

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE MATERIAIS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO A QUENTE: UMA NOVA METODOLOGIA DE ENSAIO¹

Júlio César Giubilei Milan²
Sinésio Domingues Franco²
Miguel Angelo de Carvalho³
Renato Rufino Xavier³
José Daniel Biasoli de Mello²

Resumo: A otimização de materiais para a fabricação de cilindros de laminação é normalmente executada pela utilização de testes complexos e sempre muito dispendiosos. Neste trabalho é proposta uma nova metodologia para ensaiar estes materiais que além de reproduzir os mecanismos de desgaste atuantes nos cilindros de laminação a quente é simples, rápida, confiável e econômica. Para se determinar as condições que reproduzissem o mecanismo de desgaste atuantes nos cilindros, foram realizados ensaios de deslizamento do tipo alternado em várias condições de carga, temperatura, contra-corpo e atmosfera. Análises feitas através de microscopia eletrônica de varredura mostraram que é possível reproduzir o mecanismo de desgaste dos cilindros através de ensaios laboratoriais simples. Em seguida, foi estudado o comportamento tribológico de dois materiais: um aço rápido e um ferro fundido branco de alto cromo, ambos utilizados na confecção de cilindros, através desta nova metodologia de ensaio. O aço rápido apresentou um desempenho muito superior ao ferro fundido de alto cromo proporcionando uma taxa de desgaste bem inferior. Já o coeficiente de atrito dos dois materiais foi semelhante com valor ligeiramente superior para o aço rápido. Esses resultados estão de acordo com o desempenho em campo destes materiais validando a metodologia proposta.

Palavras chave: Cilindros de laminação, desgaste, mecanismo de desgaste.

¹ Trabalho a ser apresentado no 41º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. 26 a 28 de outubro de 2004 – Joinville – SC – Brasil.

² Laboratório de Tribologia e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Av João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 1R, Uberlândia, MG, Cep 38400-902 – ltm-demello@ufu.br.

³ Aços Villares S.A., Usina Pindamonhangaba. Rodovia Luiz D. Villares, Km 2, Pindamonhangaba, SP, Cep 12400-000.

1. Introdução

Os cilindros de laminação são componentes dispendiosos e de fabricação bastante complexa. Com a crescente demanda por qualidade do produto final e a constante necessidade de redução de custos, é necessário que estes componentes tenham maior vida e proporcionem a obtenção de produtos laminados com maior qualidade. Para isto, novos materiais são constantemente desenvolvidos. Antes de serem utilizados na fabricação de cilindros, estes materiais devem ser testados em laboratório. Isto permite se fazer uma avaliação prévia, mais rápida e menos onerosa destes materiais.

Existem vários tipos de ensaios que são utilizados para se testar estes materiais. Um dos mais encontrados na literatura consiste da utilização de dois discos de dimensões reduzidas deslizando um contra o outro [1]. O disco equivalente ao material laminado é aquecido através de uma bobina de indução. Já o disco que representa o cilindro é aquecido devido ao atrito e ao contato com o disco quente. Pode ser utilizado um jato de água para resfriar este disco, garantindo a presença de fadiga térmica. A Figura 1 mostra um esquema deste ensaio.

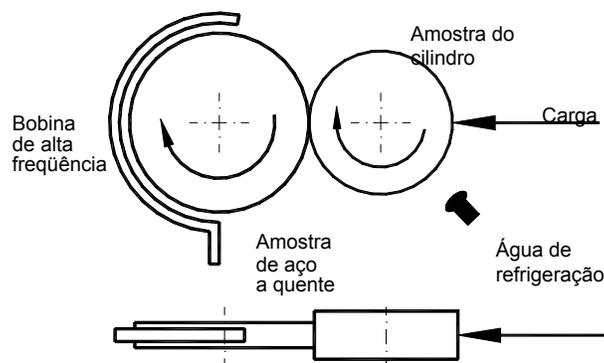


Figura 1 – Esquema de um ensaio de desgaste disco-disco [1].

Porém, este ensaio requer um equipamento específico de alto custo e, além disso, ele não proporciona a obtenção do mesmo tipo de movimento relativo entre o cilindro e a tira. O movimento entre cilindro e tira é de deslizamento, porém, do tipo alternado, ou seja, o movimento relativo inverte o sentido de esforço tangencial atuante no cilindro constantemente, como mostrado na Figura 2 (a).

O ensaio de deslizamento do tipo alternado, Figura 2 (b), utilizando esferas de aço 52100 como contra-corpo já foi utilizado para simular o processo de laminação [2], porém, neste trabalho o mecanismo de desgaste atuante nos cilindros não foi reproduzido. Além disso, houve uma grande dificuldade de interpretação dos resultados pois houve um depósito de material sobre o corpo de prova e não foi possível identificar a origem deste material (se proveniente do próprio corpo de prova ou do contra-corpo).

Em outro trabalho [3] foram utilizadas esferas de WC-Co como contra-corpo. Neste caso também não se reproduziu o mecanismo de desgaste dos cilindros, mas conseguiu-se uma informação valiosa, que foi a caracterização do mecanismo de transferência de material entre corpo de prova e contra-corpo.

Neste trabalho foi desenvolvida uma nova metodologia para ensaiar materiais utilizados na confecção de cilindros de laminação de tiras a quente que reproduz os mecanismos de desgaste atuantes nos cilindros de laminação a quente. Além disto, esta metodologia é simples, rápida, confiável e econômica.

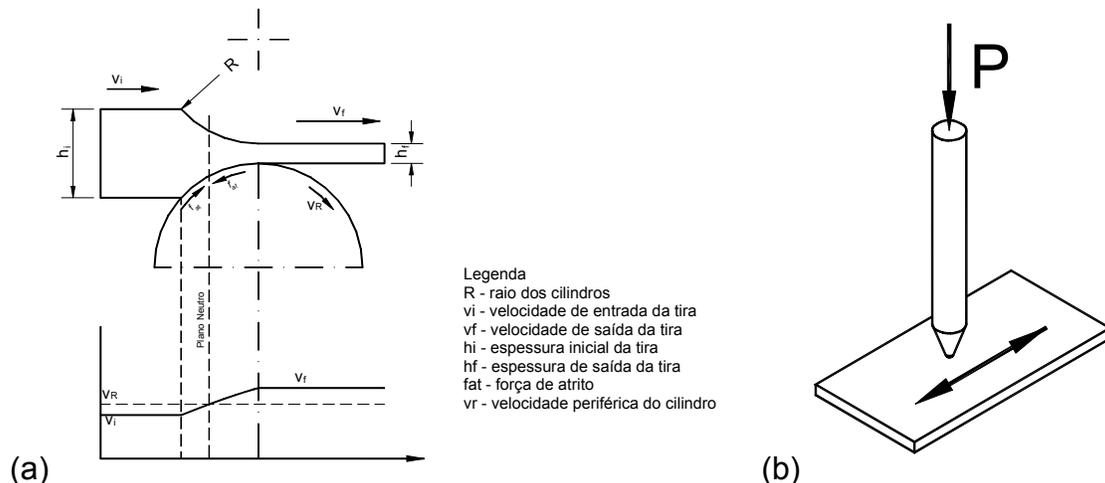


Figura 2 – (a) Esquema das velocidades relativas ao longo do arco de contato e forças de atrito atuantes sobre a superfície dos cilindros e (b) esquema do ensaio de deslizamento tipo alternado.

2. Experimento

O aspecto superficial que se procura reproduzir pode ser descrito da seguinte maneira: detalhes da microestrutura do material ficam visíveis, evidenciando os carbonetos. Podem ser observadas regiões claras e regiões mais escuras, indicando, respectivamente, áreas menos e mais oxidadas. Nestas regiões escurecidas a microestrutura do material pode ficar encoberta devido à oxidação. Pode-se, ainda, encontrar sinais de abrasão com riscos ou sulcos na direção do movimento. A superfície do cilindro pode apresentar muitas trincas que ocorrem devido à fadiga térmica.

Nos corpos de prova ensaiados neste trabalho não se espera obter trincas deste tipo, pois a variação cíclica de temperatura não chega a ser suficiente para causar este tipo de dano. Nestes ensaios, a variação de temperatura ocorre apenas nos pontos reais de contato, devido às temperaturas 'flash' sendo, assim, muito localizada.

Na simulação deste mecanismo de desgaste foram realizados ensaios de deslizamento do tipo alternado utilizando como contra-corpo esferas de Si_3N_4 com 10 mm de diâmetro. A principal justificativa de utilização deste tipo de material foi a de que os cerâmicos são materiais inertes e com elevada dureza. Com isto, procurava-se obter uma superfície desgastada com uma mínima influência do contra-corpo.

A amplitude de deslocamento foi de 6 mm e a frequência de movimentação de 6 Hz. Variou-se a carga desde cerca de 20 N até 70 N. A temperatura variou desde a ambiente até 200 °C. Foram utilizadas dois tipos de atmosfera: uma com umidade relativa em torno de 50 % (utilizando um desumidificador) e, outra com injeção de vapor na região de ensaio. Isto foi feito com o auxílio de um equipamento doméstico de produção de vapor.

Os ensaios foram iniciados com cargas mais baixas (23 N), e variou-se a temperatura, para cada carga utilizada, mantendo a carga constante. Em seguida houve uma tentativa em se utilizar uma atmosfera semelhante àquela a que os cilindros estão submetidos na indústria, através da injeção de um jato de vapor.

Em seguida, após ter conseguido a reprodução do mecanismo de desgaste, ou um mecanismo que mais se aproxime daquele atuante nos cilindros de laminação, foram realizados ensaios para comparação do comportamento tribológico dos dois materiais.

Foram testados dois materiais utilizados na confecção de cilindros de laminação a quente: um aço rápido, AR, e um ferro fundido de alto cromo, FFAC. As condições de ensaio foram as seguintes: carga de 51 N, temperatura ambiente, atmosfera sem vapor, amplitude de deslocamento de 6 mm e frequência de 6 Hz.

Foram realizados 5 ensaios nesta condição para cada material.

3. Resultados e discussões

Mecanismo de desgaste – Os ensaios foram iniciados com cargas mais baixas, e variou-se a temperatura mantendo a carga constante. A Figura 3 (a) mostra a fotografia de um corpo de prova ensaiado à temperatura ambiente com 23,5 N, e na Figura 3 (b) tem-se a micro-análise química relativa a um ponto indicado na Figura 3 (a). Observa-se na primeira figura algumas regiões que parecem ser carbonetos, porém, a micro-análise química destas regiões mostrou uma grande quantidade de silício, indicando um depósito de material proveniente do contra-corpo. Desta forma, esta condição de ensaio foi descartada, devido à interferência do contra-corpo.

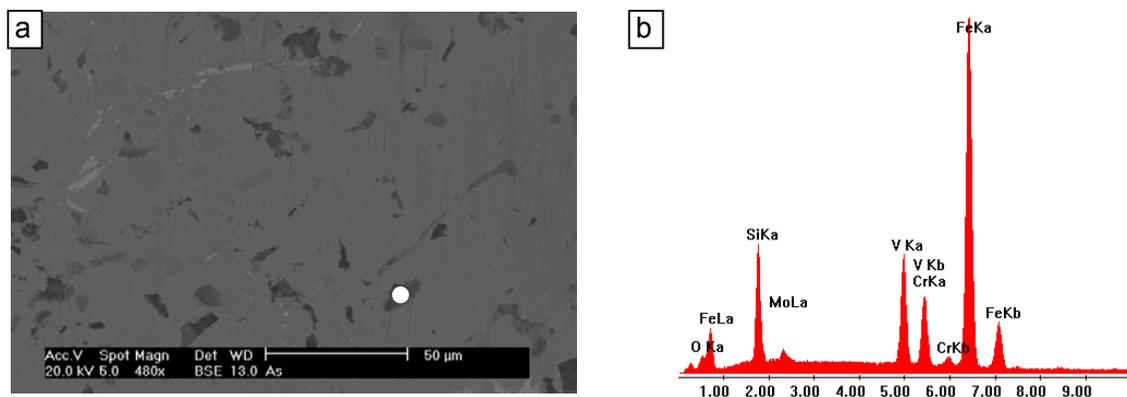


Figura 3 – (a) Aspecto da superfície de um corpo de prova ensaiado com 23,5 N, temperatura ambiente e esfera de Si_3N_4 com 10 mm de diâmetro como contra-corpo, e (b) micro-análise química do ponto mostrado em (a).

Na Figura 4 (a) é mostrado o aspecto da superfície do corpo de prova ensaiado com 23,5 N e 200 °C. A foto mostrada corresponde à região central da marca de desgaste produzida no corpo de prova. Observa-se uma grande porcentagem da superfície plana contendo regiões que parecem ser pequenas crateras distribuídas de forma homogênea. Na Figura 4 (b) nota-se claramente estas crateras e, ainda, que a região plana parece ser formada da aglomeração e deformação de pequenas partículas, que devem ter sido produzidas durante o deslizamento. Observa-se, ainda,

uma partícula maior que parece estar preste a se desprender. Nas duas fotos observa-se o aspecto da superfície bastante oxidada. Porém, o aspecto da superfície obtida não corresponde ao do mecanismo de desgaste atuante nos cilindros.

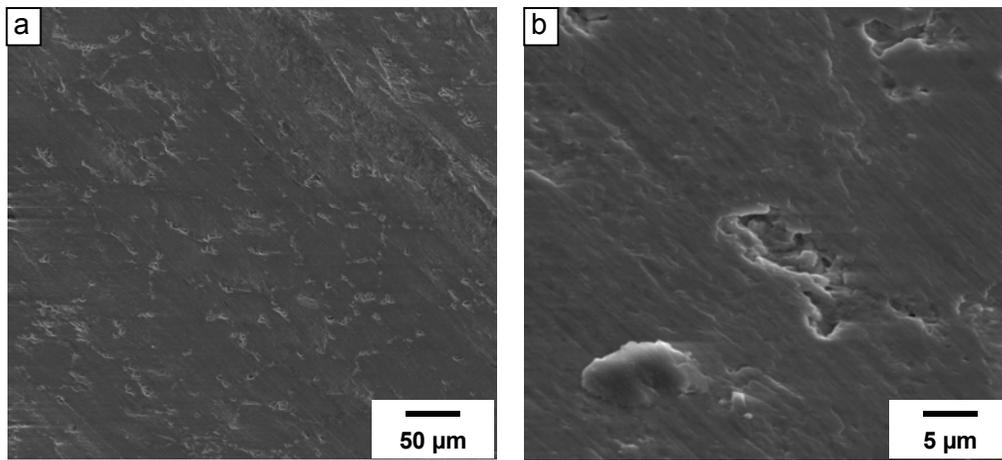


Figura 4 – Aspecto da superfície de um corpo de prova ensaiado com 23,5 N e temperatura de 200 °C e atmosfera seca.

Na Figura 5 (a) é mostrada uma foto de um ensaio realizado com injeção de vapor e carga de 23,5 N. Observa-se um aspecto aparentemente liso da superfície apresentando novamente crateras semelhantes as do ensaio com 23,5 N sem atmosfera de vapor. Há, ainda, áreas escurecidas, também semelhantes àquelas onde foi encontrada alta quantidade de silício. Não correspondendo ao aspecto esperado que reproduz o mecanismo de desgaste.

Na Figura 5 (b) tem-se a superfície de um corpo de prova ensaiado à temperatura ambiente, com atmosfera seca e uma carga um pouco superior às anteriores, 31,4 N. Pode-se observar grandes regiões claras e escuras e pequenas regiões escuras que poderiam fazer parte da microestrutura. Observa-se que as grandes regiões escuras podem ser óxidos, mas as pequenas que se assemelham a partes de carbonetos, devem conter ainda grande quantidade de silício. Levantou-se esta suspeita devido à grande semelhança do aspecto desta superfície com os mostrados na Figura 3 (a).

Na Figura 6 são mostradas fotos da superfície de corpos de prova ensaiados com carga de 51 N, à temperatura ambiente e com atmosfera seca. Em todas as fotos pode-se observar claramente os carbonetos presentes nos materiais, e também, regiões ligeiramente mais claras alternadas com regiões mais escuras. Aspecto semelhante ao da descrição do mecanismo de desgaste atuante nos cilindros, com exceção das trincas. Observam-se, ainda, riscos na direção do movimento. Na Figura 6 (a) tem-se uma visão geral da superfície ensaiada do AR e na Figura 6 (b) observa-se em detalhe a estrutura de um carboneto. Na Figura 6 (c) tem-se uma foto, na mesma condição de ensaio, porém, para o FFAC, onde também se observa uma característica semelhante à obtida para o AR. Na Figura 6 (d) tem-se a mesma região da figura anterior porém, utilizando-se elétrons retro-difundidos, ERD, evidenciando ainda mais os carbonetos.

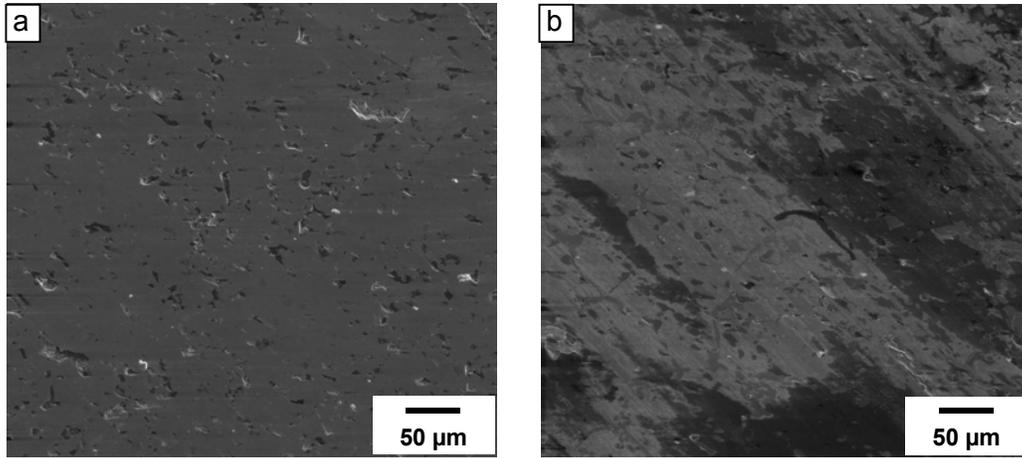


Figura 5 – Aspecto da superfície de um corpo de prova ensaiado (a) com 23,5 N e atmosfera de vapor, e (b) a temperatura ambiente, com 31,4 N e atmosfera seca.

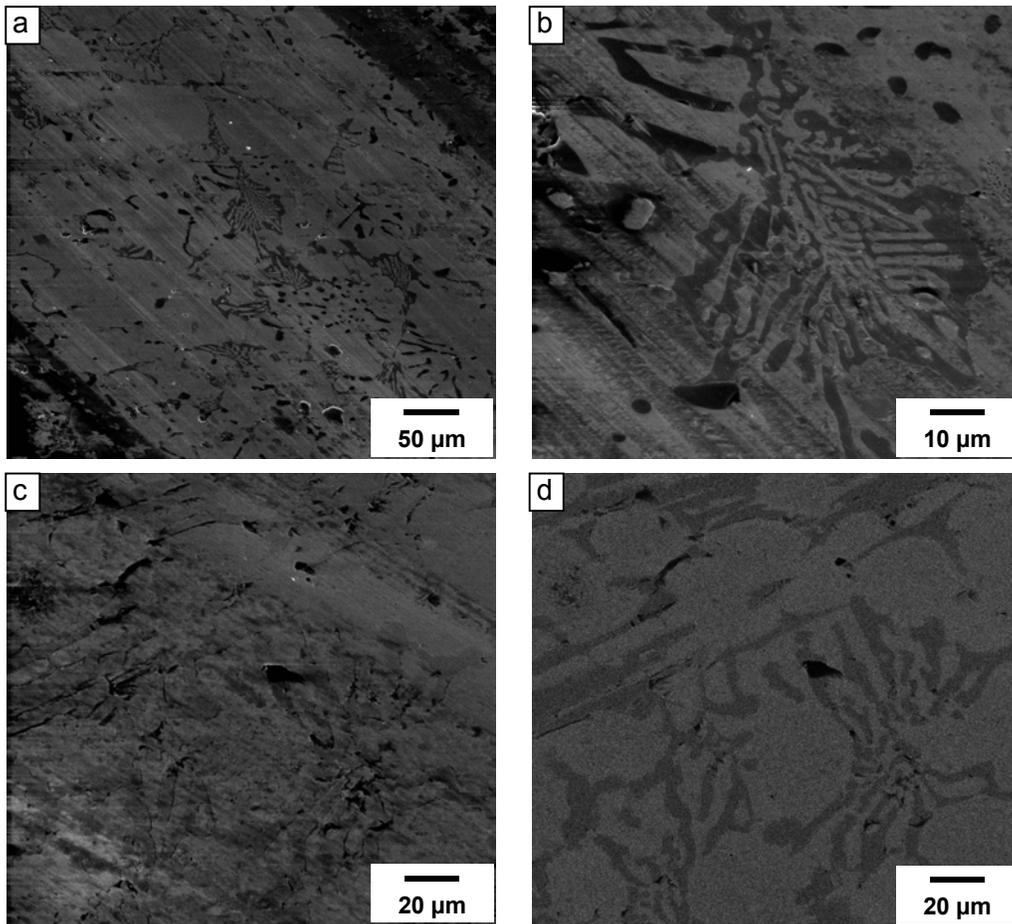


Figura 6 – Aspecto da superfície de um corpo de prova ensaiado à temperatura ambiente e 51 N, utilizando (a) e (b) AR, (c) FFAC e (d) FFAC com ERD.

Estas características descritas acima correspondem, ou se aproximam muito, da descrição feita do mecanismo de desgaste atuantes nos cilindros de laminação.

Acredita-se ter encontrado, nestas condições e com o tipo de ensaio realizado, uma forma de reproduzir este mecanismo.

Comportamento tribológico dos materiais – Na Figura 7 (a) são mostrados os resultados de coeficiente de atrito aparente médio relativo aos ensaios de deslizamento tipo alternado com esferas de nitreto de silício e carga de 51 N para os dois materiais. O atrito aparente apresentou valores ligeiramente inferiores para o FFAC.

Na Figura 7 (b) são mostrados os valores de taxa de desgaste média para os dois materiais, calculado como descrito em [4]. Nota-se a grande diferença entre os resultados dos dois materiais. O AR apresentou uma taxa de desgaste muito inferior ao FFAC, confirmando o resultado de trabalhos anteriores [5]. Desta forma, estes ensaios contribuíram para a comparação entre o desempenho dos dois materiais nas condições do mesmo mecanismo de desgaste atuante nos cilindros, confirmando a superioridade do AR sobre o FFAC em relação ao desgaste.

Também na Figura 7 (b) são mostrados os resultados de taxa de desgaste média dos contra-corpos. Apesar do aço rápido ser mais duro que o ferro fundido estudado, 884 HV contra 672 HV, os contra-corpos que deslizaram sobre este material sofreram um desgaste menor do que aqueles que deslizaram sobre o FFAC.

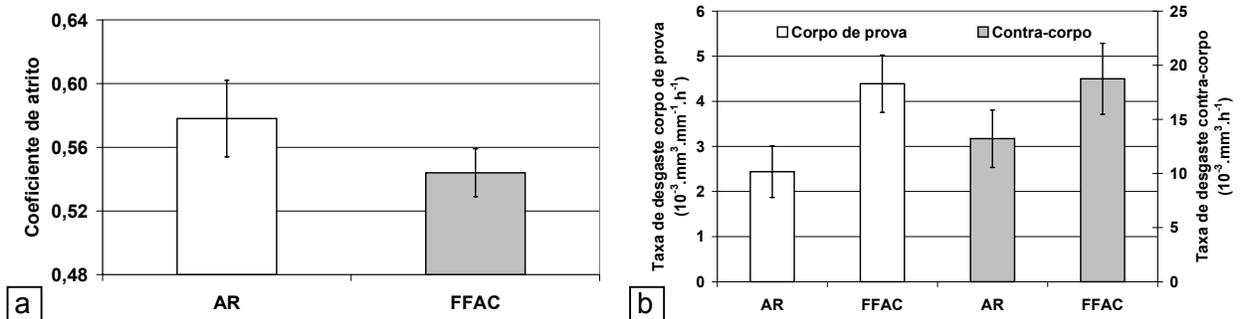


Figura 7 – (a) Coeficiente de atrito aparente médio do AR e do FFAC nos ensaios com esfera de nitreto de silício, com carga de 51 N, (b) taxa de desgaste média dos corpos de prova de AR e FFAC e dos contra-corpos (esferas) de nitreto de silício nos ensaios com carga de 51 N e temperatura ambiente.

A Figura 8 apresenta fotos da superfície de alguns dos corpos de prova ensaiados. Na Figura 8 (a) observa-se a microestrutura do AR destacando-se um carboneto. Observam-se também regiões mais claras alternadas com regiões mais escuras, sendo que estas últimas indicam regiões mais oxidadas.

Já na Figura 8 (b) é mostrada a foto de uma amostra de FFAC utilizando-se elétrons retro-difundidos, ERD, onde também se observa uma região contendo carbonetos do tipo M_7C_3 ricos em cromo. Nota-se claramente a fragmentação destes carbonetos, regiões com muitas trincas e regiões que parecem ser vazios causados pelo desprendimento de partes dos carbonetos. Nesta foto pode-se perceber claramente o mecanismo de degradação desta superfície. Provavelmente, os carbonetos já danificados teriam suas trincas aumentadas em passes subseqüentes até serem completamente removidos. É possível que a matriz menos resistente do FFAC não possibilite a sustentação adequada dos carbonetos facilitando sua fragmentação.

Estes carbonetos soltos na interface podem atuar como abrasivos tanto sobre os corpos de prova como sobre os contra-corpos.

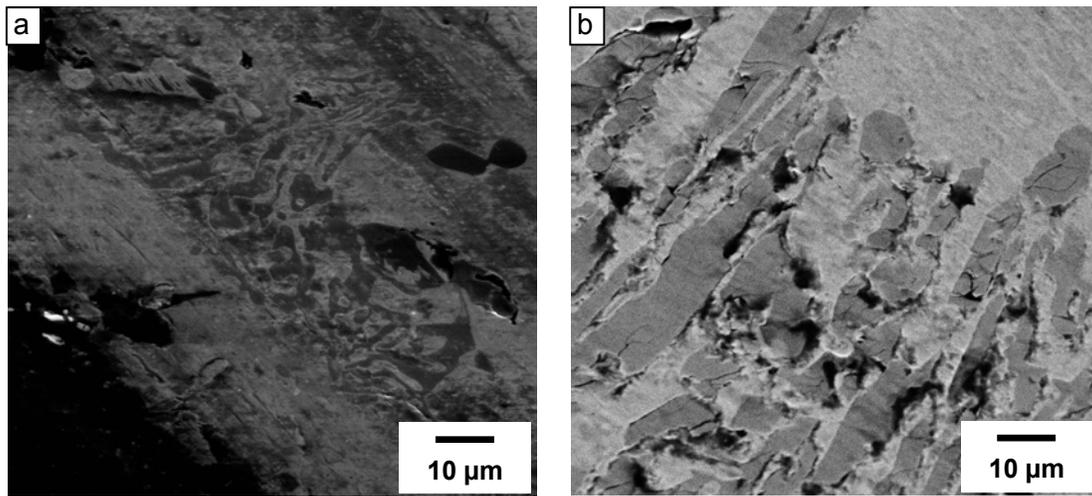


Figura 8 – Aspecto da superfície dos corpos de prova, obtidos em MEV, ensaiados com esfera de nitreto de silício e carga de 51 N para o (a) AR sem pré-oxidação, (b) FFAC sem pré-oxidação, ERD.

Desta forma, pode-se descrever o mecanismo de desgaste da seguinte maneira: com a contínua movimentação entre as superfícies, os carbonetos começam a se deteriorar sendo trincados. Estas trincas se propagam, atravessam os carbonetos e fazem com que estes se fragmentem e se desprendam da matriz formando vazios, ou vales, tornando a superfície irregular e ainda podendo atuar como abrasivos. Isto deve ocorrer de forma cíclica. Assim, cada superfície observada pode estar num estágio diferente e apresentar características um pouco distintas. Este mecanismo parece ter sido semelhante para os dois materiais, porém, foi bem mais severo no FFAC.

4. Conclusões

Com base na série de ensaios realizados é possível tirar algumas conclusões:

- Há uma condição específica de carga ou uma faixa na qual é possível reproduzir o mecanismo de desgaste atuante nos cilindros de laminação a quente com ensaios de deslizamento tipo alternado;
- Variações de carga e temperatura, a partir da condição em que se reproduziu o mecanismo de desgaste desejado, causam uma alteração deste mecanismo;
- Conseguiu-se reproduzir o mecanismo de desgaste atuante nos cilindros de laminação de tiras a quente com ensaios de deslizamento do tipo alternado, utilizando-se um contra-corpo de nitreto de silício com 10 milímetros de diâmetro, carga de 51 N, frequência de 6 Hz e amplitude de 6 mm.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de deslizamento realizados nestas condições em amostras de AR e FFAC, pode se tirar algumas conclusões:

- O AR apresentou um desgaste consideravelmente inferior ao do FFAC;
- O mecanismo de desgaste dos materiais consiste no trincamento, fragmentação e arrancamento dos carbonetos, que foi mais crítico no FFAC;

5. Referências bibliográficas:

- [1] SPUZUC, S., STRAFFORD, K. N., SUBRAMANIAN, C., SAVAGE, G., 1994, Wear of Hot Rolling Mill Rolls: an Overview; **Wear**, 176 (1994), 261 – 271.
- [2] MILAN, J. C. G., FRANCO, S. D., de MELLO, J. D. B., CARVALHO, M. A., XAVIER, R. R. Efeitos da oxidação sobre o comportamento tribológico de um aço-rápido, In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Uberlândia, Anais, Novembro de 2001, 168 – 177.
- [3] MILAN, J. C. G., FRANCO, S. D., de MELLO, J. D. B., CARVALHO, M. A., XAVIER, R. R. Efeito da força normal no comportamento tribológico em alta temperatura de um aço rápido, In 58º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, **Anais**, Julho 2003, 750 – 759.
- [4] JACOMINE, L.; BARCELOS, L. D. P.; MILAN, J. C. G.; FRANCO, S. D.; MELLO, J. D. B., Quantificação da Perda de Volume em Desgaste Via Interferometria Laser e Análise de Imagem, In: 59º CONGRESSO ABM, São Paulo, **Anais**, Julho 2004, a ser publicado.
- [5] MILAN, J. C. G., FRANCO, S. D., de MELLO, J. D. B., CARVALHO, M. A., XAVIER, R. R. Efeito da Temperatura Sobre O Comportamento Tribológico de Ferros Fundidos Multi-Componentes, In: 39º SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, Ouro Preto, **Anais**, Outubro de 2002, .

TRIBOLOGIC BEHAVIOUR OF HOT ROLLING MILL ROLL MATERIALS: A NEW TEST METODOLOGY¹

Júlio César Giubilei Milan²
Sinésio Domingues Franco²
Miguel Angelo de Carvalho³
Renato Rufino Xavier³
José Daniel Biasoli de Mello²

Abstract: optimization of materials for hot rolling rolls is usually carried out by using complex and expensive tests. In this work a new methodology to test these materials is proposed. Besides to reproduce wear mechanisms acting on the rolls used in hot rolling these tests are simple, fast, reliable and safe. To determine the test conditions to reproduce wear mechanism, reciprocating sliding tests were carried out in several conditions of load, temperature, counter-body and environment. Scanning electron microscope analysis showed that it is possible to reproduce roll wear mechanism. In sequence tribologic behavior of two materials, a HSS and a high chromium cast iron, used in rolls were studied through this methodology. HSS was much superior than high chromium cast iron when wear rate was evaluated. Friction coefficient was similar for both materials with a little bit higher values to HSS. These results are in accordance with field performance of these materials validating the proposed methodology.

Key words: roll mills, wear, wear mechanism.

¹ Paper to be presented at 41º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos. October, 26 - 28 2004 – Joinville – SC – Brazil.

² Laboratório de Tribologia e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Av João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 1R, Uberlândia, MG, Cep 38400-902 – ltm-demello@ufu.br.

³ Aços Villares S.A., Usina Pindamonhangaba. Rodovia Luiz D. Villares, Km 2, Pindamonhangaba, SP, Cep 12400-000.