

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ARRASTE NA DUREZA AO RISCO DE MATERIAIS DÚCTEIS

Fábio José Pinheiro Sousa

Universidade Federal de Santa Catarina - Depto de Eng. Mecânica – Laboratório de Materiais CEP 88040-970 – C. P 5153 - Florianópolis - SC– Brasil - fabiodacivil@pg.materiais.ufsc.br

André Luís Spiller

Universidade Federal de Santa Catarina - Depto de Eng. Mecânica – Laboratório de Materiais CEP 88040-970 – C. P 5153 - Florianópolis - SC– Brasil - andrespiller@grad.ufsc.br

Daniel Tridapalli

Universidade Federal de Santa Catarina - Depto de Eng. Mecânica – Laboratório de Materiais CEP 88040-970 – C. P 5153 - Florianópolis - SC– Brasil - danieltrida@terra.com.br

Orestes Estevam Alarcon

Universidade Federal de Santa Catarina - Depto de Eng. Mecânica – Laboratório de Materiais CEP 88040-970 – C. P 5153 - Florianópolis - SC– Brasil - orestesl@materiais.ufsc.br

RESUMO

A esclerometria é uma técnica experimental que mede principalmente a dureza ao risco dos materiais. O ensaio consiste basicamente em promover um risco na superfície da amostra, conhecendo-se a força aplicada, a velocidade de riscamento, a largura do risco e as características geométricas do indentador. A dureza ao risco está relacionada à resistência ao desgaste de um material, representando a resistência média à penetração oferecida pelo material. Além disso, difere-se de durezas quasi-estáticas, tal como a dureza Vickers, por computar efeitos dinâmicos, o que permite a avaliação do comportamento do material quando submetidos à diversas condições de riscamento, tais como variações da velocidade de avanço, da carga normal aplicada e do uso de diferentes geometrias e ângulos de arraste do indentador. Este trabalho pretende estudar a influência do ângulo de arraste do indentador na propriedade de dureza ao risco de materiais dúcteis. Para tanto usou-se um esclerômetro retilíneo automatizado, e uma amostra formada por um filme de Ni depositado sobre uma chapa metálica via PVD, de modo a se obter elevada homogeneidade superficial resultante. A variação da dureza ao risco em função dos diferentes ângulos de arraste causou um aumento significativo da dureza ao risco. Este aumento chegou a ser em torno 60% nos ângulos intermediários, onde o indentador assume um desalinhameto intermediário entre aresta e face.

Palavras-chave: esclerometria, dureza ao risco, ângulo de arraste, desgaste, incerteza de medição

1. INTRODUÇÃO

A grande ocorrência de falhas por desgaste, bem como o amplo uso industrial de processos como a usinagem, conferem grande interesse prático e econômico ao estudo dos fenômenos decorrentes do atrito, por sua vez pertencentes a um ramo maior da ciência, chamado tribologia.

Na tribologia um grande número de fatores é levado em conta para se caracterizar um sistema tribológico, tais como: aspectos geométricos, mecânicos, reológicos e físico-químicos da região afetada pelo deslizamento relativo de dois ou mais corpos em contato.

Assim, além do caráter extensivo, propriedades tribológicas como resistência ao desgaste são de difícil quantificação, fazendo-se necessário o uso de modelos e técnicas experimentais idealizadas para cada fim específico. Dentre elas, pode-se citar a técnica esclerometria, cujos principais conceitos serão revisados a seguir.

Foram admitidas as simplificações do modelo teórico de Rabinowics, onde o fenômeno de desgaste é estudado com base na análise de um único risco na superfície de um material, promovido por uma asperidade dura, e que por sua vez é simulada na prática por um indentador de geometria e dureza conhecidas ⁽¹⁾.

Por desgaste entende-se a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo em decorrência do movimento relativo de um outro corpo sobre o mesmo ⁽²⁾. O presente estudo é focado apenas no desgaste abrasivo, que mais ocorre na prática, sendo também o mais destrutivo, responsável por aproximadamente metade dos casos de falha por desgaste ⁽³⁾.

A esclerometria consiste basicamente em riscar a superfície de uma amostra conhecendo-se a carga aplicada, a velocidade de riscamento e as características geométricas do indentador. Os resultados são obtidos com base na morfologia do risco e nas componentes normal e tangencial da força aplicada para promover o riscamento ⁽⁴⁾.

Embora possuam reconhecida versatilidade como aparato experimental, o destino original dos esclerômetros é a caracterização da resistência à abrasão dos materiais, representada principalmente por meio da dureza ao risco ⁽³⁾.

A dureza ao risco (H_r) é definida como a resistência média à penetração, oferecida pelo material sob riscamento. Seu valor é dado por meio da Equação ⁽²⁾ (1):

$$H_r = \frac{F_n}{A_H} = K \frac{F_n}{L^2} \quad (1)$$

A força normal (F_n) que atua sobre uma partícula avançando horizontalmente sobre a superfície da amostra é mostrada na Figura 1. A área A_H é a projeção da área de contato entre indentador e amostra, na direção de F_n . O fator K é reservado para computar o efeito da geometria do indentador, assumindo neste caso em particular o valor 4. L é a largura do risco.

A força tangencial (F_t), indicada na Figura 1, varia conforme o coeficiente de atrito da amostra. F_t é usado na determinação da energia necessária para movimentar uma unidade de volume na superfície do material, também chamada de energia de remoção específica. Tanto o coeficiente de atrito quanto a energia de remoção específica do material não serão abordadas neste trabalho.

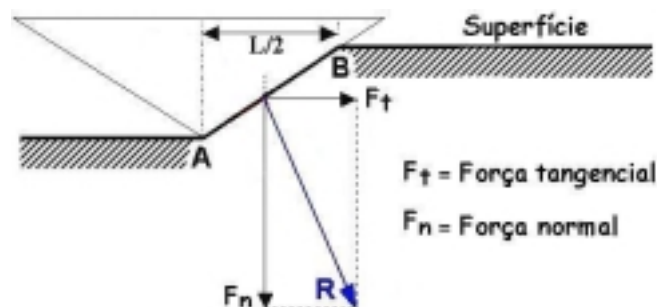


Figura 1 – Diagrama de corpo livre do indentador durante o riscamento

O principal objetivo deste trabalho é investigar o efeito da variação do ângulo de arraste do indentador na dureza ao risco de materiais dúcteis, de modo a compreender melhor a influência da geometria do indentador nesta propriedade. Estudos anteriores ⁽⁵⁾ mostraram a influência da geometria na taxa de desgaste de materiais dúcteis, porém, mantendo-se sempre a simetria do indentador. Considerações de riscamento assimétricas não foram encontradas na literatura.

Paralelamente, pretende-se ainda avaliar o potencial de um equipamento desenvolvido no Laboratório de Materiais – LabMat, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, para este fim.

O efeito do desalinhamento D na medida da largura do risco, por sua vez presente na dureza ao risco (H_r), pode ser avaliado analiticamente, como o esquema da Figura 2.

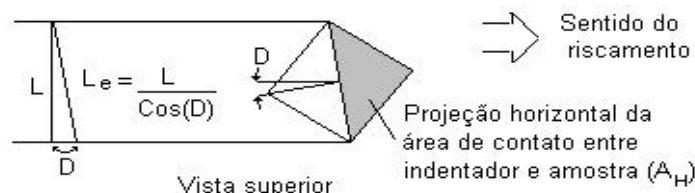


Figura 2 – Influência do desalinhamento (D) na área horizontal projetada

Na Figura 2 observa-se que a largura L do risco deixado pelo ensaio esclerométrico é de fato uma componente da largura efetiva L_e , em função do desalinhamento D . Substituindo este efeito diretamente na Equação 1, de dureza ao risco, tem-se finalmente a Equação (2):

$$H_R = \frac{4F_n \cos^2(D)}{L^2} \quad (2)$$

Com efeito, o termo multiplicativo $4 \cos^2(D)$ é o fator representativo da geometria K , da equação 1, sendo agora definido para qualquer valor de desalinhamento entre 0 à 90° . A Equação 2 promove portanto a correção efetiva do valor de dureza ao risco, no caso de ensaios realizados com indentador desalinhado em relação à direção do riscamento.

2. MATERIAIS, MÉTODO E EQUIPAMENTOS

Foi utilizado um esclerômetro retilíneo, adotando-se para todos os ensaios velocidade de riscamento de $500 \mu\text{m/s}$, indentador piramidal de diamante com ponta de $148,7^\circ$ entre arestas opostas, comprimento final de risco de 10 mm , e carga normal aplicada e monitorada em cerca de 3 N .

A partir da posição de perfeito alinhamento entre aresta do indentador e a direção do risco, foram efetuados três riscos paralelos entre si. Em seguida, o indentador foi desalinhado em 5° com a direção do risco, e três novos riscos foram feitos, mantendo-se o paralelismo anterior. Este procedimento foi repetido, sempre com incremento de 5° , até atingir um desalinhamento acumulado de 45° , condição na qual uma das faces do indentador esteja de frente à trajetória do risco.

Todos os riscos foram feitos numa mesma superfície, formada por um filme de Ni depositado sobre uma chapa metálica via PVD (physical vapor deposition), de modo a contar com a elevada homogeneidade superficial, conferida pelo processo de deposição ⁽⁶⁾.

A largura dos riscos foi medida com auxílio de um microdurômetro, marca Shimadzu, modelo HMV 2000. Foram tomadas 10 medidas de largura para cada risco, sendo uma medida a cada milímetro. Assim, para cada ângulo estudado foram feitas 30 medidas de largura de risco.

As avaliações de incerteza de medição basearam-se no recomendado pelo guia da ABNT - Guia Para Expressão da Incerteza de Medição (ISO GUM), de 1998 ⁽⁷⁾, sempre adotando-se um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). A dureza ao risco final para cada ângulo foi tomada como a média dos três riscos realizados, sendo a incerteza de cada medida estimada por meio da Equação (3).

$$U_{Hr} = \sqrt{\left\{ \frac{\partial Hr}{\partial F_N} (U_{FN}) \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial Hr}{\partial L} (U_L) \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial Hr}{\partial D} (U_D) \right\}^2} \quad (3)$$

Onde U_{FN} é a incerteza da força normal aplicada, e U_D é a incerteza do desalinhamento, ambas previamente estimadas em 0,1 N e 1,22°, respectivamente, e U_L é a incerteza da largura do risco, obtida conforme a Tabela 1. Os conceitos de incerteza combinada e expandida podem ser encontrados em literaturas específicas sobre metrologia ⁽⁷⁾.

Tabela 1 – Avaliação de incerteza da largura do risco

Fonte de incerteza	Símbolo	Distribuição	Incerteza padrão	G. L.
Repetitividade do instrumento de medição	u_{Rep}	Normal	Desvio padrão das 30 medidas	29
Estimativa da média entre os três riscos em cada ângulo	u_{LT}	Normal	$\sigma / \sqrt{3}$	2
Incerteza Combinada	u_{CLR}		$\sqrt{(u_{LR})^2 + (u_{LT})^2}$	
Incerteza Expandida	U_L		$k u_{CLR}$	$u_{efetivo}$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As larguras de risco obtidas encontram-se na Figura 3, com as margens de incerteza correspondentes. Foi incluída no gráfico uma linha de referência, definida pela equação $L = L_c \cdot \cos(D)$, que representa uma largura hipotética a ser medida caso fosse mantida a mesma profundidade de penetração em todos os desalinhamentos. Deve-se ressaltar que a variável estatística é de fato um valor de área, de modo que ao se substituir o termo L^2 por um valor médio deve-se usar a média de (L^2) , e não o valor de L médio.

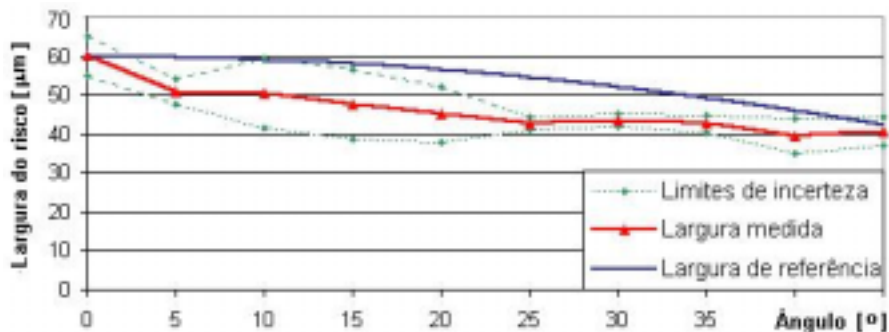


Figura 3 – Larguras de risco experimentais e de referência, para cada ângulo.

A diferença entre largura medida e de referência deve-se à diminuição da penetração do indentador, indicando que a variação geométrica promovida pelo desalinhamento tem efeito direto na resistência que a superfície da amostra oferece ao riscamento.

Os maiores intervalos de incerteza na faixa entre 5° a 25° podem ser atribuídos à dificuldade de identificação das bordas dos riscos efetuados com esses níveis de desalinhamento do indentador.

Na Figura 4 são apresentados os valores de dureza ao risco obtidos para cada desalinhamento, calculados conforme a Equação 2. Na mesma figura, além do intervalo de incerteza correspondente, foi incluída a curva de dureza ao risco de referência, calculada com base na largura de referência supracitada.

O comportamento da curva de referência mostrado na Figura 4, em virtude do fator de correção $4 \cos^2(D)$ presente na Equação (2), representa uma situação na qual a dureza ao risco seria a mesma independentemente do ângulo de arraste do indentador. Na mesma Figura 4 foram adicionadas as médias da força normal aplicada em cada ângulo, visando justificar a suave divergência da linha de dureza de referência com uma reta.

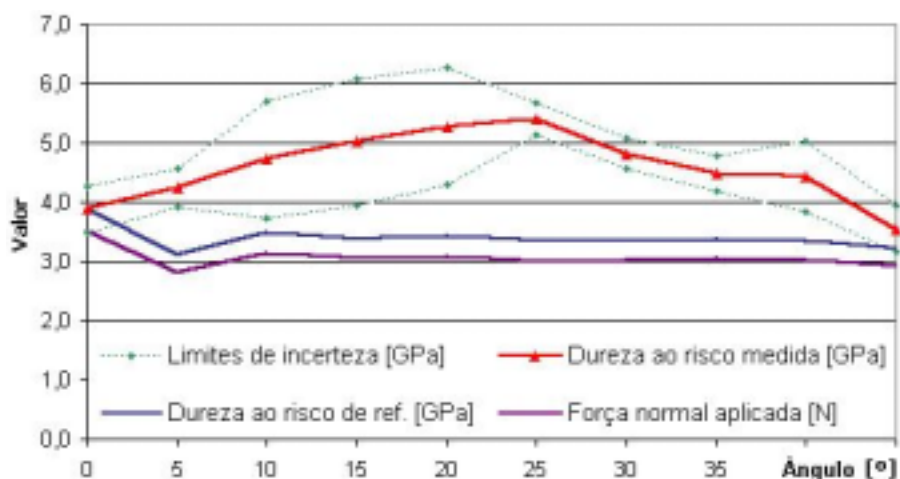


Figura 4 – Resultados obtidos

Apesar do razoável nível de incerteza, cuja maior parcela se deve ao processo de medição da largura de risco, pode-se observar uma variação significativa da dureza ao risco em função do ângulo de arraste do indentador. Esta variação mostrou-se mais intensa na faixa de desalinhamento entre 20° e 25°, na qual o indentador assume uma disposição de transição de sua geometria, estando igualmente distante das configurações usuais de aresta ($D = 0^\circ$) e de face ($D = 45^\circ$). Nesta faixa o aumento na dureza ao risco foi em torno de 60%.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos reforçam o caráter sistêmico da dureza ao risco, sendo constatados aumentos de até 60% nessa propriedade, para desalinhamentos próximos a 22,5°, variando-se apenas o ângulo de arraste do indentador. Este efeito pode ser observado já nas medidas de largura do risco, e complementam o efeito da geometria do indentador para casos de riscamento assimétrico. Quanto ao esclerômetro utilizado, o nível de incerteza obtido mostrou-se satisfatório para detectar o aumento de dureza ao risco mediante variações de desalinhamento do indentador.

5. REFERÊNCIAS

- GAHR, Karl-Heinz Zum. **Microstructure and wear of materials**. Tribology Series 10. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam – Netherlands, 1987. 560 p.
- DE MELLO, José. Daniel Biasolli. **Introdução ao estudo do desgaste**. Uberlândia, 1994. 26 f. Notas de aula – Laboratório de Eng. de Materiais, Universidade Federal de Uberlândia. 1994
- NOGUEIRA, R. E. F. Q.; DE MELLO, J. D. B. **Esclerometria aplicada ao estudo do desgaste abrasivo**. 43°. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais, [S.L.], p. 281-294, [199?].
- O. Alarcon; W. Weingaertner, H. Roman, F. Sousa, M. Pereira, A. Spiller, D. Tridapalli. **Design and development of an apparatus to measure the scratch hardness of ceramic floor tiles**. In: Qualicer 2004, Castellón, Spain, 2004. v. 2, p. PGI-283 - PGI-295.
- K. Kato, K. Hokkirigawa, T. Kayaba, Y. Endo, **Three dimensional shape effect on abrasive wear**, Journal Of Tribology, v. 108, junho, 1986. p. 346-351.
- ISHÍÍ, Y.; ICHIMURA, H. **Effects of indenter radius on the critical load in scratch testing**. Surface & Coatings Technology. V. 165, p. 1-7, 2003.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Guia para a Expressão da Incerteza da Medição (ISO GUM)**. 2 ed. Serifa, Campinas, SP, 1998. 120 p.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do CNPq e do Laboratório de Materiais da UFSC – LabMat.

INFLUENCE OF THE INDENTER ATTACK ANGLE OVER THE SCRATCH HARDNESS OF DUCTILE MATERIALS

Fábio José Pinheiro Sousa

Federal University of Santa Catarina - Dept of Mechanical Engineering – Laboratory of Materials
CEP 88040-970 – C. P 5153 - Florianópolis - SC– Brazil - fabiodacivil@pg.materiais.ufsc.br

André Spiller

Federal University of Santa Catarina - Dept of Mechanical Engineering – Laboratory of Materials
CEP 88040-970 – C. P 5153 - Florianópolis - SC– Brazil - andrespiller@grad.ufsc.br

Daniel Tridapalli

Federal University of Santa Catarina - Dept of Mechanical Engineering – Laboratory of Materials
CEP 88040-970 – C. P 5153 - Florianópolis - SC– Brazil - danieltrida@terra.com.br

Orestes Estevam Alarcon

Federal University of Santa Catarina - Dept of Mechanical Engineering – Laboratory of Materials
CEP 88040-970 – C. P 5153 - Florianópolis - SC– Brazil - orestes@materiais.ufsc.br

ABSTRACT

Sclerometry is an experimental technique that measures primarily the scratch hardness of materials. The test basically consists on promoting a scratch on the sample surface, knowing the applied force, the scratching velocity, the width of the scratch, and geometrical characteristics of the indenter. Scratch hardness stands for the mean resistance to penetration offered by the material surface and is related to wear resistance. It differs from quasi-static hardness by considering some dynamic effects, which allows the analysis in materials submitted to many different scratching conditions, such as speed variation, normal loading and the use of different types of indenter, or even different attack angle of the indenter. This work intends to study the influence of the indenter attack angle over the scratch hardness of ductile materials. A fully computerized sclerometer was used to carry out the tests. A metallic plate covered by a Ni PVD film was adopted as sample, in order to assure a homogeneous surface. The variation of indenter attack angle caused a substantial increase in the scratch hardness. The increase had reached 60% in the intermediate angles, where the indenter has neither an edge nor a face alignment.

Keywords: *sclerometry, scratch hardness, indenter angle, wear, scratch testing*