

AVALIAÇÃO DO DESGASTE POR MICROABRASÃO DO AÇO AISI M-35 REVESTIDO POR DLC – DIAMOND-LIKE CARBON

Evaluation of microabrasion wear of AISI M-35 steel coated with DLC – diamond-like carbon

Ramon Martins Drumond^{1*}; Ernane Rodrigues da Silva¹; Paulo Sergio Martins²;
Elhadji Cheikh¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

²Centro Universitário UNA, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

*Autor para correspondência: ramondrumond@uol.com.br

Recebido em: 10/09/2020, Aceito em: 16/11/2020, Publicado em: 18/12/2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2020.v12.p.199-212>

RESUMO

A utilização de revestimentos finos é uma alternativa muito utilizada para se alterar características superficiais. No caso de ferramentas de corte, o objetivo é de se proporcionar melhorias ao processo de usinagem como, por exemplo, melhor acabamento superficial dos produtos e aumento da vida útil das ferramentas. O DLC – Diamond-like Carbon é um material amplamente utilizado como revestimento. Ele corresponde a uma forma metaestável do carbono amorfo, na qual são encontradas ligações sp^3 e sp^2 , próprias do diamante e do grafite, respectivamente. Por ser constituído por esse misto de ligações, o DLC é capaz de combinar características presentes em ambos os materiais, como boa resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito. O presente estudo teve por objetivo realizar uma comparação entre o desempenho de amostras de aço rápido AISI M-35 revestidas por DLC e amostras não revestidas, no que se refere à resistência ao desgaste por microabrasão. Primeiramente, foi realizada a caracterização dos materiais. O filme DLC foi analisado por meio das técnicas de espectroscopia Raman e espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios-X. Sua análise permitiu caracterizá-lo como um carbono amorfo não tetraédrico de espessura média de cerca de 1,5 μm . O aço AISI M-35, por sua vez, teve sua composição química determinada por espectrometria de emissão ótica. Por fim, foi analisado o desempenho das amostras revestidas e não revestidas no teste de resistência à microabrasão, o caloteste. As calotas obtidas tiveram o diâmetro, em média, 71% menor nas amostras que receberam o revestimento. O coeficiente de desgaste específico foi, em média, 142 vezes maior no aço não revestido por DLC. Esses resultados permitiram concluir que a utilização do DLC como revestimento em ferramentas de corte fabricadas em aço AISI M-35, pode se constituir como uma alternativa viável quando se busca melhorar o desempenho de ferramentas de corte.

Palavras-chave: caloteste, coeficiente de desgaste, DLC, tribologia

ABSTRACT

The use of thin coatings is an alternative widely used to change surface characteristics. In the case of cutting tools, the objective is to provide improvements to the machining process, such as, for example, better surface finish of the products and increased tool life. DLC - Diamond-like Carbon is a material widely used as a coating. It corresponds to a metastable form of amorphous carbon, in which sp^3 and sp^2 bonds are found, typical of diamond and graphite, respectively. Because it consists of this mixture of connections, the DLC is able to combine characteristics present in both materials, such as high wear resistance and low friction coefficient. The present study aimed to make a comparison between the performance of AISI M-35 high speed steel samples coated by DLC and uncoated samples, with regard to wear resistance by microabrasion. First, the materials were characterized. The DLC film was analyzed using Raman spectroscopy and X-ray photoelectrons spectroscopy. Its analysis allowed to characterize it as an amorphous non-tetrahedral carbon with an average thickness of about 1.5 μm . AISI M-35 steel had its chemical composition determined by optical emission spectrometry. Finally, the performance of coated and uncoated samples was analyzed in the microabrasion resistance test, the calotest. The obtained craters had, on average, 71% smaller diameter in the samples that received the coating. The specific wear coefficient was, on average, 142 times higher in steel not coated by DLC. These results allowed to conclude that the use of DLC as a coating on cutting tools manufactured in AISI M-35 steel, can constitute a viable alternative when seeking to improve the performance of cutting tools.

Keywords: calowear, wear coefficient, DLC, tribology

INTRODUÇÃO

A tribologia é uma ciência que se dedica ao estudo de superfícies que se encontram em movimento relativo, cujo campo de pesquisa envolve, principalmente, os fenômenos de atrito e desgaste. Nesse sentido, uma das maiores contribuições a serem dadas por ela é promover o aumento da vida útil dos mais diversos tipos de produtos, sejam eles, por exemplo, componentes de motores a combustão ou as próprias ferramentas de corte utilizadas na fabricação desses componentes. Assim, pode-se afirmar que a melhora das características superficiais ou tribológicas, na medida em que se mostra capaz de prolongar a vida útil de produtos, pode ter consequências que vão desde o aumento no valor agregado destes, até a redução na emissão de substâncias nocivas ao meio ambiente, decorrentes de sua fabricação. Tais melhorias podem ser alcançadas, por exemplo, por meio de mudanças nos processos de produção e materiais utilizados (JOST, 1990; CAI *et al.*, 2020).

Uma maneira de alterar as características tribológicas de um produto ou componente é por meio da aplicação de revestimentos superficiais de escala micrométrica, também chamados de filmes. Estes podem ser dos mais diversos tipos de materiais e sua aplicação é capaz de proporcionar, dentre outras, alterações em propriedades óticas, magnéticas, eletrônicas e químicas das superfícies. Tais mudanças podem ter efeitos como proteger contra a corrosão, melhorar a aparência, alterar a condutividade térmica e aumentar a resistência ao desgaste. Esse último pode ser obtido, por exemplo, por meio da redução do coeficiente de atrito das superfícies e da consequente obtenção de uma redução na taxa de desgaste (TANG *et al.*, 2020).

A usinagem é um processo de fabricação no qual, através da retirada de material, uma peça em estado bruto pode se tornar um produto acabado. Sua execução é marcada pela geração de calor, que tem sua origem em fenômenos próprios ao processo como a deformação plástica e a fratura e que são também os responsáveis pela remoção do material, chamado de cavaco (BRZEZINKA *et al.*, 2020). Um dos maiores problemas relacionados à geração de calor durante o processo está no fato das altas temperaturas presentes contribuírem para a alteração das características macro e microestruturais tanto dos materiais das ferramentas de corte, quanto da peça que está sendo usinada. Uma consequência disso pode ser, por exemplo, a redução da dureza do material da ferramenta que, por sua vez, pode ser capaz de levar à queda na resistência ao desgaste da mesma (BRZEZINKA *et al.*, 2020). Além disso, a usinagem de determinados materiais apresenta desafios ainda maiores em função de efeitos específicos das altas temperaturas geradas. Em se tratando do alumínio, por exemplo, pode ocorrer a adesão dele sobre as ferramentas de corte, fenômeno que prejudica a durabilidade delas e a qualidade dos produtos (BRZEZINKA *et al.*, 2020; MARTINS, 2016; SILVA *et al.*, 2015). Enke (1999), ao analisar a quantidade de calor gerada no processo, constatou que 70% dele tem sua origem na deformação plástica do material e os 30% restantes no atrito entre a peça e a ferramenta. Nesse sentido, a possibilidade de alterar as características do par tribológico peça-ferramenta, a fim de diminuir o atrito entre eles, se constitui como uma medida promissora no sentido de promover a redução da geração de calor decorrente do processo de usinagem, sendo capaz assim de trazer maior vida útil às ferramentas de corte utilizadas no processo e melhor acabamento superficial aos produtos obtidos (FUKUI *et al.*, 2004; UCUN *et al.*, 2015; QI *et al.*, 2020).

O Diamond like carbon - DLC é um material capaz de combinar altos níveis de dureza, baixo coeficiente de atrito, boa resistência ao desgaste abrasivo e à corrosão, alta condutividade térmica e inércia química (FUKUI *et al.*, 2004). Ele corresponde a uma das formas metaestáveis do carbono e, a depender de sua maneira de produção, pode resultar em diferentes materiais (BRZEZINKA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2015). Suas ligações atômicas são um misto de hibridizações sp^3 , próprias do diamante, e sp^2 , presentes no grafite, e a proporção existente entre elas, assim como a presença de Hidrogênio ou Nitrogênio, é um dos fatores que determinam as propriedades alcançadas pelo material (BRZEZINKA *et al.*, 2020; PILLACA *et al.*, 2018; DELFIN *et al.*, 2018; ROBERTSON & FERRARI, 2002). Robertson e Ferrari (2002) definem o DLC como um carbono amorfo (a-C) ou amorfo hidrogenado (a-C:H), com uma quantidade significativa de ligações sp^3 . Quando a proporção dessas ligações é muito grande, porém, o material, segundo os autores, é chamado carbono amorfo tetraédrico (ta-C) ou carbono amorfo tetraédrico hidrogenado (ta-C:H).

O revestimento DLC pode ser obtido por meio de duas técnicas diferentes de deposição via vapor, *CVD* (*chemical vapour deposition*) e *PVD* (*physical vapour deposition*). No processo *CVD* ocorre uma reação química na fase vapor, que permite que seja depositado um sólido em uma superfície aquecida. Já no processo *PVD*, o material é vaporizado a partir de átomos ou moléculas, e então transportado na forma de vapor por meio de vácuo ou de um ambiente com um gás de baixa pressão até o substrato, onde ele então condensa e é depositado. Trata-se de um processo físico, no qual não há ocorrência de reações químicas (EL-ESKANDARANY, 2015). Uma das características desse processo é sua capacidade de manter o substrato que receberá o revestimento DLC a baixas temperaturas. Isso permite que não ocorram alterações microestruturais do substrato, preservando assim suas propriedades mecânicas, como a dureza, por exemplo.

Dessa forma, o controle da temperatura do substrato no momento da deposição tem grande importância para que sejam conservadas as características de determinados materiais, como no caso dos utilizados na fabricação de ferramentas de corte, que devem ter sua microestrutura preservada a fim de que, por exemplo, não sejam perdidas propriedades como a dureza a altas temperaturas SOLIS *et al.*, 2016).

No que se refere à espessura, tanto os filmes DLC obtidos pelo processo *CVD* quanto os obtidos por *PVD* apresentam espessuras de ordem micrométrica. Pesquisas realizadas em revestimentos produzidos pelo processo *CVD* encontraram valores entre 0,030 μm e 3,3 μm de espessura (SALAH *et al.*, 2016; CONSTANTINOU *et al.*, 2017; HADDOCK, D. *et al.*, 2016; DALIBÓN *et al.*, 2019). Já estudos em filmes obtidos por *PVD* obtiveram valores na faixa de 0,05 μm e 2 μm (POPESCU *et al.*, 2017; KUMAR *et al.*, 2020).

Há também uma série de estudos que avaliam o desempenho de ferramentas de corte revestidas por filmes de carbono. É o caso de Dasch *et al.* (2006), que compararam o desempenho de cinco diferentes revestimentos a base de carbono utilizados em ferramentas de corte e verificaram casos em que foi obtido um aumento na vida útil de mais de 100 vezes em relação ao obtido sem o uso de revestimento. Fukui *et al.* (2004) utilizaram uma ferramenta revestida por carbono para realizar a usinagem a seco de uma liga de alumínio e verificaram melhorias tanto na vida útil da ferramenta quanto na qualidade da superfície usinada. Silva *et al.* (2015) também observaram uma melhora em relação a erros macrogeométricos mensurados em furos usinados com ferramentas de metal duro revestidas por DLC, quando comparados aos obtidos com ferramentas não revestidas.

Dentre os trabalhos disponíveis na literatura é possível verificar uma grande variação tanto dos materiais usinados, quanto dos utilizados na fabricação das ferramentas de corte, além dos próprios processos de usinagem e dos tipos de revestimento a base de carbono utilizados. Há, porém, uma escassez de estudos referentes ao comportamento específico do aço AISI M-35 revestido por DLC.

Sendo assim, esse trabalho tem por objetivo analisar as alterações no comportamento tribológico de um aço ferramenta AISI M-35, amplamente utilizado na fabricação de ferramentas de corte, originadas a partir da aplicação de filme DLC. Para tal foram utilizados dois grupos de amostras do aço AISI M-35, um revestido e outro não. Em seguida, o aço ferramenta foi caracterizado em relação à sua composição química. O filme DLC, além da composição, teve também suas ligações químicas analisadas e espessura mensurada. Na sequência foram realizados testes a fim de determinar o comportamento de ambos os materiais no que se refere à resistência ao desgaste microabrasivo.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a caracterização dos materiais foram utilizados dois grupos de amostras planas do aço rápido AISI M-35 com acabamento superficial retificado e nas dimensões de 30x30x5mm. Um grupo de amostras recebeu revestimento em DLC e outro não. Como revestimento foi utilizado um filme cuja deposição foi realizada por meio de processo PVD. A imagem de uma das amostras do aço rápido pode ser vista na Figura 1.

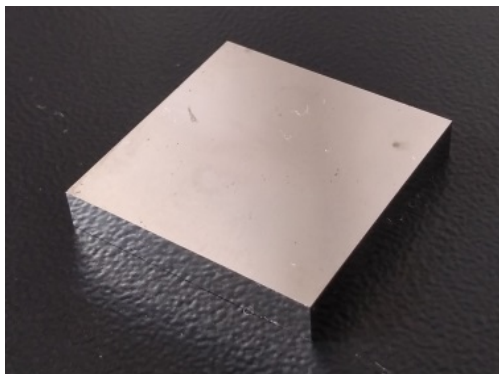


Figura 1. Amostra em aço AISI M-35.

CARACTERIZAÇÃO DO AÇO AISI M-35

A composição química do aço AISI M-35 foi obtida por meio de Espectrometria de Emissão Óptica. Foi utilizado o equipamento Foundry Master Pro 2 do fabricante Hitachi. Foram realizadas três análises em uma amostra do material. O preparo da amostra consistiu de sua limpeza e posterior secagem.

CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO DLC

O filme DLC utilizado no revestimento das amostras de aço AISI M-35 foi caracterizado por meio de Espectroscopia Raman, Espectroscopia de Fotoelétrons – XPS e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A espectroscopia Raman é uma técnica não-destrutiva, considerada padrão na caracterização de sistemas compostos de carbono. Por meio dela é gerado um espectro através do qual é possível obter os picos das bandas G e D, relacionadas, respectivamente, às ligações sp^2 e sp^3 realizadas pelo carbono. Por meio do cálculo da área embaixo da curva de cada banda, obtém-se as intensidades delas, ID e IG. Através do cálculo da relação ID/IG é obtido um valor que indica o nível de prevalência de uma ligação sobre a outra (ROBERTSON & FERRARI, 2002). Neste estudo, foi utilizado um Espectrômetro Raman Horiba modelo LabRam HR Evolution com excitação de comprimento de onda de 515 nm com lentes de aumento de 10x e 50x. Foi utilizada uma amostra, na qual foram avaliadas duas regiões distintas. Em cada análise foram obtidos espectros com intensidade de laser de 50% e potência máxima de 50mW.

A análise por Espectroscopia de Fotoelétrons - XPS tem o objetivo de determinar a presença e a concentração dos elementos químicos em camadas superficiais. O processo consiste da iluminação da amostra por Raios - X e conseqüente transferência de energia para os elétrons presentes nela. Ocorre então uma movimentação de parte deles e o elemento é identificado pela medida da energia dos elétrons que acabam por escapar da amostra. A partir dessa medida obtém-se um espectro, que é diferente para cada elemento (PAULA, 2018). Neste trabalho foi utilizado um equipamento Kratos Axis Ultra X-ray Photoelectron Spectroscopy. As análises foram realizadas em uma amostra revestida por DLC. O objetivo foi verificar os elementos químicos presentes no filme e, no caso do carbono, a proporção entre as ligações sp^3 e sp^2 .

A avaliação da espessura do filme foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura. Para a realização desse experimento, uma amostra foi cortada transversalmente e a espessura foi medida em três pontos diferentes.

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR MICROABRASÃO DO AÇO AISI M-35 REVESTIDO E NÃO REVESTIDO POR DLC

A resistência ao desgaste dos dois grupos de amostras do aço AISI M-35, um revestido por DLC e outro não, foi avaliada por meio de teste de resistência ao desgaste por microabrasão, também conhecido como caloteste. Para sua execução foram seguidas as orientações da norma DD ENV 1071-6 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2001). Nessa norma são enumerados os parâmetros que devem ser definidos previamente à realização do teste: diâmetro da esfera; líquido abrasivo a ser utilizado, inclusive, sua concentração e taxa de gotejamento ao longo do experimento; carga Normal aplicada; velocidade de rotação do eixo e; tempo de execução do teste. A norma esclarece que existe liberdade para que o executante adote os parâmetros que lhe forem mais convenientes, apenas com a ressalva de que os dados só devem ser comparados se tiverem sido adotados os mesmos parâmetros. Assim, após uma fase de pré-teste, foram definidos os melhores parâmetros a serem utilizados no ensaio, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados no teste de resistência ao desgaste por microabrasão.

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro da esfera em aço SAE 52100	30,0	mm
Concentração do abrasivo	2,0	%
Taxa de gotejamento do abrasivo	120	gotas/min
Carga Normal	0,8	N
Velocidade de rotação	900	RPM
Tempo de contato	14 e 16	min

Foi utilizado como abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3) diluído a uma concentração de 2% em água destilada. Para que fosse mantida uma concentração homogênea da solução abrasiva, foi utilizado um agitador magnético ao longo de todo o ensaio, que foi executado em um equipamento da marca Anton Paar.

Após a conclusão do ensaio foram obtidas imagens ampliadas das calotas por meio de uma lupa digital. A capacidade máxima de ampliação do equipamento é de 80 X. Em seguida, foram medidos por meio de software os diâmetros de cinco calotas de cada um dos dois grupos de amostras do aço AISI M-35, revestidas por DLC e não revestidas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CARACTERIZAÇÃO DO AÇO AISI M-35

A Tabela 2 apresenta os limites de composição previstos para o aço AISI M-35 (ASM INTERNATIONAL, 1990) e a média aritmética dos valores obtidos na análise realizada por meio de espectrometria de emissão ótica.

Tabela 2. Aço AISI M-35: comparação entre os limites de composição e a composição média obtida.

Elemento	Limites de composição (%)	Composição média (%)
C	0,82-0,88	0,870
Si	0,20-0,45	0,369
Mn	0,15-0,40	0,400
Cr	3,75-4,50	4,14
Mo	4,50-5,50	4,82
Ni	Máximo 0,30	0,328
Co	4,50-5,50	3,94
V	1,75-2,20	1,58
W	5,50-6,75	6,78
Fe	-	76,5
Outros	-	0,23

Fonte: ASM International, 1990.

A análise realizada indicou a presença dos principais elementos de liga que são encontrados nos aços utilizados na fabricação de ferramentas, a saber, C, Si, Mn, Cr, V, W, Mo e Co (CHIAVERINI, 1979). Dentre todos os elementos presentes, porém, quatro foram observados em proporções fora dos parâmetros estabelecidos por ASM International (1990), a saber, Ni, Co, V, W. Dentre eles o que apresentou maior diferença em relação ao esperado foi o Cobalto, com 12,4% abaixo do limite inferior. Já o Vanádio foi encontrado em um percentual 9,8% menor que o limite inferior. O Níquel, por sua vez, foi observado em percentual 9,3% acima do limite superior. A variação de Tungstênio foi menor, cerca de 0,5% inferior ao valor mínimo.

O Cobalto possui a capacidade de aumentar a dureza a quente, propriedade muito importante quando se trata de processos de usinagem que conduzem a altas temperaturas. Vanádio é responsável pela formação dos carbonetos mais duros presentes nos aços rápidos. O Tungstênio também participa da formação de carbonetos e eleva a resistência do aço rápido (CHIAVERINI, 1979). Dessa forma, pode-se concluir que as variações encontradas podem influenciar a microestrutura do aço e, conseqüentemente, o seu comportamento quando em serviço. Contudo, para que fosse possível confirmar o impacto dessas variações, seria necessário um estudo que permitisse comparar o desempenho do aço AISI M-35 utilizado no presente estudo com outro que se encontrasse dentro das faixas especificadas de composições químicas estabelecidas por ASM International (1990).

CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO DLC

Foram realizadas, por meio de espectroscopia por espalhamento Raman, duas análises no filme DLC utilizado no revestimento da amostra de aço AISI M-35. Os dados obtidos foram tratados em uma versão de teste do software Origin. Neste tratamento foi realizada uma deconvolução gaussiana que permitiu a visualização dos picos sobrepostos característicos do DLC. O espectrograma obtido na primeira análise encontra-se na Figura 2.

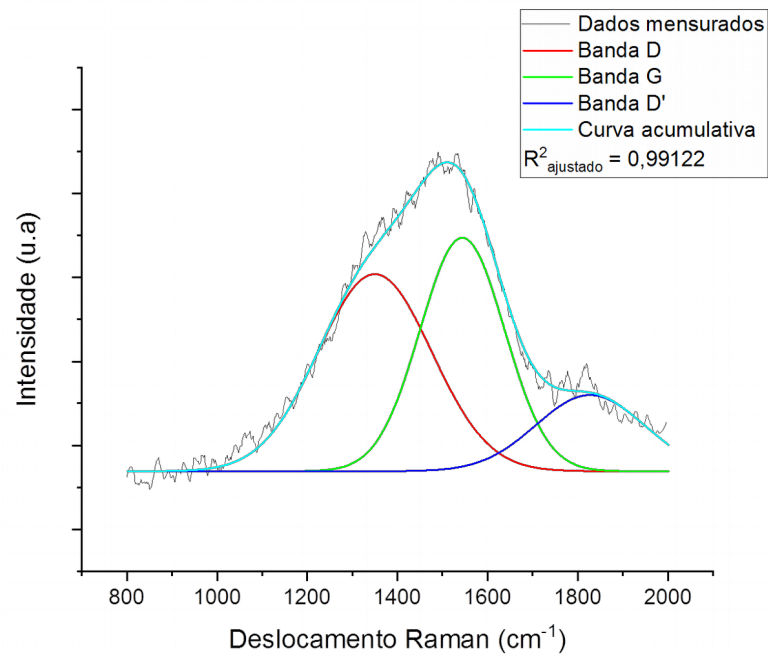


Figura 2. Espectrograma Raman da amostra revestida por DLC – 1ª análise.

Na Figura 3 pode ser visto o espectrograma obtido na segunda análise.

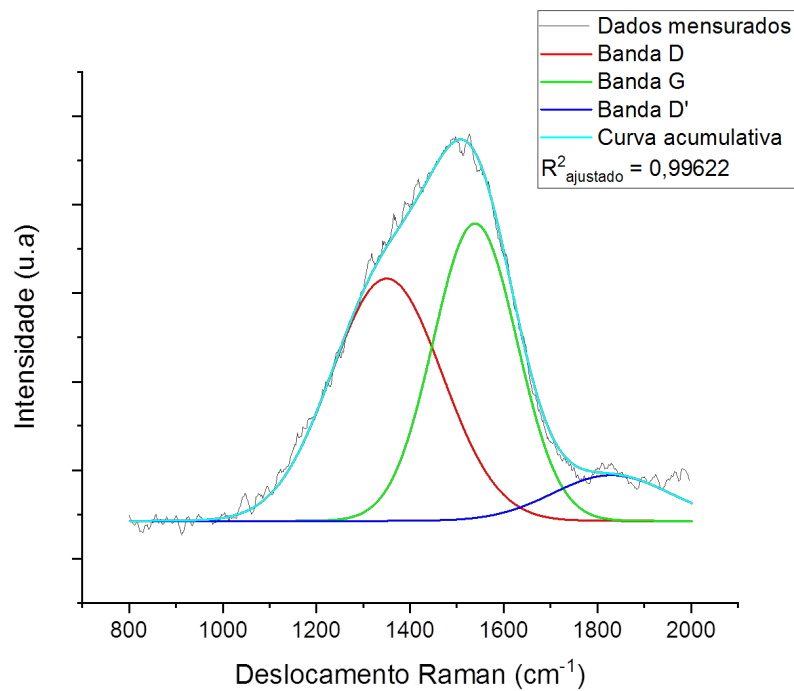


Figura 3. Espectrograma Raman da amostra revestida por DLC – 2ª análise.

Os valores obtidos a partir da deconvolução são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados obtidos através da deconvolução do espectrograma Raman.

Amostra	1	2
Posição banda d' (cm-1)	1827	1830
Posição banda d (cm-1)	1350	1350
Posição banda g (cm-1)	1544	1539
Intensidade banda d'	54	32
Intensidade banda d	148	162
Intensidade banda g	130	150
ID/IG	1,14	1,08

Por meio do cálculo da razão entre as intensidades das bandas D e G representadas por I_D/I_G foram obtidos, nas duas análises, os valores de 1,14 e 1,08. Tais valores são indicativos de uma presença de ligações sp^3 em uma proporção menor que 20%, segundo Robertson e Ferrari (2002). Também de acordo com os autores, isso permite classificar o revestimento analisado como um carbono amorfo não tetraédrico, tipo a:C.

Com a finalidade de determinar a presença e a concentração dos elementos químicos foi também realizada a análise do revestimento DLC por Espectroscopia de Fotoelétrons - XPS. A Figura 4 mostra o espectrograma obtido.

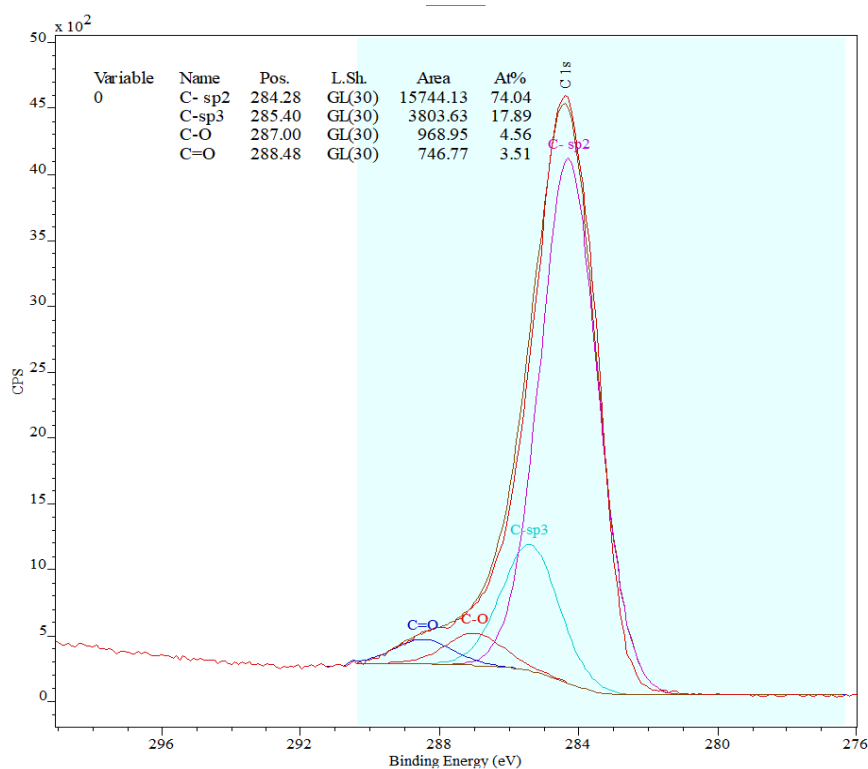


Figura 4. Espectroscopia de fotoelétrons.

Os resultados obtidos na análise por XPS demonstraram a presença de picos sp^2 C-C em 284,3 (+0,3), sp^3 C-C em 285,4 (+0,3), C-O em 287,0 (+0,3) e C=O em 288,5 (+0,3) eV, valores semelhantes aos encontrados em outros trabalhos (KIMURA *et al.*, 2016; KAO *et al.*, 2019). Dessa forma, pode-se afirmar que o revestimento DLC analisado é composto pelos elementos carbono e oxigênio, com uma prevalência de carbono, que corresponde a mais de 92% do material. Os pequenos picos de oxigênio encontrados podem ser atribuídos a impurezas introduzidas no revestimento durante o processo de deposição ou a contaminações decorrentes da exposição do material ao ar (JO *et al.*, 2018). Além disso, o percentual de ligações sp^3 foi quantificado em 17,89%, portanto, dentro da margem que havia sido apontada pela Espectroscopia Raman. Esse dado, aliado à ausência de hidrogênio, permite concluir que se trata de um carbono amorfo não tetraédrico, tipo a:C (ROBERTSON & FERRARI, 2002; MARTINS, 2016). Essa conclusão é fundamental, uma vez que permite uma melhor compreensão a respeito do desempenho do filme DLC.

A espessura do filme DLC foi avaliada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura. Foram medidos três pontos de uma amostra, conforme a Figura 5.

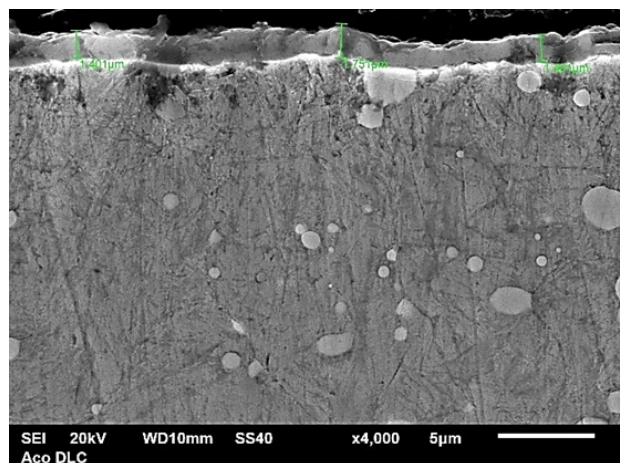


Figura 5. Imagem do filme DLC obtida por microscopia eletrônica de varredura.

Os valores obtidos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Espessura do revestimento.

Ponto	Espessura (μm)
1	1,401
2	1,751
3	1,401
Média aritmética	1,518

Também a espessura do revestimento, em média de 1,518 μm , encontra-se dentro da faixa encontrada em outros estudos sobre filmes produzidos pelo processo PVD (POPESCU *et al.*, 2017; KUMAR *et al.*, 2020).

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR MICROABRASÃO DO AÇO AISI M-35 REVESTIDO E NÃO REVESTIDO POR DLC

A Figura 6 mostra as calotas obtidas a partir da realização do teste de resistência ao desgaste por microabrasão, o caloteste, no aço AISI M-35 não revestido por DLC.

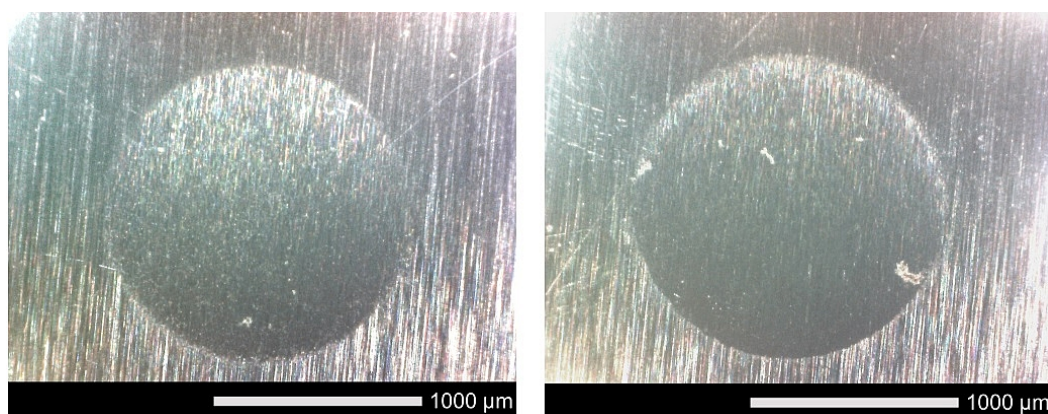


Figura 6. Imagens das calotas obtidas no aço AISI M-35 não revestido por DLC.

A Figura 7 mostra as calotas obtidas a partir da realização do teste de resistência ao desgaste por microabrasão, o caloteste, no aço AISI M-35 revestido por DLC.

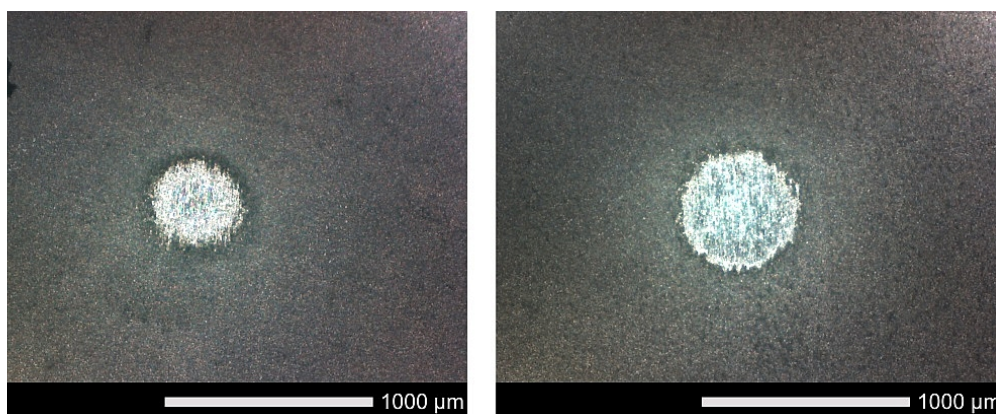


Figura 7. Imagens das calotas obtidas no aço AISI M-35 revestido por DLC.

A partir da ampliação das imagens foi realizada a medição do diâmetro de cinco calotas de cada grupo. Foi então calculada a média aritmética dos valores obtidos. De posse desse valor e dos parâmetros utilizados na execução do ensaio, foram obtidos os coeficientes de desgaste específico médio, que se encontram na Tabela 5.

Tabela 5. Coeficientes de desgaste específico.

Amostra	Coefficiente de desgaste específico médio (mm ³ /m.N)	Desvio padrão
Aço AISI M-35 revestido com DLC	1,44 x 10 ⁻⁷	1,26 x 10 ⁻⁷
Aço AISI M-35 sem revestimento	2,04 x 10 ⁻⁵	7,66 x 10 ⁻⁶

O diâmetro médio das calotas obtidas no ensaio de desgaste por microabrasão realizado nas amostras de aço revestidas e não revestidas por DLC encontra-se na Figura 8.

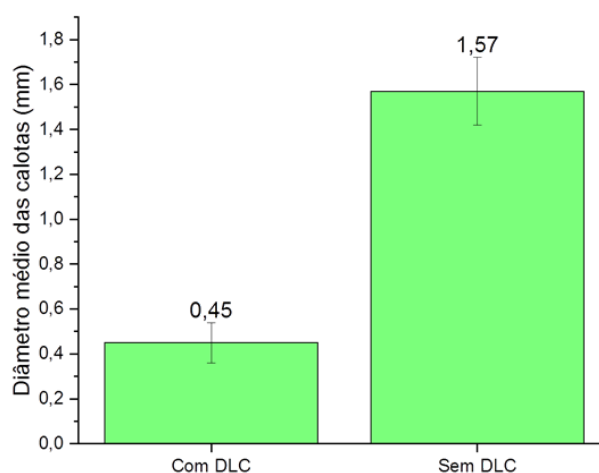


Figura 8. Diâmetro médio das calotas obtidas no ensaio de desgaste por microabrasão.

A comparação entre os diâmetros das calotas e os coeficientes de desgaste específico obtidos no ensaio de desgaste por microabrasão no aço AISI M-35 não revestido por DLC e no aço revestido, evidenciaram que as amostras que receberam o revestimento DLC tiveram o diâmetro médio de suas calotas reduzido em cerca de 71%. Esse resultado é muito próximo ao obtido por Pires (2018), que ao comparar o desempenho no ensaio de desgaste por microabrasão de amostras de aço AISI M-2 com acabamento retificado, revestidas e não revestidas por DLC, percebeu que as amostras que receberam o revestimento em DLC tiveram o diâmetro médio de suas calotas reduzido em 68%.

Já o coeficiente de desgaste específico médio encontrado foi 142 vezes maior no aço não revestido por DLC. No aço AISI M-2, Pires (2016) encontrou um coeficiente de desgaste, em média, 88 vezes maior no aço não revestido por DLC em comparação ao revestido.

Os resultados obtidos na análise do AISI M-35 demonstram que houve uma melhora significativa na resistência ao desgaste a partir da utilização do filme DLC. Tal melhora pode ser traduzida como uma maior resistência ao desgaste, pois se forem utilizados como parâmetros as diferenças entre os diâmetros das calotas obtidas no aço AISI M-35 não revestido e no aço revestido, é possível considerar que a aplicação do filme DLC foi capaz de proporcionar um aumento de cerca de 3,5 vezes na vida útil do componente.

CONCLUSÕES

As análises realizadas permitiram caracterizar o revestimento utilizado como um filme DLC com espessura média de cerca de 1,5 μm . Ele foi classificado como um carbono amorfo não tetraédrico (a:C), com 17,89% de conteúdo sp^3 . Além do elemento carbono, também foi verificada a presença de oxigênio no revestimento, provavelmente originário de impurezas introduzidas durante o processo de deposição ou de contaminações decorrentes da exposição do material ao ar.

Os resultados obtidos nos testes tribológicos demonstraram uma expressiva melhora nas características de resistência ao desgaste apresentadas pelo aço AISI M-35 revestido por DLC, em comparação ao aço não revestido.

Uma das evidências que levam a essa conclusão é o fato das calotas obtidas no ensaio de desgaste por microabrasão, o caloteste, terem apresentado diâmetro 71% menor nas amostras de aço revestidas em comparação às não revestidas. Outra evidência do melhor desempenho do material revestido por DLC é a diferença entre os valores do coeficiente de desgaste específico médio, que foi 142 vezes maior no material não revestido.

Nesse sentido, pode-se concluir que a utilização de revestimento por DLC em ferramentas de corte produzidas em aço AISI M-35 pode se apresentar como uma alternativa promissora, quando se busca uma melhor resistência ao desgaste e, conseqüentemente, maior vida útil das ferramentas.

AGRADECIMENTOS

À FCA – Fiat Chrysler Automobiles pela realização da análise por Microscopia Eletrônica de Varredura.

Ao INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela realização das análises por Espectroscopias Raman e de Fotoelétrons - XPS.

À Nipo-Tec Ferramentas Especiais pela doação das amostras de aço AISI M-35.

À Oerlikon Balzers Revestimentos Metálicos por revestir o aço AISI M-35 com DLC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook: Properties and selection: irons steels and high performance alloys**. 10th ed. Ohio: ASM International; 1990. Wrought Tool Steels, Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys; p. 1763-1839.
- BRZEZINKA T., *et al.* DLC and DLC-WS₂ Coatings for Machining of Aluminium Alloys. **Coatings** **9**, 2019.
- CAI, R., *et al.* Wear mechanism evolution on brake discs for reduced wear and particulate emissions. **Wear** **452-453**, 2020.
- CHIAVERINI V. **Aços e ferros fundidos**. 4ª ed. São Paulo: ABM; 1979. Aços para ferramentas e matrizes.
- CONSTANTINO M. *et al.* Enhancing the nanoscratch resistance of pulsed laser deposited DLC films through molybdenum-doping. **Surface & Coatings Technology** **330**, 185-195, 2017.
- DALIBÓN E. *et al.* Characterization of DLC coatings over nitrided stainless steel with and without nitriding pre-treatment using annealing cycles. **Journal of Materials Research and Technology** **8**, 2019.
- DASCH J. *et al.* A comparison of five categories of carbon-based tool coatings for dry drilling aluminium. **Surface & Coatings Technology** **200**, 2970-2977, 2006.
- DELFIN F. *et al.* Carbon based films: Influence of the processing parameters on the structure and properties. **Revista Matéria** **23**, 2018.
- EL-ESKANDARANY M. **Mechanical Alloying: Nanotechnology, Materials Science and Powder Technology**. 2nd ed. Oxford: Elsevier; 2015. Vapor deposition.

- ENKE K. Dry machining and increase of endurance of machine parts with improved doped DLC on coatings steel, ceramics and aluminium. **Surface & Coatings Technology** **116-119**, 488-491, 1999.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Advanced technical ceramics: Methods of test for ceramic coatings**. Brussels: DIN; 2001. DD ENV 1071-6: Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-abrasion wear test.
- FUKUI, H. *et al.* Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminium alloys. **Surface & Coatings Technology** **187**, 70-76, 2004.
- HADDOCK, D. *et al.* Characterisation of Diamond-Like Carbon (DLC) laser targets by Raman spectroscopy. **Journal of Physics: Conference Series** **713**, 2016.
- JO, Y. *et al.* Synthesis and electrochemical properties of Ti-doped DLC films by a hybrid PVD/PECVD process. **Applied Surface Science** **433**, 2018.
- JOST, H. Tribology – origin and future. **Wear** **136**, 1-17, 1990.
- KAO, W. *et al.* Effects of Pulse Power and Argon Flux Flow Rate on Mechanical and Tribological Properties of Diamond-like Carbon Coatings Prepared Using High Power Impulse Magnetron Sputtering Technology. **Thin Solid Films**. 2019.
- KIMURA, T. *et al.* Properties of diamond-like carbon films prepared by high power pulsed sputtering with two facing targets. **Surface & Coatings Technology** **307**, 2016.
- KUMAR, C. *et al.* Applicability of DLC and WC/C low friction coatings on Al₂O₃/TiCN mixed ceramic cutting tools for dry machining of hardened 52100 steel. **Ceramics International** **46**, 2020.
- MARTINS, P. S. Estudo da furação em altas velocidades de corte em ligas de Al-Si utilizando brocas de aço rápido e metal duro sem e com revestimento de DLC (Diamond like Carbon) [Tese de Doutorado]. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais; 2016. 209 p. Doutorado em Engenharia Mecânica.
- PAULA, L. O. **Estudos de tribocorrosão em substratos de ligas de 60NiTi e Ti-6Al-4V recobertos com DLC na presença de urina sintética** [Dissertação de Mestrado]. São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba; 2018. 62 p. Mestrado e Engenharia Biomédica.
- PILLACA, E.J. *et al.* DLC deposition inside a long tube by using the pulsed-DC PECVD process. **Surface & Coatings Technology** **359**, 55-61, 2018.
- PIRES, S. S. **Aspectos tribológicos de revestimento Diamond Like Carbon sobre a superfície de aço rápido AISI M-2** [Dissertação de Mestrado]. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais; 2018. 118 p. Mestrado em Engenharia de Materiais.
- POPESCU, C. *et al.* An Experimental Study on Nano-Carbon Films as an Anti-Wear Protection for Drilling Tools. **Coatings** **7**; 2017.
- QI, Y. *et al.* Wear of WC inserts textured by shot peening and electrical discharge machining. **Wear** **452-453**, 2020.
- ROBERTSON, J.; FERRARI, A. Raman Spectroscopy of Amorphous, Nanostructured, Diamond-like Carbon and Nanodiamond. **Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences** **362**, 2004.
- SALAH, N. *et al.* Tribological behavior of diamond-like carbon thin films deposited by the pulse laser technique at different substrate temperatures. **Tribology International** **103**, 274-280, 2016.
- SILVA, W. *et al.* Performance of carbide tools coated with DLC in the drilling of SAE 323 aluminium alloy. **Surface & Coatings Technology** **284**, 404-409, 2015.
- SOLIS, J. *et al.* Tribological performance of an H-DLC coating prepared by PECVD. **Applied Surface Science** **383**, 222-232, 2016.
- TANG, L. *et al.* Significantly enhanced mechanical and tribological properties of Co-based alloy coatings by annealing treatment. **Tribology International** **146**, 2020.
- UCUN, I. *et al.* The performance of DLC-coated and uncoated ultra-fine carbide tools in micromilling of Inconel 718. **Precision Engineering** **41**, 135-144, 2015.