



# UMA REVISÃO SOBRE OS REVESTIMENTOS DA FAMÍLIA DLC (*DIAMOND LIKE CARBON*) E SUA UTILIZAÇÃO NO MERCADO BRASILEIRO<sup>1</sup>

Giovanni Rocha dos Santos<sup>2</sup>  
Alexandre da Silva Rocha<sup>3</sup>

## Resumo

Os revestimentos DLC têm apresentado maior introdução no mercado brasileiro ao longo dos últimos anos. Estes revestimentos são depositados principalmente por técnicas de PVD e PACVD, possuem excelente resistência ao desgaste, não incrementam significativamente a rugosidade inicial do substrato e geram baixo coeficiente de atrito. Estas propriedades fazem destes revestimentos as principais alternativas para aplicação em diversos segmentos da indústria, tais como usinagem de ligas de alumínio como uma alternativa na substituição do PCD (*Polycrystalline Diamond Compact*), ferramentas utilizadas em cirurgias odontológicas onde se deseja redução da geração de calor e em componentes automotivos gerando baixo coeficiente de atrito na interface peça e contra-peça. Neste artigo serão abordadas as principais propriedades dos revestimentos da família DLC, alguns processos de deposição utilizados e como estes revestimentos podem ser utilizados na indústria brasileira.

**Palavras-chave:** Revestimentos; Propriedades; Aplicações.

## A REVIEW ABOUT DLC COATINGS AND ITS UTILIZATION ON THE BRAZILIAN INDUSTRY

### Abstract

DLC coatings have shown more penetration into Brazilian market in the last years. These coatings are applied mainly by PVD and PACVD process, they have excellent wear resistance, do not increase substrate original roughness significantly and generate very low friction coefficient. All these properties make these coatings good alternatives to several industrial applications, for example in the field of aluminum alloys machining to replace PCD (*Polycrystalline Diamond Compact*), for dental drills where its very important to keep low heat generation during drilling and for automotive components to reduce friction coefficient between part and counterpart. In this article will be discussed the main properties of DLC coatings, some coating process technologies in use and how this coatings are being used by the Brazilian industry.

**Key words:** Coatings; Properties; Applications.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Doutorando (UFRGS, PPGEM)

<sup>3</sup> Prof. Dr. (UFRGS, PPGEM).



## 1 INTRODUÇÃO

Desde o começo dos anos 80, os revestimentos têm sido aplicados industrialmente para ferramentas de corte e de conformação. O material predominantemente aplicado, nesta época, como revestimento para proteção contra o desgaste foi o nitreto de titânio (TiN). Entretanto, a demanda no aumento de desempenho de ferramentas tem trazido cada vez mais estudos na área de desenvolvimento de novos processos e revestimentos compostos de novos materiais.

Já na década de 90, filmes DLC atraíram mais e mais estudos devido a algumas propriedades bastante interessantes. Os revestimentos compostos por nitretos podem causar um desgaste significativo da contra-peça e são principalmente aplicados em ferramentas. Já os revestimentos DLC não só possuem baixo coeficiente de atrito e alta resistência ao desgaste, como também protegem a contra-peça de um desgaste significativo. Esta vantagem faz dos revestimentos DLC muito atrativos e promissores, tanto em aplicações onde se deseja aumentar o desempenho de componentes mecânicos através da redução do desgaste e redução do coeficiente de atrito, quanto no emprego para ferramentas.

Aplicações tais como usinagem de ligas de alumínio, para as quais na grande maioria dos casos utiliza-se ferramentas não recobertas, se tornam bastante críticas devido ao fato de surgirem inconvenientes, tais como formação de aresta postiça, baixa qualidade do acabamento superficial da peça usinada, lascamento das arestas de corte e até mesmo quebra de ferramentas.

Outras aplicações em que o DLC é usado em larga escala são para ferramentas utilizadas na indústria odontológica, principalmente brocas na furação óssea, para colocação de implantes dentários. O revestimento tem por objetivo reduzir o coeficiente de atrito e evitar a geração de calor excessivo durante um processo de furação.

No segmento automotivo, pode-se dizer que a família de revestimentos DLC é utilizada na Europa e Estados Unidos em volume muito maior do que no Brasil. As aplicações são para componentes de motores, tais como anéis de pistão, pinos de pistão e comandos de válvulas, por exemplo.

## 2 REVISÃO SOBRE REVESTIMENTOS DLC

### 2.1 Dados Gerais

*Diamond-like carbon* (DLC) é um filme fino amorfo que tem como principal constituinte o carbono. Este revestimento apresenta propriedades como: baixo coeficiente de atrito, dureza de até 9000 HV, alta resistência ao desgaste e pode conter quantidades de hidrogênio de até 50% atômico.<sup>(1-6)</sup> Características estas que fazem com que os revestimentos DLC possam ser utilizados para melhoria do desempenho de ferramentas ou componentes em aplicações de engenharia.

Na Tabela 1 é apresentada uma classificação dada aos revestimentos a base de carbono.

**Tabela 1.** Classificação dos revestimentos a base de carbono<sup>(7)</sup>

	Filmes de carbono amorfo – DLC							Filmes de carbono cristalino (revestimentos diamante)	
	Sem Hidrogênio			Com Hidrogênio				Sem aditivo	Com aditivo
Aditivos	-		Metal	-		Metal	Outros		
Ligação	sp <sup>2</sup>	sp <sup>3</sup>	sp <sup>2</sup>	sp <sup>2</sup> -sp <sup>3</sup>	sp <sup>3</sup>	sp <sup>2</sup>		sp <sup>3</sup>	
Abreviação	a-C	ta-C	a-C:Me	a-C:H	ta-C:H	a-C:H:Me (Me=Ti, W, etc)	a-C:H:X (X=Si, O, N, etc)	-	
Nomes comuns	DLC, carbono grafítico	DLC, iC, diamante amorfo	-	DLC, Carbono duro		DLC, Me-DLC, Me-CH, MeCH	DLC, X-DLC, Si-DLC	PVD, PD, CVD Diamond	
Processo de deposição	PVD	PVD	PVD	PACVD	PVD, PACVD	PVD, PACVD	PVD, PACVD	CVD ativado	

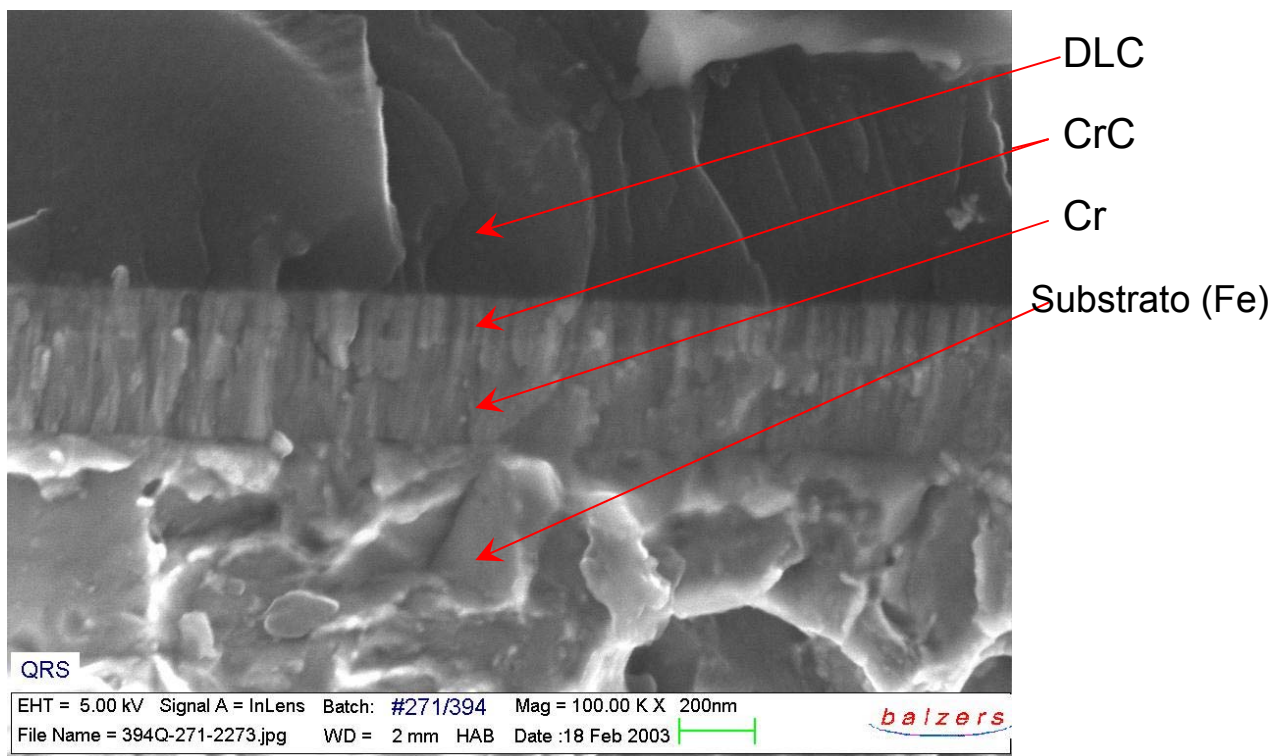
## 2.2 Propriedades dos Revestimentos DLC

As propriedades dos filmes DLC variam e dependem da forma com que os átomos de carbono estão quimicamente arranjados. As ligações dos átomos podem ser do tipo grafite (sp<sup>2</sup>), as quais se encontram entre os planos cristalinos, ou do tipo diamante (sp<sup>3</sup>) nos planos adjacentes. A escolha dos parâmetros de deposição será o influenciador na razão de ligações tipo grafite/tipo diamante e esta razão causará uma variação proporcional nas propriedades do revestimento.<sup>(5,7)</sup> As principais faixas das propriedades dos filmes DLC estão na Tabela 2.

**Tabela 2.** Propriedades dos revestimentos DLC<sup>(8)</sup>

% de hidrogênio (%atômico)	< 1 – 50
Dopantes	Si, F, N e metais
%sp <sup>2</sup>	10 – 70%
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,9 – 3,0
Tensão (Gpa)	-0,5 até – 7,0
Dureza (Gpa)	< 5 até 80
Resistividade Elétrica (Ω/cm)	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>6</sup>
Coefficiente de atrito	0,01 – 0,5

Na Figura 1 pode-se ver uma seção transversal de um filme DLC depositado sobre aço. Diferentes camadas são depositadas durante o processo. O cromo puro depositado primeiramente é utilizado como uma camada que melhora a adesão do revestimento como um todo. As camadas de CrC (carbeto de cromo) é formada pela introdução do gás acetileno enquanto há evaporação dos alvos de cromo no processo, e é uma camada de transição entre a camada de cromo e o DLC puro.



**Figura 1.** Amostra em aço fraturada mostrando a presença de diferentes camadas depositadas (cortesia Oerlikon Balzers).

### 2.3 Dureza

Os revestimentos DLC são caracterizados por apresentarem alta dureza, alto módulo de elasticidade e altas tensões residuais. Estas propriedades estão diretamente ligadas a razão  $sp^3/sp^2$  de ligações dos átomos de carbono do filme e se há ou não elementos dopantes na composição do revestimento.<sup>(5)</sup>

Por exemplo, um revestimento DLC que possui dureza entre 1.500 HV e 3.000 HV contêm de 5% a 10 % de carbono com ligações do tipo  $sp^3$ . Já os filmes que possuem dureza na faixa de 3.000 HV a 5.000 HV têm uma razão  $sp^3/sp^2$  de 15% a 20%. E se a concentração de ligações  $sp^3$  aproxima-se de 100%, a dureza e a elasticidade dos revestimentos DLC tornam-se muito semelhantes a do diamante (8000-9000HV).<sup>(9)</sup>

Alta dureza não significa automaticamente baixo coeficiente de atrito. Em contraste com a dureza, o coeficiente de atrito não é propriedade intrínseca dos materiais. Os valores de coeficiente de atrito são governados pelas propriedades da vizinhança e condições de operação (temperatura, atmosfera, pressão, tipo de movimento, carga etc).<sup>(10)</sup>

### 2.4 Coeficiente de Atrito

Revestimentos depositados por PVD (*Physical Vapour Deposition*) tais como TiN, CrN e TiAlN geralmente causam uma redução no coeficiente de atrito entre ferramenta e peça de trabalho, mas o valor deste coeficiente, contra metais e a seco, está na ordem de 0,3 a 0,6, o que é considerado um valor alto em comparação com os revestimentos DLC.

Atualmente, os revestimentos utilizados para se conseguir baixos coeficientes de atrito são os que contêm carbono em excesso. Tipicamente são os materiais do grupo DLC (a-C:H, a-C:H:X, ta-C, ta-C:H e Me-C:H).<sup>(11)</sup>

De uma forma geral, o coeficiente de atrito dos revestimentos DLC varia de 0,007 até 0,4 em vácuo com pressões abaixo de  $10^{-4}$  Pa, enquanto que em ar atmosférico e em umidade relativa entre 20% e 60%, os coeficientes de atrito variam de 0,05 até 1,0. A variação considerada bastante alta para os valores de coeficiente de atrito se deve a variação de composição e estruturas que os revestimentos podem possuir,<sup>(12)</sup> fazendo com que as mais diversas reações químicas ocorram nas interfaces filme/contra-peça.<sup>(9)</sup>

O baixo coeficiente de atrito pode ser explicado por três mecanismos principais: formação de um filme de grafita, formação de cadeia de hidrocarbonetos ou transferência do filme DLC para a contra-peça.

Uma camada de grafita, formada na superfície do revestimento DLC, age como um lubrificante na região de contato entre a peça revestida e outra não revestida. O ambiente em que as partes estão inseridas, velocidade de deslocamento e a carga de contato aplicada influenciam no processo de grafitização, devido ao aumento de temperatura na região de contato, o que facilita o desprendimento de hidrogênio da estrutura do filme DLC.<sup>(9,13)</sup> Este mecanismo de lubrificação leva a uma grande diminuição da taxa de desgaste entre os materiais em contato.<sup>(10)</sup>

A natureza de baixo coeficiente de atrito de sólidos macios ou lamelares é largamente atribuída a sua tensão de cisalhamento. Quando interposto entre duas superfícies de deslizamento, este sólido cizalha com relativa facilidade, causando baixo coeficiente de atrito. Entretanto, com sua alta resistência mecânica e rigidez, os filmes DLC não podem ser deformados plasticamente ou cizalhar da mesma forma que sólidos macios e lamelares. Com isso, a deformação plástica ou cisalhamento não podem ser utilizados para explicar o caráter extraordinário de baixo coeficiente de atrito nos filmes DLC.<sup>(14)</sup>

Acredita-se que a baixa reatividade dos filmes DLC são, primeiramente, responsáveis pelo seu baixo coeficiente de atrito. Adicionado a isto, a formação de uma camada transferida rica em carbono nas superfícies que estão em deslizamento contra o filme DLC pode ser essencial para a redução do coeficiente de atrito e vidas longas em desgaste. Embora somente uma camada transferida de pequena espessura seja formada na superfície da contra-peça, ela pode ser transferida de volta para o outro lado e este processo continuar por um período longo antes que esta pequena camada possa ser completamente removida da interface de deslizamento.<sup>(9,10,14)</sup>

Em contra partida, a presença do hidrogênio no filme causa um baixo coeficiente de atrito, lubrificando o contato entre revestimento e contra-peça, pela formação de cadeias de hidrocarbonetos conforme observado por Fukui et al.<sup>(4)</sup> Ele identificou em uma trilha de desgaste de uma amostra revestida com um filme a-C:H com 35% atômico de hidrogênio a presença de  $C_3H_6$ ,  $C_4H_{10}$ ,  $C_6H_{12}$ ,  $C_8H_9$ . Também Gardos, citado por Donnet,<sup>(13)</sup> atribuiu o baixo coeficiente de atrito para camadas DLC bastante lisas e em ambientes inertes ao alto acabamento superficial e a presença de um filme ultra-fino de hidrocarbonetos do tipo polímeros na superfície, os quais possuem interações fracas das forças de Van der Waals entre as cadeias carbônicas hidrogenadas.



## 2.5 Estabilidade Química

Revestimentos DLC hidrogenados ou não são materiais metaestáveis e suas estruturas mudarão para estruturas mais grafíticas pela ativação térmica. Calor aplicado aos revestimentos DLC hidrogenados resulta em perda de hidrogênio e espécies  $\text{CH}_x$ , e o colapso da estrutura através do aumento da formação de ligações  $\text{sp}^2$ , a qual começa em temperaturas de  $400^\circ\text{C}$  e, eventualmente, até menores, dependendo das condições de deposição e da quantidade de elementos dopantes no filme. Isto causa mudanças em dimensões e propriedades do material e limitam o uso de revestimentos DLC em operações que possam atingir temperaturas acima de  $400^\circ\text{C}$ .<sup>(9,12)</sup>

Krumpiegl et al.<sup>(12)</sup> testaram três diferentes revestimentos DLC (a-C, a-C:H e Ti-C:H) contra aço AISI M2 em temperaturas acima de  $450^\circ\text{C}$  e sob vácuo ( $10^{-3}$  Pa) e observou alto coeficiente de atrito (0,6) e alto desgaste. Os autores observaram uma queda drástica da dureza do revestimento após aquecimento a  $450^\circ\text{C}$  em ar ambiente. Isto, provavelmente está relacionado com a alta oxidação do revestimento.

Os revestimentos DLC também podem ser mudados por radiação UV (ultra-violeta), esta radiação quebra as ligações C-C e C-H e causa oxidação do filme pela formação de ligações C-O. Há um desprendimento de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$  do filme, resultando em uma redução da espessura do filme.<sup>(9)</sup>

## 2.6 Rugosidade

Observa-se um aumento de rugosidade durante a deposição em substratos aquecidos, o que também é observado durante a exposição a temperaturas similares após o processo de deposição. Isto acontece devido ao aumento progressivo da formação das zonas de estrutura grafítica através de difusão. A formação destas zonas também pode ser promovida pela alta temperatura do substrato ou por aquecimentos aplicados após a deposição.<sup>(15)</sup>

Quando a energia do íon incidente excede o valor crítico do espaçamento atômico da estrutura cristalina, se torna claro que o íon vai penetrar no interior da estrutura. Sob estas circunstâncias, ocorre a implantação do íon na superfície, e a energia de impacto é menos eficiente em causar difusão na superfície. A morfologia da superfície se mantém relativamente inafetada pela penetração do íon, o que leva a uma estrutura densa. A energia crítica que o íon possui, acima da qual são produzidas superfícies mais lisas foi estimada em aproximadamente 50 eV para os processos de RF, *magnetron sputtering* e *íon beam*. Energias de bombardeamento podem também promover superfícies mais lisas pela remoção preferencial de asperezas pelo efeito de *sputtering*, embora isto seja dependente de relações entre ângulo de incidência da partícula ou energia do íon.<sup>(15)</sup>

Pesquisadores, de uma forma geral, relatam que energias altas de íons levam a quantidades maiores de ligações  $\text{sp}^3$ , altas densidades, altas tensões residuais e superfícies mais lisas.<sup>(15)</sup>

## 2.7 Limitações

Uma limitação que se pode citar para os filmes DLC é o fato de estes possuírem magnitude de tensões residuais compressivas que podem chegar a 7,0 GPa originadas a partir das ligações interatômicas  $\text{sp}^3$ . Dessa forma, somente

filmes extremamente finos estão bem aderidos em diferentes substratos, especialmente substratos de aço. Para superar esta limitação de pobre adesão e depositar filmes mais espessos, uma camada metálica intermediária (cromo ou molibdênio) pode ser depositada entre o substrato e o filme de DLC.<sup>(10)</sup> Também, para se causar uma redução nas tensões residuais é possível incorporar N, Si, O ou metais na composição dos filmes.<sup>(9)</sup>

Outra limitação é que existe uma temperatura acima da qual o revestimento DLC se grafitiza e se oxida drasticamente. Esta temperatura depende do método de deposição, parâmetros de deposição, estrutura e composição do revestimento.<sup>(16)</sup>

Existem também os efeitos causados por uma camada transferida, ela gera efeito lubrificante e sua formação pode ser melhorada pelo hidrogênio, mas pode ser restringida pela presença de água ou oxigênio. Água e oxigênio causam a oxidação do filme por reações que acabam formando ligações do tipo C=O, fazendo com que o coeficiente de atrito tenha valores de 0,1 a 0,2.

## 2.8 TÉCNICA DE DEPOSIÇÃO DE FILMES DLC

A deposição de filmes bastante lisos (em escala nanométrica) pode ser conseguida através de uma variedade de métodos, incluindo d.c. ou r.f., PACVD, *sputtering*, arco catódico e deposição por *ion beam*,<sup>(13,17)</sup> a partir de precursores sólidos e gasosos, em temperaturas de substratos abaixo de 350°C.

Elementos dopantes, tais como, silício, flúor, nitrogênio e vários metais podem ser incorporados a estrutura do filme.<sup>(11)</sup>

Por exemplo, um filme metal-carbono (Me-C:H) pode ser depositado utilizando-se a técnica de *sputtering* para evaporação do *target* de metal, em uma atmosfera contendo argônio e um gás hidrocarboneto.<sup>(8)</sup> Durante a deposição, a temperatura do substrato pode se manter relativamente baixa, entre 100°C e 200°C e aços podem ser revestidos sem perda de dureza.<sup>(8)</sup>

Filmes que contém dopantes metálicos (Me-C:H) possuem, em geral, menores tensões compressivas do que os filmes C:H. A resistência ao desgaste e o coeficiente de atrito dos revestimentos que possuem metais (< 20 at %) são similares aos revestimentos a-C:H.<sup>(18)</sup> Comumente, a estrutura de um filme Me-C:H pode ser caracterizada por uma matriz a-C:H amorfo com a presença de soluções sólidas. No caso de metais formadores de carbonetos (Ex.: titânio, cromo, tungstênio) cristais de carbonetos bem pequenos se revelam no filme. Um invólucro de material modificado a-C:H em torno dos cristais de carbonetos parece modificar as propriedades do filme.<sup>(18)</sup>

As condições de deposição de filmes DLC no processo PACVD (precursor, energia elétrica, tensão aplicada ao substrato, pressão dos gases e temperatura do substrato) abrangem uma larga faixa de parâmetros, os quais vão influenciar diretamente nas propriedades do revestimento.<sup>(13)</sup>

Revestimentos DLC podem ser preparados por técnicas de PVD ou CVD através de uma variedade de fontes de carbono, sejam elas sólidas ou gasosas. O tipo de revestimento DLC é determinado pelo processo de deposição. Os processos industriais mais comuns para a deposição de DLC são por *sputtering*, os quais foram relatados pela primeira vez em 1985. Foram produzidos filmes de carbono amorfo (a-C) por *planar magnetron sputtering* com um alvo de grafite em uma atmosfera contendo argônio puro e a uma temperatura de cerca de 300 K.<sup>(18)</sup>

Mais tarde outros grupos de pesquisa tentaram preparar filmes amorfos de carbono hidrogenado contendo uma pequena quantidade de metal pelo processo de

*unbalanced magnetron ion plating* com um alvo de metal em uma atmosfera contendo gás acetileno. A introdução de metal no processo de deposição foi reconhecida como uma melhoria por aumentar a adesão do revestimento ao substrato e reduzir as tensões residuais.<sup>(19)</sup>

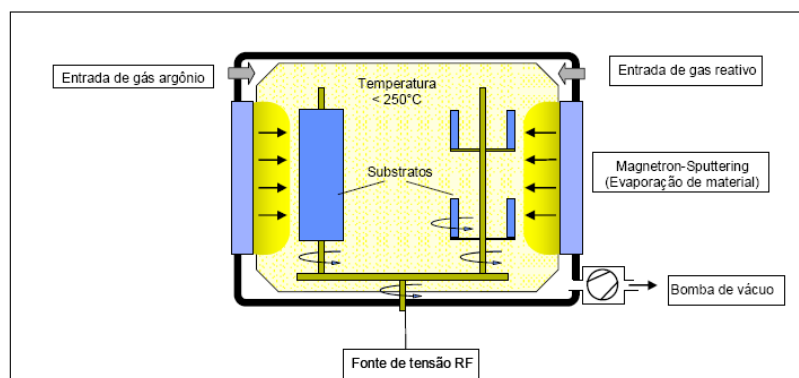
## 2.9 processos PACVD

Deposição Química de Vapores ou *Chemical Vapour Deposition* (CVD) envolve reações químicas de reagentes na forma gasosa que ocorre na vizinhança ou sobre superfícies de substratos aquecidos. Este método de deposição é atomizado e pode gerar revestimento de alta pureza com um bom controle de estrutura em níveis atômicos ou nanométricos. Também são podem ser produzidas camadas únicas ou multicamadas, dimensionalmente bem controladas e em baixas temperaturas.<sup>(2)</sup>

No método PACVD, representado pelo desenho esquemático da Figura 2, o substrato está sob uma tensão negativa (bias) em relação ao plasma para que seja possível um bombardeamento iônico e, dessa forma, o crescimento de um filme. A deposição é realizada em um ambiente contendo hidrogênio para se obter revestimentos DLC com quantidades de hidrogênio de 10% a 50% atômico. O hidrogênio determina a estrutura do filme, dessa forma controla as propriedades elétricas, ópticas e a tensão residual do filme.<sup>(9)</sup>

É sabido que usando-se uma descarga incandescente (plasma) a baixa pressão é possível promover reações químicas que, por outros métodos, são difíceis ou até mesmo impossíveis de ocorrerem. Um fator chave nas reações químicas assistidas por plasma é o fato de que elas ocorrem em temperaturas consideradas baixas quando comparadas as reações químicas que tem a temperatura como forma principal para que sua realização seja possível.<sup>(2)</sup>

Existem diversos reatores para se realizar o processo de revestimento pela técnica PACVD e os principais constituintes para este sistema são: (i) uma fonte de gás e uma forma de se fazer sua distribuição controlada em uma câmara. (ii) uma fonte de potência para que a energia elétrica possa ser introduzida na mistura gasosa. (iii) um sistema de bombeamento e exaustão para que os produtos formados durante as reações químicas possam ser descartados de forma segura.



**Figura 2.** Desenho esquemático de uma câmara que é utilizada para deposição de filmes DLC (Cortesia Oerlikon Balzers).





## 2.10 Aplicações de Filmes DLC

Ao contrário de muitos revestimentos, os quais foram primeiramente utilizados em ferramentas de corte devido a sua alta dureza, revestimentos DLC geram baixos coeficientes de atrito contra vários tipos de contra-peças e dão boa resistência ao desgaste tanto para a parte revestida quanto para a contra-peça não revestida. Esta propriedade única faz com que os revestimento DLC sejam apropriados em aplicações tribológicas sejam elas para componentes mecânicos ou para ferramentas.

### 2.10.1 Revestimentos DLC para usinagem de ligas de alumínio

A maioria dos contatos entre superfícies gera calor por atrito. Em operações de usinagem, a maior parte do calor é liberado devido à extensiva deformação plástica durante a remoção de material (por exemplo: formação do cavaco). Entretanto, o aumento de temperatura na superfície da ferramenta é significativo no processo de usinagem. O revestimento aplicado a ferramenta deve ser capaz de manter suas propriedades em elevadas temperaturas.<sup>(16)</sup>

Quando a superfície da ferramenta de corte é revestida com DLC, o qual possui baixo coeficiente de atrito e propriedade antiaderente, a adesão de material das ligas de alumínio usinadas na aresta de corte da ferramenta pode ser eliminada. A redução da formação da aresta postiça leva a uma manutenção do fio de corte, e dessa forma melhora as condições de usinagem e a qualidade do acabamento da peça usinada. Cavacos são rompidos favoravelmente, prevenindo que a peça de trabalho seja riscada pelos cavacos e evitando a deterioração da superfície usinada pela re-adesão de material da peça de trabalho, conseqüentemente a vida da ferramenta pode ser aumentada significativamente.<sup>(4,5)</sup>

Pode-se observar que ferramentas revestidas com WC/C,  $\alpha$ -C:H e revestimentos a base de diamante mostraram não formação de aresta postiça na face de corte. Estes são classificados como revestimentos apropriados. Revestimentos não apropriados para usinagem de ligas de alumínio, tais como CrN, MoS<sub>2</sub>, TiN, (Ti,Al)N e metal duro não revestido formam grandes arestas postiças na face de corte. Estes elementos de transição (Cr, Mo e Ti) provavelmente afetam o comportamento químico e resultam em reações de difusão com os materiais da peça de trabalho (Al, Zn, Mg e Cu). Isto leva a formação da aresta postiça, a qual é composta destes elementos e oxigênio proveniente do ambiente. Revestimentos parcialmente cristalinos (WC/C e  $\alpha$ -C:H) exibem, ao contrário dos que contém metais, por exemplo o tungstênio, uma baixa tendência a formar camada postiça. Acredita-se que as regiões amorfas dos revestimentos causam influência positiva.<sup>(20)</sup>

Atualmente, a maioria dos processos de usinagem são realizados utilizando-se fluidos refrigerantes com o objetivo de reduzir atrito entre ferramenta e peça de trabalho, diminuindo as temperaturas locais, a oxidação e taxa de desgaste de brocas e insertos. Entretanto, subseqüentes passos de desengraxe e limpeza superficial de peças usinadas também geram custos e consumo de tempo, e também reciclagem e tratamento de resíduos gerados.<sup>(10)</sup>

Por outro lado, os fluidos refrigerantes também são prejudiciais ao ambiente, por isso o interesse crescente em desenvolver novas ferramentas de corte que poderiam tornar obsoleto o uso de refrigerantes. A combinação de baixo coeficiente de atrito e alta resistência ao desgaste dos revestimentos a base de carbono, fazem



deles reais candidatos para aplicações de fresamento a seco por exemplo. Entretanto, a baixa estabilidade térmica de alguns revestimentos a base de carbono podem ser o maior obstáculo para este tipo de aplicação.<sup>(5)</sup>

### **2.10.2 Revestimentos DLC em brocas odontológicas**

Implantes dentários tem se tornado o maior tratamento para recolocação de dentes faltantes. Os implantes são colocados em furos pequenos que são feitos no osso com o auxílio de brocas dentárias. Com o principal objetivo de evitar a geração de calor através da redução de coeficiente de atrito na interface superfície da ferramenta/osso é que os revestimentos DLC são depositados. Este calor deve ser evitado, pois se for excessivo causa danos irreversíveis as células ósseas.

Pelo fato das brocas odontológicas serem confeccionadas em aço inoxidável, é necessário que a temperatura de processo de revestimento não ultrapasse 250°C, evitando assim o fenômeno de sensibilização do substrato e conseqüentemente o aparecimento de oxidação. Revestimentos da família DLC podem ser aplicados abaixo desta temperatura, ao contrário da maioria dos revestimentos a base de nitretos.

As ferramentas não têm sua rugosidade alterada, após serem revestidas, esta também é uma vantagem competitiva dos revestimentos DLC, pois o aspecto visual brilhante da ferramenta polida é mantido, causando uma impressão visual favorável de que a ferramenta está limpa.

### **2.10.3 Revestimentos DLC em componentes automotivos**

Componentes automotivos, sejam eles de motores ou de sistemas de injeção de combustível estão sujeitos aos efeitos de degradação causados pelo desgaste. Os principais componentes que atualmente são revestidos em motores são: pinos de pistão, anéis de pistão e balancins. Em sistemas de injeção de diesel é possível revestir agulhas de bicos injetores, eixos, pistões e válvulas.

Dentro de motores, pinos de pistão não revestidos têm sua superfície em contato direto com buchas montadas nos cilindros. Quando o pino é revestido com DLC é possível eliminar a utilização das buchas deixando que a superfície do pino revestido fique deslizando diretamente sobre o pistão. O conjunto de camadas que é depositado sobre um pino de pistão normalmente é composta de uma camada de adesão (cromo puro), primeiramente depositada, em seguida é sobreposta uma camada de transição com elementos como cromo e carbono formando nitretos o carbonitretos, e por fim, a camada de DLC. A camada intermediária tem a função de tanto atuar como suporte da camada DLC, que é dura e frágil, como também servir de “camada de emergência” em uma eventual falha do filme DLC, seja esta falha por desgaste prematuro ou por adesão pobre.

Na maioria dos casos não são realizados pós-tratamentos para componentes automotivos revestidos com DLC, pois a rugosidade não é alterada significativamente, mesmo assim algumas empresas fazem um processo de escovamento, o qual remove pequenos defeitos localizados.

Aços utilizados para fabricação destes componentes são basicamente aços mais baratos e que são revenidos a baixas temperaturas, cementados ou não, para durezas próximas a 60 HRC. Os processos DLC são realizados em temperaturas em que se pode manter a dureza do substrato, cerca de 200°C por *sputtering*, isto é considerado uma das grandes vantagens deste tipo de processo comparado com os processos via arco catódico.



### 3 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma revisão sobre os revestimentos DLC, suas técnicas de deposição mais comuns, suas propriedades e aplicações práticas na indústria brasileira. Pode-se dizer que empresas prestadoras de serviços de aplicação de revestimentos estão introduzindo cada vez mais este tipo de revestimento no mercado. Os benefícios são evidentes, e sugere-se que, eventualmente, pode-se utilizar o DLC como uma melhor alternativa de custo benefício em relação ao PCD.

O crescimento do mercado de implantes odontológicos faz com que empresas fabricantes de ferramentas busquem diferenciais em relação a seus concorrentes, desta forma a utilização de revestimentos a base de carbono é uma das novidades deste ramo. As melhorias obtidas no processo de furação com o DLC são marcantes, tais como redução do desgaste excessivo e menor geração de calor.

Em componentes automotivos, a busca é constante não só pelo aumento de vida, como também por um incremento de confiabilidade. Em motores de alto valor agregado, como os motores diesel para aplicações em caminhões *Heavy Duty*, introduz-se componentes revestidos que otimizam propriedades de coeficiente de atrito e resistência ao desgaste.

A principal tendência observada nos estudos relacionados aos revestimentos DLC é sua utilização para se chegar a coeficientes de atrito menores possíveis, trazendo como vantagem a redução de emissões gasosas por melhora de eficiência do componente automotivo e também menor geração de resíduos de lubrificantes.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) pelo suporte e ao financiamento de bolsas de pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- 1 DERFLINGER, V. New hard/lubricant coatings for dry machining. *Surface and Coatings Technology* 113, p. 286-292, 1999.
- 2 CHOY, K. L. Chemical vapour deposition coatings. *Progress in Materials /science* 48, p.57-170, 2003.
- 3 MOUSINHO, A. P. et al. Micro-machine fabrication using diamond-like carbon films. *Diamond and related Materials* 12, p. 1041-1044, 2003.
- 4 FUKUI, H. et al. Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys. *Surface and Coatings Technology* 187, p. 70-76, 2004.
- 5 VANDERVELDE, T. C. S. et al. Cutting applications of DLC, hard carbon and diamond films. *Surface and Coatings Technology* 113, p. 80-85, 1999.
- 6 WEI, Q. et al. Superhard diamond like carbon: preparation, theory and properties. *International Materials Reviews*. Vol. 45, n. 4, 2000.
- 7 VDI 2840 Carbon Films – Basic Knowledge, film types and properties, 2005.
- 8 MEERKAMM, H. et al. Mechanical and Tribological properties of PVD and PACVD wear resistant coatings. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 17, p. 201 – 208, 1999.
- 9 GRILL, A. Diamond like carbon: state of the art. *Diamond and Related Materials* 8, p. 428-434, 1999.
- 10 PAULETA, Y. et al. Deposition and characterization of nanostructures metal / carbon composit films. *Surface and Coatings Technology* 181, p. 313-322, 2004.



- 11 ENKE, K. Dry machining and increase of endurance of machine parts with improved DLC doped coatings on steel, ceramics and aluminium. *Surface and Coatings Technology*, p. 488-491, 1999.
- 12 KRUMPIEGL, T. et al. Amorphous carbon coatings and their tribological behavior at high temperatures and in high vacuum. *Surface and Coating Technology* 120-121, p. 116-121, 1997.
- 13 DONNET, C. et al. Friction control of diamond-like carbon coatings. *Surface and Coatings Technology* 94-95, p. 456-462, 1997.
- 14 ERDEMIR, A. et al. Characterization of transfer layers forming on surfaces sliding against diamond-like carbon. *Surface and Coatings Technology* 86-87, p. 697-692, 1996.
- 15 PENG, X.L. et al. Surface roughness of diamond-like carbon films prepared using various techniques. *Surface and Coatings Technology* 138, p. 23-32.
- 16 KONKA, E. et al. Elevated temperature tribological behavior of non-hydrogenated diamond-like carbon coatings against 319 aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology* 200, p. 3996-4005, 2006.
- 17 VERCAMMEN, K. et al. Study of RF PACVD diamond-like carbon coatings for space mechanism applications. *Surface and Coatings Technology* 120-121, p. 612-617, 1999.
- 18 PANJAN, P. et al. Carbon-containing Ti-C:H and Cr-C:H PVD hard coatings. *Vacuum* 71 p. 261-265, 2003.
- 19 DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 3<sup>a</sup> ed. Artliber Editora Ltda, São Paulo, Brasil, 2001.
- 20 LAHRES, M. et al. Applicability of different hard coatings in dry milling aluminum alloys. *Surface and Coatings Technology* 91, p. 116-121, 1997.