



Propriedades mecânicas e tribológicas de recobrimentos de Diamond Like-Carbon depositados em AISI 316 modificando a pressão de deposição

Ariel Capote Sánchez ¹, Vladimir Jesus Trava-Airoldi ², Evaldo José Corat ²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Mestrado do curso de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Pesquisador e Docente da Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais

ariel.sanchez@inpe.br

Resumo: Recobrimentos de carbono amorfo hidrogenados foram depositados usando a técnica PECVD DC pulsada modificada com catodo adicional sobre substratos de aço inoxidável AISI 316. A caracterização dos recobrimentos permitiu identificar a influência da pressão de deposição nas propriedades microestruturais, mecânicas, tribológicas e na aderência dos filmes. Os principais resultados indicam que a obtenção de filmes com elevada dureza, baixo coeficiente de atrito, alta resistência ao desgaste e aderência apropriada é possível.

Palavras-chave: Diamond-like Carbon; Recobrimentos; Pressão de deposição; AISI 316.

1. Introdução

Os recobrimentos de Diamond-Like Carbon (DLC) fazem parte da família de filmes de carbono amorfo hidrogenados (a-C:H), estes possuem propriedades mecânicas, químicas, tribológicas e biológicas, entre outras, similares às do diamante (Robertson, 2002). Estes recobrimentos são utilizados em diversas aplicações industriais devido a sua elevada dureza, alta resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito, além de ser um material com inercia química e compatibilidade biológica. (Capote et al., 2018). A composição destes recobrimentos é caracterizada por uma fração importante de ligações de carbono com hibridizações sp^3 e hidrogênio, segundo o conteúdo destas é possível classificá-los em filmes de tipo polimérico, tipo grafitico e tipo diamantífero (Ferrari et al., 2004). Em geral, os filmes de a-C:H tipo diamante são aqueles com teor de hidrogênio entre 20-40%, e possuem interessantes propriedades quando comparado com os outros tipos (Ferrari et al., 2004).

Filmes duros de carbono amorfo podem ser obtidos usando diversas técnicas incluindo processos de deposição física de vapor (PVD), como a deposição por pulverização catódica (Sputtering), por descarga de arco catódico pulsado (PFCVAD), por feixe de íons (IBAD), entre outros (Capote et al., 2016). Entre as técnicas de deposição química de vapor (CVD) a obtenção de filmes de DLC mediante técnica de deposição química na fase vapor assistida por plasma (PECVD) é a que permite obter melhor aderência ao substrato (Capote et al.,



2018). Nesta técnica quando incorporado uma tela ativa ou cátodo adicional é possível a deposição de filmes em pressões mais baixas com um regime quase-nulo de colisões entre as moléculas (Clorovale Diamantes, 2016). Adicionalmente, a utilização desta técnica permite depositar recobrimentos de DLC em substratos com geometrias tridimensionais complexas, com taxas de deposição variáveis, brindando a possibilidade de controlar a microestrutura e propriedades dos filmes, além da facilidade de escalonamento do processo, fazendo esta técnica altamente relevante para aplicações industriais.

Para obter recobrimentos que sejam aptos a especificações industriais é preciso controlar os parâmetros de deposição da técnica PECVD, os quais influenciam as propriedades dos filmes de DLC obtidos. O controle da pressão de deposição, tensão e frequência de pulso da fonte, composição dos gases precursores e a razão dos gases costumam ser as principais variáveis que determinam a qualidade do recobrimento obtido (Wang et al., 2019). Em geral, prever a influência das variáveis sob as propriedades do recobrimento depositado é desafiador devido ao comportamento não linear de alguns parâmetros e a necessidade de realização de um grande número de experimentos (Kumar et al., 2018). Adicionalmente, o material utilizado como substrato influencia consideravelmente na aderência destes filmes, sendo que sua limitada aderência costuma ser devido a presença de esforços compressivos residuais próprios do processo de deposição na microestrutura do filme. A incorporação de uma intercâmara de silício amorfo sob a superfície do substrato permite promover uma aderência melhor dos recobrimentos de DLC crescidos em substratos metálicos (Capote et al., 2016). Neste trabalho, recobrimentos de DLC foram depositados em substratos de aço inoxidável AISI 316 usando a técnica PECVD DC Pulsada modificada com cátodo adicional. Os efeitos da pressão de deposição nas propriedades microestruturais, mecânicas, tribológicas e a aderência dos filmes foram estudados.

2. Metodologia

2.1 Preparação das amostras

Substratos de aço inoxidável AISI 316 foram utilizados para realizar a deposição dos recobrimentos de DLC. A partir de um tarugo do material foram cortadas amostras com diâmetro e espessura média de 15 e 6 milímetros, respectivamente. A superfície superior das amostras foi preparada em um processo de lixamento (granulometria variando entre 80 e 1200) e posteriormente um polimento com pasta de diamantada de 5 micras, obtendo-se uma rugosidade média de 15 nanômetros. Adicionalmente, os substratos passaram por um processo de limpeza em banho de ultrassom, utilizado agentes desengordurantes, água deionizada e álcool isopropílico antes de serem dispostos na câmara do reator.

2.2 Deposição dos recobrimentos

Os filmes de DLC foram obtidos pela técnica Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD). Esta técnica foi combinada com um sistema de cátodo adicional para um maior confinamento dos íons. A descarga produzida por uma fonte DC pulsada permitiu a geração de plasma entre os eletrodos, acelerando íons dos gases precursores contra a superfície dos substratos. A deposição dos filmes consta de uma etapa de limpeza e três etapas de deposição. A etapa de limpeza é realizada com plasma de argônio a pressão e tensão baixas, o plasma age na superfície removendo contaminantes orgânicos e outras moléculas



contaminantes na superfície do substrato (Lugo et al., 2019). O Argônio (Ar) é utilizado durante todo o processo devido que serve como estabilizador do plasma de Silano (SiH_4) e Acetileno (C_2H_2). As etapas de deposição constam da formação de uma intercamada de silício amorfo na superfície do substrato, posteriormente a deposição simultânea de DLC e silício amorfo com fluxo decrescente de Silano, seguido por uma etapa de crescimento do filme de DLC (a-C:H). Os parâmetros de deposição dos recobrimentos de DLC, a identificação e a pressão de deposição são apresentadas nas Tabelas 1 e 2:

Tabela 1. Parâmetros de deposição dos recobrimentos de DLC. Fonte: Autores

Etapa Deposição	Tensão (-V)	Largura de pulso (μs)	Tempo (min)	Gases Precusores	Fluxo de gases (sccm)
Limpeza	600	20	30	Ar	10
Intercamada de Silício Amorfo	800	20	30	Ar + SiH_4	2 + 4
Gradiente	800	20	8	Ar + SiH_4 + C_2H_2	2 + (4 \rightarrow 0) + 30
a-C:H	800	20	60	Ar + C_2H_2	2 + 30

Tabela 2. Identificação e pressão de deposição dos recobrimentos de DLC. Fonte: Autores

Amostra	Pressão de deposição (Pa)	Amostra	Pressão de deposição (Pa)
DLC-1	0,107	DLC-5	0,433
DLC-2	0,333	DLC-6	0,467
DLC-3	0,367	DLC-7	0,667
DLC-4	0,400	DLC-8	1,333

2.3 Caracterização dos recobrimentos

Após a deposição dos recobrimentos de DLC nos substratos foram realizados testes para a obtenção das propriedades microestruturais, mecânicas, tribológicas e morfológicas. As propriedades microestruturais foram determinadas utilizando as técnicas Espectroscopia Raman e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Usando a técnica de nano-indentação foi possível obter as propriedades mecânicas: dureza e módulo de elasticidade. A caracterização tribológica permitiu determinar o coeficiente de atrito e desgaste. Finalmente, os métodos de Scratch (riscamento) e macro-indentação foram utilizados para avaliar a aderência dos recobrimentos. Uma descrição das técnicas experimentais é apresentada a continuação:

2.3.1 Propriedades microestruturais

A microestrutura dos recobrimentos foi avaliada por meio de espectroscopia de espalhamento Raman. Esta técnica possibilita o estudo da microestrutura de filmes de DLC. Em um espectro típico destes filmes é possível identificar duas bandas bem definidas, chamadas D (Disorder Band) e G (Graphitic Band). Um ajuste gaussiano dos espectros



permite conhecer os valores correspondentes a área e posição do pico das duas bandas. Para a obtenção dos espectros foi utilizado um Espectrômetro Raman LabRAM Horiban Evolution, com um laser de 532 nm e potência de 20 mW. O tempo de aquisição dos dados foi de 30 segundos, com 3 acumulações para cada espectro. Os espectros foram analisados entre 800 e 2000 cm^{-1} . As medidas foram realizadas em condições de temperatura e umidade ambiente.

A espessura dos filmes foi determinada a partir de imagens obtidas com o microscópio eletrônico de varredura MEV-FEG TESCAN modelo MIRA3. O cálculo da taxa de deposição foi realizado dividindo a espessura pelo tempo de deposição.

2.3.2 Propriedades Mecânicas

A dureza e o módulo de elasticidade das amostras foram determinados usando a técnica de nano-indentação. Para este trabalho foi utilizado um nano-indentador UNHT3-STeP E400 da Anton Paar. Para o teste foi aplicada uma força com uma taxa de carregamento de 6 mN/min até atingir um valor máximo de 3 mN a qual, foi mantida constante durante 5 segundos, permitindo assim a acomodação do material. Posteriormente, a força foi retirada a uma taxa de 6 mN/min e o penetrador foi removido da amostra. A dureza e o módulo de elasticidade foram determinados a partir da força aplicada, da forma do indentador e da profundidade da penetração segundo o método de Oliver e Pharr (1992). A profundidade de penetração da indentação foi inferior a 10% da espessura do filme.

2.3.3 Propriedades tribológicas

Para determinar o coeficiente de atrito dos recobrimentos, foi utilizado um tribômetro CETR UMT-2, foram utilizadas esferas de Zircônia de 4 mm de diâmetro. Antes dos ensaios, tanto as amostras como as esferas foram limpas por um tempo de 5 minutos em banho de ultrassom com acetona. Foi utilizada uma célula de carga de 100 N e os testes foram realizados em condições ambientais (temperatura de 20°C e umidade relativa de 40% RH). Os parâmetros do ensaio foram: carga de 5 N, velocidade de 10 mm/s, tamanho da trilha de 5 mm e tempo de 10 minutos (300 ciclos), até a obtenção de um coeficiente de atrito estacionário. A taxa de desgaste volumétrico foi determinada analisando a diferença entre os volumes das esferas de Zircônia antes e após o atrito. A medição foi realizada usando um perfilômetro ótico Veeco/Wyko NT 1100, o qual fornece medições de superfícies tridimensionais de alta resolução, desde rugosidade na escala de fração nanométrica até etapas de altura da ordem de milímetros. A taxa de desgaste foi determinada dividindo o volume desgastado pela multiplicação da carga pela distância percorrida.

2.3.4 Aderência

Para os ensaios de aderência foram utilizadas duas técnicas experimentais: teste Scratch (riscamento) e macro-indentação. No teste de riscamento foi utilizado um tribômetro CETR UMT-2 com uma ponta de diamante do tipo Rockwell C 120° com raio de curvatura de 200 μm . A carga foi aplicada de forma progressiva até atingir 60N. O ponto onde ocorreu a primeira trinca foi determinado como a carga crítica Lc1 e o valor da carga onde foi observado a exposição do substrato foi determinado como a carga crítica Lc2. O teste de macro-indentação consistiu na realização de um ensaio de dureza Rockwell C. No ensaio foi realizada uma indentação usando uma ponta de diamante cônica e uma força de 150 kgf, o



qual produz a deformação plástica no substrato. Os resultados foram analisados utilizando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As micrografias obtidas foram comparadas com o padrão de imagens proposto na norma VDI 3198 (Vidaki et. al., 2003).

3. Resultados e Discussão

Nesta seção é apresentada uma discussão dos principais resultados obtidos na caracterização dos filmes de DLC.

3.1 Análise da microestrutura dos filmes

A Figura 1 (A) mostra os espectros Raman dos filmes obtidos com uma pressão de deposição entre 0,107 e 1,33 Pa. Resultados similares foram obtidos por Wang, et al. (2019) e mostram que não há diferença significativa nos perfis espectrais de amostras depositadas em diferentes pressões quando são mantidos outros parâmetros de deposição constantes. Um ajuste gaussiano dos espectros permitiu identificar a intensidade, posição das bandas D e G, assim como a largura total na metade do máximo da banda G ($FWHM_G$). Devido a semelhanças entre os espectros obtidos, na Figura 1 (B) é apresentado o espectro do filme depositado com uma pressão de 0,433 Pa.

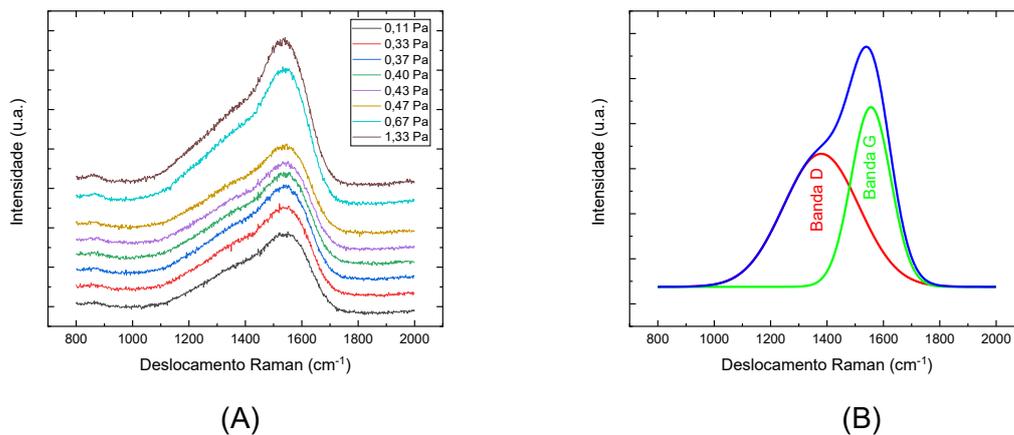


Figura 1. (A) Espectros Raman de recobrimentos de DLC depositados com diferentes pressões. (B) Espectro Raman do recobrimento DLC-5, crescido com pressão de 0,433 Pa. Fonte: Autores

Resultados da posição e altura das bandas D e G, assim como, a razão I_D/I_G para a amostra DLC-5 são apresentados na Tabela 3. Nos espectros Raman analisados todos os filmes apresentaram uma posição da banda D e G, centralizada ao redor de 1380 cm^{-1} e 1556 cm^{-1} respectivamente. A Figura 2 (A) mostra a variação da razão I_D/I_G e da largura à meia altura do pico G ($FWHM_G$) com a pressão de deposição. Os valores de I_D/I_G e $FWHM_G$ mostraram uma tendência a permanecer constante para pressões inferiores a 0,467 Pa. Uma leve diminuição destes valores foram observados para as pressões de 0,667 e 1,333 Pa.

Em espectros Raman de filmes de DLC as mudanças na posição, a intensidade e a largura à meia altura das bandas D e G relacionaram-se com possíveis variações microestruturais dos



recobrimentos. (Kasiorowski et al., 2020) As pequenas variações obtidas nas deconvoluções dos espectros sugerem que as proporções de ligações com hibridizações sp² e sp³ permanece constante, o qual pode indicar pouca mudança na microestrutura dos filmes apesar de terem sido depositados a diferentes pressões.

Tabela 3. Resultados da deconvolução do espectro do recobrimento DLC-5.

	Posição (cm ⁻¹)	FWHM (cm ⁻¹)	I _D /I _G
Banda D	1380 ± 7	315 ± 11	1,4 ± 0,07
Banda G	1556 ± 1	165 ± 4	

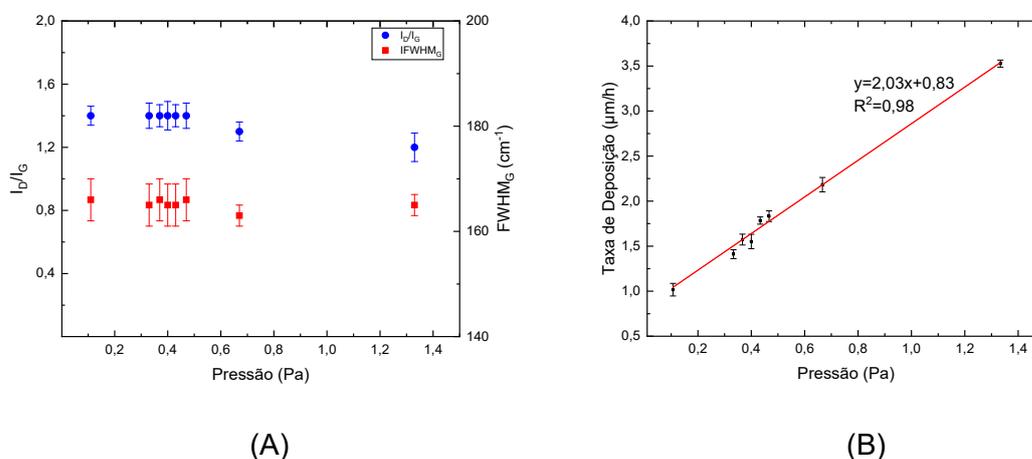


Figura 2. (A) Valores de I_D / I_G e FWHM_G. (B) Taxa de deposição para filmes depositados com diferentes pressões. Fonte: Autores

A determinação da taxa de deposição permite a estimativa da espessura do filme a partir da definição da pressão do processo de deposição. Na Figura 2 (B) mostra-se a relação linear entre a taxa de deposição e a pressão de deposição dos recobrimentos. Este comportamento pode ser associado principalmente ao incremento da densidade do plasma como consequência do incremento da pressão no reator. Em geral, pressões de deposição baixas possuem a desvantagem de oferecer menores taxas de deposição, enquanto pressões altas podem favorecer a perda de energia dos íons devido a colisões e o aumento dos esforços residuais dos recobrimentos.

3.2 Análise das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram obtidas mediante a técnica de nano-indentação. Os resultados de dureza (H), módulo de elasticidade (E) e a razão entre elas (H/E) são apresentados na Figura 3.

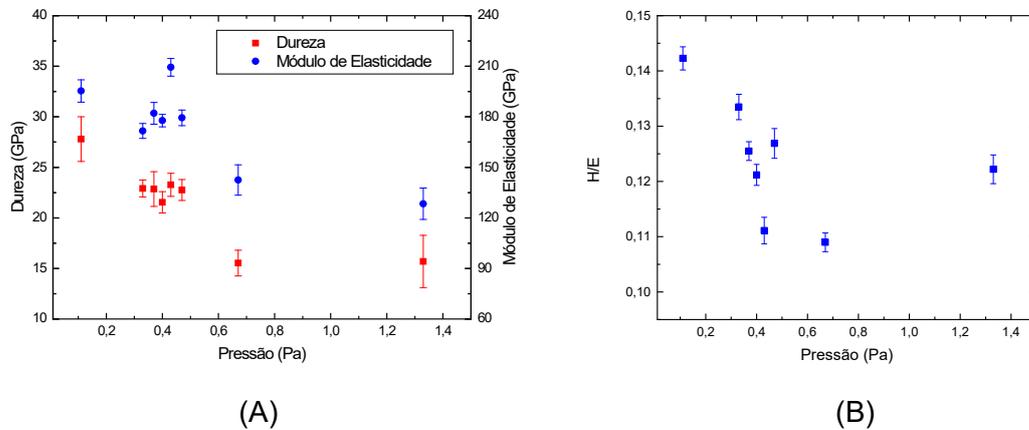


Figura 3. (A) Valores de dureza e de módulo de elasticidade. (B) Razão (H/E) em função da pressão em filmes de DLC. Fonte: Autores

A dureza e o módulo de elasticidade dos recobrimentos são determinados pelos parâmetros do processo de deposição. Segundo Wang et al. (2020), o conteúdo das ligações sp³ está positivamente relacionado com a dureza e o módulo de elasticidade, sendo estas propriedades importantes no comportamento mecânico e tribológico do material. Dependendo do tipo de aplicação dos recobrimentos de DLC, é necessário garantir uma elevada dureza para melhorar as propriedades tribológicas dos filmes e uma resistência adequada às deformações produzidas. Por tanto, a razão entre os valores de dureza (H) e módulo de elasticidade (E) resulta ser importante para a apropriada seleção da aplicação de um determinado filme de DLC (Leyland et al., 2000). Em geral, valores altos da razão H/E indicam uma alta resistência ao desgaste, enquanto valores baixos indicam uma alta resistência a deformações elásticas

Na Figura 3 (A) são apresentados os valores de dureza para os filmes obtidos a diferentes pressões de deposição. À medida que a pressão de deposição aumenta, a dureza do recobrimento diminui. Três comportamentos foram observados: uma alta dureza na pressão de 0,107 Pa, uma dureza constante entre as pressões 0,333 e 0,467 Pa, e finalmente uma dureza inferior para as pressões de deposição mais altas (acima de 0,667 Pa). O mesmo comportamento pode ser observado no módulo de elasticidade dos filmes obtidos. A dureza atingiu seu valor máximo igual a 27,7 GPa a uma pressão de 0,107 Pa e um valor mínimo igual a 15,7 GPa para uma pressão de 1,333 Pa. Maiores módulos de elasticidade foram obtidos nas pressões de 0,107 Pa e 0,433 Pa (195 GPa e 209 GPa, respectivamente), no entanto filmes depositados a uma pressão de 1,333 Pa apresentaram um módulo de elasticidade igual a 128 GPa.

Na Figura 3 (B) é possível identificar a razão H/E dos recobrimentos de DLC. Os valores obtidos se encontram-se entre 0,11 e 0,14. Estes valores são similares aos apresentados por (Shang et al., 2015). A razão H/E atingiu seu valor máximo igual a 0,14 para o DLC-1, por ser este o DLC que apresentou o maior valor de dureza, porém um módulo elástico de 195



GPa. A menor razão H/E apresentada foi de 0,11 para o recobrimento DLC-5. Este valor pode ser associado a que este filme obteve um valor de dureza menor quando comparada com a amostra DLC-1, porém maior módulo elástico.

3.3 Análise das propriedades tribológicas

O coeficiente de atrito e a taxa de desgaste foram determinadas mediante o procedimento descrito na seção 2. Os resultados são apresentados na figura 4.

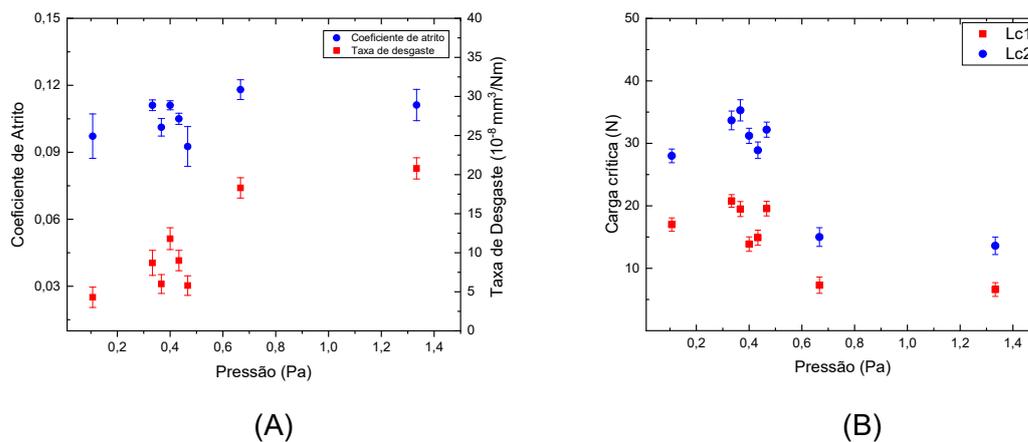


Figura 4. (A) Coeficiente de atrito e taxa de desgaste. (B) Carga crítica dos filmes de DLC. Fonte: Autores

A obtenção de filmes de DLC aderentes sobre superfícies metálicas é influenciado por diversas variáveis do processo de deposição, tais como a presença de esforços residuais compressivos, composição da microestrutura dos filmes, ligação da intercamada e propriedades físicas e químicas do substrato como rugosidade e tipo de material (Capote et al., 2016). O coeficiente de atrito e a taxa de desgaste dos filmes são apresentados na Figura 4 (A). Os valores obtidos do coeficiente de atrito para os recobrimentos encontram-se entre 0,09 e 0,12. Verifica-se que a maior taxa de desgaste foi $20,8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ foi obtida à pressão de 1,333 Pa e a mais baixa foi de $4,3 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ à pressão de 0,107 Pa. Em geral, é possível identificar que os recobrimentos com maiores valores de dureza apresentaram menores taxas de desgaste volumétrico. Adicionalmente, foi observado um maior nível de desgaste com o incremento da pressão de deposição.

3.4 Análise de aderência

Os valores de carga crítica apresentados a Figura 4 (B) permitem identificar que os recobrimentos obtidos com pressões menores a 0,467 Pa possuem carga crítica Lc1 e Lc2 superiores a 14 e 28 N, respectivamente. Em comparação, os filmes depositados em pressões maiores possuem cargas críticas menores a 7 e 14 N.

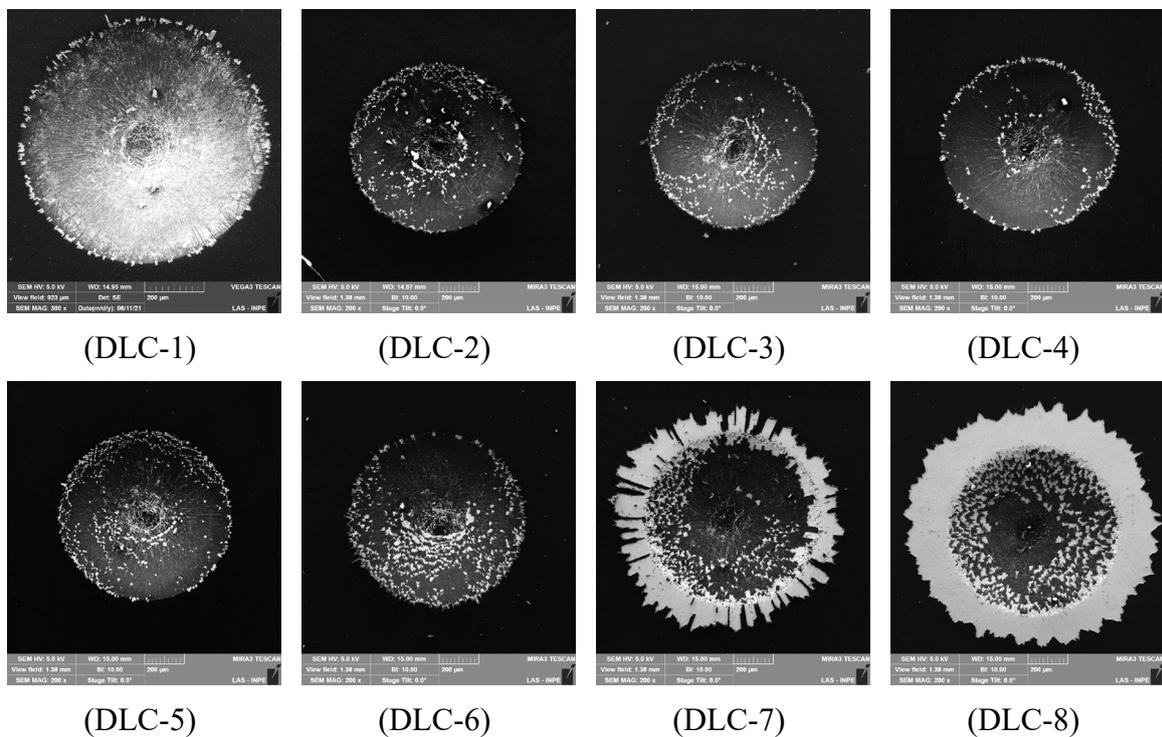


Figura 5. Indentações Rockwell C realizadas nos filmes de DLC. Fonte: Autores

A delaminação de filmes de DLC quando submetido a cargas mecânicas geralmente implica que os recobrimentos não são aptos para aplicações industriais. Utilizou-se o teste de indentação VDI 3198 para o controle qualitativo da aderência dos recobrimentos depositados. As macro-indentações HR-C realizadas sobre os substratos recobertos são apresentadas na Figura 5. Quando comparados ao padrão VDI 3198 os recobrimentos obtidos em pressões menores a 0,467 Pa apresentaram um padrão de falhas aceitáveis e portanto uma aderência interfacial adequada entre os filmes e os substratos. Porém os recobrimentos DLC-7 e DLC-8 apresentam padrões de falhas que indicam baixa aderência interfacial. Os resultados do controle qualitativo são congruentes com os resultados do teste de riscamento, devido à diminuição do valor de cargas críticas para os recobrimentos depositados nas pressões maiores a 0,667 Pa.

4. Conclusão

De acordo com os resultados obtidos foi possível identificar a influência da pressão de deposição nas propriedades dos recobrimentos de DLC obtidos usando a técnica PECVD DC Pulsada modificada com catodo adicional. O estudo da composição da microestrutura sugere similaridade nos espectros de espalhamento Raman entre todos os recobrimentos, obtendo-se apenas pequenas variações na razão I_D/I_G . A determinação da influência da pressão na taxa de deposição de DLC permite prever a espessura de recobrimentos obtidos em condições equivalentes. Os estudos de propriedades mecânicas indicam que a obtenção de filmes com dureza e módulo de elasticidade elevados é possível, permitindo a



combinações destas propriedades para obter razões H/E factíveis para as possíveis aplicações dos filmes. Em todas as condições de deposição foram obtidos baixos coeficientes de atrito e taxas de desgaste, porém filmes crescidos em pressões menores a 0,667 Pa são destacados devido a apresentarem uma maior dureza. Finalmente, a aderência interfacial dos filmes foi determinada como aceitável, com exceção dos filmes DLC-7 e DLC-8 que delaminaram.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências

CAPOTE, G. et al. Improvement of the properties and the adherence of DLC coatings deposited using a modified pulsed-DC PECVD technique and an additional cathode. *Surface & Coatings Technology*, v. 308, p.70-79, 2016. ISSN 0257-8972.

CAPOTE, G. et al. Effect of amorphous silicon interlayer on the adherence of amorphous hydrogenated carbon coatings deposited on several metallic surfaces. *Surface & Coatings Technology*, v. 344, p. 644-655, 2018. ISSN 0257-8972.

CLOROVALE DIAMANTE S/A (CVD VALE). Vladimir Jesus Trava-Airoldi; Evaldo José Corat; Luís Francisco Bonetti. Processo de revestimentos de superfícies com DLC (Diamond Like Carbon) via confinamento parcial de elétrons e íons. BR 10 2016 000262-1. Jan. 2016.

FERRARI, C., ROBERTSON, J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. *The Royal Society*, v. 362, 2477-2512, 2004. ISSN 2054-5703.

KASIOROWSKI, T. et al. Microstructural and tribological characterization of DLC coatings deposited by plasma enhanced techniques on steel substrates. *Surface & Coatings Technology*, v. 389, p.1-10, 2020. ISSN 0257-8972.

KUMAR, R. et al. PECVD process parameter optimization: towards increased hardness of diamond-like carbon thin films. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 33, p.1905-1913, 2018. ISSN 1532-2475.

LEYLAND, A., MATHEWS, A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimized tribological behaviour. *Wear*, V.246, P.1-11, 2000. ISSN :0043-1648.

LUGO, N. et al. Characterization and tribologic study in high vacuum of hydrogenated DLC films deposited using pulsed DC PECVD system for space applications. *Surface & Coatings Technology*, v.332, p.135-141, 2017. ISSN. 0257-8972.

OLIVER, W.C. PHARR, G.M. Measurement of Thin Film Mechanical Properties Using Nanoindentation. *MRS Bulletin*, v. 17, p.28-33, 1992. ISSN 0883-7694.

ROBERTSON, J. Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering*, v.37, p.127-181, 2002. ISSN 0927-796X.

SHANG, C. et al. Influence of Wettability and Mechanical Properties on Tribological Performance of DLC Coatings under Water Lubrication. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, v. 5, p.110-123, 2015. ISSN 2161-489X.

VIDAKI, N. et al. The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds. *Journal of Materials Processing Technology*, v.143-144, p.481-485, 2003. ISSN. 0924-0136.

WANG, X. et al. Effect of deposition pressures on uniformity, mechanical and tribological properties of thick DLC coatings inside of a long pipe prepared by PECVD method. *Surface & Coatings Technology*, v. 375, p.150-157, 2019. ISSN 0257-8972.