixa da ordem de 10^{-4} a 10^{-5} . Dos coeficientes de desgaste mostrados na Tab. 3, verifica-se que apenas o deslizamento entre metal duro e ferro fundido nodular apresenta desgaste severo, enquanto que nos outros casos há desgaste leve. A partir da Tab. 3, pode-se verificar também que o aumento da velocidade de deslizamento entre metal duro e aço ABNT 1045 em cinco vezes levou a um aumento do coeficiente de desgaste do disco em cerca de sete vezes. Por outro lado, o uso do ferro fundido nodular no lugar do aço ABNT 1045 aumentou o coeficiente de desgaste do disco em cerca de trinta e oito vezes.

A Figura 8a mostra a superfície dos pinos antes do contato com os discos nos ensaios Pino sobre Disco, a superfície se encontrava espelhada e sem defeitos macroscópicos. As Figuras 8b, 8c, 8d e 8e, por outro lado, mostram as imagens das superfícies de contato dos quatro pinos após os ensaios obtidas de um microscópio ótico.

**Figura 8. Superfície dos pinos antes dos ensaios (a) e a superfície dos pinos #1 (b) e #2 (c) após o contato com o aço ABNT 1045, e dos pinos #3 (d) e #4 (e) após o contato com o ferro fundido nodular.**

Nas Figuras 2b e 2c, podem ser verificadas duas das pistas nas quais ocorreram os deslizamentos dos pinos nos ensaios. Em cada pista, as superfícies desgastadas foram avaliadas por meio de um microscópio ótico e na Fig. 9 são apresentadas imagens da pista de deslizamento das amostras #1 e #2 de aço ABNT 1045.

**Figura 9. Imagens da pista de deslizamento das amostras #1, (a), (b) e (c), e #2, (d), (e) e (f), de aço ABNT 1045.**

A partir da análise da Fig. 9, verifica-se a presença de deslocamento e material aderido, indicando a ocorrência de remoção e deposição de material sobre a própria superfície de deslizamento, características do mecanismo de desgaste por adesão. Além disso, destacam-se marcas de sulcamento, indicando também a presença do mecanismo de desgaste por abrasão durante o deslizamento.

Os desgastes por adesão e abrasão observados na Fig. 9 são confirmados ao se analisar as superfícies dos pinos nas Figs. 8b e 8c, onde se verifica material aderido que provoca abrasão no disco por meio do mecanismo ilustrado na Fig. 1. Como as superfícies dos pinos #1 e #2 apresentam sinais claros de desgaste, o material que produziu abrasão nos discos é composto por partículas dos dois materiais, metal duro e aço ABNT 1045, tornando-o mais abrasivo do que se fosse composto apenas por partículas de aço encruadas, já que as partículas de metal duro, devido a sua alta dureza (2000 – 2400 HV, segundo Hutchings e Shipway, 2017), aumentam muito a sua capacidade de produzir dano abrasivo.

Além disso, também são verificadas nas Figs. 9d, 9e e 9f alterações na superfície desgastada da amostra #2 que podem indicar a presença de óxidos. O teste realizado com a amostra #2 teve a maior duração e, devido a isto, a superfície manteve alta temperatura por mais tempo, isso permite maior modificação das características da superfície devido a reações triboquímicas com o ambiente.

A Figura 10 mostra imagens da pista de deslizamento na superfície das amostras #3 e #4 de ferro fundido nodular obtidas por meio de um microscópio ótico.

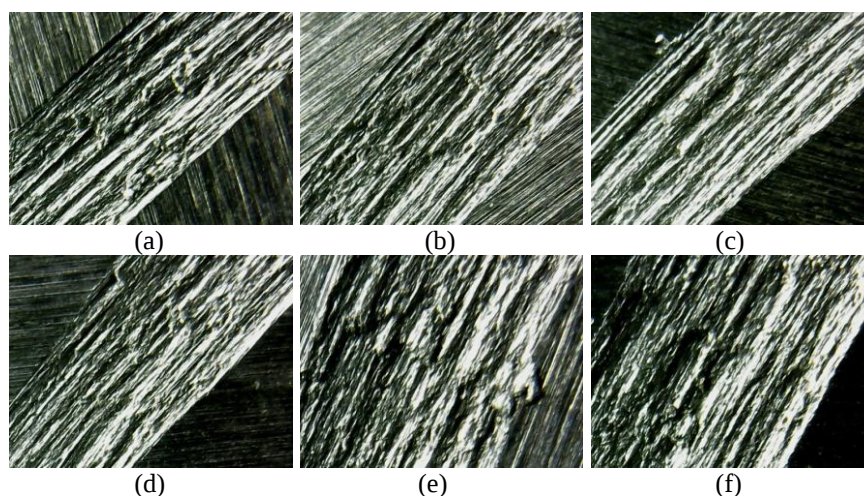


Figura 10. Imagens da pista de deslizamento nas amostras #3, (a), (b) e (c), e #4, (d), (e) e (f), de ferro fundido nodular.

As imagens apresentadas na Fig. 10 mostram que houve remoção e deposição de material sobre a própria pista de deslizamento, indicando, assim, a presença do mecanismo de desgaste por adesão, isto pode ser confirmado pela análise das superfícies dos pinos #3 e #4 nas Figs. 8d e 8e, onde se verifica a presença de grande quantidade de material aderido. Este material também pode justificar a grande quantidade de marcas de sulcamento e regiões das pistas das amostras #3 e #4 em que há notável acúmulo de materiais, pois, como mostrado pelo modelo da Fig. 1, o material aderido ao pino encontra-se muito encruado e produz desgaste por abrasão no sistema tribológico.

Além disso, verifica-se nas Figs. 8d e 8e que, no deslizamento contra os discos de ferro fundido nodular, os pinos de metal duro não sofreram desgaste significativo. Dessa forma, o material aderido é, predominantemente, composto por partículas encruadas de ferro fundido nodular. Outra observação é que, como verificado na Fig. 8, houve maior adesão de partículas de ferro fundido nodular do que adesão de partículas de aço ABNT 1045 ao pino de metal duro. Essa maior adesão pode ser explicada pela considerável compatibilidade entre a ferrita presente em, aproximadamente, 20% da microestrutura do ferro fundido nodular mostrada na Fig. 4c, e o cobalto (Co) e o tungstênio (W) contido na matriz do metal duro. Rabinowicz (1995) deixa claro que a compatibilidade metalúrgica entre os materiais, neste caso, entre Fe e Co, e Fe e W, provoca maior adesão entre os metais.

Segundo Rabinowicz (1995), no mecanismo de desgaste abrasivo, baixo atrito denota alta taxa de desgaste porque detritos de desgastes são mais facilmente removidos das superfícies em deslizamento. Isso pode indicar que no ferro fundido nodular também ocorreu maior desgaste abrasivo do que no aço ABNT 1045, pois aquele material apresentou um coeficiente de atrito bem menor que este.

5. CONCLUSÃO

A partir da avaliação dos coeficientes de atrito, coeficientes de desgaste de Archard e da trilha de desgaste nas superfícies de deslizamento após os ensaios Pino sobre Disco realizados com velocidade de deslizamento cinco vezes

maior que a utilizada por Franco (2014) para o mesmo contato entre metal duro e aço ABNT 1045 sem tratamento superficial, e para o contato entre metal duro e ferro fundido nodular, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- O aumento da velocidade de deslizamento de 0,2 para 1,0 m/s no contato entre metal duro e aço ABNT 1045 promove um aumento do coeficiente de atrito na interface em cerca de quatro vezes - de 0,34 obtido por Franco (2014) para 1,35 obtido durante os ensaios Pino sobre Disco realizados para este trabalho.
- O aumento do coeficiente de atrito como resultado do aumento da velocidade de deslizamento pode ser explicado por uma elevação significativa da temperatura nos pontos de contato entre o pino e o disco em função do consequente aumento da energia dissipada por atrito. Este aumento de temperatura pode fazer com que a ductilidade e a adesão do material do disco na interface aumente e, como consequência disso, ocorra o aumento do coeficiente de atrito.
- A utilização do ferro fundido nodular no lugar do aço ABNT 1045 provocou uma redução do coeficiente de atrito no contato com o metal duro em 42,22% (de 1,35 para 0,78).
- A redução do coeficiente de atrito com a utilização do ferro fundido no lugar do aço ABNT 1045 pode ser explicada pela presença, na estrutura do ferro fundido nodular, de uma fase proeminente macia, a grafita, que pode agir como lubrificante sólido e reduzir o atrito com o metal duro.
- O aumento da velocidade de deslizamento em cinco vezes realizado nos ensaios com aço ABNT 1045 provocou um aumento do coeficiente de desgaste em relação ao encontrado por Franco (2014) em cerca de sete vezes, porém ambos os casos se mantiveram dentro da classificação de Archard para desgaste leve.
- A utilização do ferro fundido nodular no lugar do aço ABNT 1045 apresentou um aumento no coeficiente de desgaste em cerca trinta e oito vezes e o contato passou a exibir desgaste severo segundo a classificação de Archard.
- O grande aumento do coeficiente de desgaste com a utilização do ferro fundido nodular pode ser justificado pela existência de maior desgaste abrasivo no contato entre ele e o metal duro, visto que, no mecanismo de desgaste abrasivo, baixo atrito denota alto desgaste, e também pela presença de maior desgaste adesivo nesse contato, explicado pela considerável compatibilidade entre a ferrita, muito presente no ferro fundido nodular, e o tungstênio e o cobalto presentes no metal duro.
- No aço ABNT 1045 foi verificada uma grande quantidade de deslocamento de material e, tanto no aço ABNT 1045 quanto no ferro fundido nodular, verificou-se bastante sulcamento do material na superfície produzido pelos detritos formados durante o deslizamento e pelo material aderido aos pinos. Dessa forma, nos dois materiais, pode-se concluir que os mecanismos de desgaste por abrasão e adesão estiveram presentes durante o deslizamento contra o pino de metal duro.

6. AGRADECIMENTOS

À UFMG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelo apoio à realização deste projeto.

7. REFERÊNCIAS

- Archard, J.F. and Hirst, W., 1956, "The wear of metals under unlubricated conditions", Proceedings of The Royal Society A, Vol. 236, pp. 397-410.
- Bortoleto, E.M., Rovani, A.C., Seriacopi, V., Profito, F.J., Zachariadis, D.C., Machado, I.F., Sinatora, A. and Souza, R.M., 2013, "Experimental and Numerical Analysis of Dry Contact in the Pin on Disc Test", Wear, Vol. 301, pp. 19-26, Ed. Elsevier Ltd.
- Buckley, D.H., 1981, "Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication", Ed. Elsevier Ltd., Cleveland, Ohio, USA.
- Feres, F., 2011, "Ferro fundido nodular pode substituir o aço – Tendências e oportunidades", O mundo da Usinagem, Vol. 6, p 35-36.
- Franco, C.J., 2014, "Avaliação do Comportamento Tribológico dos Aços ABNT 1020 e 1045 Submetidos a Tratamentos Termoquímicos Sólidos", Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville.
- Han, M.J, Lee, C.H, Park, T. W, Park, M.P and Min, S.M, 2017, "Coupled Thermo-Mechanical Analysis and Shape Optimization for Reducing Uneven Wear of Brake Pads", International Journal of Automotive Technology, Vol. 18, No. 6, pp. 1027-1035.
- Hutchings, I. and Shipway, P., 2017, "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials", Ed. Elsevier Ltd., Kidlington, United Kingdom, 388p.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Silva, M.B. e Coelho, R.T., 2009, "Teoria da Usinagem dos Materiais", Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, Brasil, 371p.
- Mendes, M.A.R.S., 2009, "Estudo do Desgaste de Ferramentas Com e Sem Revestimentos de Filmes Finos Utilizadas em Operações de Deformação a Frio", Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

- Moreira, M.C., 2011, "Serramento do Aço ABNT 1045 Utilizando Serras Circulares com Insertos de Metal Duro e Cermet", Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Rabinowicz, E., 1995, "Friction and Wear of Materials", John Wiley & Sons, Inc., 2 ed., New York, USA, 315p.
- Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W., 2000, "Engineering Tribology", Ed. Butterworth-Heinemann, 2 ed., Australia, 722p.
- Zum Gahr, K.H., 1987, "Microstructure and Wear of Materials", Ed. Elsevier Ltd., Amsterdam, The Netherlands, 560p.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

INFLUENCE OF SLIDING SPEED ON THE AISI 1045 STEEL/CEMENTED CARBIDE TRIBOLOGICAL SYSTEM IN COMPARISON TO THE NODULAR CAST IRON/CEMENTED CARBIDE SYSTEM

Filipe Figueiredo dos Santos, filipe_fsantos@hotmail.com¹

Adelti Assis Silva, adelti.assis@hotmail.com¹

João André Monteiro, joaoandremonteiro@hotmail.com¹

Alexandre Mendes Abrão, abrao@demec.ufmg.br¹

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

Geralda Cristina Durães de Godoy, gcgodoy@demet.ufmg.br²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte - MG, CEP 31270-901

²Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte - MG, CEP 31270-90

Abstract. Studies that analyze the tribological behavior of materials are of paramount importance for the resolution of engineering problems. This research studies the tribological properties of materials of large use in engineering, namely: cemented carbide, AISI 1045 steel and nodular cast iron, the latter two, due to their close mechanical properties, are used in similar applications. In order to accomplish this, two comparative analyses of tribological behavior were performed using Pin-on-Disc tests. In the first one, the same test parameters used by a research found in the literature, which studied the sliding contact of cemented carbide against AISI 1045 steel, were used, except for the sliding speed which was multiplied by five in order to analyze the influence of increasing the sliding speed on the coefficient of friction and wear of the AISI 1045 steel disc and cemented carbide pin interface. Then, the coefficient of friction and the wear of the nodular cast iron disc (in place of the AISI 1045 steel disc) sliding against the cemented carbide pin were analyzed using those same test parameters. Multiplying the sliding speed of the cemented carbide pin against the AISI 1045 steel disc by five resulted in an increase of the coefficient of friction by about four times (due to the significant increase in the temperature at the contact interface) and in an increase of the wear coefficient by about seven times, while the system remained in mild wear. On the other hand, the use of nodular cast iron instead of AISI 1045 steel in the same sliding conditions against cemented carbide, led to the reduction of the coefficient of friction by 42.22%, due to the presence of graphite in the structure of the nodular cast iron, and to the increase of the wear coefficient by about thirty eight times, placing the system in severe wear due to the increased abrasion and adhesion on the contact.

Keywords: Tribology, wear, Pin-on-Disc test, AISI 1045 steel, nodular cast iron.