

ABRASÃO-CORROSÃO: NOVAS INFORMAÇÕES A PARTIR DA MEDIDA DAS FORÇAS NO CONTATO*

Marcelo Braga dos Santos¹
Wiliam da Silva Labiapar²
Miguel Angel Narvaez Ardila³
José Daniel Biasoli de Mello⁴

Resumo

Visando o estudo da sinergia entre abrasão e corrosão concebeu-se um novo instrumento, permitindo a medição das forças que atuam sobre o contacto. O dispositivo consiste de um equipamento de micro-abrasão por esfera fixa dotada de uma célula de carga de três eixos, e uma célula eletroquímica. Uma membrana protetora flexível foi desenvolvida para isolar a célula de carga, situado no exterior da célula eletroquímica, da amostra no interior da célula. Uma solução corrosiva com partículas abrasivas é continuamente alimentada no contacto entre a amostra e a esfera. Os ensaios de abrasão-corrosão foram realizados simultaneamente em aços inoxidáveis e ferríticos. Também foram executados ensaios de micro-abrasão e corrosão separadamente para avaliar a capacidade do equipamento nos estudos da sinergia entre a micro-abrasão e a corrosão. Para as três condições de ensaios (micro-abrasão, corrosão e abrasão-corrosão) o equipamento se mostrou eficiente em evidenciar a variação nas propriedades do material com excelente repetibilidade. Para os aços austeníticos, as mudanças nas condições de carregamento nos ensaios de abrasão-corrosão induziram variações significativas nas curvas de polarização. A capacidade única de acompanhar as forças que atuam sobre o contato dos processos de abrasão-corrosão pode abrir caminho para novas descobertas sobre o estudo da sinergia na abrasão-corrosão, em especial, a dissipação de energia na interface quantificada através do coeficiente de atrito.

Palavras-chave: Abrasão-Corrosão; Aço inoxidável; Equipamento; Medida de força.

ABRASION-CORROSION: NEW INSIGHTS FROM FORCE MEASUREMENTS

Abstract

Aiming at the study of synergy between the abrasion and corrosion a new instrument, enabling the measurement of forces acting on the contact, has been designed. The test rig consists of a fixed-ball micro-abrasion tester, where the specimen is supported by a three-axis load cell, and an electrochemical cell. A very flexible protective membrane has been designed to isolate the load cell, located outside the electrochemical cell, from the sample inside the cell. A mixture of a corrosive fluid and abrasive particles is continuously fed to the contact. Simultaneous micro-abrasion/corrosion tests have been performed in austenitic and ferritic stainless steels. In addition, independent micro-abrasion and corrosion tests were also carried out to evaluate the capacity of the rig to account for the synergy between micro-abrasion and corrosion. For all three tests (micro-abrasion, corrosion and combined micro-abrasion/corrosion) the rig was efficient to respond to variation in material properties and showed excellent repeatability. For the austenitic steels, changes in loading conditions in combined micro-abrasion and corrosion tests induced significant variations on polarization curves. The unique capability of monitoring the forces acting on the contact of abrasion-corrosion processes could pave the way for new insights into the study of abrasion-corrosion, in particular the dissipation of energy at the interface quantified via the friction coefficient.

Keywords: Abrasion-corrosion; Stainless steel; Test rig; Force measurements.

¹ Ph.D, Professor Associado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil

² M. Sc, Pesquisador, P&D Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil

³ M. Sc, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil

⁴ Ph.D, Professor Emérito, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O desgaste abrasivo-corrosivo desempenha um papel importante na falha de sistemas tribológicos. Como exemplos de estruturas sujeitas a ambos os fenômenos existem bombas e válvulas no processamento na indústria de óleo ou gás, na indústria naval, implantes cirúrgicos metálicos substituindo partes ósseas do corpo humano [1,2] e na indústria do biocombustível (etanol) [3].

Normalmente o principal mecanismo de danos, corrosão [4-6] ou abrasão [7,8], é estudado separadamente. Apesar dos estudos via modelagem e da investigação experimental feita para avaliar as interações entre os danos mecânicos e corrosivos, as falhas dos materiais pela ação combinada desses fenômenos ainda não são totalmente compreendidas [9].

Alguns ensaios de abrasão e corrosão separadamente são realizados, com associação desses fenômenos através de tratamento matemático posterior, mas eles apresentam muita dispersão e erros [10]. A fim de se obter resultados mais precisos, o ensaio deve incluir o efeito combinado. Por isso, várias adaptações são feitas para se estudar alguns mecanismos de desgaste combinados a uma componente de corrosão.

Neste sentido, diferentes técnicas de corrosão como impedância eletroquímica [11,12], ruído eletroquímico [13,14] e polarização potenciodinâmica/potenciostática [15,16] têm sido associados a diferentes ensaios de desgaste como por deslizamento alternado “*reciprocate*” [17], pino sobre disco [18], cilindro sobre plano [19], abrasão por roda de borracha [20], erosão [21], “*scratch test*” [22] e, em especial, micro-abrasão [1,9,10,21-26].

O efeito combinado da abrasão e corrosão pode conduzir a danos maiores do que simplesmente a soma das duas partes e, como resultado, pode encurtar consideravelmente a vida útil dos componentes em serviço [10].

Lekka et al. [19] estudaram revestimentos de níquel puro e revestimentos Ni + SiC, utilizando um cilindro de alumina sobre a superfície revestida a 200 rpm, com cargas variáveis entre 1 e 3 kg. Foi utilizada a solução 0,5M Na₂SO₄ como eletrólito. Observou-se que o potencial de corrosão medido sob condições abrasivas tem grande diferença para os dois tipos de revestimentos, mas não mostram grandes diferenças quanto ao coeficiente de atrito. Bateni et al. [27] estudaram o comportamento de desgaste corrosivo do aço carbono SAE 1045 e aço inoxidável AISI 304 em solução de 3,5% NaCl a um teste pino sobre disco. Demonstrando a influência do ambiente corrosivo no coeficiente de atrito.

A fim de compreender como as variáveis tribossistema afetam o atrito, a utilização de célula de carga capaz de medir simultaneamente a força normal e tangencial durante os testes de abrasão-corrosão é obrigatória. Em geral, os equipamentos de abrasão relatados na literatura, em particular os micro-abrasão anteriormente mencionado [1,9,10,16,21,24] não são capazes de medir a força de atrito e, como consequência, o coeficiente de atrito. O monitoramento das forças associadas no sistema abrasivo corrosivo em tempo real auxilia na compreensão da sinergia entre esses dois fenômenos. Neste sentido, a influência da corrosão sobre a abrasão pode ser mais bem entendida pela observação do comportamento da evolução do coeficiente de atrito nos testes de abrasão-corrosão. Este trabalho tem como objetivo mostrar o desenvolvimento de um aparelho original para estudar o comportamento de materiais sujeitos a ambiente abrasivo-corrosivo, monitorando as forças atuantes no processo de desgaste.

2 METODOLOGIA

A Figura 1 resume a abordagem metodológica utilizada neste trabalho.

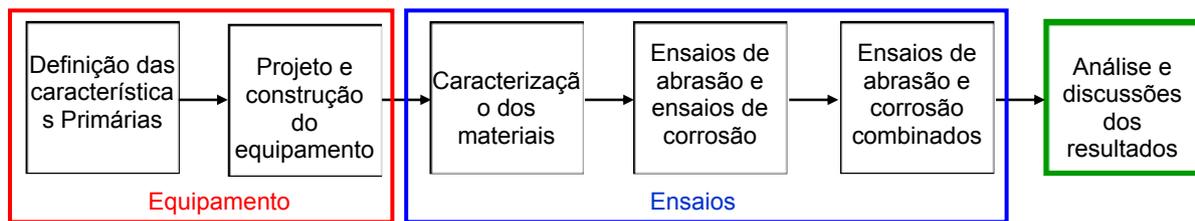


Figura 1 - Esquema de abordagem metodológica utilizada.

2.1 Equipamento de Teste

Um equipamento híbrido foi concebido e combinando com um potenciostato e um equipamento de micro-abrasão por esfera fixa, conforme esquema da Figura 2.

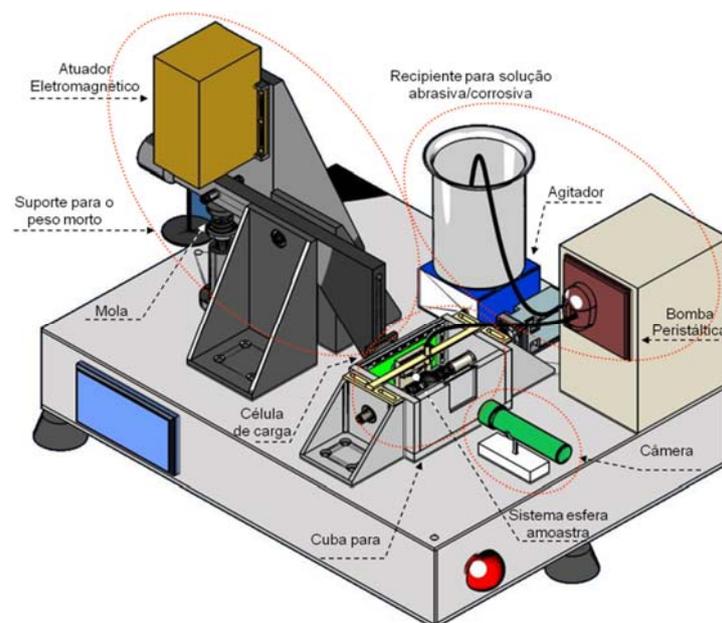


Figura 2 - Desenho esquemático do dispositivo de ensaio.

O equipamento pode ser dividido em quatro partes: Monitoramento da carga e da rotação, sistema eletroquímico, aquisição e processamento de imagens além de preparação das soluções. A parte mais simples é o sistema de a preparação da solução, composto por um agitador eletromagnético e uma bomba peristáltica, garantindo a homogeneidade e o fluxo constante de solução durante os ensaios. Uma câmara digital assegura a medição da calota de desgaste. A carga pode ser aplicada utilizando o peso morto ou um atuador eletromagnético, portanto, é possível executar um teste com uma força normal fixa ou variável. A força é transmitida do seu ponto de aplicação para a amostra por um sistema de braço de alavanca, Figura 3a. Na Figura 3b tem-se uma vista geral da célula eletroquímica.

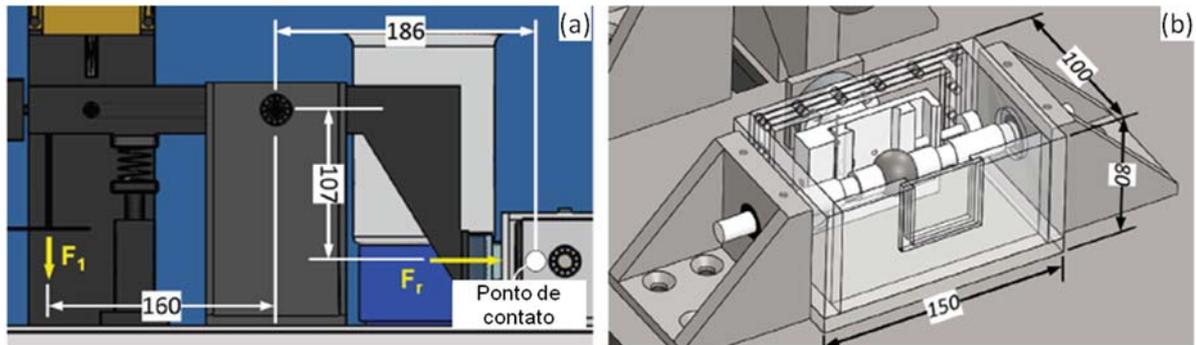


Figura 3 - (a) Sistema de aplicação de força pelo braço de alavanca e (b) célula eletroquímica.

Na Figura 4 podem ser vistos os detalhes do posicionamento da célula de carga.

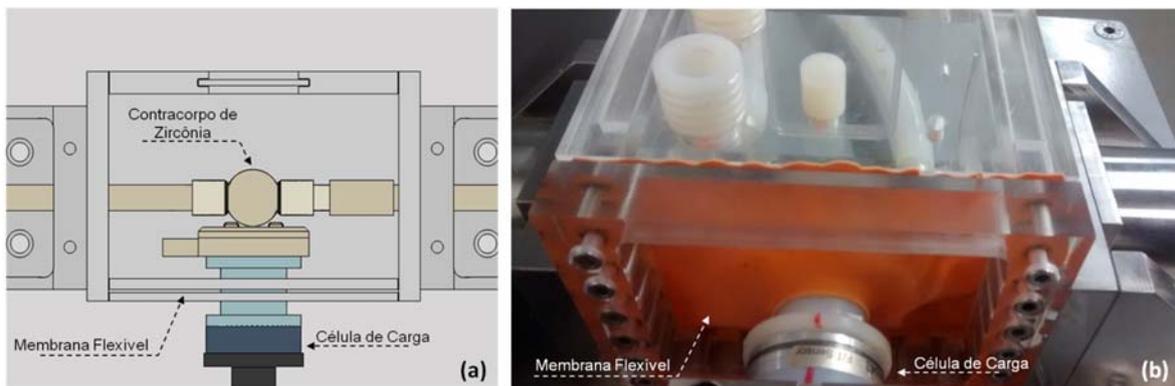


Figura 4. (a) Configuração esquemática da célula de carga e a membrana flexível e (b) o condição real da membrana flexível.

Para proteger a célula de carga da solução corrosiva esta foi posicionada no exterior da célula eletroquímica e a carga é transmitida, usando uma haste polimérica, através de uma membrana flexível agindo como uma barreira, cuja interferência mecânica é desprezível.

A velocidade de rotação da esfera é assegurada por um motor de corrente contínua controlado, usando controle em malha fechada, onde o sinal de realimentação de velocidade é fornecida por um encoder.

A célula eletroquímica é feita de metacrilato de metila. Os eletrodos de um potenciostato Biologic, modelo SP-150, foram posicionados no interior da célula eletroquímica. Um nível constante de eletrólito garante o contato elétrico entre todos os elétrodos.

Resumindo, o equipamento foi projetado para dar maior flexibilidade aos ensaios, sendo:

a) Características mecânicas:

- 1 - Carga máxima em cada uma das três direções: 18 N com 4 resolução mN;
- 2 - Momento máximo em cada uma das três direções: 250 N mm com resolução de 0,05 N.mm;
- 3 - Velocidade de rotação máxima: 3000 rpm;
- 4 - "Velocidade de rotação mínima: 1 rpm.

b) - Características eletroquímicas:

- 1 - Faixa de corrente: 10 mA-800 mA;
- 2 - Tensão: 2,5 V;
- 3 - Taxa de Aquisição: 200 kHz.

2.2 Testes

Os testes foram realizados utilizando amostras de aço inoxidável AISI 304 e AISI 430, como mostrado na Tabela 1. O primeiro é um aço inoxidável austenítico, e o segundo é um aço inoxidável ferrítico estabilizado com nióbio.

Tabela 1 - Composição química e dureza Vickers (HV₁₀) das amostras.

The content of Table 1 is completely redacted with a solid black box.

As amostras foram cortadas nas dimensões de 35 x 25 x 5 mm e, em seguida, lixada com lixa 220 e 600. Após este passo, foram submetidas a limpeza por ultrassom em banho de acetona durante 5 min.

As amostras foram utilizadas nos ensaios de abrasão, corrosão e ensaios combinados de abrasão-corrosão. Os ensaio de abrasão utilizaram solução abrasiva com 10% em peso de SiO₂ ($\phi = 5 \mu\text{m}$) em água destilada. Testes de micro-abrasão usam um fluido para transportar as partículas abrasivas para a superfície de contato ativa e a água destilada é normalmente usada para este propósito [28-40]. É muito bem conhecido que os aços inoxidáveis podem formar uma camada passiva auto-regenerativa em diferentes meios, de acordo com Massoud et al. [41], a água é um meio passivante para os aços inoxidáveis. A reação com o oxigênio forma uma fina camada de óxido de cromo, quando o conteúdo é maior do que 11%, protegendo-o contra a corrosão [42]. Neste contexto, a água destilada pode ser considerada como um meio neutro, sem o efeito corrosivo para o aço inoxidável podendo ser considerado um teste de abrasão pura.

Foi utilizado como contra-corpo uma esfera de zircônia $\phi = 25,4 \text{ mm}$ (Ra $0,34 \pm 0,03 \mu\text{m}$). A velocidade de rotação foi ajustada para 150 rpm, e a carga normal foi definida como $1,10 \pm 0,02 \text{ N}$.

Para identificar o regime permanente de desgaste, os testes foram interrompidos cada 3 min. para medir o diâmetro da calota e calcular o coeficiente de desgaste k [39,40].

Para os ensaios de corrosão e abrasão-corrosão foi utilizada uma área de 2cm^2 delimitada por esmalte sintético transparente a base de nitrocelulose e cera parafinada. Um fio de cobre foi colado com tinta a base de prata para estabelecer o contato elétrico. Todo o processo de preparação ocorreu pelo menos 8 horas antes de cada ensaio, assegurando a reprodutibilidade dos ensaios com a secagem da cera, do esmalte sintético, fixação do fio de cobre e uma passivação da amostra ao ar.

Os ensaios de corrosão foram realizados usando uma solução de 1N H₂SO₄. A amostra foi parcialmente submersa na solução, que foi bombeada a 1,7 ml/min. cobrindo área exposta, criando uma ponte salina com a solução da célula eletrolítica. A curva de polarização anódica foi obtida utilizando uma taxa de aumento de potencial de 1 mV/s.

Os ensaios de abrasão-corrosão foram realizados utilizando os mesmos parâmetros impostos aos testes de abrasão e de corrosão, mas aplicados simultaneamente. A solução abrasiva-corrosiva utilizou 1N H₂SO₄ em vez de água destilada como agente dispersante do abrasivo (10% em peso de SiO₂ $\phi = 5 \mu\text{m}$). Para estudar a influência carga aplicada sobre a curva de polarização foram utilizados dois níveis de força

normal ($0,49 \pm 0,1$ N e $1,23 \pm 0,12$ N). Para todos os testes de corrosão e abrasão-corrosão, a solução do sistema foi arejada. Para todos os casos, pelo menos 3 testes foram realizados em cada configuração para verificar a reprodutibilidade dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evolução do coeficiente de desgaste k com a evolução do ensaio de micro-abrasão é mostrado na Figura 5 para os aços AISI 304 e AISI 430.

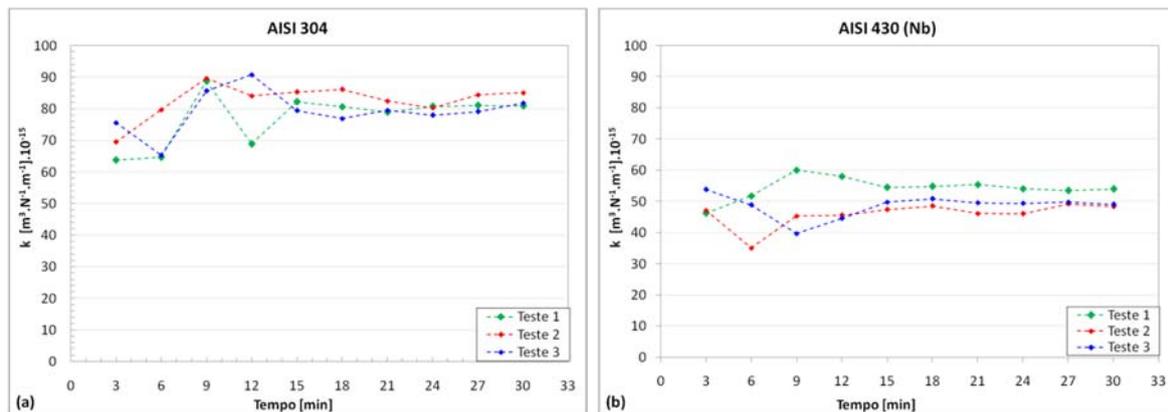


Figura 5 - Evolução do coeficiente de desgaste com o tempo de ensaio em solução de 10% em peso de SiO_2 em água destilada. (a) AISI 304 e (b) AISI 430

O coeficiente de desgaste k varia de uma forma aleatória até 15 min. de ensaio. Após esse tempo a dispersão diminui e a evolução do coeficiente de desgaste k torna-se mais estável. O regime de desgaste permanente, isto é, a estabilidade do coeficiente de desgaste k , foi alcançada para todas as condições testadas após 15 min. Este regime é representado por um coeficiente de desgaste médio (k), que é obtido pelo cálculo da média dos resultados com os tempos de ensaio de 15, 18, 21, 24, 27 e 30 minutos das três repetições, isto é, este uma média de 18 testes realizados em cada condição. Na Figura 6a são apresentados estes resultados do coeficiente de desgaste k , enquanto na Figura 6b o coeficiente de atrito, devido a utilização dos sinais da célula de carga 3D.

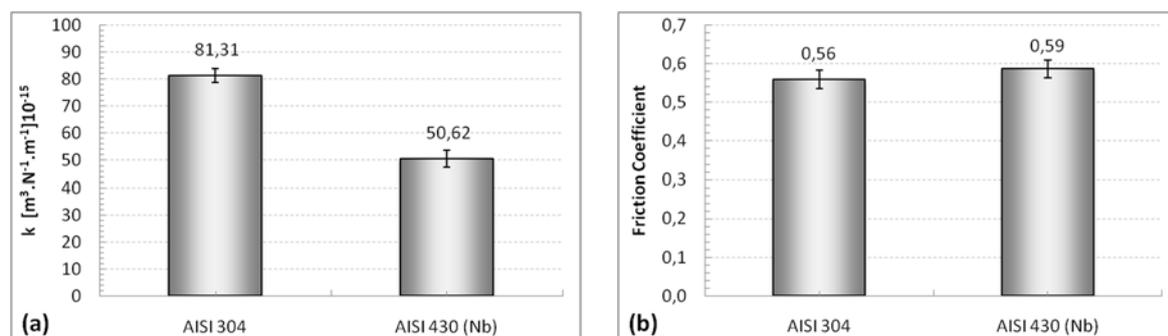


Figura 6 (a) Coeficiente de desgaste k ; e (b) Coeficiente de atrito para os aços AISI 304 e AISI 430 estabilizado com nióbio.

As variações de ambos os parâmetros dentro do regime permanente de desgaste mostram claramente que o equipamento de teste desenvolvido apresenta estabilidade satisfatória e repetibilidade.

Embora o aço AISI 304 tenha maior dureza, coeficiente de desgaste é quase 60% superior ao AISI 430, Figura 6a, e o coeficiente de atrito quase equivalente, Figura 6b. É bem conhecido na literatura que não existe uma correlação diretamente a dureza elevada ligada diretamente à resistência à abrasão [42,43-47]. Muitos outros parâmetros tribológicos/micro-estruturais influenciam a resistência à abrasão, em particular a capacidade de encruamento e a tenacidade. Um dos mais influentes é a capacidade de endurecimento por deformação do material, tornando-o mais duro após a deformação [42].

Em uma primeira abordagem tentou-se correlacionar a resistência à abrasão com a capacidade de encruamento, medindo os perfis de microdureza abaixo da calota produzida pelo ensaio de micro-abrasão, Figura 7.

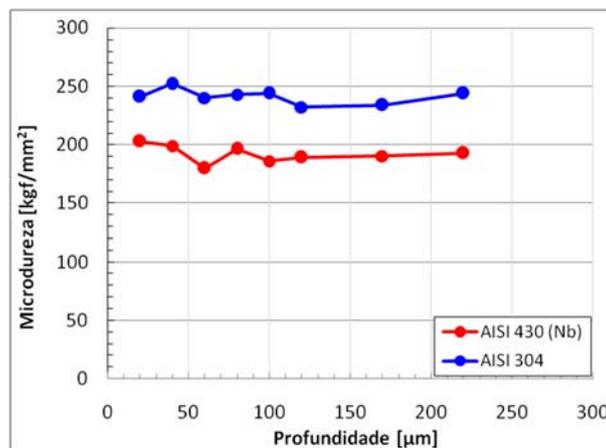


Figura 7 - Evolução da micro-dureza com a distância a partir da superfície da calota de desgaste.

O material mais duro (AISI 304) apresentou a maior dureza na sub-superfície e quase nenhuma capacidade de endurecimento. Em termos de mecanismos de desgaste, os aços também apresentaram comportamentos equivalentes, com deslizamento de partículas produzindo sulcos alinhados, Figura 8.

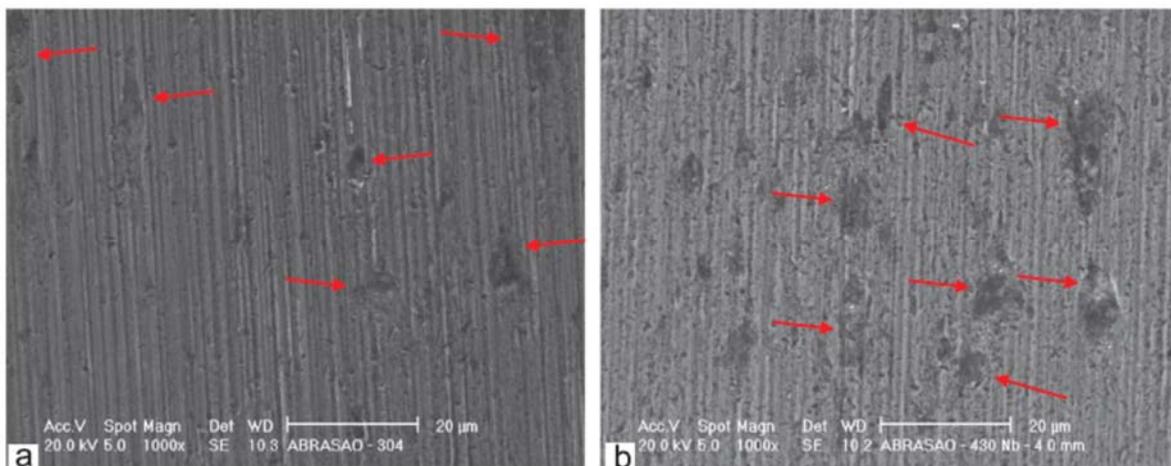


Figura 8 – Superfície de desgaste típicas para os aços (a) 304 e (b) 430 Nb.

Nota-se ainda uma espécie de eventos de arrancamento de material da superfície (setas na Figura 8), que, em princípio, é mais prevalente na calota de desgaste para o aço AISI 430, o que contradiz os resultados do coeficiente de desgaste. Desta forma, os resultados obtidos ainda necessitam de mais pesquisas para entender o

que levou a um aumento do desgaste de mais acentuado no aço 304 em relação ao aço 430.

A estabilidade das curvas de polarização também foi analisada. As curvas de polarização potencio-dinâmicas exibem excelente repetibilidade, se não melhores do que aquelas habitualmente referidas na literatura. Na Figura 9a, pode ser verificada a excelente repetibilidade entre as curvas de polarização para os três diferentes ensaios realizados nas amostras de AISI 304, com densidade de corrente passiva de $0,013 \pm 0,003 \text{ mA/cm}^2$. Isto é um indicativo de que a célula eletroquímica é totalmente isolada e livre de interferências eletromagnéticas. A instabilidade observada para aço AISI 430 (densidade de corrente passiva $0,021 \pm 0,004 \text{ mA/cm}^2$) mostrada na Figura 9b ainda não é bem compreendida e mais estudos são necessários para elucidar o fenômeno.

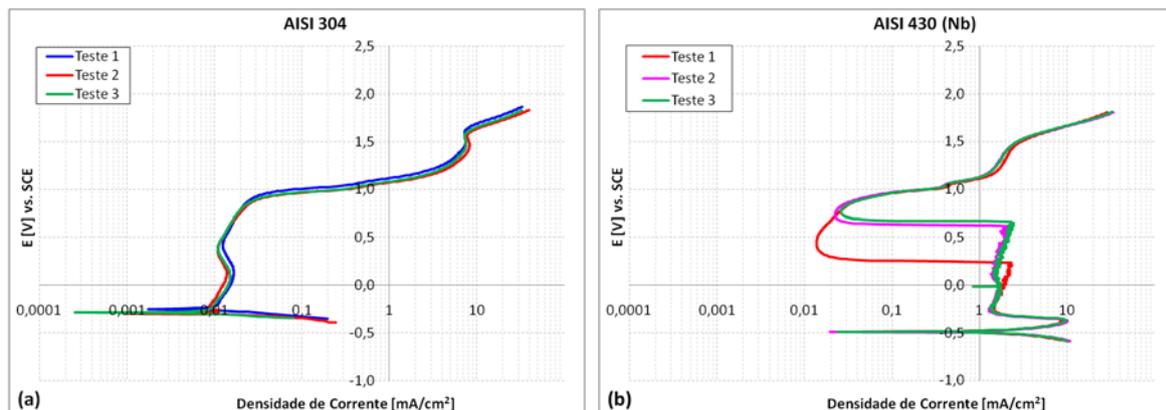


Figura 9 - Curvas de polarização típicas. Amostras parcialmente submersas numa solução de 1N H_2SO_4 , 1,7 ml/min. e taxa de aumento de potencial de 1 mV/s. (a) AISI 304. (b) AISI 430 (Nb).

As curvas de polarização obtidas em testes preliminares, para aços de baixo e alto teor de Cr (11 e 17,5% em peso) são bastante estáveis e apresentam uma repetibilidade notável entre os três testes diferentes. Qiao et al.[48] relataram distúrbios nas curvas de polarização como uma característica inerente da instabilidade do filme passivo. Como indicado na literatura [49], há um valor crítico de conteúdo Cr para que os aços inoxidáveis não apresentem uma completa passivação. As flutuações e falta de repetibilidade são associadas a esta classe de aço inoxidável (AISI 430) em ambientes aerados e agitados devido ao fluxo de eletrólito. Os fenômenos parecem depender particularmente no conteúdo Cr, uma vez que ocorreu tanto para os aços estabilizados ao nióbio como sem a estabilização.

O efeito da força aplicada nas curvas de polarização está ilustrado na Figura 10, com as alterações na densidade de corrente bastantes significativas: a densidade de corrente passiva aumentou de $0,070 \pm 0,014 \text{ mA/cm}^2$ para $0,123 \pm 0,009 \text{ mA/cm}^2$ com o aumento da força de $0,49 \pm 0,10 \text{ N}$ para $1,23 \pm 0,12 \text{ N}$.

Comparando as curvas de polarização de corrosão pura, Figura 9, e de abrasão-corrosão, Figura 10, é evidente que a ação de abrasão aumenta a densidade de corrente passiva, como apresentado na Figura 11.

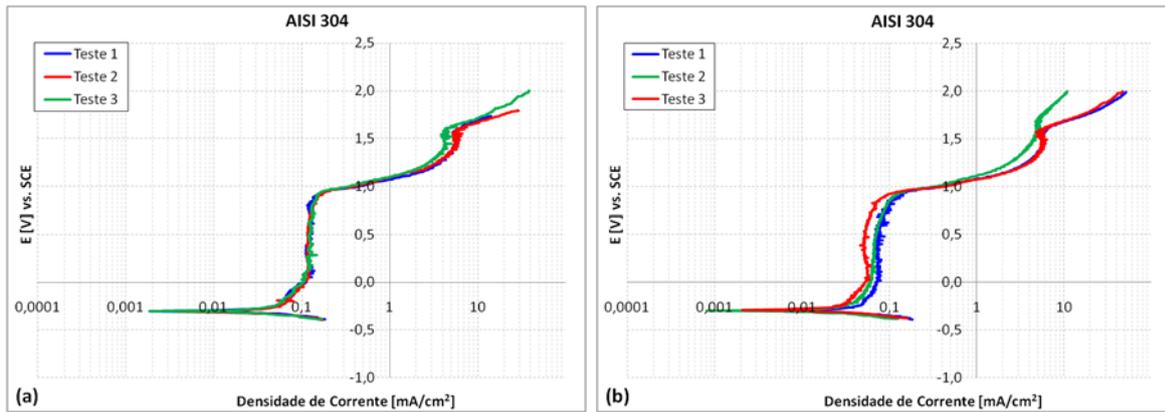


Figura 10 - Efeitos de força normal na curva de polarização durante ensaio abrasivo-corrosivo em aço AISI 304. (a) $F_n = 1,23 \pm 0,12$ N; e (b) $F_n = 0,49 \pm 0,1$ N.

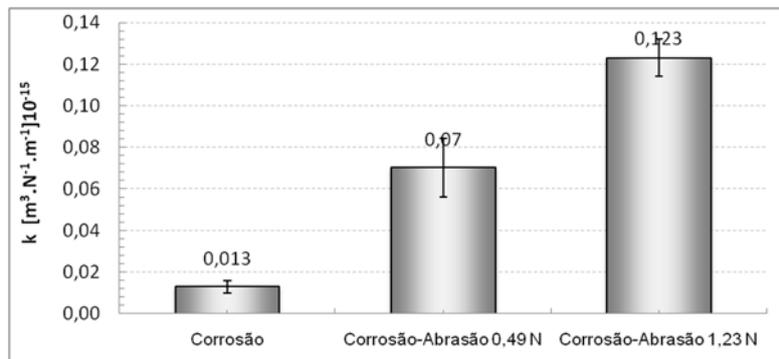


Figura 11 - Média da densidade de corrente passiva.

Para melhor compreender este ponto, testes adicionais com variação da força normal durante o ensaio no patamar de passivação foram realizadas. A Figura 12a mostra uma curva típica de polarização obtida sob estas condições.

As curvas de polarização obtidas com uma força normal constante também é mostrada como referência. A reversibilidade do fenômeno é claramente ilustrado: aos 25 minutos da experiência, a carga normal diminuiu de 1,3 para 0,5 N, o que levou a uma diminuição na densidade de corrente passiva de 0,12 para 0,06 mA/cm², conforme mostrado na Figura 13a, que está associada com uma diminuição no coeficiente de fricção (de 0,32 para 0,23), evidenciado na Figura 13b. No minuto 32, estes valores retornaram aos valores anteriores após o aumento da carga.

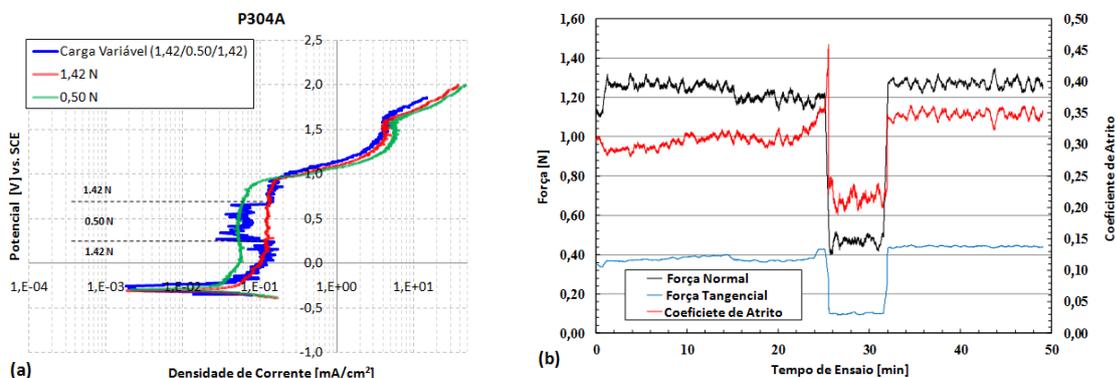


Figura 12 - (a) Curvas de polarização e (b) evolução das forças de contato evolução para o ensaio abrasivo-corrosivo em aço AISI 304 com força normal variável.

Conforme já foi apresentado, a variação da carga normal induziu uma considerável variação na densidade de corrente passiva, que pode ser associada, em princípio, a ausência ou a remoção constante da camada passiva.

Finalmente, na Figura 13 comparam-se os principais resultados dos ensaios de abrasão, corrosão e abrasão-corrosão. São apresentados os valores médios para a densidade de corrente passiva, coeficiente de atrito calculado durante os últimos 15 min. do experimento e a taxa de desgaste para os testes de resistência à abrasão e à abrasão-corrosão.

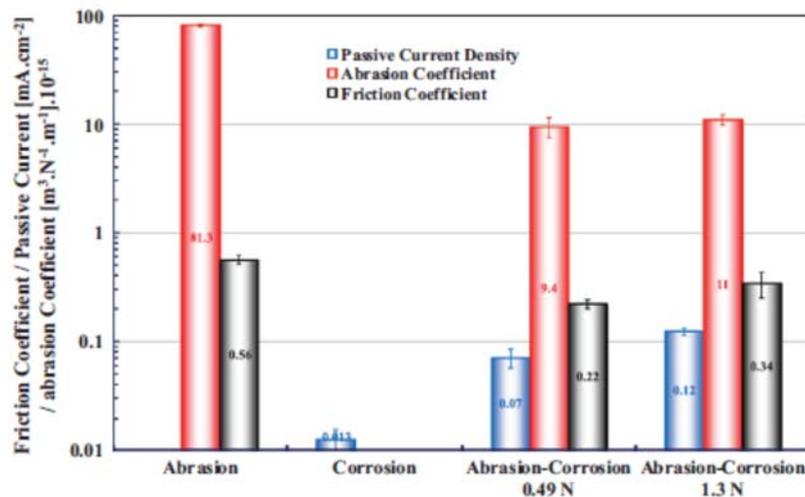


Figura 13 - Coeficiente de atrito, densidade de corrente passiva e taxa de desgaste para os ensaios de abrasão, corrosão e abrasão-corrosão.

As taxas de desgaste e os coeficientes de atrito para os ensaios de abrasão foram mais elevados do que para os ensaios de abrasão-corrosão em condições equivalentes. Por outro lado, a corrosão, isoladamente, apresenta menor densidade de corrente passiva quando comparada com os testes de abrasão-corrosão. Além disso, os testes de abrasão-corrosão são afetados pela força normal aplicada: cargas mais elevadas apresentam maiores densidades de corrente passiva e um pouco mais altas taxas de desgaste.

Há uma tendência de forte correlação entre as forças de contato (de desgaste mecânico) e formação de camada passiva e estabilização. A despassivação e repassivação dentro da calota de desgaste são processos complexos e certamente influenciados por fatores tais como o tamanho da indentação causada pelas partículas abrasivas, carga aplicada, concentração de abrasivos na solução e pH [25].

A literatura apresenta uma forte evidência da dependência da passivação em relação ao trabalho mecânico na interface. Bello et al. [10] discutem o sinergismo em termos da dependência da integridade da camada passiva e da cinética de repassivação. Além disso, quando um metal é fortemente trabalhado a frio, a energia pode ser armazenada no metal como um resultado do aumento da densidade de discordâncias na microestrutura. Uma ligeira diferença de potencial de alguns mV pode resultar entre as áreas trabalhadas a frio e não danificadas. Isso pode levar a diferença na cinética das reação nas áreas afetadas, resultando em diferentes taxas de corrosão. Além disso, a criação de defeitos contínuos e movimentos de deslocação micro-estruturais na interface (ou seja, contornos de grãos, inclusões, lacunas, etc.) e perto da superfície para aços inoxidáveis podem afetar o crescimento do filme de óxido de Cr₂O₃. Utilizando SiC, que é um abrasivo mais

severo do que o SiO_2 [36], Sinnett-Jones et al. [24] encontraram uma sinergia negativa para o aço AISI 304 em solução a base NaCl, indicando uma dependência da sinergia sobre a integridade dos filmes passivos e da cinética de repassivação. A presença do filme de óxido passivo afeta a mecânica de contato entre as partículas e as amostras de SiC e pode também ser associado com mecanismos aumento do endurecimento do material e, como consequência, da redução da abrasão. Tal mecanismo de corrosão foi apresentada por Perret et al. [17], cujas observações sugerem que a difusão de deslocamentos pode ser interrompido por fronteiras de grão e filmes de óxidos na superfície que atuam de forma semelhante a outros defeitos interfaciais, aumentando assim a dureza.

Wang e Han [50] demonstraram, por meio de simulações numéricas, um sinergismo entre a concentração de tensões e a corrosão localizada. Eles relataram que a corrosão localizada é acelerada pela tensão, e que a geometria do pite promove a concentração de tensões. Gutman [51] mostra uma relação entre a densidade de corrente durante a corrosão e a deformação plástica e elástica de metais com base na análise termodinâmica. Gutman et al. [52] realizaram uma série de experimentos e observaram um aumento de densidade de corrente com o aumento da tensão para o aço inoxidável 316L. Eles também demonstraram que isto ocorre, em ambos os estados, passivo e transpassivo, independentemente da natureza do filme passivo na superfície.

Wang et al. [53] estudaram a influência da frequência de variação de carga na corrosão dos aços inoxidáveis em soluções de 1M H_2SO_4 e 0,6M NaCl. Eles observaram que a densidade de corrente aumenta com a ruptura da camada passiva devido à deformação plástica e reduz novamente após a repassivação. Uma importante conclusão deste trabalho é que a principal diferença entre as baixas e as altas frequências reside no tempo de repassivação para a superfície do metal exposto, ou seja, se a destruição da camada passiva é mais rápida do que a sua formação e crescimento.

Sadiq et al. [54] desenvolveram mapas abrasão-corrosão para a liga de aço ASTM F1537. Para determinados domínios (potencial aplicado de 200 mV) a corrente é multiplicada por dois quando a força aumenta de 2 para 3 N. Este fenômeno está associado à capacidade do processo abrasivo para remover a camada passiva mais rapidamente do que sua formação e por conseguinte, expondo grandes áreas de superfície de metal ao meio corrosivo.

Wu e Celis [13], estudando desgaste por deslizamento-corrosão, demonstraram que em pH mais elevado, os aços inoxidáveis tornam-se passivos mais facilmente e um pH maior que corresponde ao maior coeficiente de atrito. De fato, no presente trabalho o pH mais alto corresponde à solução neutra utilizado durante os ensaios abrasivos, o que resultou nos mais altos níveis de desgaste e coeficientes de atrito, o que sugere que a relação entre a passivação e coeficiente de atrito existe também em o caso de abrasão-corrosão.

Sendo que os equipamentos, de micro-abrasão e corrosão, relatados na literatura não são capazes de medir as forças de atrito e, como consequência, coeficientes de atrito, é razoável supor que esta característica é única do instrumento desenvolvido. Isto pode abrir o caminho para novas descobertas sobre o estudo da abrasão-corrosão, em particular em uma nova abordagem que representa a dissipação de energia na interface, quantificada através do coeficiente de atrito.

Devido à grande complexidade das interações entre os processos mecânicos e corrosivos, a falha material devido à ação combinada destes fenômenos não é ainda

totalmente compreendida e mais estudos são necessários para entender melhor este ponto.

4 CONCLUSÕES

O novo equipamento de teste apresentou boa sensibilidade e repetibilidade e tem demonstrado ser uma ferramenta poderosa para estudos envolvendo abrasão, corrosão ou uma combinação de ambos os fenômenos.

Uma forte diferença na taxa de desgaste, no coeficiente de atrito e na densidade de corrente passiva foi observada para os testes realizados em diferentes configurações (ou seja, abrasão, corrosão e abrasão-corrosão).

Para os testes de abrasão-corrosão, uma sinergia negativa foi observada. Para esta configuração, um aumento da força de contacto produziu um aumento na densidade de corrente passiva. Testes com força normal variável dão uma indicação clara de que esse comportamento é reversível.

Os coeficientes de atrito encontrados são menores em meio corrosivo.

A capacidade única de acompanhar as forças que atuam sobre o contato dos processos de abrasão-corrosão pode abrir caminho para novas descobertas sobre o estudo de abrasão-corrosão, em particular, uma nova abordagem que leve em conta a dissipação de energia na interface quantificada via o coeficiente de atrito.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes/Proex, CNPq (Projeto 477286/2011-9), CBMM S.A. (Projeto FEMEC 01-2011) e à Fapemig pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 R.J.K. Wood, D. Sun, M.R. Thakare, A. De, F. Rozas, J.A. Wharton, Interpretation of electrochemical measurements made during micro-abrasion–corrosion, *Tribol. Int.* 43 (2010) 1218–1227.
- 2 J. Jiang, M.M. Stack, A. Neville, Modelling the tribo–corrosion interaction in aqueous sliding conditions, *Tribol. Int.* 35 (2002) 669–679.
- 3 W.S. Labiapari, C.M. Alcantara, H.L. Costa, J.D.B. De Mello, Stainless steel as an antiwear material for the bio-fuel industry, *Wear* 302 (S1–2) (2013) 1536–1545.
- 4 R. Santandréa, Master's dissertation - Corrosion Analysis of Stabilized Ferritic Stainless Steels with Variable Molybdenum Contents, Rio de Janeiro, RJ – Brazil, 1999, 156p, In Portuguese.
- 5 P.R. Roberge, *Handbook of Corrosion Engineering*, McGraw-Hill Professional, Products Liability Series, USA, 1999 1072 p.
- 6 A.J. Sedriks, *Corrosion of Stainless Steels*, second ed., Wiley-Interscience Publication, New York (1996) 260 (The Electrochemical Society).
- 7 I.M. Hutchings, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, CRC Press, Boca Raton, USA (1992) 77–171.
- 8 K-H. Zum Gahr, *Microstructure and Wear of Materials*, Institute of Materials Technology, University of Siegen, Siegen, Federal Republic of Germany, 1987.
- 9 R. Oltra, B. Chapey, L. Renaud, Abrasion–corrosion studies of passive stainless steels in acidic media: combination of acoustic emission and electrochemical techniques, *Wear* 186-187 (1995) 533–541.
- 10 J.O. Bello, R.J.K. Wood, J.A. Wharton, Synergistic effects of micro-abrasion–corrosion of UNS S30403, S31603 and S32760 stainless steels, *Wear* 263 (2007) 149–159.

- 11 R.C.C. Silva, R.P. Nogueira, I.N. Bastos, Tribocorrosion of UNS S32750 in chloride medium: effect of the load level, *Electrochim. Acta* 56 (2011) 8839–8845.
- 12 M.T. Mathew, E. Ariza, L.A. Rocha, A.C. Fernandes, F. Vaz, TiCxOy thin films for decorative applications: tribocorrosion mechanisms and synergism, *Tribol. Int.* 41 (2008) 603–615.
- 13 P.-Q. Wu, J.-P. Celis, Electrochemical noise measurements on stainless steel during corrosion–wear in sliding contacts, *Wear* 256 (2004) 480–490.
- 14 D. Sun, J.A. Wharton, R.J.K. Wood, Micro-abrasion–corrosion of cast CoCrMo-effects of micron and sub-micron sized abrasives, *Wear* 267 (2009) 52–60.
- 15 H.-H. Huang, T.H. Chuang, Erosion- and wear–corrosion behavior of Fe–Mn–Al alloys in NaCl solution, *Mater. Sci. Eng. A292* (2000) 90–95.
- 16 M.R. Thakare, J.A. Wharton, R.J.K. Wood, C. Menger, Exposure effects of alkaline drilling fluid on the micro scale abrasion–corrosion of WC-based hard metals, *Wear* 263 (2007) 125–136.
- 17 J. Perret, E. Boehm-Courjault, M. Cantoni, S. Mischler, A. Beaudouin, W. Chitty, J.-P. Vernot, EBSD, SEM and FIB characterisation of subsurface deformation during tribocorrosion of stainless steel in sulphuric acid, *Wear* 269 (2010) 383–393.
- 18 I. Garcia, D. Drees, J.P. Celis, Corrosion–wear of passivating materials in sliding contacts based on a concept of active wear track area, *Wear* 249 (2001) 452–460.
- 19 M. Lekka, N. Kouloumbi, M. Gajo, P.L. Bonora, Corrosion and wear resistant electrodeposited composite coatings, *Electrochim. Acta* 50 (2005) 4551–4556.
- 20 A.J. Gant, M.G. Gee, A.T. May, The evaluation of tribo–corrosion synergy for WC–Co hardmetals in low stress abrasion, *Wear* 256 (2004) 500–516.
- 21 M.M. Stack, S. Zhou, R.C. Newman, Identification of transitions in erosion– corrosion regimes in aqueous environments, *Wear* 186-187 (1995) 523–532.
- 22 K.L. Dahm, P.A. Dearnley, Abrasion response and abrasion–corrosion interactions for a coated biomedical stainless steel, *Wear* 259 (2005) 933–942.
- 23 P.H. Shipway, L. Howell, Microscale abrasion–corrosion behaviour of WC–Co hardmetals and HVOF sprayed coatings, *Wear* 258 (2005) 303–312.
- 24 P.E. Sinnott-Jones, J.A. Wharton, R.J.K. Wood, Micro-abrasion–corrosion of a CoCrMo alloy in simulated artificial hip joint environments, *Wear* 259 (2005) 898–909.
- 25 M.R. Thakare, J.A. Wharton, R.J.K. Wood, C. Menger, Investigation of micro-scale abrasion–corrosion of WC-based sintered hard metal and sprayed coating using in situ electrochemical current-noise measurements, *Wear* 267 (2009) 1967–1977.
- 26 M.M. Stack, H. Jawanb, M.T. Mathew, On the construction of micro-abrasion maps for a steel/polymer couple in corrosive environments, *Tribol. Int.* 38 (2005) 848–856.
- 27 M.R. Bateni, J.A. Szpunar, X. Wangb, D.Y. Li, The effect of wear and corrosion on internal crystalline texture of carbon steel and stainless steel, *Wear* 259 (2005) 400–404.
- 28 G.H.S. Gava, R.M. Souza, J.D.B. de Mello, M.C.S. de Macêdo, C. Scandian, Effect of load partition and particle distribution on micro-abrasive wear mapping of two-phase metal matrix composites, *Wear* 301 (2013) 130–136.
- 29 J.D.B. De Mello, J.L. Gonçalves, H.L. Costa, Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of steels used in cold rolling mill rolls, *Wear* 302 (2013) 1295–1309.
- 30 W.S. Labiapari, C.M. Alcântara, H.L. Costa, J.D.B de Mello, Stainless steel as an antiwear material for the bio-fuel industry, *Wear* 302 (2013) 1536–1545.
- 31 L.A. Dutra, J.D.B de Mello, M.C.S. de Macêdo, C. Scandian, Correlation among abrasive wear tests, *Lubr. Sci.* 25 (2012) 173–184.
- 32 J.D.B de Mello, A.A. Polycarpou, Abrasive wear mechanisms of multi-components ferrous alloys abraded by soft, fine abrasive particles, *Wear* 269 (2010) 911–920.
- 33 J.D.B. de Mello, C. Binder, R. Binder, A.N. Klein, Effect of nature of nitride phases on microabrasion of plasma nitrided sintered iron, *Tribology* 4 (2010) 191–196 (Leeds. Print).

- 34 R.C. Cozza, J.D.B. de Mello, D.K. Tanaka, R.M. Souza, Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests, *Wear* 263 (2007) 111–116.
- 35 M.B. dos Santos, H.L. Costa, J.D.B. De Mello. Potentiality of triboscopy to monitor friction and wear. *Wear*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.10.017>, in press.
- 36 A.C. Bozzi, J.D.B. De Mello, Wear resistance and wear mechanisms of WC–12% Co thermal sprayed coatings in three-body abrasion, *Wear* 233–235 (1999) 575–587.
- 37 K. Adachi, I.M. Hutchings, Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test, *Wear* 255 (2003) 23–29.
- 38 R.I. Trezona, D.N. Allsopp, I.M. Hutchings, Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the micro scale abrasive wear test, *Wear* 225–229 (1999) 205–214.
- 39 K.L. Rutherford, I.M. Hutchings, Theory and application of a micro-scale abrasive wear test, *J. Test. Eval.* 25 (1997) 250–260.
- 40 R.I. Trezona, I.M. Hutchings, Three-body abrasive wear testing of soft materials, *Wear* 235 (1999) 209–221.
- 41 T. Massoud, V. Maurice, L.H. Klein, A. Seyeux, P. Marcus, Nanostructure and local properties of oxide layers grown on stainless steel in simulated pressurized water reactor environment, *Corros. Sci.* 84 (2014) 198–203.
- 42 B.O. Elfstrom, The effect of chloride ions on passive layers on stainless steels, *Mater. Sci. Eng.* 42 (1980) 173–180.
- 43 K.H. Zum Gahr, *Microstructure and Wear of Material*, Institute of Materials Technology, University of Siegen - Germany, Elsevier, 1987, 560p.
- 44 I.M. Hutchings, *Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials*, Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge, Cambridge, 1992.
- 45 N. Ojala, et al., Effects of composition and microstructure on the abrasive wear performance of quenched wear resistant steels, *Wear* 317 (2014) 225–232.
- 46 F. Katsuki, K. Watari, H. Tahira, M. Umino, Abrasive wear behaviour of a pearlitic (0.4%C) steel microalloyed with vanadium, *Wear* 264 (2008) 331–336.
- 47 J.D.B. de Mello, A.A. Polycarpou, Abrasive wear mechanisms of multi-components ferrous alloys abraded by soft, fine abrasive particles, *Wear* 269 (2010) 911–920.
- 48 Y.X. Qiao, Y.G. Zheng, P.C. Okafor, W. Ke, Electrochemical behaviour of high nitrogen bearing stainless steel in acidic chloride solution: effects of oxygen, acid concentration and surface roughness, *Electrochim. Acta* 54 (2009) 2298–2304.
- 49 B. Diawara, Y.A. Beh, P. Marcus., Atomistic simulation of the passivation of iron chromium alloys using calculated local diffusion activation barriers, *Passivation of Metals and Semiconductors, and Properties of Thin Oxide Layers*, Elsevier (2006)651–657.
- 50 H. Wang, E.H. Han, Simulation of metastable corrosion pit development under mechanical stress, *Electrochim. Acta* 90 (2013) 128–134.
- 51 E.M Gutman, *Mechanochemistry of Materials*, Cambridge International Science Publishing, UK, 1998 215p.
- 52 E.M Gutman, G. Solovioff, D. Eliezer, The mechanochemical behavior of type 316L stainless steel, *Corros. Sci.* 38 (1996) 1141–1145.
- 53 J.Q. Wang, et al., Influence of loading frequency on transient current behavior of Fe-26Cr-1Mo during low cycle corrosion fatigue in 1M H₂SO₄ and 0.6M NaCl solutions, *Scr. Metall. Mater.* 29 (1993) 1415–1420
- 54 K. Sadiq, R.A. Black, M.M. Stack, Bio-tribocorrosion mechanisms in orthopaedic devices: Mapping the micro-abrasion–corrosion behaviour of a simulated CoCrMo hip replacement in calf serum solution, *Wear* 316 (2014) 58-69, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.04.016>.