

# AVALIAÇÃO MECÂNICA DE SUPERFÍCIES

## **Rodrigo José Brasil Wanda Bru**

Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Jardim das Américas, 81531-990, Curitiba – PR – Brasil, Caixa Postal: 19011  
rodrigo.bru1@gmail.com

## **Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira**

Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Jardim das Américas, 81531-990, Curitiba – PR – Brasil, Caixa Postal: 19011  
sofmat@ufpr.br

**Resumo.** *A degradação de componentes mecânicos em consequência das condições de serviço na maioria dos casos se concentra ou inicia na sua superfície, devido, por exemplo, a fenômenos de desgaste. O estudo dos mecanismos de diferentes fenômenos de degradação mecânica de superfícies é feito pela Tribologia. Por esta degradação depender do sistema tribológico existem dificuldades na qualificação de componentes. No sentido de qualificar componentes em relação à possibilidade de apresentarem maior ou menor resistência a esta degradação faz-se necessário a compreensão de diferentes técnicas de caracterização de superfícies que possam cobrir um amplo espectro de solicitações. Neste trabalho propõe-se avaliar as características mecânicas de superfícies, através de medidas de dureza, risco, desgaste por deslizamento abrasivo e adesivo com o intuito de encontrar relações/tendências de comportamento entre estas diferentes técnicas de caracterização. A metodologia empregada selecionou um aço em diferentes condições superficiais, assim foram avaliadas as condições de aço SAE 4144 normalizado, SAE 4144 temperado e revenido e aço SAE 4144 temperado, revenido e nitretado. Depois de preparadas, as superfícies foram retificadas, antes de ser medida a sua dureza (microdureza Vickers e dureza Rockwell), resistência ao risco, desgaste por deslizamento adesivo e abrasivo). Os resultados mostraram que o aumento da dureza resulta em maior resistência ao desgaste por deslizamento e abrasivo. Já a correlação dos resultados do ensaio de risco com as características da superfície depende do tipo de teste realizado e da presença ou não de gradiente de dureza na superfície.*

**Palavras-chave:** *nitretação, desgaste abrasivo, desgaste adesivo, ensaio risco*

## **1. INTRODUÇÃO**

O atual desenvolvimento industrial confirma a importância de processos termoquímicos ou revestimentos superficiais para obtenção de características mecânicas importantes sem elevar o preço dos produtos. Após a proteção do componente é determinante disponibilizar-se procedimentos para qualificação/caracterização da superfície em função de solicitações a que esta estará exposta. A degradação de componentes mecânicos em consequência das condições de serviço na maioria dos casos concentra-se ou inicia na superfície em razão, por exemplo, do desgaste. Para prever/estimar esta degradação é necessário o desenvolvimento de técnicas de caracterização de superfícies que possam abranger o maior número possível de solicitações. Propõem-se neste trabalho identificar relações entre diferentes técnicas de avaliação mecânica de superfície, com o intuito de estabelecer procedimentos de qualificação de superfícies, utilizando para isso o mesmo material processado de ferro a se obter diferentes durezas em sua superfície.

A relação entre diferentes testes de caracterização mecânica de superfícies como dureza e resistência ao desgaste, dureza e risco tem sido reportado na literatura. A metodologia prevê a coleta de três tipos diferentes de superfícies (aço SAE 4144 sem tratamento, aço SAE 4144 temperado e revenido, aço SAE 4144 temperado, revenido e nitretado). Para caracterizar as amostras serão coletados dados de dureza utilizando-se os métodos tradicionais de indentação além de dados obtidos através do ensaio de risco (*scratch test*) e ensaios de desgaste por deslizamento adesivo e abrasivo.

Estudos têm comprovado o aumento da resistência à abrasão com o aumento da dureza dos materiais. Este comportamento é mais significativo em metais puros do que em aços tratados termicamente. No entanto, apenas dureza não é um indicador de resistência abrasiva quando comparados diferentes grupos de materiais. Rabinowicz et al. (1965) propôs uma simples expressão para o volume de material removido durante a abrasão entre dois corpos por uma partícula abrasiva cônica. A relação entre dureza e resistência ao desgaste para revestimentos duros também foi o objeto de pesquisa em Prabhakaran et al. (2000). Em Lin et al. (2005), buscou-se estudar a mesma relação, mas utilizando-se material nitretado em vez de revestimentos duros.

A relação entre dureza e risco em revestimentos duplex foi estudada por Hoy et al. (2004). Depois de caracterizada por nanoindentação e ensaio de risco verificou-se que com o aumento na profundidade da nitretação, a carga suportada pelo revestimento duplex aumenta levando a um aumento significativo na dureza ao risco. Uma expressão analítica foi derivada para correlacionar a carga crítica da adesão do risco com a dureza e espessura de um filme duro e fino sobre substratos mais frágeis, com base no modelo B-R (Burnett, 1987) para interpretação das medidas de dureza do composto em Rodrigues et al. (2001). Esta expressão foi usada para calcular a correção da carga crítica com a dureza de Vickers para o substrato, dureza de Vickers para o compósito e espessura do filme. Medidas para comparar a dureza ao risco com a dureza à indentação correspondente do chumbo, do cobre e do aço mole a temperatura ambiente foram feitas em Brookes et al. (1972).

A relação entre desgaste e risco foi estudada por diversos pesquisadores, entre eles Rabinowicz et al. (1965), que estudou em um ensaio de risco a razão entre o volume de material real removido e o volume de material removido pelo risco pode ser descrito pela fração  $f_{ab}$ . Valores de  $f_{ab}$  de 0,15 a 1 foram medidos experimentalmente para trinta materiais diferentes por Mewes e Zum Gahr (Rabinowicz, 1965) usando-se a secções transversais. Com o aumento da dureza do material tem-se também o aumento do  $f_{ab}$ . Quanto maior a razão entre a dureza e  $f_{ab}$  maior é a resistência ao desgaste abrasivo.

A correlação da microestrutura com a dureza e resistência ao desgaste em compostos de superfície de aço Cr3C2/inoxidável fabricados pela alta irradiação de energia do feixe de elétrons e reforço de partículas Cr7C3 foi investigado por Yun et al. (2005). A dureza e resistência ao desgaste da camada de composto da superfície foram influenciadas diretamente pelos carbeto duros Cr7C3, e foram cerca de duas vezes maiores que aquelas do substrato de aço inoxidável.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Metodologia**

Foi feita a seleção de três tipos diferentes de superfícies (aço SAE 4144 como fornecido, aço SAE 4144 temperado e revenido, aço SAE 4144 temperado, revenido e nitretado). Para caracterizar as superfícies foram coletados dados de dureza utilizando-se os métodos tradicionais de indentação, além de dados obtidos através do ensaio de risco (*scratch test*) e ensaios de desgaste por deslizamento adesivo e abrasivo.

### **2.2. Microestrutura**

O trabalho iniciou pelo reconhecimento das diferentes superfícies através de microscopia ótica da seção transversal para análise de microestrutura. Para tanto adotaram-se procedimento padrão para a preparação das amostras, a microestrutura foi revelada utilizando-se a solução química Nital 2%.

O ataque químico é a técnica utilizada para revelar a microestrutura. A superfície polida reflete a luz uniformemente, sendo assim, oculta os detalhes da microestrutura. O ataque químico age como um contraste, neste caso foi utilizado Nital 2%. As amostras foram imersas na solução durante 10s.

### 2.3. Dureza

Macro dureza Rockwell C e perfis de micro dureza HV1(1kgf) na seção transversal, das diferentes amostras foram utilizadas para determinar a dureza das superfícies em estudo.

### 2.4. Ensaio de risco

Para o estudo em questão foram planejados dois tipos de ensaio de risco diferentes. No primeiro, utilizou-se um aumento progressivo da carga (2-150N) e no segundo, utilizaram-se cargas constantes de 60 e 100N. Em ambos os ensaios o comprimento do risco foi de 10 mm.

### 2.5. Ensaio de desgaste por deslizamento adesivo e abrasivo

O ensaio de desgaste constitui-se basicamente do movimento relativo entre o corpo de prova e uma superfície. Para o aumento da intensidade do desgaste foi aplicada uma carga de 1kgf normal à superfície de deslizamento. Ensaios de desgaste tipo pino sobre disco foram realizados utilizando como pino o material em estudo e, como disco, o AISI 4340 com dureza de 57 HRC. Para o deslizamento abrasivo uma lixa de carvão de Si foi colocada sobre o disco (320mesh). O comportamento do material foi medido pela perda de massa dos pinos pesados antes dos testes e em intervalos de 500 m até uma distância total de 6000m.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Caracterização geral

A análise da microestrutura das diferentes superfícies confirmou os tratamentos utilizados com a superfície nitretada exibindo uma camada branca de 0,008mm de espessura seguida de 0,030mm de camada de difusão, definido com a profundidade onde se encontra a dureza de 550Hv. A superfície temperada e revenida apresentou uma fina martensita revenida e o material como fornecido sem evidências de tratamento térmico ou outros benefícios. A correlação destas microestruturas com a dureza Rockwell C está apresentado na figura 1a, com a superfície nitretada apresentando a maior dureza, precedida pelo temperado e revenido e a condições como fornecida apresentando a menor dureza, conforme previsões da leitura (ASM 1992, Volume 4). Perfis de micro dureza, figura 1b, confirmam este comportamento junto à superfície externa. Para o material nitretado observou-se a diminuição progressiva da sua dureza com a aproximação do seu núcleo, isto ocorre devido à elevada dureza observada na camada branca seguido da camada de difusão. Observa-se em qualquer dos casos que o tratamento térmico não alcançou o núcleo das peças como mostra a semelhança de durezas no interior das amostras.

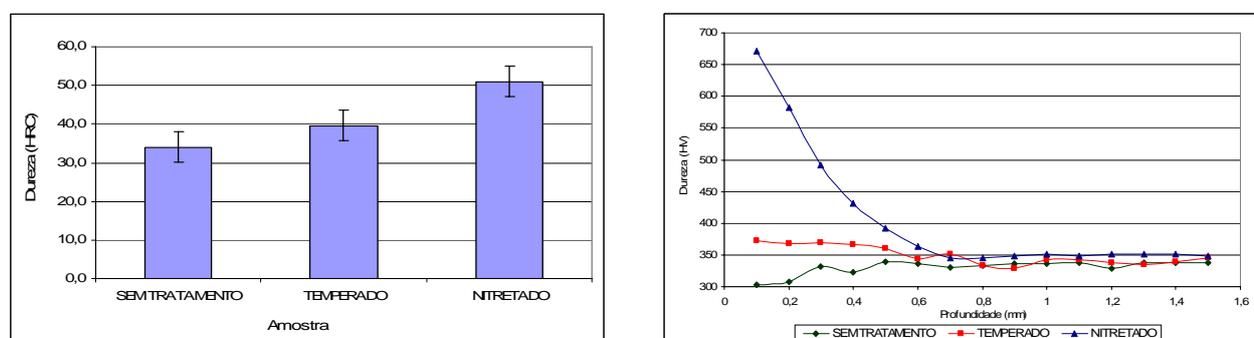


Figura 1. a) Macro dureza e b) Perfil de dureza das superfícies em estudo

### 3.3. Ensaio de risco

Para o ensaio com carga crescente, verificou-se que no início do risco (2N) as amostras com dureza mais elevada proporcionam menor largura de risco. No entanto, à medida que a carga aumenta, a largura dos riscos tende a tornar-se muito semelhante para as três condições, figura 2.

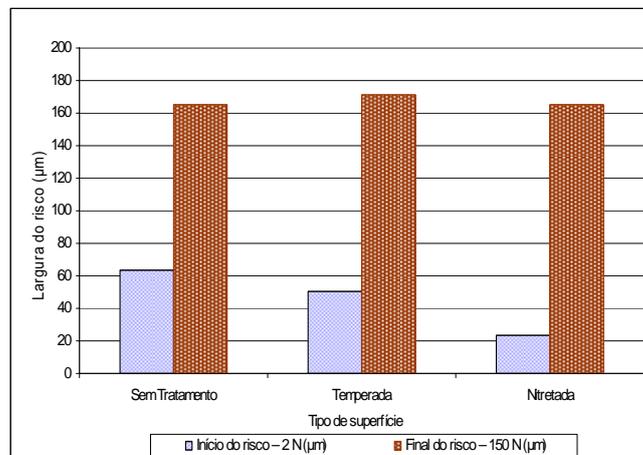


Figura 2. Largura do risco por carga aplicada.

Este comportamento é esperado, pois o material nitretado apresenta camada branca seguida de camada de difusão com espessura total de  $38\mu\text{m}$  e a profundidade do risco chega até  $55\mu\text{m}$  para a carga final (150 N). A esta profundidade, a característica de dureza é muito semelhante à do material sem nitretação, como demonstrado pelos perfis de dureza.

É interessante observar que a correlação direta entre dureza e comportamento ao risco para as superfícies em estudo não existe para todas as cargas estudadas, uma vez que a dureza varia com a distância da superfície externa. No entanto, considerando apenas as menores cargas, verifica-se que quanto maior a dureza, menor a largura do risco.

A mesma relação foi observada ao correlacionar-se dureza e profundidade do risco com carga constante, com uma relação inversamente proporcional entre dureza e profundidade do risco, observada para cargas constantes, figura 3, de 60 e 100 N.

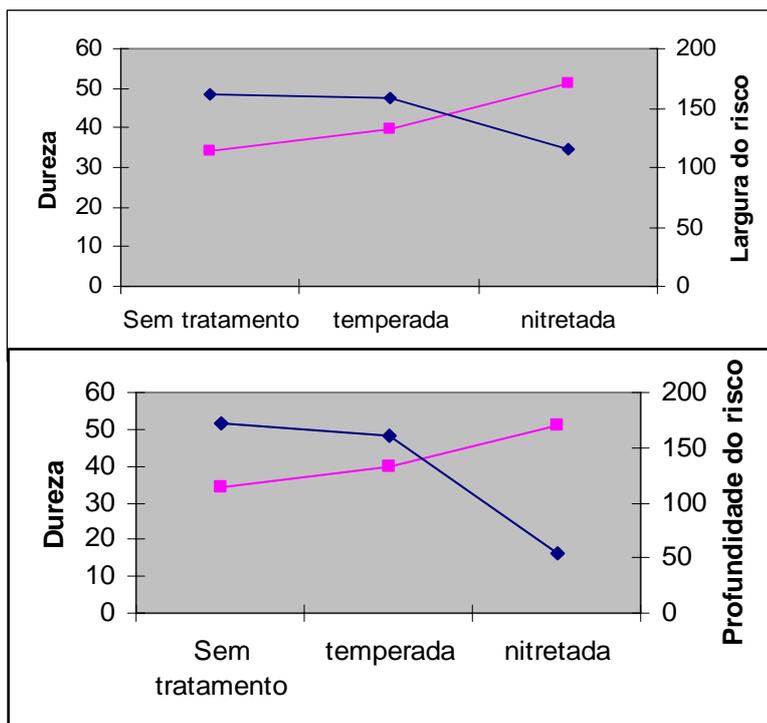


Figura 3. Relação entre dureza do aço SAE 4144 e as características do risco (60N)

Observou-se que o gradiente de dureza medido nas superfícies testadas não afeta esta relação no entanto a presença de um gradiente de dureza aumentará a largura e profundidade do risco, quando comparado ao resultado de superfícies de dureza constante e de valor igual à maior dureza medida.

### 3.4 Comportamento ao desgaste

As figuras 3 e 4 apresentam o comportamento ao desgaste adesivo e abrasivo, respectivamente em função da distância percorrida, para as superfícies testadas. A menor perda de massa foi medida para as superfícies nitretadas e a maior para os pinos de material na condição como fornecido isto é sem beneficiamento. A maior agressividade do desgaste abrasivo resultou em maior perda de massa para todas as condições testadas.

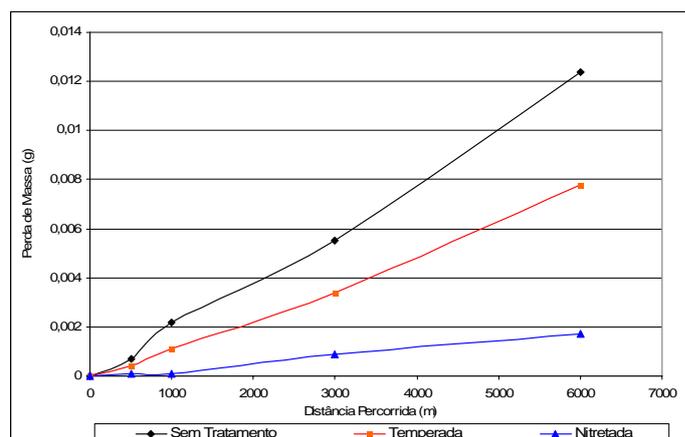


Figura 4. Desgaste por deslizamento adesivo em função da distância percorrida

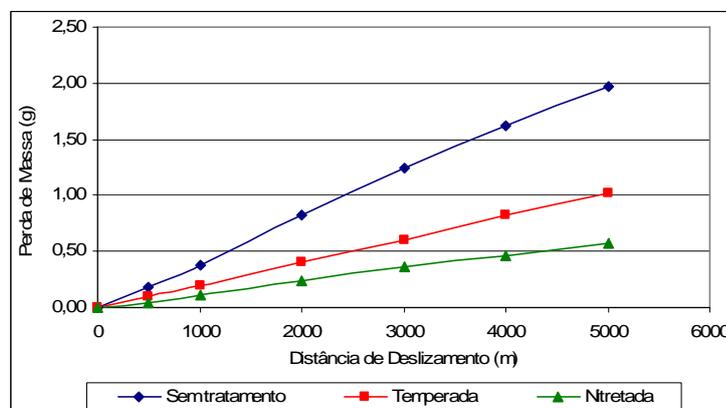


Figura 5. Desgaste por deslizamento abrasivo em função da distância percorrida

Correlacionado a perda de massa total com a dureza do aço SAE 4144 nas diferentes condições de estudo observa-se que após desgaste adesivo, a menor dureza medida pode ser associada com a maior perda de massa, seguindo previsões da literatura, figura 6. No entanto este mesmo aço nas condições temperada e revenida com e sem nitretação apresenta resistência ao desgaste similar (perda de massa similares) e superior a medida para a condição sem beneficiamento, figura 6a. A perda de massa medida após desgaste por deslizamento abrasivo apresentou uma relação inversamente proporcional a dureza, ocorrendo um aumento da resistência ao desgaste (menor perda de massa) com o aumento da dureza, figura 6b, seguindo previsões da literatura.

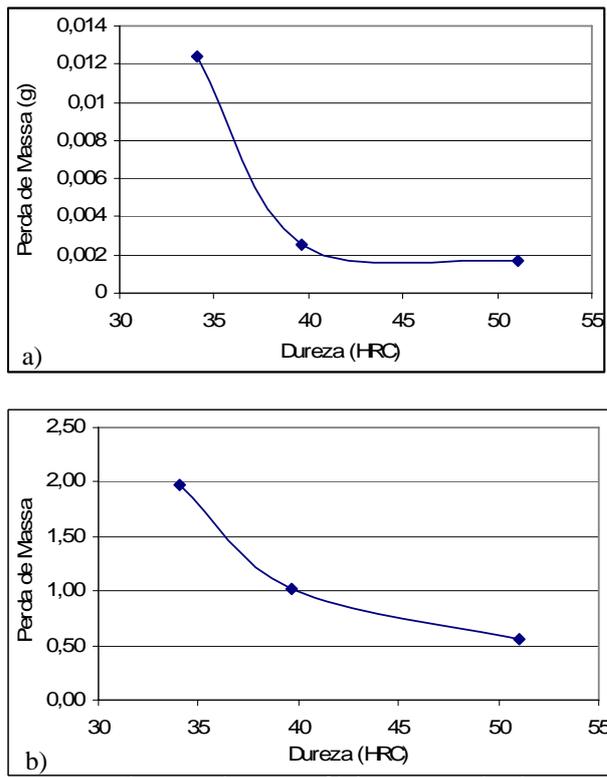
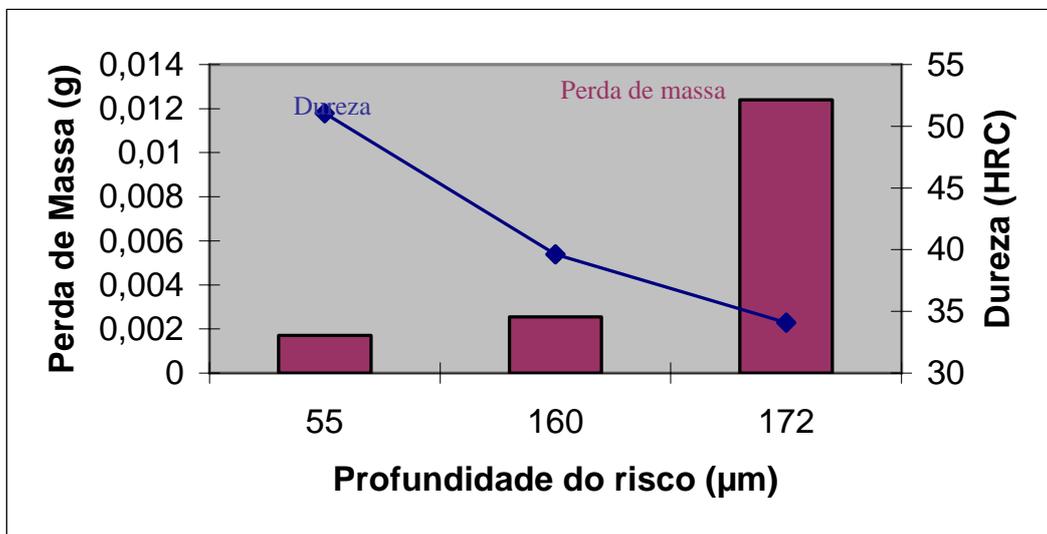


Figura 6. Relação entre a dureza da superfície e a perda de massa medida após desgaste por deslizamento adesivo (a) e abrasivo(b).

As figuras 7 e 8 apresentam a correlação entre os resultados de testes de desgaste, risco (60N) e dureza (HRC) para as diferentes condições do material SAE 4144 avaliadas neste trabalho.



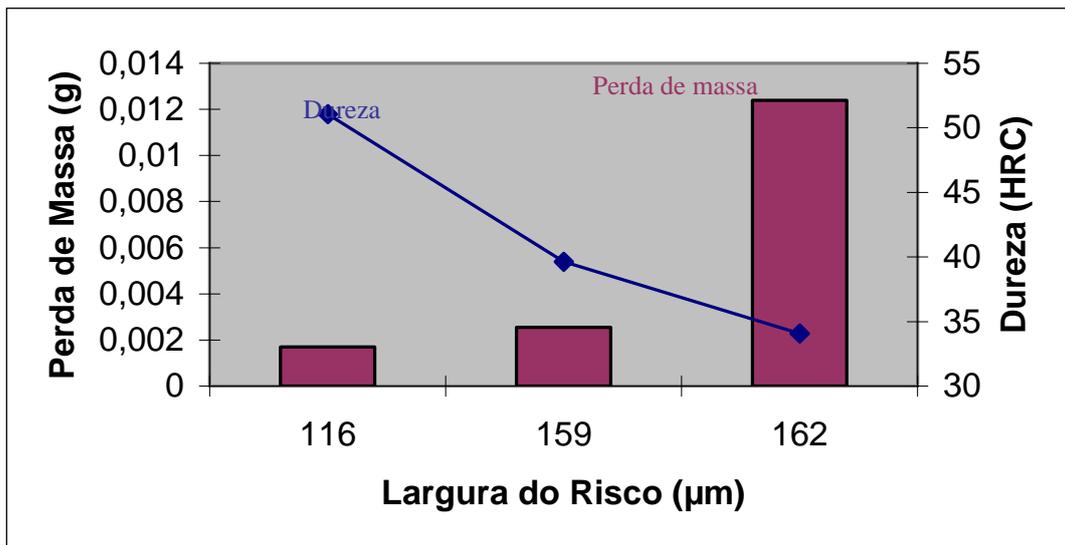


Figura 7. Correlação entre resultados de desgaste adesivo, dureza (HRC) e risco (60N) para as superfícies testadas

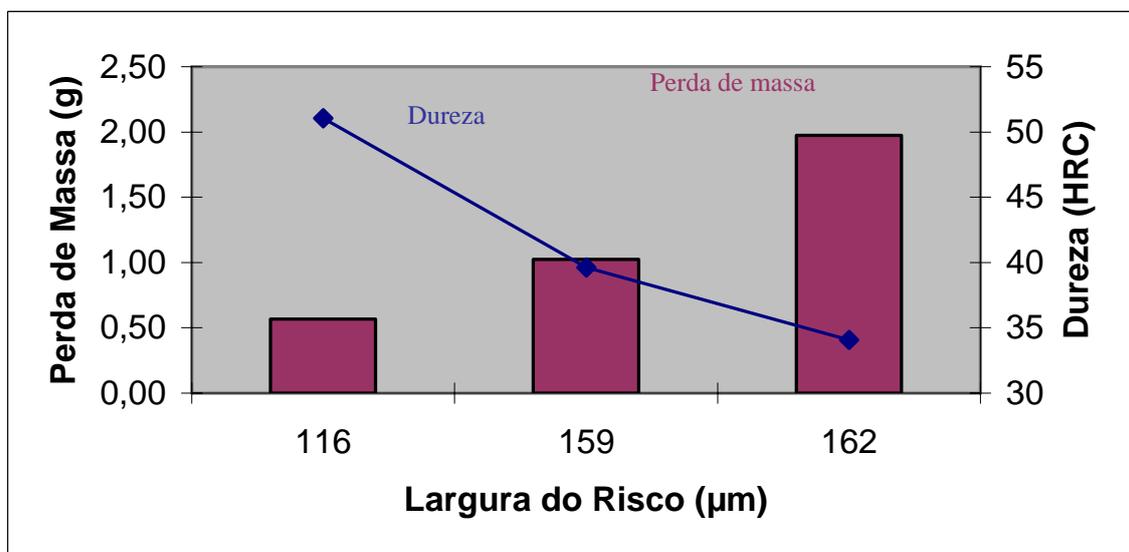
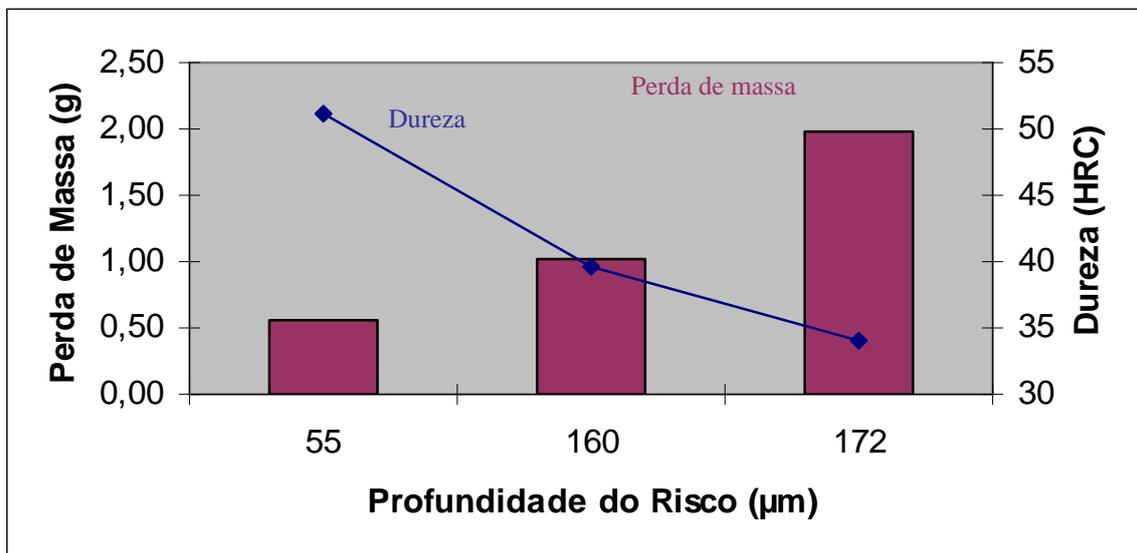


Figura 8. Correlação entre resultados de desgaste abrasivo, dureza (HRC) e risco (60N) para as superfícies testadas

As figuras 7 e 8 permitem observar as principais tendências apresentadas pelo aço SAE 4144 nas diferentes condições de estudo, verificando-se que a dureza é inversamente proporcional a perda de massa ou seja diretamente proporcional a resistência ao desgaste enquanto que as características do risco são diretamente proporcionais a perda de massa, ou seja, inversamente proporcionais a resistência ao desgaste.

No entanto é deve-se ter em atenção que existe dificuldade no estabelecimento de procedimentos de avaliação mecânica de superfícies quando estas apresentam um gradiente de dureza. Esta dificuldade ocorre principalmente devido ao diferente comportamento apresentado pelo material em função de sua variação de dureza. Isto foi comprovado no ensaio de risco, por exemplo, onde as superfícies apresentaram para cargas pequenas e médias um comportamento diferente daquele apresentado para cargas elevadas.

#### 4. CONCLUSÃO

Para as diferentes condições do aço SAE 4144 e testes utilizados, é interessante destacar que a correlação direta entre dureza e comportamento ao risco para as superfícies estudadas não existe para todas as cargas, uma vez que a dureza varia com a distância da superfície externa. No entanto, considerando apenas as menores cargas, é possível concluir que quanto maior a dureza da superfície, menor a largura e a profundidade do risco. Este comportamento foi o mesmo tanto para carga constante quanto para crescente.

Na correlação entre desgaste por deslizamento adesivo e dureza, observou-se que o aumento na dureza da superfície implica em uma redução na perda de massa, o que indica uma maior resistência da superfície testada ao desgaste. Na correlação entre este tipo de desgaste e risco, foi possível observar que o aumento da profundidade e da largura do risco acompanha o aumento da perda de massa das amostras ensaiadas.

Comportamento semelhante foi observado para os ensaios de desgaste por deslizamento abrasivo. No entanto, a perda de massa foi mais significativa neste ensaio devido à maior agressividade sofrida pela superfície da amostra.

Na tentativa de correlacionar dureza, risco e desgaste, verificou-se que à medida que a dureza da superfície aumentou, menor foi a largura e a profundidade do risco e maior a resistência ao desgaste, seja ele por deslizamento adesivo ou abrasivo. Este resultado foi observado tanto no ensaio de risco com carga constante quanto no ensaio com carga progressiva. No estudo da relação entre as diversas técnicas utilizadas constatou-se ainda que o comportamento de largura e profundidade do risco depende da carga aplicada. Isto é particularmente importante para superfícies com gradiente de dureza, como observado na amostra temperada e nitretada. Desta forma, é importante que o responsável pela avaliação da superfície esteja treinado e apto para realizar esta avaliação.

O estudo das diversas técnicas de caracterização de superfícies em conjunto contribui para o aumento da quantidade de informações disponíveis, além de aumentar a compreensão das características avaliadas. No entanto, uma técnica de caracterização de superfícies deve ser utilizada para complementar outra, mas não para substituí-la.

#### 5. REFERÊNCIAS

1. HOY, R. et al. Scratch resistance of CrN coatings on nitrided steel. **Surface & Coatings Technology** xx, xxx-xxx, 2004.
2. BURNETT, P.J. et al. The relationship between hardness and scratch adhesion. **Thin solid films**, 154, p.403-416, 1987.
3. RODRIGUES, Adolfo et al. Analytical correlation of hardness and scratch adhesion for hard films. **Surface and Coatings Technology**, 148, p 8 – 17, 2001.
4. MEZLINI, S. et al. Abrasions of aluminium alloy: effect of subsurface hardness and scratch interaction simulation. **Wear** 257, p. 892 – 900, 2004.

5. JEONG, D. H., et al. The relationship between hardness and abrasive wear resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni-P coatings. **Scripta Materialia**, 48, p 1067 – 1072, 2003.
6. YUN, Eunsub et al. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance in Cr3C2/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation. **Materials Science and Engineering**, A 405, p 163 – 172, Maio 2005.
7. BROOKES, C. A., et al., Some observations on scratch and indentation hardness measurements. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 5, p. 1284 – 1293, 1972.
8. QIAN, Limmao, et al., Anomalous relationship between hardness and wear properties of a superelastic nickel-titanium alloy. **Applied Physics Letters**, Volume 84, Issue 7, p 1076 – 1078, February 16, 2004.
9. HARRISON, A. et al. A correlation between abrasion resistance and other properties of some acrylic resins used in dentistry. **PubMed**, Vol 13 (1), p 23 -34, Jan 1979.

## MECHANICAL EVALUATION OF SURFACES

### **Rodrigo José Brasil Wanda Bru**

Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Jardim das Américas, 81531-990, Curitiba – PR – Brasil, P. Box: 19011  
rodrigo.bru1@gmail.com

### **Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira**

Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Jardim das Américas, 81531-990, Curitiba – PR – Brasil, Caixa Postal: 19011  
sofmat@ufpr.br

***Abstract.** Failure of mechanical components in most cases is concentrated or starts at their surface, as in wear. Tribology studies the different wear mechanisms and states that the tribological systems determine the degradation of the component. As a consequence whenever is required to evaluate a surface there is not a standard procedure as it depends on the tribological features. Nevertheless it is required to understand different testing procedures and their results, to evaluate a surface regarding their mechanical behavior. In this work, three different surfaces of an SAE 4144 steel (normalized; quench and temper; quench, temper and plasma nitrided) were evaluated using hardness tests (Rockwell and HVI), scratch tests under constant and increasing load, sliding and abrasive wear tests. Results showed that an increasing on surface hardness is followed by an increase on wear resistant, measured by mass loss. Scratch tests results are dependable on the testing procedures, and on surface features such as the presence of a hardness gradient, requiring therefore a more qualified operator.*

***Keywords.** nitriding, scratch test, abrasive wear, sliding wear.*