



Metodologia de avaliação da rigidez de um tribômetro para ensaios de desgaste de materiais

M M Maru¹, V Kapps¹, S P Oliveira² and J Trota Filho²

¹ Divisão de Metrologia de Materiais, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, 25250 020, Brasil

² Divisão de Metrologia Mecânica, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Duque de Caxias, 25250 020, Brasil

mmmaru@inmetro.gov.br (M M Maru), vkapps@inmetro.gov.br (V Kapps), spoliveira@inmetro.gov.br (S P Oliveira) and jtfilho@inmetro.gov.br (J T Filho)

Resumo. Os ensaios tribológicos são de importância fundamental para avaliar a aplicabilidade dos diversos materiais utilizados em componentes que operam sob atrito. O ensaio de riscamento é uma técnica rápida e simples muito utilizada para a avaliação da resistência ao mecanismo de abrasão do material, que é um dos mais críticos entre os mecanismos existentes. Neste tipo de ensaio, um parâmetro de medição importante é a profundidade da trilha que é produzida mediante a aplicação de uma força mecânica de compressão. Para garantir uma medição confiável desse parâmetro, é importante conhecer a rigidez do equipamento e sua influência na medição. Dependendo do tipo de equipamento, da intensidade da força utilizada no ensaio e do tipo de material a ser avaliado, a rigidez do equipamento apresenta valores diferentes e, assim, afetam os resultados das medições. Neste trabalho, a avaliação da rigidez do equipamento foi realizada por meio de ensaios de indentação em diferentes tipos de materiais. Com a metodologia apresentada, foi estabelecida uma relação da rigidez do tribômetro com o módulo de elasticidade do material ensaiado. A partir desta relação, foi possível identificar a parcela de deformação do equipamento no resultado da profundidade atingida em cada material avaliado, possibilitando determinar um fator de correção no valor da profundidade de penetração no material obtido nos ensaios de riscamento.



Stiffness evaluation methodology of a tribometer for wear tests of materials

M M Maru¹, V Kapps¹, S P Oliveira² and J Trota Filho²

¹ Material Metrology Division, National Institute of Metrology, Quality and Technology, Duque de Caxias, 25250 020, Brazil

² Mechanical Metrology Division, National Institute of Metrology, Quality and Technology, Duque de Caxias, 25250 020, Brazil

mymar@inmetro.gov.br (M M Maru), vkapps@inmetro.gov.br (V Kapps), spoliveira@inmetro.gov.br (S P Oliveira) and jtfilho@inmetro.gov.br (J T Filho)

Abstract. Tribological tests are of fundamental importance to evaluate the applicability of the different materials used in components that operate under friction. The scratch test is a quick and simple technique widely used to evaluate the resistance to the abrasion mechanism of the material, which is one of the most critical among the existing mechanisms. In this type of test, an important measurement parameter is the depth of the track that is produced by applying a mechanical compression force. To ensure a reliable measurement of this parameter, it is important to know the rigidity of the equipment and its influence on the measurement. Depending on the type of equipment, the intensity of the force used in the test and the type of material to be evaluated, the rigidity of the equipment presents different values and, thus, affects the measurement results. In this work, the evaluation of the rigidity of the equipment was carried out by means of indentation tests in different types of materials. With the methodology presented, a relationship between the stiffness of the tribometer and the modulus of elasticity of the tested material was established. From this relationship, it was possible to identify the amount of equipment deformation in the result of the depth reached in each evaluated material, making it possible to determine a correction factor in the value of the depth of penetration in the material obtained from scratch tests.

1. Introdução

A Tribologia é a ciência que avalia o atrito e o desgaste de materiais que necessitam ser utilizados em condições de contato mecânico e em movimento com outros corpos. Exemplos clássicos da indústria metal-mecânica são os materiais utilizados nos componentes de mancais de rolamento e de engrenamentos de sistemas de movimentação de forma geral.

Várias outras aplicações dos materiais em situações de atrito podem ser citadas, como os materiais das ferramentas utilizadas nos processos de conformação mecânica e em processos de usinagem na indústria de fabricação, e também nos componentes articulares de próteses de quadril e de joelho da área médica. Melhorias em processos de lubrificação e desenvolvimento de filmes protetivos contra atrito e desgaste também são objeto de estudo dentro da Tribologia.

O atrito e o desgaste são propriedades dos materiais determinadas experimentalmente por meio da utilização de tribômetros. Estes são equipamentos que permitem a obtenção da força resistente ao movimento, ou a força de atrito, e o desgaste combinado dos corpos em contato no ensaio. Durante o ensaio, o contato entre corpos se desloca à medida que os corpos se desgastam, e este deslocamento é monitorado por um sensor de deslocamento linear, a partir de uma referência. Assim sendo, o desgaste combinado dos corpos ensaiados é obtido diretamente da medição deste deslocamento.

Há vários tipos de ensaios tribológicos, os quais recebem denominações típicas, basicamente associadas ao tipo do contato e ao tipo de movimento, tais como pino contra disco rotativo ou pino contra placa em movimento recíproco. Um tipo de ensaio simples e rápido é o ensaio de riscamento linear. Neste tipo de ensaio é possível a avaliação da resistência à abrasão do material, em que um riscador com ponta de diamante representa o corpo abrasivo em ação sobre o material, sob uma carga mecânica conhecida. Os parâmetros de avaliação no ensaio são a força de resistência ao riscamento e a profundidade atingida pelo riscador. Dadas as características de resistência mecânica dos materiais avaliados, sobretudo no caso de materiais metálicos, que dependem das propriedades mecânicas relacionadas a fenômenos elastoplásticos, é preciso considerar ambas as parcelas, elástica e plástica, na profundidade medida durante o ensaio.

Na Figura 1 é apresentado o esquema do ensaio de riscamento, indicando as parcelas elástica e plástica da profundidade atingida pela ponta de riscamento durante o ensaio, e a parcela plástica que pode ser medida posteriormente ao ensaio, por meio de um perfilômetro.

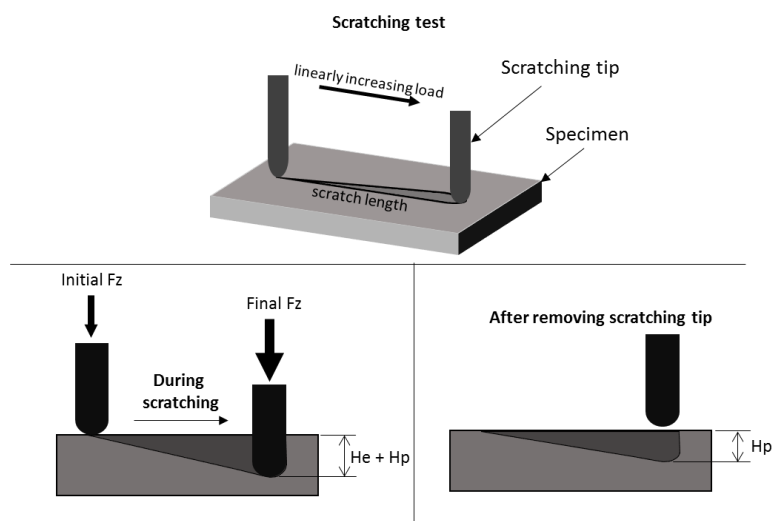


Figura 1 - Esquema do ensaio de riscamento. H_e : deformação elástica; H_p : deformação plástica.

Fonte: elaboração própria.

Na Figura 2 é apresentado um exemplo da morfologia do risco de um material polimérico observada em microestereoscópio após o ensaio de riscamento.

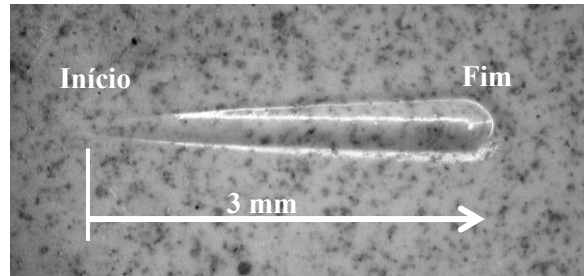


Figura 2 - Imagem de um risco produzido em material polimérico após ensaio de riscamento com ponta esférica de diamante, obtida em microestereoscópio. Fonte: Laboratório de Biomateriais e Tribologia do Inmetro.

Uma questão crucial nos experimentos de tribologia, incluindo o ensaio de riscamento, é a confiabilidade no resultado do comportamento do desgaste do material. Este resultado depende do valor medido pelo sensor que monitora o deslocamento do contato entre os corpos durante o ensaio. Em geral, o sensor é posicionado no equipamento de forma a envolver um conjunto de partes intermediárias que compõem o sistema mecânico da aplicação da carga no ensaio, até alcançar a posição do deslocamento efetivo do contato entre os corpos sob avaliação, que é a medição de interesse. Considerando as características construtivas desse sistema de medição, surgiu a necessidade de investigar a rigidez do sistema, e verificar possíveis influências dessa rigidez na medição do deslocamento que podem impactar na garantia da medição do desgaste do material avaliado (Infante-García et al., 2020; Pawełko et al., 2021). Resumidamente, é necessário avaliar o quanto que o tribômetro se deforma durante a realização do ensaio de riscamento.

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da rigidez do equipamento de ensaio na medição da profundidade de deformação atingida no corpo de prova. Para isto, foram realizados ensaios de indentação mecânica em materiais diferentes. Foi possível estabelecer um fator de correção no valor da profundidade de penetração no material, medida pelo sensor de deslocamento do equipamento, em função da rigidez do material.

A importância de se avaliar a rigidez do tribômetro para os diversos materiais está no fato de ser necessário corrigir a profundidade atingida nos ensaios de riscamento. Com essa correção, será possível ter uma comparabilidade entre os resultados para os diversos tipos de materiais avaliados em tribômetros diferentes. Cabe ressaltar que a rigidez do tribômetro pode ser diretamente dependente do fabricante, do nível de força utilizado e do material a ser avaliado.

2. Materiais e métodos

Os materiais utilizados neste trabalho foram padrões de dureza de três classes diferentes, sendo dois de aço (HV2 e HRC) e um de latão (HV30), um material utilizado em implante de ortopedia de CoCrMo com recobrimento de TiNbN com espessura de 5 micrometros (TiNbN+CoCrMo), uma peça em liga de alumínio e outra em estanho fundido (Sn). Na Tabela 1 são apresentados os valores de módulo de elasticidade comumente encontrados dos materiais avaliados.

Tabela 1 - Valores nominais do módulo de elasticidade (E) dos materiais utilizados nos ensaios de indentação mecânica.

Material	Codificação	E [GPa]
Estanho fundido (Sn) [El-Ashram, 2006]	Sn	45
Liga de alumínio [Callister e Rethwisch, 2014]	Al	69
Padrão de dureza HV30 (latão) [Callister e Rethwisch, 2014]	HV30	97

Padrão de dureza HV2 (aço) [Callister e Rethwisch, 2014]	HV2	207
Padrão de dureza HRC (aço) [Callister e Rethwisch, 2014]	HRC	207
TiNbN+CoCrMo [Chen et al., 2003]	M1	451,9

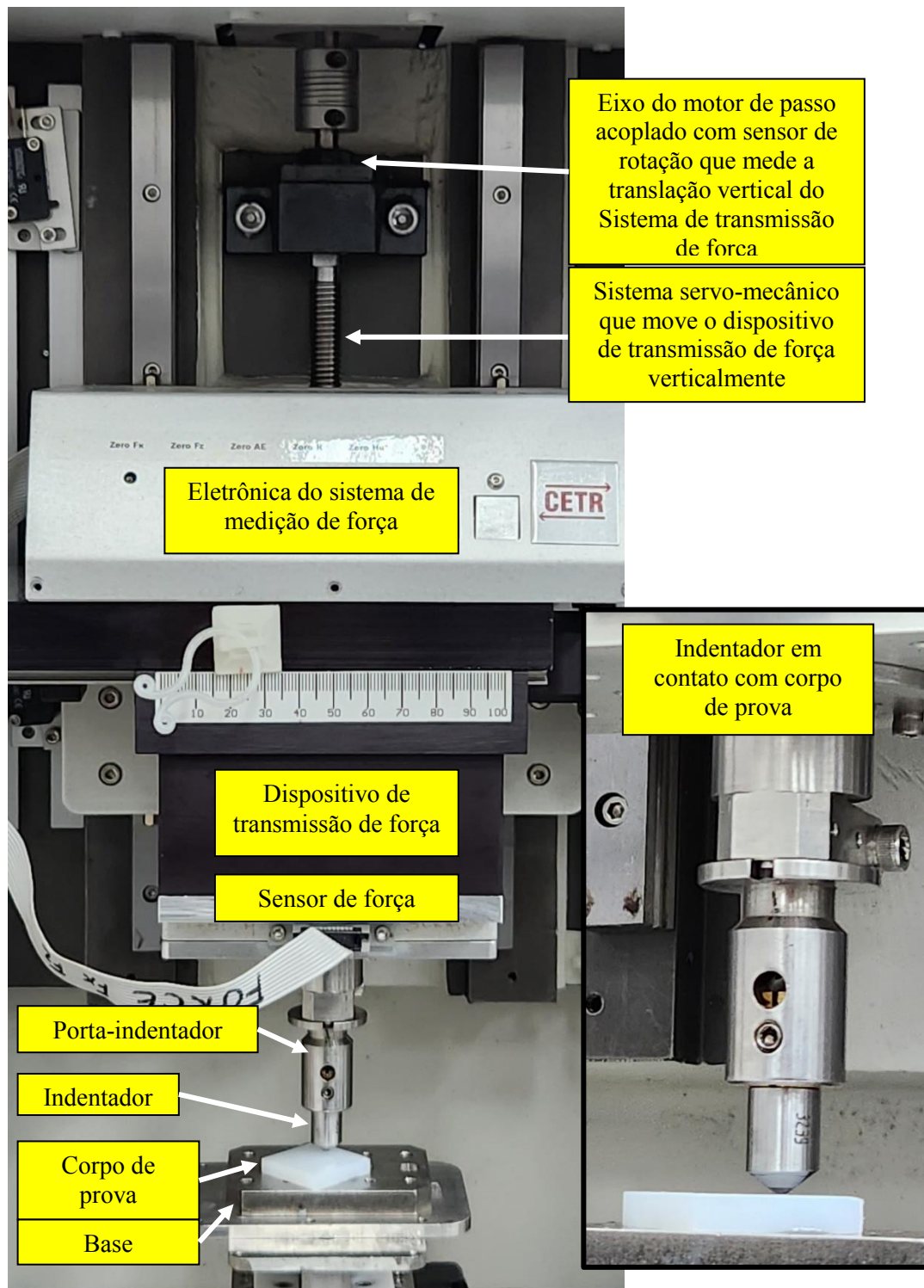


Figura 3 – Vista geral do tribômetro (UMT3, CETR) montado com sistema de ensaio de indentação.

O equipamento de ensaio utilizado foi um tribômetro (UMT3, CETR, Figura 3) com sensor de força de faixa de 20 N (modelo DFM-2). O ensaio de indentação consiste de uma aplicação de força vertical linearmente crescente, que pressiona o indentador contra a superfície do corpo de prova. Como resultado, o indentador penetra no corpo de prova até atingir uma profundidade máxima de penetração.

A aplicação da força é realizada por um sistema servo-mecânico, que possui um fuso com um motor de passo acoplado a um sensor de rotação (*encoder*). Este *encoder* monitora o deslocamento vertical do sensor de força que mede a carga aplicada na indentação. O deslocamento vertical do sensor de força ocorre de forma a proporcionar o controle da carga aplicada no contato entre penetrador e corpo de prova durante a indentação. Este deslocamento vertical representa a medição da profundidade de penetração. O *encoder* possui uma resolução no movimento vertical de 2 micrometros conforme o manual do equipamento. Durante a indentação, o corpo de prova permanece fixo na base da estrutura inferior do equipamento, conforme mostrado na Figura 3.

Para as indentações, foi utilizado um penetrador padrão Vickers e uma força máxima aplicada de 2 kgf (19,6 N). O penetrador possui geometria na forma de uma pirâmide de diamante de base quadrada, com ângulo de 136°, e superfície livre de defeitos. Cada indentação compreendeu as seguintes etapas:

- 1- Aplicação de força de 1 N durante 10 segundos;
- 2- Aumento linear da força de 1 N a 19,6 N em 60 segundos;
- 3- Manutenção da força em 19,6 N por 15 segundos;
- 4- Diminuição linear da força de 19,6 N para 1 N em 60 segundos, e,
- 5- Manutenção da força em 1N por 10 segundos.

Ao final de cada indentação é obtida uma curva da indicação da posição vertical Z do sensor de força em função da força aplicada (Figura 4a). Cada ciclo de indentação foi repetido seguidamente no mesmo ponto, até que fosse observado que a profundidade de penetração após a indentação não se alterava mais, tal que a deformação permanente máxima fosse atingida com o encruamento por deformação do material analisado (Figura 4b).

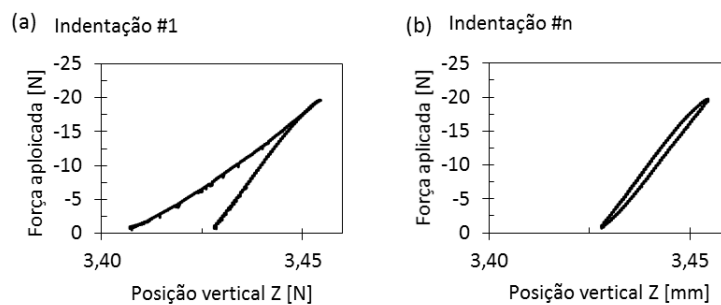


Figura 4 – Curvas típicas de indentação. (a) Primeira indentação; (b) Última indentação após encruamento do material. Fonte: elaboração própria.

A profundidade de penetração após o ensaio, ou seja, a deformação permanente, foi medida por meio de mapeamento 3D da marca deixada pelo penetrador, utilizando um medidor de forma e rugosidade (PGI 830, Taylor Hobson) com sensor de ponta de diamante de diâmetro de 4 micrometros. Na Figura 5 é mostrado um esquema representativo da indentação durante o ensaio (Figura 5a) e ao final (Figura 5b), quando a marca foi levada para mapeamento 3D (Figura 6).

A profundidade máxima final atingida pelo penetrador (Z_f) medida no equipamento de ensaio após os vários ciclos de indentação considera a profundidade atingida no corpo de prova em resposta à deformação elástica (Z_e) somada à deformação plástica (Z_p), e mais o efeito da rigidez do equipamento,

representado no esquema por uma deformação Z_t . A profundidade total medida (Z_f) é equivalente, portanto, à soma das parcelas Z_e , Z_p e Z_t . Cada material recebeu repetidos ciclos de indentação para avaliar a repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados. Essa dinâmica pode ser observada no fluxograma apresentado na Figura 7.

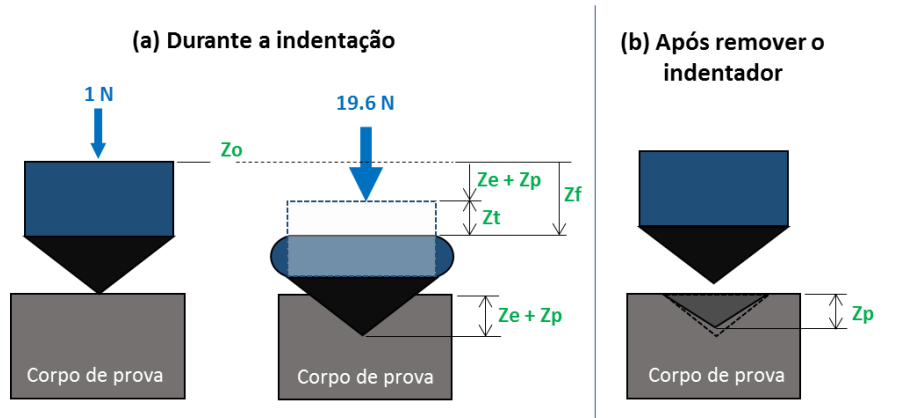


Figura 5 - Esquema mostrando a indentação (a) durante e (b) após o ensaio no tribômetro. Z_i representa o deslocamento vertical do sistema de aplicação da força. Fonte: elaboração própria.

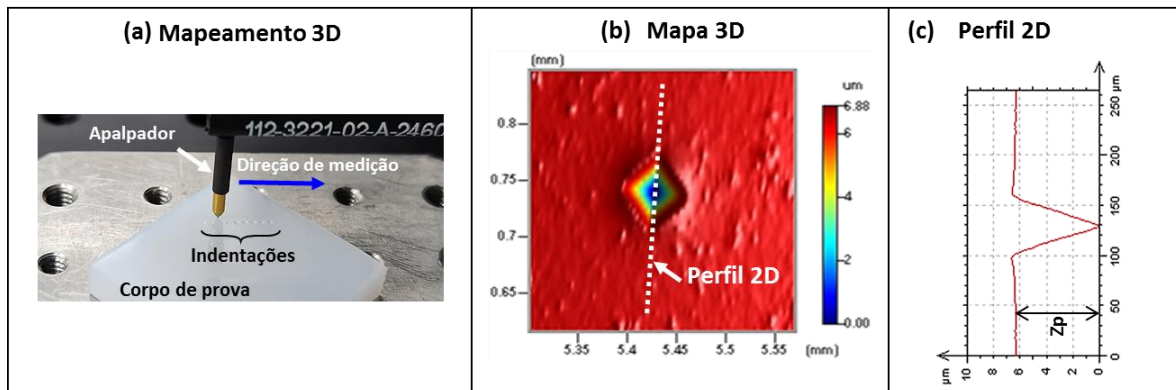


Figura 6 – Mapeamento 3D para medição da profundidade final permanente (Z_p). Fonte: elaboração própria.

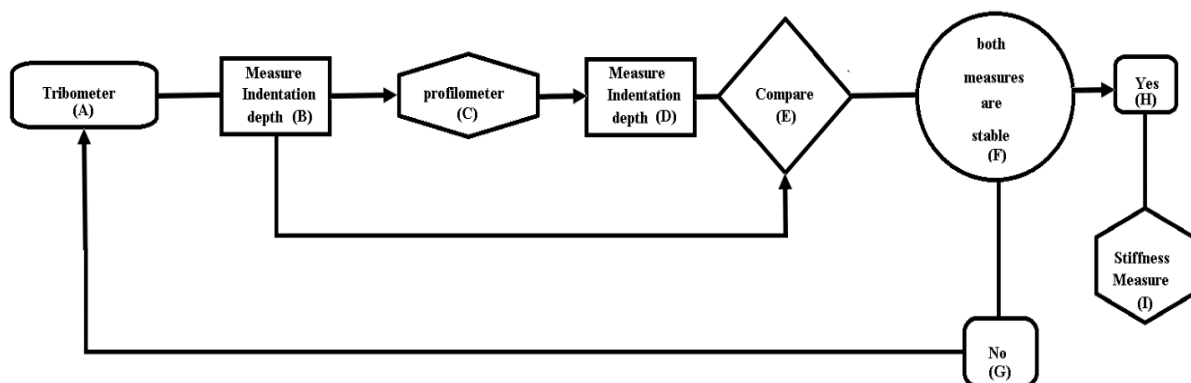


Figura 7 - Fluxograma que engloba a metodologia de determinação da rigidez do tribômetro. Fonte: elaboração própria.

A equação 1 mostra a metodologia para se determinar a rigidez do tribômetro (Z_t). Para materiais metálicos, a deformação elástica pode ser considerada muito pequena em relação à deformação plástica.

$$Z_t = Z_f - Z_e + Z_p, \\ \text{if } Z_e \rightarrow 0 \Rightarrow Z_t = Z_f - Z_p \quad (1)$$

3. Resultados e discussão

As medidas de profundidade realizadas no tribômetro (Z_f) e no perfilômetro (Z_p) após o encruamento dos materiais analisados são apresentados na Tabela 2. Além disso, a rigidez do tribômetro (Z_t) determinada pela equação 1 também é evidenciada na Tabela 2.

Tabela 2 - Profundidade média de penetração medida nos ensaios no tribômetro e no perfilômetro para os materiais.

Corpo de prova	Z_f [μm]*	Z_p [μm]*	$Z_t = Z_f - Z_p$ [μm]
Sn	98	82	15
Sn	99	85	14
Sn	104	87	17
Al	46	26	20
HV30	41	16	25
HV30	40	15	25
HV2	31	7	24
HRC	35	10	25
HRC	35	9	26
M1	36	5	31
M1	35	5	30

Dispersão estimada < 1% da média

Nota-se que o efeito da rigidez do tribômetro no resultado da medida da profundidade de penetração do indentador varia com o tipo de material. Tendo em vista que cada tipo de material possui um comportamento específico da evolução da deformação com a aplicação de uma tensão mecânica, é razoável inferir que o nível de deformação sofrido pelo tribômetro varia de acordo com a resistência mecânica do material do corpo de prova avaliado no ensaio. Com os valores de Z_t apresentados na Tabela 2 foi construída uma curva conforme mostrada na Figura 8, que pode ser utilizada para correção da profundidade medida no tribômetro. Na Figura 8, a deformação sofrida pelo tribômetro foi correlacionada com o módulo de elasticidade dos materiais avaliados, o que resultou em uma curva com tendência logarítmica. Considerando esse resultado, estabeleceu-se um modelo do efeito da rigidez do tribômetro na profundidade de penetração medida pelo tribômetro. A correção da profundidade lida no tribômetro é dada, portanto, pela equação 2.

$$Z_f - Z_p = 6.13 \ln(E) - 6.60 \quad (2)$$

Observa-se que o efeito da rigidez tende a zero para materiais mais macios. Cabe lembrar que o modelo de correlação do efeito da rigidez do equipamento com o módulo de elasticidade do corpo de prova estabelecido neste trabalho é válido para corpos de prova com característica de comportamento mecânico predominantemente elastoplástico.

Cabe lembrar também que as análises efetuadas se restringiram a uma carga aplicada de 2 kgf no tribômetro utilizado, e é importante ressaltar que os resultados do efeito da rigidez na leitura do

equipamento dependem de cada equipamento, da intensidade da força aplicada e do material que está sendo ensaiado.

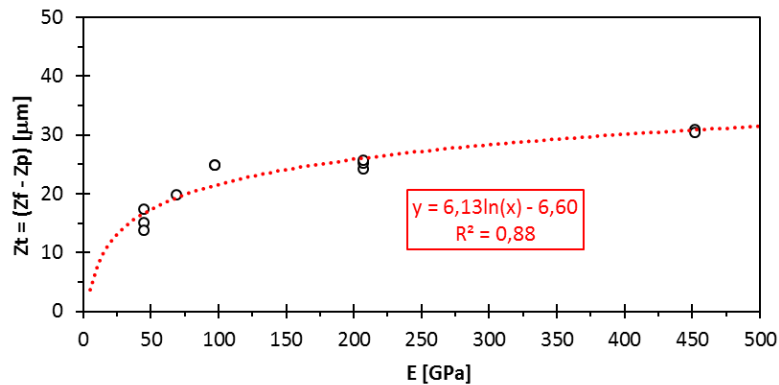


Figura 8 - Comportamento da rigidez do tribômetro em função do módulo de elasticidade dos materiais ensaiados.

4. Conclusões

Neste trabalho, o efeito da rigidez do equipamento de ensaio de tribologia no resultado de desgaste do material ensaiado foi investigado por meio de ensaios de indentação mecânica com diferentes tipos de materiais. A partir dos resultados obtidos com uma força aplicada de 2 kgf, foi demonstrado que a deformação do equipamento segue um comportamento logarítmico com a rigidez do material ensaiado. A partir desta relação, foi possível determinar o fator de correção no valor da profundidade de penetração no material obtido durante o ensaio tribológico. Cabe ressaltar que esta relação foi obtida a partir de materiais de ensaio que deformam sob regime elastoplástico. Estudos específicos devem ser realizados para determinar a existência de um fator de correção em resultados de penetração durante o ensaio de materiais viscoelásticos. De toda forma, ao realizar ensaios para avaliar o desgaste de um material durante o andamento do ensaio, as características da rigidez do equipamento de ensaio devem ser determinadas em relação à intensidade da força de ensaio e do tipo de equipamento, para cada tipo de material ensaiado, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados obtidos a partir da leitura do desgaste no tribômetro.

Referências

- [1] Callister, W. D.; Rethwisch, D. G. Mechanical Properties of Metals. *In*: Callister, W. D.; Rethwisch, D. G. Materials Science and Engineering: An introduction, 9 ed., 2014, p. 174.
- [2] Chen, K. et al. Alloying effects on elastic properties of TiN-based nitrides. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 36, p. 2725–2729, 2003.
- [3] El-Ashram, T. Structure and properties of rapidly solidified pure tin. *Radiation Effects and Defects in Solids*, v. 161, n. 3, p. 193-197, 2006.
- [4] Infante-García, D. et al. On the Role of Contact and System Stiffness in the Measurement of Principal Variables in Fretting Wear Testing. *Sensors*, v. 20, 2020.
- [5] Pawelko, P.; Jastrzębski, D.; Parus, A.; Jastrzębska, J. A new measurement system to determine stiffness distribution in machine tool workspace. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 21, p. 1-12, 2021.