

S. R. S. de Mello, M.E. H. Maia da Costa, C.M. Menezes, C.D. Boeira, F.L. Freire Jr., F. Alvarez, C.A. Figueroa

Introdução

As forças de atrito não são conservativas, elas convertem energia cinética devido ao deslizamento entre dois corpos em energia interna, essa aumenta a entropia do universo, viabilizando assim a caminhada do nosso dia a dia [1-2]. O entendimento de tal fenômeno se torna cada vez mais importante, considerando o grande interesse de todos os setores da indústria no aumento da eficiência energética, não apenas por questões econômicas, mas também devido a fatores ambientais [3-4].

Objetivo

Neste trabalho, foi analisado o efeito isotópico na dissipação de energia através de forças de atrito a partir de modelos fonônicos, afim de contribuir para o melhor entendimento desse fenômeno.

Metodologia

Para esse estudo filmes finos de carbono amorfo hidrogenado e/ou deuterado (a-C:D/H) foram depositados através da técnica deposição química a vapor assistida por plasma (*plasma-enhanced chemical vapor deposition*, PECVD) em substratos de silício. Como gases precursores foram utilizadas misturas de metano deuterado (CD₄) e metano (CH₄), variando a pressão parcial de CD₄ entre 0% (a-C:H filmes) a 100% (a-C:D filmes), obtendo assim amostras com diferentes conteúdos de deutério [5].



Figura 1. Sistema PECVD

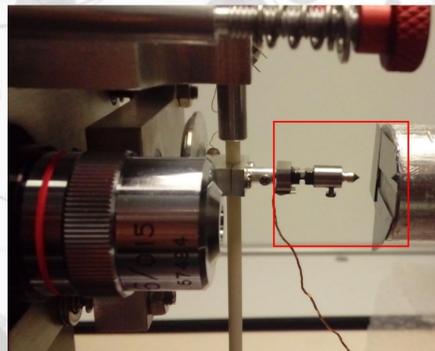


Figura 2. Nanotribômetro utilizado nos ensaios.

Os ensaios de tribologia em nanoescala através de contato direto, foram realizados aplicando uma força normal de 10 mN com uma ponta cônica de diamante cuja terminação é uma cúpula esférica com raio de 25 μm. A taxa de deslocamento foi de 1 μm.s⁻¹ percorrendo uma trilha de 680 nm.

Resultados e discussão

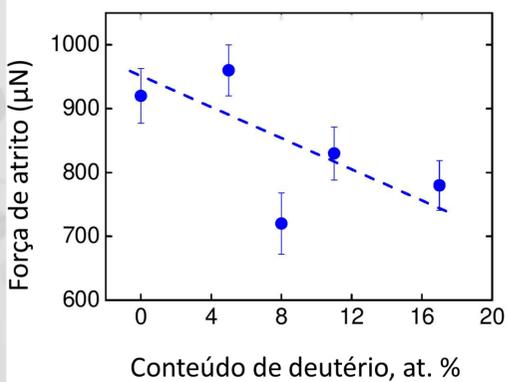


Figura 3. Força de atrito em função do conteúdo de deutério

Foi observada a diminuição da força de atrito com o aumento do conteúdo de deutério nas amostras (Figura 3).

Para posterior aplicação dos modelos fonônicos algumas definições sobre o sistema devem ser feitas:

Tabela 1: Apresenta resultados de dureza, módulo de elasticidade (E) e rugosidade (Rq).

Amostra	Dureza (GPa)	E (GPa)	Rq (nm)
0% at. D / 20 % at. H	18 ± 2	100 ± 10	12 ± 3
5% at. D / 14 % at. H	18 ± 1	105 ± 5	13 ± 3
8% at. D / 10 % at. H	16 ± 2	95 ± 10	16 ± 2
11% at. D / 7 % at. H	16 ± 2	89 ± 8	12 ± 2
17% at. D / 0 % at. H	15 ± 2	92 ± 9	15 ± 3

Tais dados foram utilizados para o cálculo dos índices de deformação plástica e elástica, além da área de contato através da teoria de contato de Hertz [6].

A substituição de átomos de hidrogênio por átomos de deutério na estrutura do filme não altera a estrutura eletrônica do mesmo, ou seja, propriedades eletrônicas do material, assim como valências e banda de condução, além de constantes dielétricas permanecem inalteradas, logo essas variáveis não interferem nos resultados obtidos. Dessa forma, a única alteração que o efeito isotópico fez no sistema é referente às massas dos isótopos.

A seguir os modelos estudados [7-8]:

Modelos de simples adsorvato: Adsorvado comensurado e ordenado:

$$1. \eta_{\parallel(\perp)} \cong m\omega_0^4/8\pi\rho C_T^3 \xi_{\parallel}(\xi_{\perp}) \quad 3. \eta_{\parallel} = m\omega_0^2 n_a / \rho C_T$$

$$2. \eta \approx m\omega_0^4/2\pi\rho C_T^3 \quad 4. \eta_{\perp} = m\omega_0^2 n_a / \rho C_L$$

Adsorvato comensurado desordenado:

$$5. \eta_0 \cong (1-\theta) m\omega_0^4/8\pi\rho C_T^3 + m\omega_0^2 n_a / \rho C_T$$

Sendo: η a constante de amortecimento do processo de interação inelástica; m a massa do adsorvato; ω é a frequência de vibração; ρ densidade; C_T velocidade transversa do som; $\xi_{\parallel}(\xi_{\perp})$ são parâmetros que dependem do tamanho do adsorvato, no caso desse trabalho é aproximadamente 3; n_a é o número de adsorvatos por unidade de área e C_L a velocidade do som longitudinal; θ representa a taxa de cobertura da superfície pelo adsorvato, variando de 0 até 1.

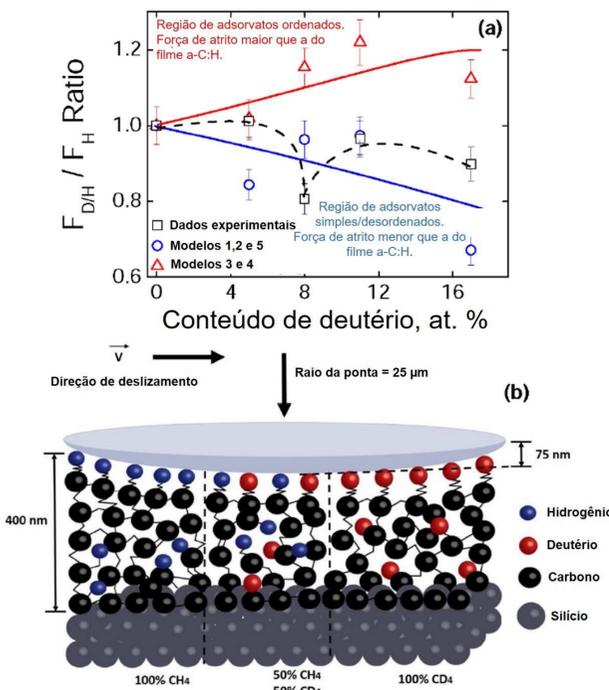


Figura 4. (a) Curvas resultantes da aplicação de modelos fonônicos estudados e dados experimentais. (b) Representação sistemática dos modelos e filme estudados.

Analisando o gráfico obtido a partir dos modelos fonônicos e dados experimentais (Figura 4a), pode-se concluir que os modelos 1, 2 (simples adsorvato) e 5 (adsorvato comensurado desordenado) mais se aproximam dos dados experimentais, isso se deve ao fato dos filmes finos apresentarem estrutura amorfa.

Conclusão

Os resultados apresentados contribuem para estudo e compreensão do atrito em nanoescala, analisando a dissipação de energia através de amortecimento e vibrações coletivas da rede por meio de fônons.

Referências

- [1] J. Krim, Adv. Phys. 61, 155 (2012).
- [2] J. Y. Park and M. Salmeron, Chem. Rev. 114, 677 (2014).
- [3] K. Holmberg, P. Andersson, and A. Erdemir, Tribol. Int. 47, 221 (2012).
- [4] K. Holmberg, R. Siilasto, T. Laitinen, P. Andersson, and A. Jäsberg, Tribol. Int. 62, 58 (2013).
- [5] M. E. H. Maia da Costa and F. L. Freire Jr., Surf. Coat. Technol. 204, 1993 (2010).
- [6] Leyland, A. & Matthews, A., Wear 246, 1 (2000).
- [7] B. N. J. Persson, E. Tosatti, D. Fuhrmann, G. Witte, and Ch. Wöll, Phys. Rev. B 59, 11777 (1999).
- [8] R. J. Cannara, M. J. Brukman, K. Cimatu, A. V. Sumant, S. Baldelli, and R. W. Carpick, Science 318, 780 (2007).

Agradecimentos

