

# USO DO ENSAIO DE RISCAMENTO LINEAR PARA CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES TRATADAS TERMOQUIMICAMENTE: UMA ABORDAGEM MULTIESCALA\*

Giuseppe Pintaude<sup>1</sup>  
Carlos Mauricio Lepienschki<sup>2</sup>

## Resumo

A avaliação do comportamento tribológico de superfícies tratadas termoquimicamente, tais como cementação e nitretação, é de suma importância para a cadeia produtiva de ferramentas, moldes e matrizes. Entretanto, o uso de ensaios tribológicos para estas superfícies deve ser bem selecionado, de modo que se evite avaliações errôneas, em particular por conta do efeito do substrato em diferentes níveis. Neste contexto, o ensaio de riscamento linear pode ser bastante adequado para distinguir os papéis da superfície e do substrato. Para tanto, este trabalho apresenta uma revisão sobre o uso deste tipo de ensaio para a avaliação tribológica em termos de desempenho de superfícies tratadas termoquimicamente. A abordagem utilizada é multiescala, considerando que tipos de resultados são obtidos a partir de cada faixa de carga utilizada e as aplicações para cada uma das mesmas.

**Palavras-chave:** Riscamento linear; Tratamentos termoquímicos; Desgaste; Atrito.

## ON THE USE OF LINEAR SCRATCH TEST FOR CHARACTERIZING THERMO-CHEMICALLY TREATED SURFACES: A MULTISCALE APPROACH

## Abstract

The evaluation of the tribological behavior of thermochemically treated surfaces, such as carburising and nitriding, is of uppermost importance for the productive chain of tools, molds and matrices. However, the use of tribological tests for these surfaces should be well selected to avoid erroneous evaluations, in particular considering the effect of the substrate at different levels. In this context, the linear scratch test may be well suited to distinguish the roles of the surface and the substrate. For that purpose, this paper presents a review on the use of this type of test for tribological evaluation in terms of the performance of thermochemically treated surfaces. The approach used is multiscale, considering what types of results are obtained from each load range used and the applications for each one of them.

**Keywords:** Linear scratching; Thermo-chemical treatments; Wear; friction.

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia Mecânica, Professor Titular da UTFPR, Curitiba, Pr, Brasil.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Professor Visitante da UTFPR, Curitiba, Pr, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Desde que o termo Engenharia de Superfícies foi cunhado [1], o desenvolvimento de tratamentos de superfícies e revestimentos para aços ferramentas foi de substancial importância para o aumento do desempenho desta classe de materiais [2]. Entretanto, a avaliação dos mesmos é relativamente complexa, muito pelo fato de que as operações industriais envolverem diferentes mecanismos de desgaste, muitas vezes associados com temperaturas relativamente elevadas [3]. Um exemplo prático é o aumento de 80% na vida de punções fabricados em aço AISI D2 temperados e revenidos, utilizados para estampagem de carrocerias, quando os mesmos foram revestidos com nitreto de titânio [4].

Dentro deste contexto, o ensaio de riscamento linear pode ser uma técnica de caracterização de superfícies tratadas e revestidas extremamente útil, pela sua relativa simplicidade e rapidez de execução. Por outro lado, sua interpretação não é trivial, sendo que este trabalho pretende ser uma contribuição para usuários na área de ferramentas, moldes e matrizes neste sentido.

## 2 ENSAIO DE RISCAMENTO LINEAR

### 2.1 Conceitos básicos

O Metals Handbook ASM [5] apresenta quatro abordagens possíveis para um ensaio de riscamento:

- a) Esclarecer os mecanismos de deformação e/ou remoção de material;
- b) Estimar a resistência ao desgaste abrasivo de materiais e revestimentos;
- c) Determinar a dureza ao riscamento; e
- d) Avaliar a resistência à adesão de revestimentos.

Esta revisão mostra que os itens (a) e (c) podem ser utilizados em conjunto para atender a abordagem (b). Outra questão relevante é determinar a resistência à adesão como equivalente à resistência ao desgaste, de forma automática, embora uma correlação certamente exista. Portanto, o termo “resistência ao riscamento” deve ser utilizado com prudência, de modo que a abordagem utilizada deva sempre estar muito bem definida pelo usuário.

Certamente dentre as abordagens definidas, a resistência ao riscamento ( $H_s$ ) é relativamente simples por ser direta e definida de forma normalizada pela ASTM G171 [6]:

$$\begin{aligned} H_s &= 8F/\pi b^2, \text{ para penetradores esféricos} \\ H_s &= 4F/b^2, \text{ para penetradores pontiagudos} \end{aligned} \quad (1)$$

Onde,

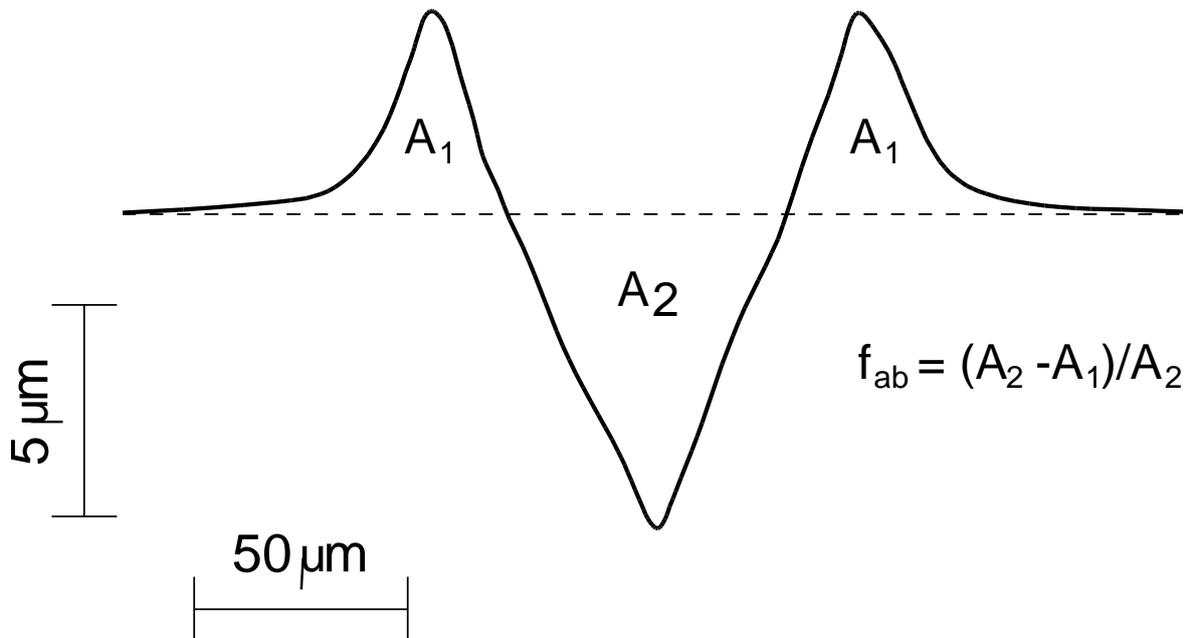
F = força normal aplicada; e

b = largura do risco.

O uso isolado da dureza ao riscamento pode ser considerado de pouco interesse para aplicações industriais que envolvam a engenharia de superfícies, sendo muito mais interessante associá-la com a resistência ao desgaste. O uso independente

desta grandeza pode ser relacionado em aplicações para substituição da dureza Mohs, tanto em mineralogia, quanto na construção civil [7].

Por sua vez, a avaliação da quantidade de deformação e dos mecanismos de remoção de material pode ser extremamente útil utilizando o ensaio de riscamento, por meio do fator de abrasão ( $f_{ab}$ ), definido de acordo com uma típica seção transversal de superfície metálica após o riscamento [8] (Fig.1):



**Figura 1.** Típica seção transversal após ensaio de riscamento. Adaptado de [8].

O fator de abrasão foi usado extensivamente pela literatura para modelar o desgaste abrasivo de metais, sendo que Zum-Gahr [9] o fez descrevendo a dependência do mesmo com diferentes propriedades mecânicas de metais.

Percebe-se a partir da Fig. 1 que a capacidade de remover material, ou seja, para que o contato mecânico seja mais efetivo em promover o micro-mecanismo de corte, está relacionado com a redução das áreas  $A_1$ , que correspondem à formação de bordas (“pile-ups”). Portanto, maiores fatores de abrasão significam pior resistência à abrasão, o que permite estabelecer uma relação entre o  $f_{ab}$  e o coeficiente de desgaste  $K$ . Esta relação entre coeficiente de desgaste e fator de abrasão foi descrita por Jacobson et al. [10]:

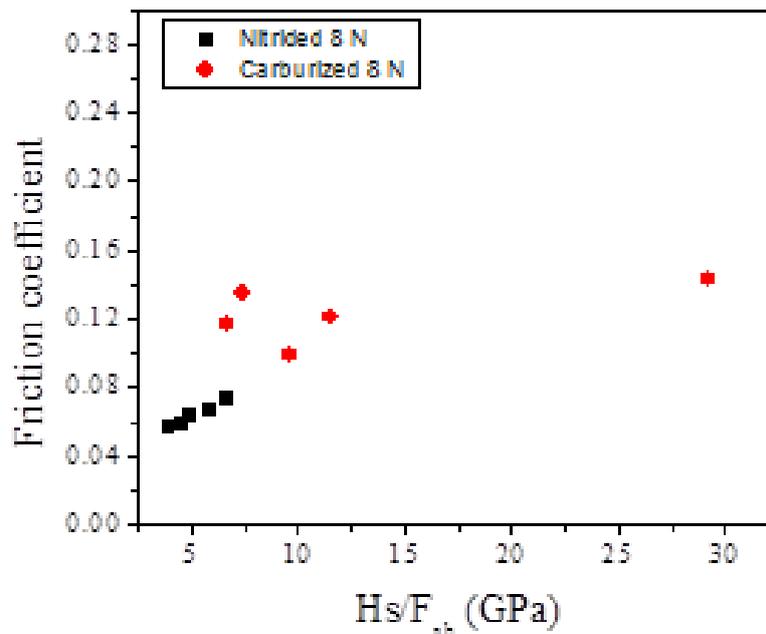
$$f_{ab} = K/\mu_P \quad (2)$$

Onde,

$\mu_P$  = componente de deformação do coeficiente de atrito.

Isolar componente de atrito pode não ser uma tarefa trivial. No caso de um processo de corte, esta variável é dependente da geometria do penetrador (ou partícula abrasiva) [11]. Mesmo que a outra componente do atrito, responsável pela adesão, seja tomada como constante (tal como descrito na referência [11]), o desconhecimento do ângulo de ataque de uma partícula torna a definição complexa do ponto de vista prático.

Por sua vez, a avaliação do coeficiente de atrito para o desempenho de materiais para moldes, matrizes e ferramentas é de fundamental importância. Durante o ensaio de riscamento, medidas de coeficiente de atrito podem ser realizadas com o auxílio de instrumentação adequada. Dessa forma, o comportamento tribológico num ensaio de riscamento deve ser capaz de forma simultânea a resistência ao desgaste, combinando os resultados determinados para  $H_s$  e  $f_{ab}$ , e o coeficiente de atrito. Esta abordagem foi colocada em prática por Rovani et al. [12] para superfícies cementadas e nitretadas, como mostra a Figura 2.

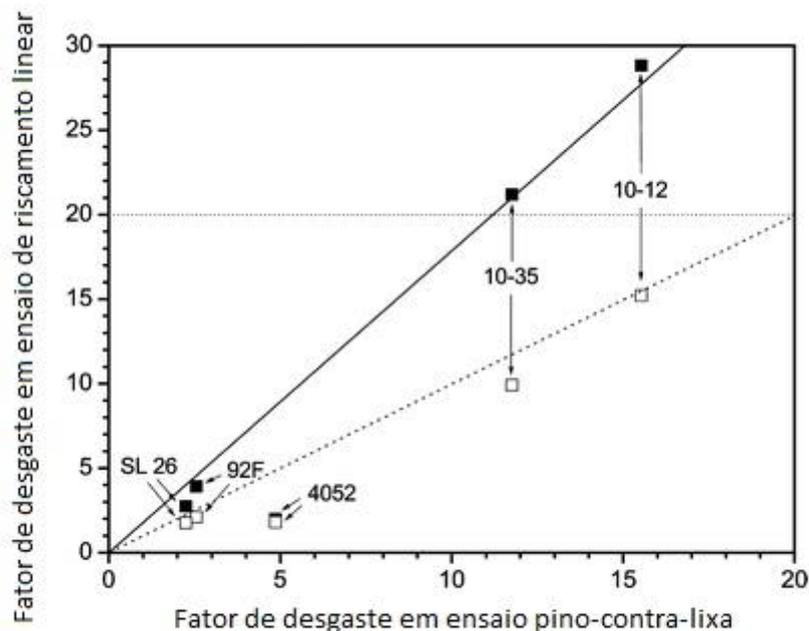


**Figura 2.** Mapa tribológico para ensaio de riscamento. Resultados para superfícies cementadas e nitretadas [12].

O parâmetro  $f_{ab}$ , embora útil na interpretação dos micro-mecanismos atuantes, e também na classificação quanto à resistência ao desgaste, requer cuidados específicos em sua determinação. Um trabalho que sumariza bem estes procedimentos se deve a Franco e Sinatora [13], no qual pontua que atenção específica deve ser dada aos seguintes fatores:

- a) Definição do plano de referência: deve ser adequado no sentido de excluir por completo a área de sulco ( $A_2$ );
- b) Definição dos limites das áreas deformadas acima do sulco ( $A_1$ ): o usuário deve definir de duas linhas verticais em cada lado do sulco de modo que delimite a região para cálculo da área, excluindo quaisquer variações que não sejam resultantes do próprio ensaio; e
- c) Falsas formações de bordas: verificar se as bordas não são cavacos que estão aderidos fortemente à superfície, causando impressão de que são material que não seria removido do sulco.

Finalmente, como fechamento dos conceitos básicos, destaca-se o trabalho de Vancl et al. [14], o qual mostra que a formação de bordas ( $A_1$ ) é determinante na relação entre os resultados de resistência ao riscamento (contato singular) com a resistência ao desgaste abrasivo (múltiplos contatos). O principal resultado destes autores está apresentado na Figura 3.



**Figura 3.** Fator de desgaste ( $\text{mm}^3/\text{Nm} \times 10^{-2}$ ) medido em ensaio de riscamento linear e sua correlação com o mesmo fator medido em ensaio pino-contra-lixo, segundo duas metodologias de cálculo. Adaptado de [14]. Pontos pretos: cálculo de volume considerando apenas área do sulco. Pontos brancos: cálculo de volume considerando diferença entre área de sulcos e área de bordas laterais.

A Fig.3 mostra que os fatores de desgaste determinados em sistemas diferentes possuem melhor correlação quando a metodologia de cálculo para o mesmo no ensaio de riscamento linear considera que a área de desgaste é determinada pela redução entre a área do sulco ( $A_2$ ) e a área de bordas laterais ( $A_1$ ). Quando apenas a área do sulco é levada em consideração para cálculo do volume desgastado, o fator de desgaste via ensaio de riscamento é superestimado em relação ao mesmo fator num ensaio de múltiplos contatos.

## 2.2 Aplicação de conceito multiescala

A aplicação de tratamentos de superfície ou revestimentos para o caso dos aços ferramentas limita-se usualmente a dimensões finais de poucos micrometros.

Estas dimensões são suficientemente pequenas para que, com baixas cargas aplicadas, o estágio de fratura seja alcançado. A transição entre comportamento elasto-plástico e fratura é a base para que se determine uma resistência à adesão em ensaio de riscamento linear.

Como o sinal acústico é sensível ao processo de propagação de trinca, este tipo de instrumentação é bem usual, sendo que variações nos sinais são associados a

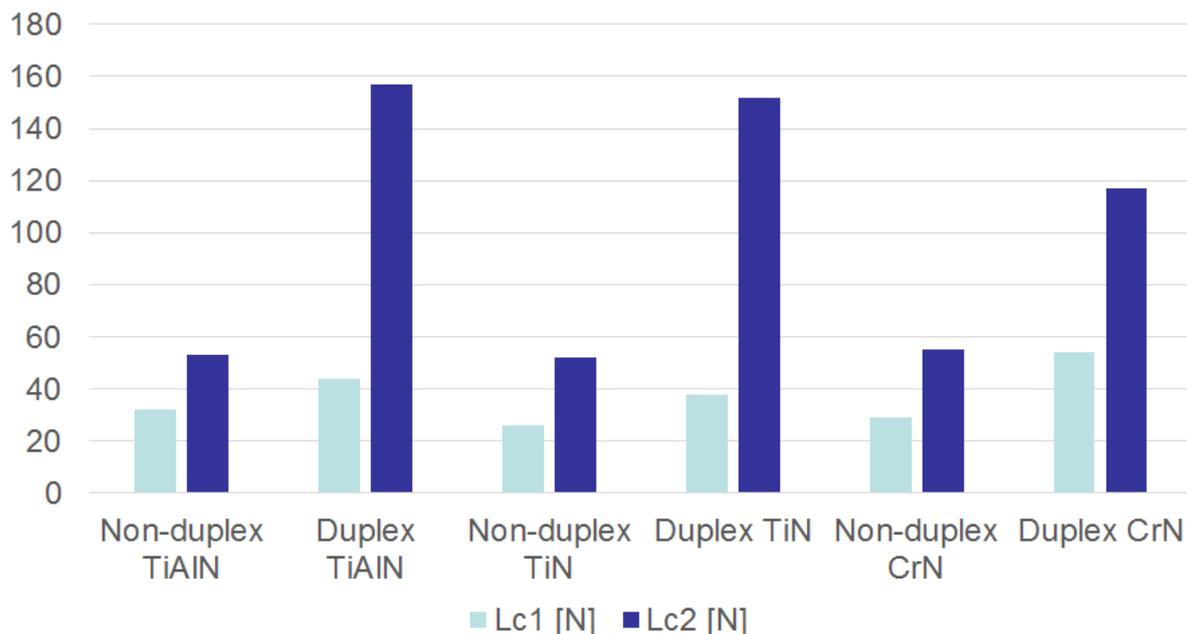
diferentes morfologias de trincas e diferentes níveis de carga crítica com relação à adesão.

Fazendo uso da possibilidade de aplicação contínua de força progressiva ao longo do ensaio de riscamento, podem ser definidas as seguintes condições:

- a)  $L_{c1}$  = força crítica para falha coesiva, na qual a primeira falha ocorre no revestimento/camada tratada.
- b)  $L_{c2}$  = força crítica para falha adesiva, na qual há a primeira exposição do substrato é identificada.

Uma série de trabalhos demonstrou que ambas forças  $L_{c1}$  e  $L_{c2}$  puderam ser aumentadas com o uso de tratamentos duplex, isto é, uma camada nitretada ser interposta entre o aço ferramenta e o revestimento final.

Batista et al. [15] demonstraram este efeito para 3 revestimentos PVD depositados sobre o aço AISI H13. A Figura 4 mostra o efeito da camada nitretada sobre os valores  $L_{c1}$  e  $L_{c2}$  após ensaio de riscamento linear.



**Figura 4.** Valores de forças críticas coesiva e adesiva determinadas para revestimentos PVD depositados em aço AISI H13, sem (non-duplex) e com (duplex) camada nitretada. Adaptado de [15].

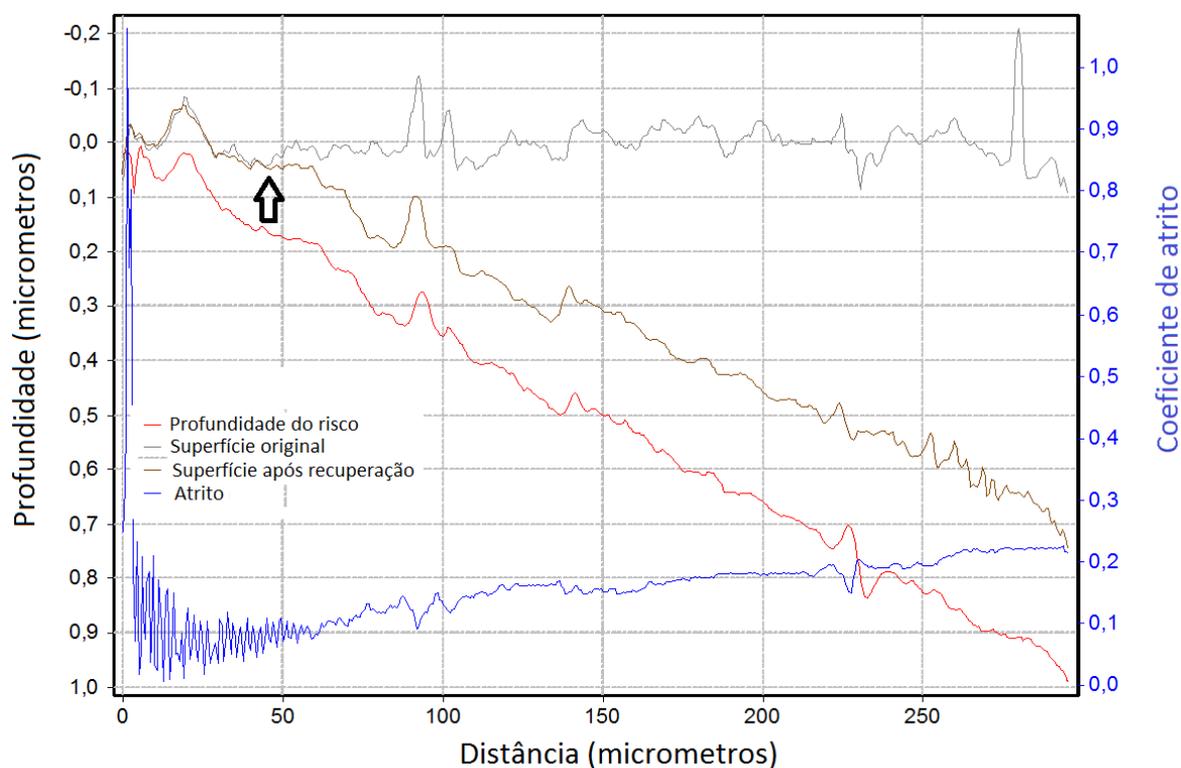
É notório o aumento das forças críticas coesiva e adesiva nos casos em que há a presença da camada nitretada, especialmente para a  $L_{c2}$ . Esta variação está ligada a dois fatores:

- Um maior suporte mecânico dado pela camada imediatamente abaixo do revestimento e, conseqüentemente;
- Um menor gradiente de propriedades entre o revestimento e o substrato.

A faixa de cargas resultantes implica em profundidades da ordem de micrometros. Esta ordem de grandeza implica que o efeito do substrato está sempre presente, o que para as medidas de adesão é adequado. A transição de comportamento neste caso é do campo plástico para a fratura. Em muitos casos é adequado que se conheça o comportamento da superfície tratada/revestida sem o efeito do substrato e que, de alguma forma, se descreva a transição de comportamento do campo

elástico para o plástico. Desta forma, esta descrição somente é viável com faixas de forças aplicadas na escala nanométrica.

A Figura 5 mostra um exemplo de ensaio de riscamento com força progressiva, realizada com penetrador esférico de diamante, com raio  $6 \mu\text{m}$ , para uma força máxima de  $0,2 \text{ N}$ . O material ensaiado é um aço inoxidável super duplex SAF 2507 [16], nitretado em gaiola catódica.



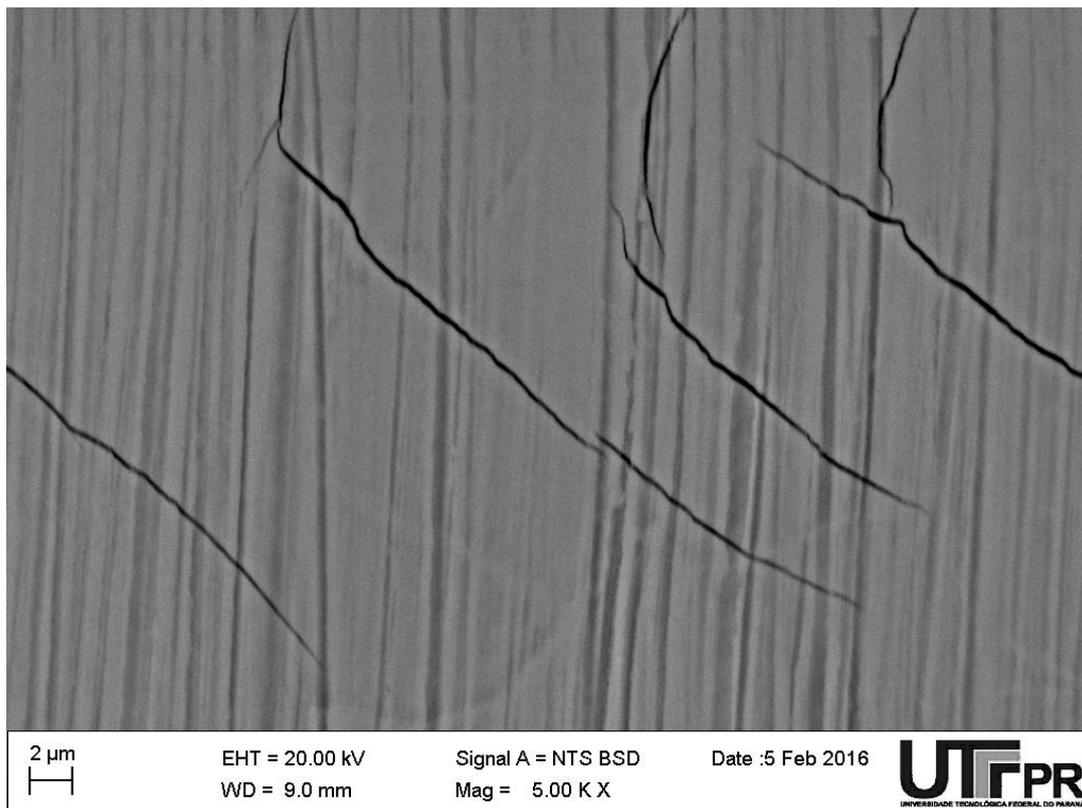
**Figura 5.** Variação da profundidade ao longo do comprimento aplicando força progressiva em ensaio de riscamento linear na faixa manométrica. Material ensaiado: camada nitretada sobre aço inoxidável duplex SAF2507.

Percebe-se pela Figura 5 a possibilidade de identificar uma transição, indicada na figura com uma flecha, na qual a rugosidade da superfície original não mais coincide com a rugosidade após a recuperação elástica (remoção da força aplicada).

É possível identificar este ponto em termos de distância aplicada e, sabendo-se a taxa de aplicação de carga, pode-se estimar a força para o início do escoamento.

Outra informação interessante é a quantidade de recuperação elástica (diferença entre a profundidade do risco e a superfície após recuperação), que se mantém aproximadamente constante ao longo de todo o trajeto.

Vale observar que a camada nitretada ensaiada possui aproximadamente  $1,5 \mu\text{m}$ , o que faz com que as informações reflitam em grande parte as propriedades apenas da camada, sem efeito do substrato. Como contraponto, esta mesma superfície quando ensaiada com penetrador Rockwell C com força de  $5 \text{ N}$  apresentou o seguinte padrão de trincas, ilustrado na Figura 6.



**Figura 6.** Superfície riscada de camada nitretada 1,5  $\mu\text{m}$  de espessura sobre aço SAF 2507. Força aplica de 5 N. Notam-se trincas semi-circulares.

### 3 CONCLUSÃO

Foram apresentados os principais conceitos básicos para aplicar o ensaio de riscamento linear em superfícies tratadas termoquimicamente ou com aplicação de revestimentos. Além disso, demonstrou-se a utilidade de uma aplicação multiescala para melhor compreender diferentes transições de comportamento mecânico da superfície. Desta forma, chama-se a atenção para os seguintes pontos:

1. A determinação com maior acurácia possível da área ou volume das bordas laterais formadas é o principal cuidado para se estimar a resistência ao riscamento de superfícies, no sentido de inferir sobre a resistência ao desgaste; e
2. A aplicação conjunta de ensaios em diferentes escalas permite determinar as transições de comportamento mecânico ao longo do ensaio, além de poder estimar o efeito do substrato nas propriedades de camadas em diferentes proporções.

### Agradecimentos

G. Pintaude agradece ao CNPq, pela concessão da bolsa de produtividade em pesquisa Processo 308416/2017-1 e ao Processo 233074/2014-7, relativo à concessão de bolsa de pós-doutorado. Da mesma forma, um agradecimento especial ao Dr. Francisco Arieta pelo convite para a participação no 16º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes.

## REFERÊNCIAS

- 1 Dong H. Guest editorial: in memory of Tom Bell. *Surface Engineering*, 2010; 26(1-2):1-10.
- 2 Pintaude, G. Estudos de casos analisados na disciplina 'proteção de superfícies' na UTFPR em ferramentas sujeitas ao desgaste. *Revista Tecnologia & Humanismo* 2006; 20(30):69-78.
- 3 Pellizzari M, Molinari A. The application-oriented heat treatment of tool steels. *Materials and Manufacturing Processes*. 2009 May 28;24(7-8):723-8.
- 4 Pintaude G, Beltrão PA, Faria MA. Plastic deformation analysis of low-carbon steel due to metal hole punching using coated and uncoated tools. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2009 Mar;31(1):52-6.
- 5 Jacobsson S, Olsson M, Hedenqvist P, Vingsbo O. Scratch testing. *ASM International, ASM Handbook*,. 1992;18:430-7.
- 6 ASTM A. G171 standard test method for scratch hardness of materials using a diamond stylus. *ASTM Stand*. 2009;3:1-7.
- 7 Sun Y, Aman M, Espinoza DN. Assessment of mechanical rock alteration caused by CO<sub>2</sub>- water mixtures using indentation and scratch experiments. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2016 Feb 29;45:9-17.
- 8 Buttery TC, Archard JF. Grinding and abrasive wear. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1970 Jun;185(1):537-51.
- 9 Zum Gahr KH. Modelling of two-body abrasive wear. *Wear*. 1988 May 16;124(1):87-103.
- 10 Jacobson S, Wallén P, Hogmark S. Fundamental aspects of abrasive wear studied by a new numerical simulation model. *Wear*. 1988 Apr 15;123(2):207-23.
- 11 Sin H, Saka N, Suh NP. Abrasive wear mechanisms and the grit size effect. *Wear*. 1979 Jul 1;55(1):163-90.
- 12 Rovani AC, Breganon R, de Souza GS, Brunatto SF, Pintaúde G. Scratch resistance of low-temperature plasma nitrided and carburized martensitic stainless steel. *Wear*. 2017 Apr 15;376:70-6.
- 13 Franco LA, Sinatora A. Material removal factor (fab): A critical assessment of its role in theoretical and practical approaches to abrasive wear of ductile materials. *Wear*. 2017 Jul 15;382:51-61.
- 14 Venci A, Manić N, Popovic V, Mrdak M. Possibility of the abrasive wear resistance determination with scratch tester. *Tribology Letters*. 2010 Mar 1;37(3):591-604.
- 15 Batista JCA, Godoy C, Pintaúde G, Sinatora A, Matthews A. An approach to elucidate the different response of PVD coatings in different tribological tests. *Surface and Coatings Technology*, 2003; 174:891-8.
- 16 Morelo F, Grabarski MI, de Camargo Beltrão PA, Pintaude G. Surface integrity of bored super duplex stainless steel SAF 2507. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2017;39(7):2649-58..