


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

YAGO DOS SANTOS CAMPOS

**FILME DE DIAMANTE CVD A PARTIR DE GÁS METANO EM SUBSTRATO DE
SILÍCIO TIPO P:**
Caracterização e aplicações na indústria

Guaratinguetá
2025



YAGO DOS SANTOS CAMPOS

**FILME DE DIAMANTE CVD A PARTIR DE GÁS METANO EM SUBSTRATO DE
SILÍCIO TIPO P:**

Caracterização e aplicações na indústria

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentada à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia e Ciências,
Guaratinguetá, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Teofilo Miguel de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Evaldo Chagas Gouvêa

Guaratinguetá

2025

C198f	<p>Campos, Yago dos Santos</p> <p>Filme de diamante CVD a partir de gás metano em substrato de silício tipo P: caracterização e aplicações na indústria / Yago dos Santos Campos - Guaratinguetá, 2025. 67 f : il. Bibliografia: f. 65-66</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Teofilo Miguel de Souza Coorientador: Prof. Dr. Evaldo Chagas Gouvêa</p> <p>1. Filmes finos de diamantes. 2. Indústria petrolífera. 3. Hidrocarbonetos. I. Título.</p> <p>CDU 539.23</p>
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

YAGO DOS SANTOS CAMPOS

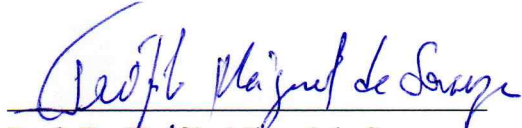
**FILME DE DIAMANTE CVD A PARTIR DE GÁS METANO EM SUBSTRATO DE
SILÍCIO TIPO P:**

Caracterização e aplicações na indústria

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Data de defesa: 14/11/2025

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências – Campus de Guaratinguetá



Prof. Dr. Carlos Augusto Marcondes dos Santos

UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências – Campus de Guaratinguetá



Prof. Dr. Jomar Esteves Bueno

UNESP – Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá – Campus de Guaratinguetá

Dedico este trabalho à minha família, pelo incentivo e apoio incondicional, que foram meu alicerce.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, *Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza*, pelo constante suporte e orientação, e ao meu coorientador, *Prof. Dr. Evaldo Chagas Gouvêa*, pela dedicação e auxílio fundamental na parte experimental. A contribuição técnica e científica de ambos foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho;

pelo apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2025/18746-6;

ao *Prof. Dr. Luís Rogério de Oliveira Hein*, responsável pelo Laboratório de Microscopia e Microanálise do LAIMat da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, pela valiosa colaboração na realização desta pesquisa;

aos meus familiares e amigos, pela presença constante e incentivo em todos os momentos da minha trajetória acadêmica.

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2025/18746-6.

RESUMO

No presente trabalho, é analisado o potencial de aplicação industrial de filmes finos de diamante sintetizados por deposição química a partir da fase vapor (CVD) em substratos de silício tipo p, com ênfase em soluções para a indústria petrolífera. A pesquisa buscou compreender como as propriedades físico-químicas e estruturais desses filmes podem contribuir para o aumento da durabilidade, eficiência e sustentabilidade de equipamentos industriais. As análises morfológicas e composicionais, realizadas por microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS), revelaram filmes com superfícies homogêneas, de estrutura policristalina, com grãos bem definidos e pureza superior a 98% em carbono. Tais características conferem aos filmes de diamante alta dureza, estabilidade térmica e resistência à corrosão e ao desgaste, tornando-os adequados para revestimentos de válvulas, selos mecânicos e componentes expostos a ambientes severos de abrasão e erosão típicos da exploração e refino de petróleo. Além do desempenho técnico, destaca-se o aproveitamento sustentável do gás metano, subproduto da extração de petróleo, como matéria-prima para a produção de materiais de alto valor agregado. Os resultados confirmam o potencial dos filmes de diamante CVD como alternativa tecnológica promissora para aumentar a eficiência, reduzir custos de manutenção e mitigar impactos ambientais na indústria de petróleo e gás.

Palavras-chave: filme de diamante CVD; gás metano; silício tipo p; caracterização; indústria petrolífera.

ABSTRACT

In the present work, the potential for industrial application of diamond thin films synthesized by chemical vapor deposition (CVD) on p-type silicon substrates is analyzed, with emphasis on solutions for the oil industry. The research aimed to understand how the physicochemical and structural properties of these films can contribute to increasing the durability, efficiency, and sustainability of industrial equipment. Morphological and compositional analyses, performed using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), revealed films with homogeneous surfaces, polycrystalline structure, well-defined grains, and carbon purity greater than 98%. These characteristics provide the diamond films with high hardness, thermal stability, and resistance to corrosion and wear, making them suitable for coating valves, mechanical seals, and components exposed to the severe abrasion and erosion environments typical of oil exploration and refining. Beyond technical performance, the sustainable use of methane gas, a byproduct of oil extraction, as a raw material for the production of high-value-added materials stands out. The results confirm the potential of CVD diamond films as a promising technological alternative for increasing efficiency, reducing maintenance costs, and mitigating environmental impacts in the oil and gas industry.

Keywords: CVD diamond film; methane gas; p-type silicon; characterization; oil industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Constituição do petróleo	25
Figura 2	Esquema básico de uma unidade de destilação atmosférica e a vácuo	26
Figura 3	Esquema de refino básico (Tipo 1) para a produção de combustíveis.	27
Figura 4	Estrutura tetraédrica da molécula de metano.	28
Figura 5	Diagrama de bandas de energia.	31
Figura 6	Estrutura atômica de: (a) silício, (b) germânio, (c) gálio e arsênio	32
Figura 7	Estrutura diamante do silício: (a) vizinhança tetraédrica e (b) célula unitária.	32
Figura 8	Ligações covalentes no silício	33
Figura 9	Rede de silício intrínseca	34
Figura 10	Silício dopado com fósforo	34
Figura 11	Impureza aceitadora (boro) em rede de silício	35
Figura 12	Movimento de lacunas em material tipo p (sequência)	36
Figura 13	Estrutura cristalina do diamante: (a) rede tridimensional das ligações tetraédricas entre átomos de carbono, (b) célula unitária cúbica	37
Figura 14	Diagrama de fases do carbono	38
Figura 15	Esquema simplificado da decomposição térmica no método HFCVD	40
Figura 16	Três direções cristalográficas e seus respectivos planos: (a) plano (100) e direção [100], (b) plano (110) e direção [110], (c) plano (111) e direção [111]	41
Figura 17	Amostras de filmes de diamante obtidos por HFCVD: (a) fragmentos sem defeitos visíveis, (b) porção com dano térmico	49
Figura 18	Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício intrínseco (ampliação: 1000×, técnica: campo claro)	52
Figura 19	Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício tipo p (ampliação: 1000×, técnica: campo claro)	53
Figura 20	Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício intrínseco (ampliação: 1600×, técnica: polarização linear)	54
Figura 21	Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício tipo p (ampliação: 1600×, técnica: polarização linear)	54
Figura 22	Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício intrínseco (ampliação: 1600×, técnica: DIC)	55
Figura 23	Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício tipo p (ampliação: 1600×, técnica: DIC)	56
Figura 24	MEV do filme de diamante CVD depositado sobre substrato de silício intrínseco (ampliação: 5000×).	57

Figura 25	MEV do filme de diamante CVD depositado sobre substrato de silício intrínseco (ampliação: 20.000×).	57
Figura 26	MEV do filme de diamante CVD depositado sobre substrato de silício tipo p (ampliação: 5000×).	58
Figura 27	MEV do filme de diamante CVD depositado sobre substrato de silício tipo p (ampliação: 20.000×).	58
Figura 28	Espectro EDS do filme de diamante CVD sobre substrato de silício intrínseco	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição elementar média do petróleo	24
Tabela 2 – Aplicações comerciais das frações de destilação do petróleo.	28
Tabela 3 – Propriedades básicas do diamante em comparação com Si, 4H-SiC, GaN e Ga ₂ O ₃	42
Tabela 4 – Resultados da análise EDS para o filme de diamante CVD sobre substrato de silício intrínseco	59
Tabela 5 – Propriedades observadas dos filmes de diamante CVD neste trabalho e aplicações discutidas	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AES	Espectroscopia Eletrônica Auger (<i>Auger Electron Spectroscopy</i>)
AFM	Microscopia de Força Atômica (<i>Atomic Force Microscopy</i>)
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BDD	Eletrodo de Diamante Dopado com Boro (<i>Boron-Doped Diamond</i>)
BSE	Elétrons Retroespalhados (<i>Backscattered Electrons</i>)
CVD	Deposição Química em Fase Vapor (<i>Chemical Vapor Deposition</i>)
DIC	Microscopia de Contraste Interferencial Diferencial (<i>Differential Interference Contrast Microscopy</i>)
DRX	Difração de Raios X (<i>X-ray Diffraction</i>)
EDS	Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (<i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i>)
EU DEMO	Usina Europeia de Demonstração de Fusão Nuclear (<i>European DEMONstration Power Plant</i>)
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FCC	Craqueamento Catalítico Fluido (<i>Fluid Catalytic Cracking</i>)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HFCVD	Deposição Química em Fase Vapor por Filamento Quente (<i>Hot Filament Chemical Vapor Deposition</i>)
HPHT	Alta Pressão e Alta Temperatura (<i>High Pressure High Temperature</i>)
MCVD	Deposição Química em Fase Vapor por Micro-ondas (<i>Microwave Chemical Vapor Deposition</i>)
MEMS	Micro-sistemas Eletromecânicos (<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
MPCVD	Deposição Química em Fase Vapor por Plasma de Micro-ondas (<i>Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition</i>)

PECVD	Deposição Química em Fase Vapor Assistida por Plasma (<i>Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition</i>)
PRH-ANP	Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP
QAV	Querosene de Aviação
QI	Querosene Iluminante
RAT	Resíduo Atmosférico
SCD	Detector Padrão de Elétrons Secundários (<i>Standard/Everhart-Thornley Secondary Electron Detector</i>)
SE	Elétrons Secundários (<i>Secondary Electrons</i>)
SEM	Microscopia Eletrônica de Varredura (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
SIMS	Espectrometria de Massa de Íons Secundários (<i>Secondary Ion Mass Spectrometry</i>)
SOI	Silício sobre Isolante (<i>Silicon-On-Insulator</i>)
TEM	Microscopia Eletrônica de Transmissão (<i>Transmission Electron Microscopy</i>)
UNESP	Universidade Estadual Paulista
WC	Carboneto de Tungstênio (<i>Tungsten Carbide</i>)
WC-Co	Carboneto de Tungstênio Cementado com Cobalto (<i>Tungsten Carbide-Cobalt</i>)
XPS	Espectroscopia de Fotoelétrons por Raios X (<i>X-ray Photoelectron Spectroscopy</i>)
XRD	Difração de Raios X (<i>X-ray Diffraction</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

CH ₄	Gás metano
H ₂	Gás hidrogênio
CH ₃ •	Radical metila
H•	Hidrogênio atômico (radical)
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
°C	Graus Celsius
GaN	Nitreto de gálio
mm	Milímetro
MW	Megawatt
Si	Silício
Fe	Ferro
Ni	Níquel
V	Vanádio
C _n H _{2n+2}	Fórmula geral dos alcanos
C _n H _{2n}	Fórmula geral dos cicloalcanos
H ₂ O	Água
ppb	Partes por bilhão
E _g	Gap de energia (banda proibida)
4H-SiC	Carbeto de silício (polimorfo 4H)
Ga ₂ O ₃	Óxido de gálio
eV	Elétron-volt
Cu	Cobre
Ge	Germânio

GaAs	Arseneto de gálio
P	Fósforo
As	Arsênio
Sb	Antimônio
B	Boro
Ga	Gálio
In	Índio
sp ³	Hibridização tetraédrica do carbono
Å	Ångström
atm	Atmosfera
GPa	Gigapascal
K	Kelvin
Torr	Unidade de pressão
μm h ⁻¹	Micrômetro por hora
CH ₂ •	Radical metileno
CH•	Radical metilidino
C•	Radical carbono
C _d	Radical superficial durante CVD
(hkl)	Plano cristalográfico (índices de Miller)
[hkl]	Direção cristalográfica (índices de Miller)
cm ² /Vs	Centímetro quadrado por volt segundo
W/cmK	Watt por centímetro kelvin
cm/s	Centímetro por segundo
kg/mm ²	Quilograma por milímetro quadrado
Ω cm	Ohm centímetro
V	Volt

nm	Nanômetro
µm	Micrômetro
cm ⁻¹	Número de onda
kV	Quilovolt
sp ²	Hibridização trigonal plana do carbono
sccm	Centímetro cúbico padrão por minuto (fluxo de gás)
v/v	Volume por volume
Si ⁺	Silício ionizado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	20
1.3	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1	PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS	24
3.2	CARACTERÍSTICAS DO GÁS METANO	28
3.3	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS SEMICONDUTORES	31
3.3.1	Ligações covalentes no silício	33
3.3.2	Semicondutor intrínseco	33
3.3.3	Dopagem e semicondutores extrínsecos	34
3.3.3.1	Semicondutores do tipo n	34
3.3.3.2	Semicondutores do tipo p	35
3.3.4	Mecanismo de condução no material tipo p	35
3.3.5	Crescimento e fabricação de <i>wafers</i> de silício	36
3.4	SÍNTESE DE FILMES DE DIAMANTE POR CVD	37
3.4.1	Estrutura cristalina do diamante	37
3.4.2	Método HFCVD: princípios e operação	38
3.4.3	Reações de superfície e formação do filme no substrato	39
3.4.4	Substrato de silício e sua preparação superficial	40
3.5	PROPRIEDADES DOS FILMES DE DIAMANTE	42
3.5.1	Propriedades mecânicas e elásticas	42
3.5.2	Propriedades elétricas	43
3.5.3	Propriedades ópticas	43
3.6	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DO FILME DE DIAMANTE	44
3.6.1	Microscopia Óptica de Reflexão	44
3.6.1.1	Microscopia de Campo Claro	44
3.6.1.2	Microscopia de Polarização	44
3.6.1.3	Microscopia de Contraste Interferencial Diferencial	45
3.6.2	Microscopia Eletrônica de Varredura	45
3.6.3	Espectrometria por Dispersão de Energia	45
3.6.4	Espectroscopia Raman	46
3.6.5	Difração de Raios X	46

3.6.6	Técnicas Complementares de Caracterização	47
4	MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1	PREPARAÇÃO DOS FILMES DE DIAMANTE CVD	48
4.2	MICROSCOPIA ÓPTICA DE REFLEXÃO	50
4.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	50
4.4	ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA	51
4.5	PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1	CARACTERÍSTICAS DOS FILMES DE DIAMANTE EM SUBSTRATO TIPO P	52
5.1.1	Microscopia óptica	52
5.1.2	Microscopia eletrônica de varredura	56
5.1.3	Resultados da EDS	59
5.2	APLICAÇÕES DOS FILMES DE DIAMANTE CVD EM SUBSTRATO TIPO P	60
5.2.1	Relação entre propriedades caracterizadas e aplicações	60
5.2.2	Influência do substrato tipo p na morfologia do filme	61
5.2.3	Potenciais aplicações dos filmes obtidos	61
5.2.3.1	Revestimentos tribológicos e de proteção	61
5.2.3.2	Gestão térmica e integração em silício	62
5.2.3.3	Elementos e sensores ópticos	62
5.2.4	Aspectos ambientais e valor agregado do metano	62
5.2.5	Limitações experimentais e considerações sobre aplicabilidade	63
6	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES DERIVADAS DO TRABALHO	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O diamante apresenta diversas propriedades notáveis para cientistas e engenheiros. Pode-se citar, entre essas propriedades, o fato de ser o material mais duro conhecido pela humanidade, sua inércia química, sua alta condutividade térmica em temperatura ambiente, sua baixa compressibilidade e sua alta rigidez. Diamantes dopados com elementos químicos exibem propriedades semicondutoras que podem ser úteis para a fabricação de dispositivos microeletrônicos para aplicações de alta frequência e alta potência (Nor *et al.*, 2010).

Existem dois principais métodos básicos para realizar a síntese de diamante, chamados de deposição química a partir da fase de vapor (do inglês *chemical vapor deposition*, sigla CVD) e crescimento em alta pressão e alta temperatura (do inglês *high pressure/high temperature*, sigla HPHT). A primeira produção de diamante artificial relatada, realizada pelo ser humano por qualquer método, especificamente pelo método CVD, é atribuída a William Eversole, da Union Carbide, em 1952. O processo HPHT foi desenvolvido pela General Electric a partir de 1955. Com o avanço nos processos de crescimento de diamante artificial ao longo das décadas, tornou-se possível a produção de filmes nanocristalinos de diamante sobrepostos a diversos tipos de substratos (Barros *et al.*, 2005).

A síntese de diamantes artificiais a baixas pressões pode ser realizada por diversos métodos CVD. Esses métodos possuem elementos fundamentais comuns, que são a matéria-prima gasosa, uma fonte de fornecimento de energia, que pode ser térmica, elétrica, de combustão ou óptica, e um substrato no qual ocorrerá a deposição dos componentes do gás dissociados pela energia fornecida à matéria-prima gasosa (Asmussen; Reinhard, 2002).

O gás utilizado como matéria-prima deve conter pelo menos uma fonte de compostos de carbono. O hidrocarboneto metano (CH_4) diluído em hidrogênio (H_2) é o mais comumente utilizado, porém existem diversas outras possíveis fontes de carbono. No caso do gás metano, a energia fornecida ao sistema decompõe o composto orgânico em vários derivados, como a metila (CH_3^\bullet), enquanto o gás hidrogênio é decomposto em hidrogênio atômico (H^\bullet) (Asmussen; Reinhard, 2002).

O radical metila e o hidrogênio atômico se depositam no substrato, iniciando o processo de crescimento dos cristais que constituem o filme de diamante. Esses cristais crescem a partir de uma camada intermediária de carбето, resultante da reação entre o substrato e o radical metila, ou de grãos de diamante previamente depositados pelo método da sementeira (Barros *et al.*, 2005).

O método utilizado para a síntese dos filmes de diamante CVD neste trabalho é o método de filamento quente. Nesse método, os gases são inseridos no interior de um reator que contém um filamento de tungstênio e um substrato posicionado abaixo dele. O filamento deve ser

aquecido a uma temperatura suficientemente alta para dissociar os gases presentes na mistura gasosa.

As amostras de filmes finos de diamante utilizadas neste trabalho foram obtidas a partir de pequenas frações de *wafers* (finas fatias de material semicondutor) de silício tipo p, dopado com boro, a fim de produzir filmes de diamante com propriedades correspondentes ou similares às do substrato. O gás metano empregado na produção dos filmes pode ser proveniente do refino e da extração de petróleo, uma vez que o gás natural presente em reservatórios geológicos é essencialmente composto por hidrocarbonetos, como o metano, em proporções superiores a 70% (ANP, 2020). No Brasil, a produção de gás natural é destinada a diversos setores, como geração de energia e indústrias. Dessa forma, o uso de metano proveniente do gás natural na síntese de filmes de diamante mostra-se economicamente viável.

A indústria de petróleo e gás possui diversos componentes que devem operar em ambientes severos, o que provoca a redução da vida útil deles. Isso ocorre porque esses ambientes propiciam a degradação dos componentes por meio de abrasão, erosão, corrosão ou uma combinação desses fatores. Poços de petróleo e gás contêm elementos corrosivos, como água salgada, dióxido de carbono (CO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S). Durante a perfuração de poços, acontece a abrasão das brocas utilizadas; no transporte de hidrocarbonetos, pode ocorrer erosão por partículas de areia presentes no fluido e corrosão pelos elementos corrosivos em válvulas e tubulações (Wheeler, 2018).

Para evitar altos custos de manutenção e substituição dos componentes e, conseqüentemente, a perda de produção, surge a necessidade de buscar materiais com propriedades adequadas para prolongar a vida útil dos equipamentos utilizados na indústria petrolífera. O diamante apresenta as propriedades necessárias para essa indústria e, assim como ele, os filmes finos de diamante CVD possuem grande potencial em componentes presentes nas etapas de exploração e refino do petróleo (Wheeler, 2018).

Além do desempenho técnico, o desenvolvimento de filmes de diamante CVD reforça a tendência de integração entre inovação tecnológica e sustentabilidade. A conversão de um subproduto de baixo valor econômico, o metano, em materiais avançados de aplicação industrial representa uma oportunidade estratégica de aliar eficiência produtiva, responsabilidade ambiental e avanço científico.

Existe um potencial promissor na aplicabilidade dos filmes finos de diamante em diversos tipos de componentes mecânicos e eletrônicos. No entanto, sua utilização em microeletrônicos ainda enfrenta problemas relacionados à dificuldade de fabricação barata e eficiente de cristais em tamanho de *wafers*. Apesar desses desafios, as aplicações no campo eletroquímico são bem promissoras, destacando-se também o uso de eletrodos de filme de diamante para operações em ambientes químicos agressivos (Nor *et al.*, 2010).

O gás natural na produção de óleo e gás é comumente descartado através de uma prática conhecida como *flaring*. Isso é devido à falta de infraestrutura para transporte do gás, preocupações com segurança e a inviabilidade econômica em sua comercialização. O objetivo

desse processo é a queima do gás metano e outros hidrocarbonetos presentes no gás natural, convertendo-os em dióxido de carbono (CO_2) e água. Esse procedimento almeja mitigar os efeitos poluentes dos gases liberados durante a extração e refino de petróleo (Plant *et al.*, 2022).

A utilização do gás metano, proveniente do refino e extração de petróleo, na produção de filmes de diamante pelo método CVD representa uma oportunidade de capitalizar esse insumo abundante na produção de bens com alto valor agregado. Consequentemente, isso também contribui para a redução das emissões de gás natural na atmosfera. Além disso, as propriedades dos filmes de diamante apresentam grande potencial de aplicabilidade em diversos tipos de componentes mecânicos e eletrônicos, o que pode possibilitar novas inovações tecnológicas em vários setores da engenharia. Essa perspectiva não apenas busca otimizar o uso do gás metano, mas também visa sua utilização de maneira sustentável e contribuir para o avanço na produção de componentes com rendimento e eficiência superiores.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a caracterização de filmes finos de diamante CVD (do inglês *chemical vapor deposition*), crescidos em substrato de silício tipo p, utilizando gás metano, proveniente do gás natural, e hidrogênio. A caracterização tem como finalidade identificar as propriedades físico-químicas dos filmes de diamante.

Os objetivos específicos deste trabalho são determinar quais propriedades dos filmes de diamante são particularmente úteis para a indústria petrolífera, documentar detalhadamente o processo de produção dos filmes de diamante CVD e investigar possíveis aplicações industriais para o material analisado.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O Capítulo 2 (Revisão da Literatura) aborda o estado da arte das aplicações industriais dos filmes de diamante sintetizados por método CVD. O Capítulo 3 (Fundamentação Teórica) detalha os conceitos essenciais para a compreensão do trabalho, incluindo petróleo e seus derivados, as características do gás metano, as propriedades dos materiais semicondutores como o silício, a síntese de filmes de diamante por CVD e as técnicas de caracterização. O Capítulo 4 (Materiais e Métodos) descreve os procedimentos experimentais adotados, detalhando a preparação dos filmes e as técnicas de caracterização empregadas, como a Microscopia Óptica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS). O Capítulo 5 (Resultados e Discussão) apresenta e analisa os dados obtidos, focando nas características dos filmes de diamante crescidos sobre o substrato tipo p e discutindo suas potenciais aplicações. Por fim, o Capítulo 6 (Conclusão) sintetiza os principais resultados alcançados no estudo, avalia se os objetivos propostos foram atingidos e as perspectivas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os filmes de diamante CVD têm ganhado destaque em diversas aplicações industriais ao longo dos anos. Isso se deve às suas propriedades excepcionais, como alta dureza, baixo coeficiente de atrito, alta resistência e inércia química. A capacidade do material de diamante de suportar condições de alta temperatura e ambientes corrosivos torna esse material ideal para demandas da indústria que exigem alta durabilidade, confiabilidade e longa vida útil (Asmussen; Reinhard, 2002; Davis, 1993).

O texto a seguir aborda algumas aplicações e avanços na utilização dos filmes de diamante CVD na indústria de petróleo e gás, em dispositivos eletrônicos e em sensores ópticos.

Os revestimentos de diamante CVD podem ser utilizados como selos mecânicos em bombas na indústria petrolífera, desempenhando a função de vedar eixos rotativos ao formar uma interface entre uma superfície rotativa e outra estacionária. Na lubrificação dos eixos, o fluido de trabalho atua como lubrificante, podendo ser qualquer substância bombeável, geralmente aquosa de baixa viscosidade ou contendo hidrocarbonetos. A espessura do filme nos selos é crucial, devendo estar entre 0,25 e 8 micrômetros, pois filmes muito finos causam desgaste e calor excessivo, enquanto filmes muito espessos resultam em vazamentos inadequados para a aplicação (Wheeler, 2018).

Falhas em selos mecânicos respondem por 70% dos defeitos em bombas. A aplicação de filmes de diamante pode prolongar significativamente a vida útil desses selos ao reduzir o atrito entre componentes e, conseqüentemente, o consumo de energia nos processos em que são utilizados. As vedações mecânicas se beneficiam dos revestimentos de diamante devido às suas propriedades de alta resistência e baixo coeficiente de atrito, tornando-os particularmente eficazes contra fluidos abrasivos ou erosivos (Wheeler, 2018).

Aplicações recentes têm revelado resultados impressionantes com selos revestidos de diamante que demonstram durabilidade superior a 10.000 horas em aplicações de transporte de petróleo e gás. No campo petrolífero de Panacocha, na região amazônica do Equador, selos mecânicos revestidos com diamante foram empregados em bombas de tubulação que conduzem uma mistura de óleo cru, gás, água e partículas sólidas. Estes selos, com espessura de 10 micrômetros, mostraram-se capazes de suportar condições adversas, incluindo temperaturas elevadas de até 300 °C e exposição a uma mistura altamente corrosiva (Wheeler, 2018).

As válvulas utilizadas na indústria petroquímica podem ter sua vida útil prolongada com a incorporação de revestimentos de filmes de diamante em seus componentes internos, com o objetivo de resistir à erosão. O carboneto de tungstênio cementado é atualmente muito usado no interior das válvulas de estrangulamento. Porém, os revestimentos de diamante CVD possuem taxas de erosão até 30 vezes menores do que esse material comumente usado. Os plugues e anéis das válvulas com cobertura parcial de diamante CVD apresentam uma taxa de resistência à erosão entre 50% e 60% maior do que os presentes em válvulas padrão (Wheeler, 2018).

Os filmes finos de diamante podem ser aplicados na fabricação de sensores ópticos capazes de suportar ambientes de condições severas. Isso se deve ao fato de o diamante apresentar propriedades que permitem suportar altas temperaturas, ser imune a interferências eletromagnéticas e a possibilidade de sua miniaturização. Baseando-se no princípio das medições interferométricas de Fabry-Pérot, é possível a fabricação de sensores ópticos compostos por membranas de filme fino de diamante, sintetizadas a partir de métodos CVD em substrato de silício (Salvatori *et al.*, 2020).

Além das propriedades de baixo coeficiente de atrito, alta dureza e resistência, a condutividade térmica do diamante confere aos filmes de diamante uma aplicabilidade relevante na dissipação de calor. Um estudo realizado por Chernykh *et al.* (2022) propôs uma nova tecnologia *GaN-on-Diamond*, que visa mitigar os efeitos de autoaquecimento em dispositivos que utilizam nitreto de gálio (GaN) como semicondutor. Esses dispositivos, devido ao efeito de autoaquecimento, possuem limitações de potência e tempo de operação. A tecnologia proposta utiliza filmes de diamante policristalino depositados em wafers de silício sobre isolante (SOI, do inglês *Silicon-On-Insulator*). A deposição do diamante CVD, utilizando uma mistura de metano e hidrogênio, é seguida pela remoção da camada mais espessa de silício e da camada de óxido de silício do substrato SOI por polimento mecânico e ataque químico, respectivamente. Esse procedimento resulta em um substrato composto que será utilizado para o crescimento de heteroestruturas de nitreto e, por fim, na fabricação de transistores de GaN. A abordagem de Chernykh *et al.* (2022) demonstrou, por testes e comparações, melhor potência de saída e confiabilidade nos dispositivos baseados em GaN, evidenciando maior eficiência na dissipação de calor ao usar o diamante.

Weng *et al.* (2023) investigam a preparação de filmes de diamante de grande área, com diâmetros entre 150 e 200 mm, utilizando um sistema de deposição química em fase vapor por plasma de micro-ondas (do inglês *Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition*, sigla MPCVD). Eles destacam a importância desses filmes de grande área para aplicações em dispositivos baseados em GaN, bem como a relevância do diamante CVD no campo da fusão nuclear controlada. Sistemas como a planta de demonstração EU DEMO necessitam de janelas de diamante CVD para suportar a transmissão do feixe de micro-ondas de alta potência dos girotrons. Essas janelas precisam ter diâmetros de pelo menos 100 mm e que devem chegar a 180 mm para suportar potências de saída de 2 MW no futuro. Além disso, em seu artigo, Weng *et al.* (2023) demonstram a viabilidade da deposição de filmes de diamante com diâmetros superiores a 150 mm, embora sejam necessárias melhorias no ambiente de plasma. Essas melhorias podem ser feitas ajustando aspectos cruciais, como a distribuição e concentração das moléculas envolvidas nas reações químicas no plasma e também mantendo uma temperatura uniforme sobre o substrato de silício utilizado. Pode-se concluir que a síntese de filmes de diamante maiores será essencial para futuras aplicações industriais nos campos óptico, térmico e eletrônico.

Um estudo conduzido por Gaydaychuk *et al.* (2022) analisou a resistência à erosão de filmes de diamante depositados em substratos de Si (100) utilizando o método HFCVD, variando as concentrações de metano até 21,9% em volume em uma mistura de CH₄ e H₂. Observou-se que, independentemente da microestrutura, os filmes apresentaram padrões similares de erosão, como fissuras radiais e em anel, furos e descolamentos. Além disso, os filmes de diamante demonstraram maior resistência à erosão em comparação com o WC-Co (metal duro de carbeto de tungstênio com cobalto). Os filmes de diamante microcristalino, sintetizados com a menor concentração de metano (5,6%), apresentaram a menor redução de peso, enquanto os filmes obtidos com 21,9% de CH₄ mostraram a maior redução de peso nos testes de erosão por partículas sólidas. Este fato evidencia a necessidade de mais estudos sobre a relação entre a microestrutura do revestimento de diamante e sua resistência à erosão para aplicações industriais mais eficientes (Gaydaychuk *et al.*, 2022).

Além das aplicações consolidadas em ferramentas de corte e componentes antidesgaste, o diamante CVD tem expandido seu uso para áreas tecnológicas emergentes. Suas propriedades térmicas viabilizam dissipadores para amplificadores 5G e suportes de lasers, enquanto seu elevado módulo de Young o torna promissor para microssistemas eletromecânicos (do inglês *Micro-Electro-Mechanical Systems*, sigla MEMS) e filtros acústicos em dispositivos móveis. Na área eletroquímica, o diamante dopado com boro destaca-se em eletrodos para purificação de água e sensores analíticos (Nebel, 2023).

Pesquisas recentes apontam ainda uma tendência de aumento no uso dos filmes de diamante CVD em setores estratégicos da engenharia. Nebel (2023) destaca que a crescente integração de componentes eletrônicos aos materiais que formam o ambiente ao redor pode gerar poluição tecnológica. Para mitigar isso, a eletrônica futura deve adotar princípios de sustentabilidade, reutilização e biocompatibilidade. Nesse contexto, torna-se necessário um afastamento gradual da tecnologia baseada em silício e o uso de novos materiais semicondutores mais sustentáveis. Nesse cenário, os materiais e moléculas à base de carbono se destacam como candidatos promissores para essa transição ecológica. Isso se deve à abundância natural do carbono, sua versatilidade química e sua capacidade de formar uma ampla variedade de estruturas (como grafite, diamante, nanotubos de carbono, grafeno, fulerenos e grafino) que podem ser produzidas em diversas formas e escalas, do macroscópico ao nanométrico (Nebel, 2023).

Portanto, o uso de filmes de diamante CVD tem demonstrado significativos avanços na durabilidade e eficiência de componentes mecânicos e eletrônicos em várias indústrias. As melhorias contínuas nos processos de deposição e aplicabilidade dos filmes de diamante abrem novas possibilidades de aplicações futuras. Logo, pode-se atribuir um papel crucial ao estudo da síntese e das características dos diamantes CVD para a evolução tecnológica e na busca por soluções mais robustas e eficientes. Em vista disso, este trabalho busca identificar propriedades físicas e químicas dos filmes de diamante em substratos de silício tipo p que possam ser particularmente úteis para aplicações na indústria petrolífera e também colaborar para o aumento da compreensão dos filmes de diamante CVD.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 PETRÓLEO E SEUS DERIVADOS

O petróleo constitui-se como uma das fontes energéticas mais importantes da sociedade contemporânea, sendo uma matéria-prima de notável complexidade. Em seu estado bruto, é uma dispersão de gases e sólidos em fase líquida, frequentemente acompanhada por impurezas como água, sais e matéria inorgânica que precisam ser removidas (Farah, 2013).

A composição elementar média do petróleo é apresentada na Tabela 1, evidenciando os principais elementos que o constituem.

Tabela 1 – Composição elementar média do petróleo

Elemento	Porcentagem mássica (%)
Carbono	83,0 a 87,0
Hidrogênio	11,0 a 14,0
Enxofre	0,06 a 8,0
Nitrogênio	0,11 a 1,7
Oxigênio	0,5
Metais (Fe, Ni, V etc.)	0,3

Fonte: Farah (2013).

Embora sua composição elementar (carbono, hidrogênio, enxofre, etc.) varie em uma faixa estreita, suas propriedades físicas são extremamente diversas, resultando em óleos que vão de fluidos, claros e de baixa viscosidade a massas escuras, viscosas e quase sólidas. Essa variação é explicada pela predominância de diferentes famílias de hidrocarbonetos, parafínicos (alcanos), naftênicos (cicloalcanos) e aromáticos, que conferem características únicas ao óleo. A proporção dessas famílias impacta diretamente o rendimento e a qualidade dos derivados (Farah, 2013).

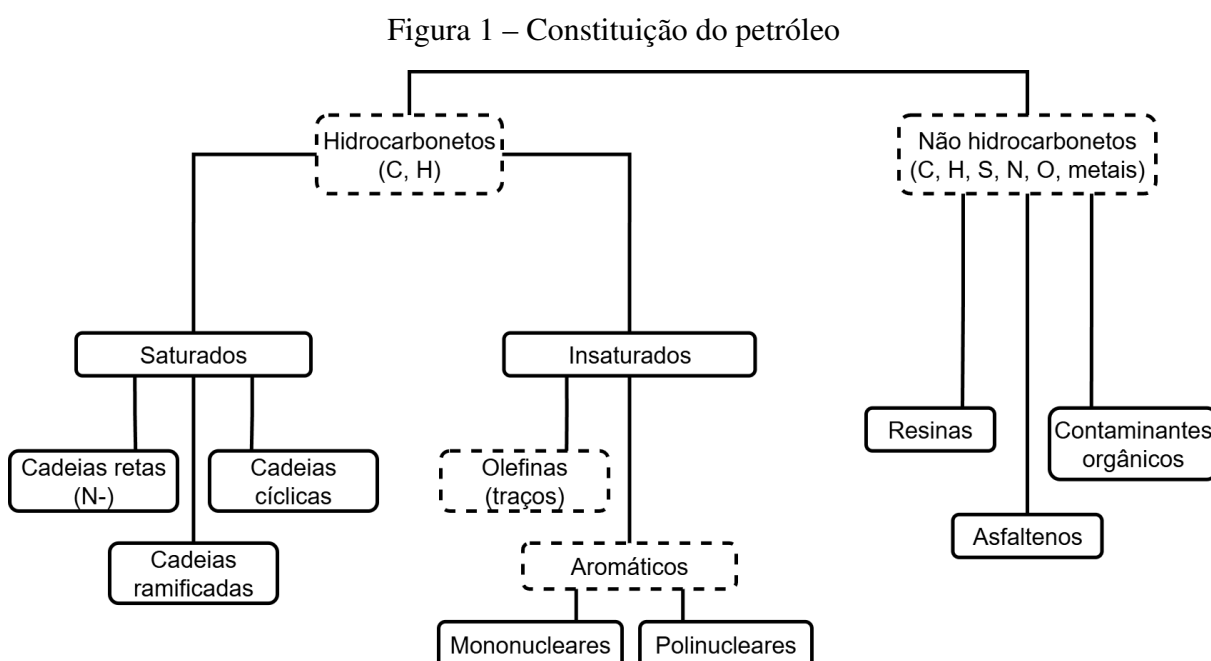
A primeira família, a dos alcanos ou parafínicos, possui fórmula geral C_nH_{2n+2} . São hidrocarbonetos saturados, onde todos os átomos de carbono apresentam ligações simples, com cadeia aberta do tipo normal ou ramificada. Os de cadeia normal e longa são os principais constituintes do produto comercial denominado parafina. Estes são majoritários nas frações leves (até cerca de 120 °C), quando começa a ocorrer o equilíbrio com os ramificados. A cerca de 150 °C, geralmente passa a ocorrer predomínio dos parafínicos ramificados sobre os normais; no entanto, petróleos parafínicos podem conter de 20% a 50% de parafínicos normais na fração entre 150 °C e 350 °C (Farah, 2013).

A segunda classe, os cicloalcanos ou naftênicos, são hidrocarbonetos saturados de fórmula geral C_nH_{2n} , contendo uma ou mais cadeias cíclicas. São conhecidos na indústria como naftênicos, pois sua presença no petróleo começa a ocorrer a partir da fração denominada nafta. As estruturas naftênicas básicas mais comuns são as do ciclopentano e do ciclo-hexano, po-

dendo ocorrer cadeias parafínicas ligadas à estrutura cíclica. De forma geral, os naftênicos ocorrem majoritariamente nas frações médias do petróleo, como querosenes, gasóleos atmosféricos e gasóleos de vácuo (Farah, 2013).

Por fim, os hidrocarbonetos aromáticos são aqueles que contêm um ou mais anéis benzênicos. No petróleo, os tipos mais comuns são aqueles que apresentam cadeias parafínicas e naftênicas ligadas à estrutura aromática, embora possam ocorrer também na forma de núcleo aromático puro. São minoritários nas frações leves e, na maioria dos casos, também nas frações médias. Ocorrem em teores maiores nas frações pesadas e residuais, onde, dependendo do tipo de petróleo, podem ser majoritários, apresentando estruturas policíclicas complexas (Farah, 2013).

A Figura 1 ilustra a constituição do petróleo, destacando os hidrocarbonetos e as substâncias não hidrocarbonadas.



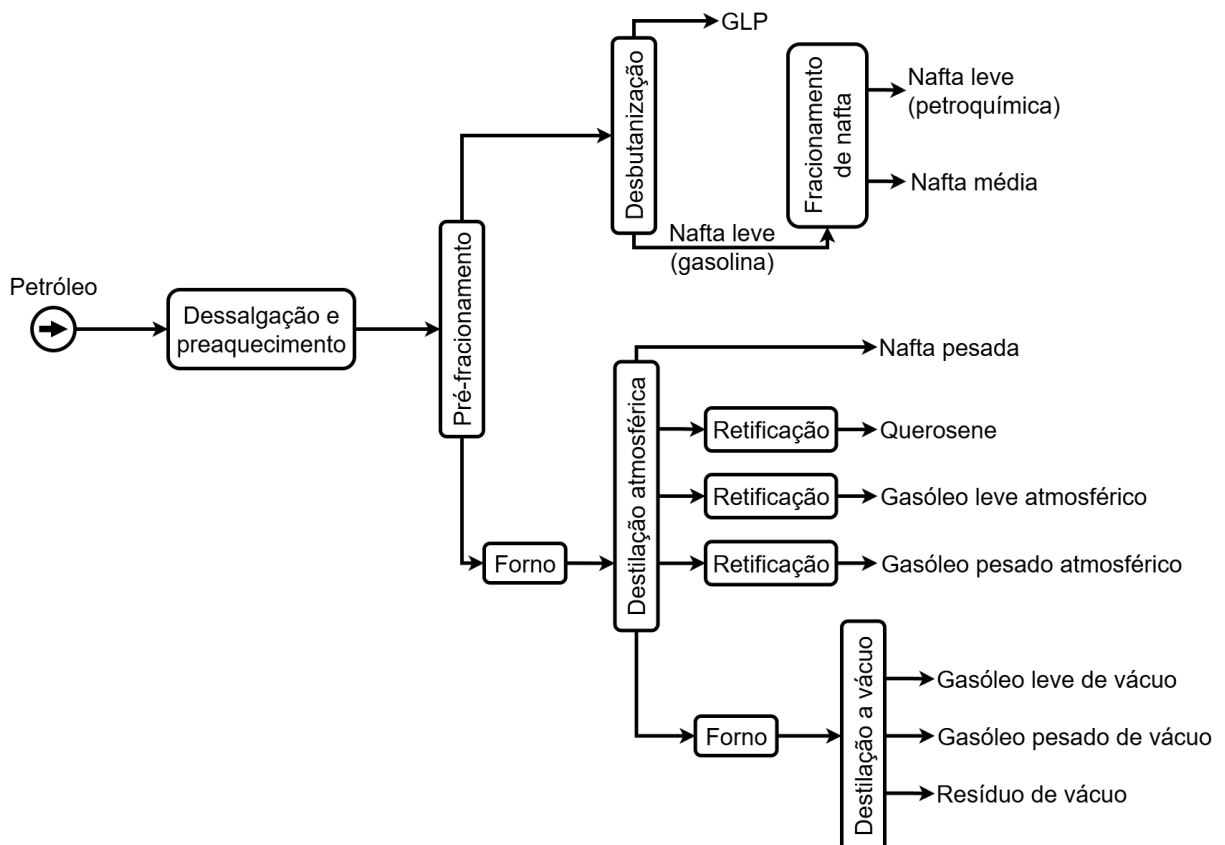
Fonte: Adaptado de Farah (2013).

O processo de refino, que transforma essa matéria-prima em produtos essenciais, é um encadeamento complexo de etapas físicas e químicas. O ponto de partida é a destilação, um processo de separação física que classifica os componentes do petróleo com base em suas diferentes temperaturas de ebulição. Inicialmente, o petróleo bruto passa por uma etapa crucial de pré-aquecimento e dessalgação, onde a água emulsionada e os sais minerais dissolvidos são removidos para prevenir problemas de corrosão nos equipamentos e envenenamento dos catalisadores nas etapas subsequentes. Em seguida, o óleo tratado entra na torre de destilação atmosférica, onde um gradiente de temperatura separa as frações: as mais leves e voláteis (como gás combustível, GLP e nafta leve) sobem para o topo da torre, enquanto as mais pesadas permanecem na base. O resíduo desta etapa, conhecido como resíduo atmosférico (RAT), é então

encaminhado para a destilação a vácuo. Esta segunda torre opera sob pressão muito reduzida, o que diminui o ponto de ebulição das frações pesadas, permitindo sua separação em gasóleos de vácuo sem que ocorra a degradação térmica (craqueamento térmico), que geraria coque e produtos de menor qualidade (Farah, 2013).

A Figura 2 apresenta um fluxograma simplificado das etapas de destilação do petróleo, desde o pré-tratamento até a destilação a vácuo.

Figura 2 – Esquema básico de uma unidade de destilação atmosférica e a vácuo



Fonte: Adaptado de Farah (2013).

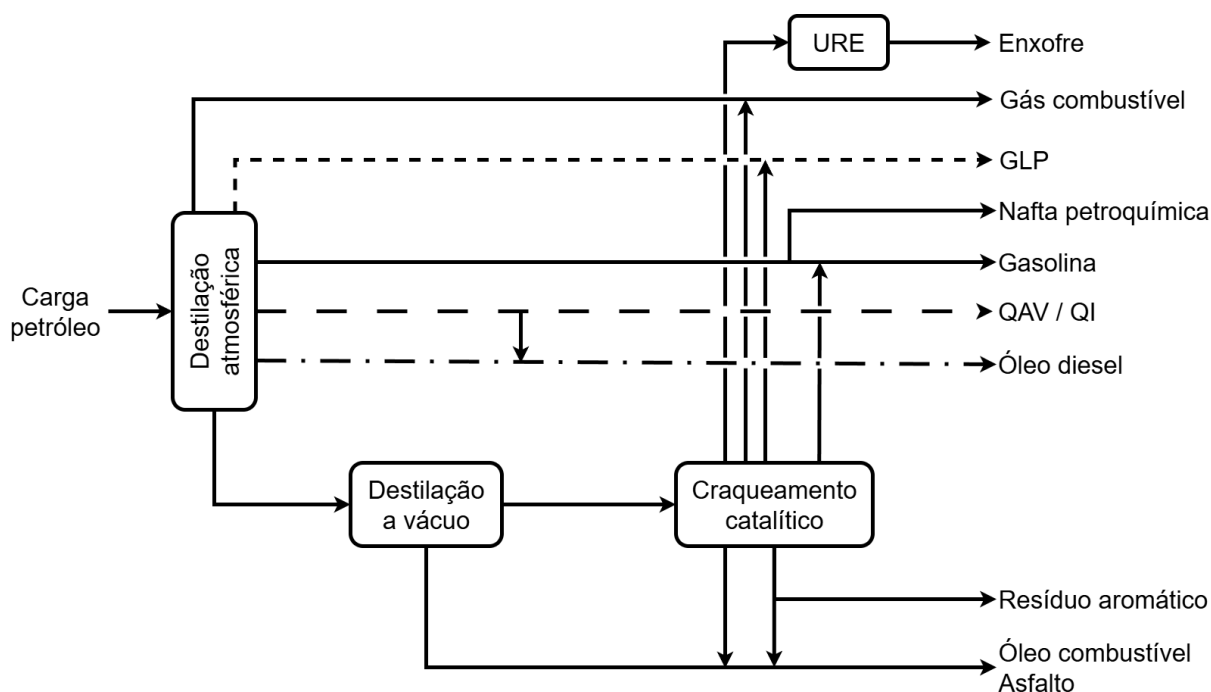
Apenas a destilação não é suficiente para atender à alta demanda por derivados leves e de maior valor agregado, como a gasolina. Por isso, as refinarias empregam processos de conversão, sendo o Craqueamento Catalítico Fluido (FCC) um dos mais importantes e rentáveis. Este processo, classificado como uma operação de "fundo de barril", tem como objetivo transformar frações pesadas e de baixo valor, como o gasóleo de vácuo, em produtos mais leves e valiosos. A carga é injetada em um reator e entra em contato com um catalisador a altas temperaturas (entre 500 °C e 540 °C). O catalisador é fluidizado por vapor d'água, comportando-se como um líquido, o que garante um contato íntimo e eficiente com o óleo. No reator, as grandes moléculas de hidrocarbonetos são "quebradas" ou "craqueadas" em moléculas menores. Os produtos craqueados são separados do catalisador, agora recoberto por coque, segue para um regenerador onde o coque é queimado, reativando o catalisador e gerando o calor necessário

para o processo. O resultado é a produção significativa de GLP, olefinas para a petroquímica, e nafta de alta octanagem, rica em hidrocarbonetos aromáticos e parafínicos ramificados (Farah, 2013).

Como resultado desse complexo esquema de refino, que integra separação, conversão e tratamento, a indústria petrolífera disponibiliza uma vasta gama de produtos. É crucial distinguir a "fração", que é o produto direto de uma única etapa do processo (como a nafta da destilação), do "derivado", que é o produto final comercial.

A Figura 3 apresenta o esquema mais simples de uma refinaria, composto pelas unidades essenciais para o processamento do petróleo, bem como as diversas frações e derivados gerados ao longo do processo.

Figura 3 – Esquema de refino básico (Tipo 1) para a produção de combustíveis.



Fonte: Adaptado de Farah (2013).

O derivado é tipicamente uma mistura formulada de várias frações, conhecida como "pool", cuidadosamente balanceada para atender a todas as rigorosas especificações legais e de desempenho, como octanagem, ponto de fulgor e teor de enxofre. Hoje, os produtos se dividem em duas categorias principais: os combustíveis ou energéticos (GLP, gasolina, diesel, querosene de aviação), que movem a economia global; e os não combustíveis (lubrificantes, parafinas, asfaltos, solventes e, crucialmente, matérias-primas para a indústria petroquímica, que dão origem a plásticos, fertilizantes, tecidos sintéticos e fármacos). A sofisticação tecnológica envolvida nesses processos evidencia o papel central do refino de petróleo como pilar das atividades econômicas e do desenvolvimento social contemporâneo (Farah, 2013).

A Tabela 2 sintetiza as principais frações obtidas na destilação e suas respectivas faixas de temperatura e aplicações.

Tabela 2 – Aplicações comerciais das frações de destilação do petróleo.

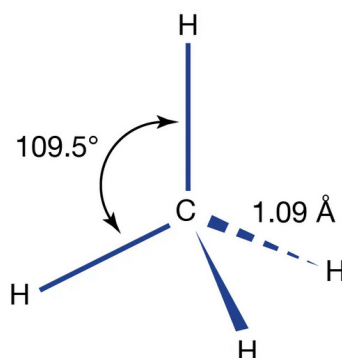
Fração	Faixa de destilação PEV (°C)	Principais aplicações comerciais
Gás combustível	Abaixo de -42	Gás combustível; petroquímica
Gás liquefeito do petróleo	-42 a 0	Combustível doméstico e industrial; petroquímica
Nafta leve	30 a 90	Gasolina; petroquímica; solventes
Nafta pesada	90 a 170	Gasolina; petroquímica; obtenção de aromáticos
Querosene	170 a 270	QI; QAV; óleo diesel; detergentes
Gasóleo leve atmosférico	270 a 320	Óleo diesel; óleo de aquecimento
Gasóleo pesado atmosférico	320 a 390	Óleo diesel; óleo de aquecimento
Gasóleo leve de vácuo	390 a 420	Carga de FCC; óleos básicos lubrificantes; óleo diesel
Gasóleo pesado de vácuo	420 a 550	Carga de FCC; óleos básicos lubrificantes
Resíduo de vácuo	Acima de 550	Óleos combustíveis; óleos básicos lubrificantes; asfaltos

Fonte: Farah (2013).

3.2 CARACTERÍSTICAS DO GÁS METANO

O metano representa o hidrocarboneto de estrutura mais elementar, sendo descrito pela fórmula molecular CH_4 . Sua estrutura consiste em um átomo de carbono central que estabelece ligações com quatro átomos de hidrogênio dispostos em geometria tetraédrica (Candelaresi; Spazzafumo, 2021; BRITANNICA, 2025), conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Estrutura tetraédrica da molécula de metano.



Fonte: Adaptado de Britannica (2025).

O composto foi identificado inicialmente por Alessandro Volta, cientista italiano que o isolou no século XVIII (Candelaresi; Spazzafumo, 2021).

Em condição ambiente de temperatura e pressão, o metano apresenta-se como gás incolor e inodoro, com densidade relativa de 0,554 em relação ao ar e solubilidade aquosa baixíssima (Candelaresi; Spazzafumo, 2021; BRITANNICA, 2025). Embora não seja diretamente tóxico, oferece risco por deslocar o oxigênio respirável e exibe alta combustibilidade, formando misturas explosivas com o ar em proporções volumétricas de 5% a 15%, característica historicamente associada a acidentes em minas de carvão (Candelaresi; Spazzafumo, 2021; BRITANNICA, 2025). Suas transições de fase ocorrem a temperaturas muito baixas, com liquefação a $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ e solidificação a $-182,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. A oxidação completa gera CO_2 e H_2O , com chama de tonalidade clara e alta temperatura (BRITANNICA, 2025).

As fontes naturais de metano derivam principalmente da atividade microbiana anaeróbica que decompõe compostos orgânicos vegetais em ambientes saturados de água, o que explica as denominações populares associadas a áreas pantanosas (BRITANNICA, 2025). Ecossistemas alagados constituem os principais emissores naturais, seguidos por contribuições relevantes da fisiologia digestiva de insetos sociais como os cupins, manifestações vulcânicas e exalações do leito marinho (Candelaresi; Spazzafumo, 2021; BRITANNICA, 2025).

Adicionalmente, extensos depósitos de hidratos de metano, estruturas cristalinas de inclusão que armazenam o gás na proporção de quatro moléculas de CH_4 para vinte e três de H_2O , encontram-se distribuídos por plataformas continentais submarinas e regiões polares permanentemente congeladas. Esses depósitos representam simultaneamente uma reserva energética e uma potencial ameaça climática (Candelaresi; Spazzafumo, 2021; BRITANNICA, 2025).

No gás natural comercial, o metano constitui a fração majoritária, variando de metade a nove décimos do volume conforme a origem geológica; ocorre também em emanações de jazidas carboníferas e pode substituir integralmente o gás natural em aplicações tecnológicas, incluindo sistemas de conversão eletroquímica de alta eficiência (Candelaresi; Spazzafumo, 2021; BRITANNICA, 2025).

As atividades humanas respondem pela maior parcela das emissões globais, com destaque para a exploração e o processamento de combustíveis fósseis gasosos e sólidos, a decomposição de materiais orgânicos industrializados, os sistemas de criação animal intensiva e a infraestrutura de gerenciamento de rejeitos urbanos, nos quais processos microbiológicos degradam resíduos líquidos e sólidos liberando metano (Candelaresi; Spazzafumo, 2021; BRITANNICA, 2025).

A intensificação das atividades industriais e agrícolas alterou substancialmente a composição atmosférica quanto ao metano: as concentrações elevaram-se dos patamares pré-Revolução Industrial, situados entre 600 e 700 partes por bilhão, para 1908,61 ppb em 2022, aumento superior ao triplo, com taxas de crescimento anual entre 6,8 e 10 ppb nas últimas duas décadas. A importância climática desse acúmulo está relacionada ao fato de o metano possuir uma eficiência muito maior que a do dióxido de carbono na retenção de calor, cerca de 28 a 36 vezes superior em um horizonte de cem anos e aproximadamente 84 a 87 vezes maior quando considerada uma escala de vinte anos (Candelaresi; Spazzafumo, 2021; BRITANNICA, 2025).

O efeito climático do metano resulta de mecanismos diretos e indiretos. O mecanismo direto consiste na interceptação e reemissão da radiação infravermelha terrestre, intensificando a retenção energética na baixa atmosfera. Já o mecanismo indireto envolve interferência nos processos oxidativos naturais: quando o metano é consumido por espécies químicas reativas atmosféricas, formam-se produtos finais menos ativos termicamente; entretanto, o excesso de metano reduz a disponibilidade desses agentes oxidantes, prolongando a permanência atmosférica do gás. Embora mecanismos naturais de remoção, predominantemente absorção pedológica e oxidação troposférica, tradicionalmente equilibrassem as emissões espontâneas, o aporte antropogênico atual excede a capacidade desses sumidouros (BRITANNICA, 2025).

A versatilidade química do metano sustenta seu uso como precursor de hidrogênio e de numerosos compostos orgânicos de interesse industrial. Pelo tratamento térmico na presença de vapor, o metano converte-se em mistura de monóxido de carbono e hidrogênio molecular (gás de síntese), sendo este último direcionado à síntese de amônia para fabricação de fertilizantes e materiais explosivos (BRITANNICA, 2025).

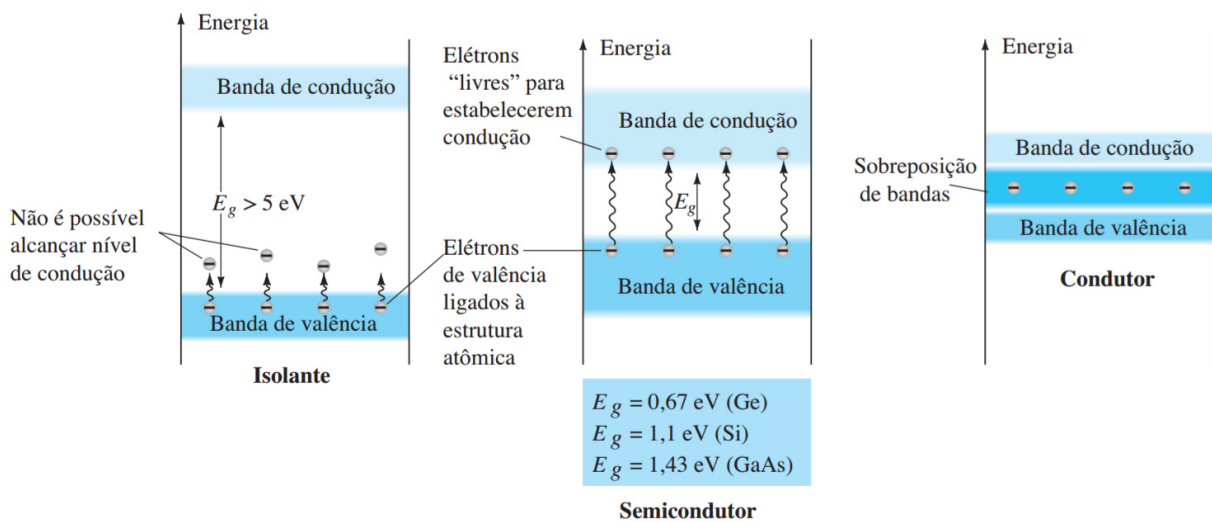
Processos de halogenação e oxidação parcial permitem a obtenção de metanol, compostos clorados diversos e nitrometano. Adicionalmente, a combustão controlada em deficiência de oxigênio gera carbono particulado empregado como carga de reforço em elastômeros automotivos (BRITANNICA, 2025). Paralelamente às fontes fósseis, rotas de produção sustentável possibilitam a geração de metano renovável por biodigestão de matérias orgânicas e resíduos úmidos, tecnologia na qual comunidades microbianas anaeróbicas convertem substratos carbonáceos em mistura gasosa rica em metano e dióxido de carbono, posteriormente purificada por remoção do CO_2 para obtenção de biometano combustível, mitigando as emissões que ocorrem da decomposição natural descontrolada desses materiais (Candelaresi; Spazzafumo, 2021).

Adicionalmente, sínteses catalíticas permitem a conversão de óxidos de carbono e hidrogênio em metano por rotas termoquímicas classificadas como tecnologias de armazenamento energético na forma química (Candelaresi; Spazzafumo, 2021).

3.3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS SEMICONDUTORES

Os materiais condutores, como, por exemplo, ouro, prata e cobre, possuem, em geral, um elétron de valência, o que facilita a condução elétrica. Em sentido oposto, os isolantes tendem a apresentar oito elétrons de valência, tornando improvável a excitação para níveis de condução (Malvino; Bates, 2016). Os semicondutores exibem comportamento intermediário entre esses extremos, motivo pelo qual os elementos tetravalentes, com quatro elétrons de valência, são os mais empregados (Malvino; Bates, 2016). A diferença entre condutores, semicondutores e isolantes pode ser observada no diagrama de bandas de energia apresentado na Figura 5, no qual o valor do *band gap* (E_g) é determinante para o movimento de portadores.

Figura 5 – Diagrama de bandas de energia.

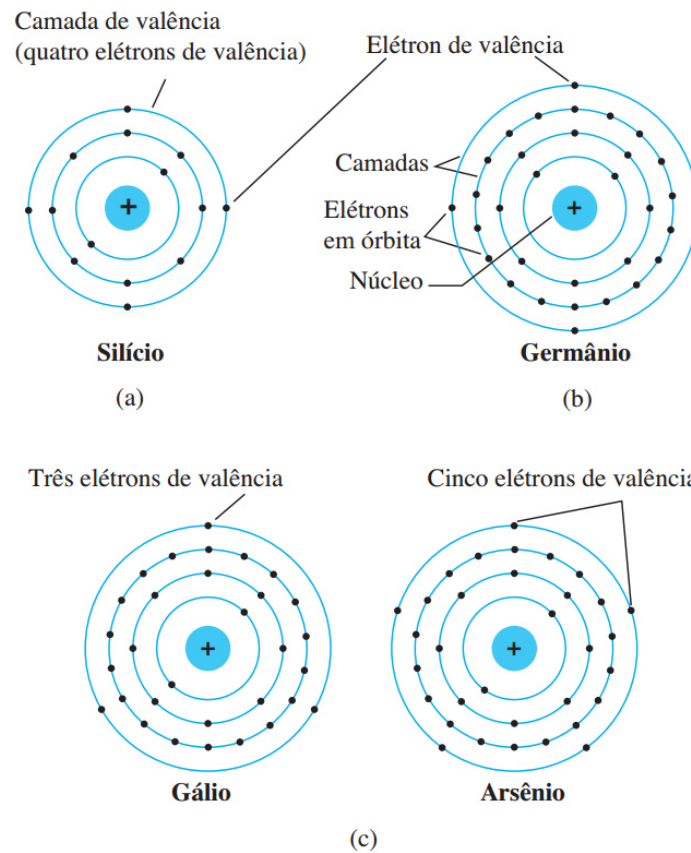


Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013).

Os elétrons de valência ocupam os orbitais de maior energia na camada mais externa do átomo. No caso do cobre (Cu), que possui 29 prótons e 29 elétrons, 28 elétrons preenchem as camadas internas, restando um elétron na camada de valência. Esse elétron encontra-se relativamente afastado do núcleo e parcialmente blindado pelos elétrons internos, o que reduz a carga nuclear efetiva para aproximadamente $+1$. Assim, uma pequena tensão é suficiente para promovê-lo à banda de condução, permitindo o fluxo de corrente (Malvino; Bates, 2016).

Entre os semicondutores mais utilizados na indústria destacam-se o germânio (Ge), o silício (Si) e compostos como o arseneto de gálio (GaAs). Eles podem ser classificados em elementares (cristal formado por um único elemento, por exemplo, o silício) ou compostos (formados por dois ou mais elementos, como GaAs ou nitreto de gálio, GaN) (Boylestad; Nashelsky, 2013). As diferenças no número de elétrons de valência entre elementos dos grupos III, IV e V da tabela periódica, relevantes para a dopagem, estão ilustradas na Figura 6 (Boylestad; Nashelsky, 2013).

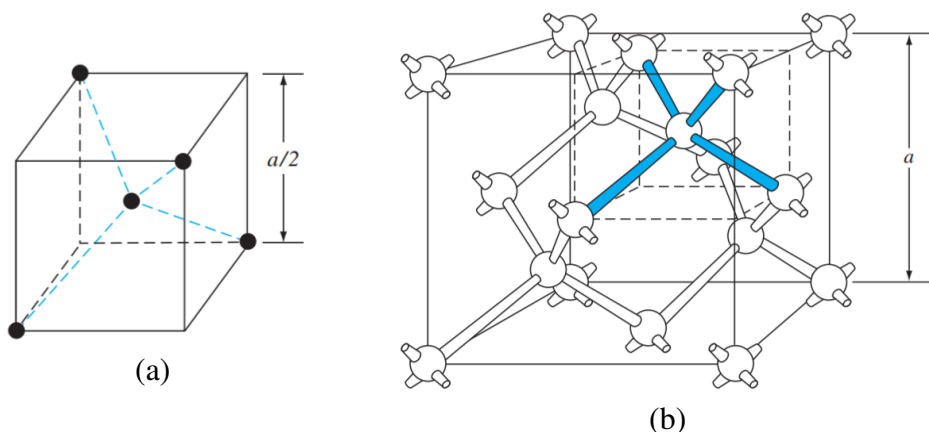
Figura 6 – Estrutura atômica de: (a) silício, (b) germânio, (c) gálio e arsênio



Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013).

O silício, elemento do grupo IV da tabela periódica, cristaliza-se na estrutura diamante. Nessa rede, cada átomo se liga covalentemente a quatro vizinhos, formando uma geometria tetraédrica que se repete ao longo do cristal. A vizinhança tetraédrica imediata e a célula unitária com ligações covalentes que evidenciam a repetição tridimensional da estrutura são mostradas nas Figura 7a e Figura 7b, respectivamente (Neamen, 2012; Boylestad; Nashelsky, 2013).

Figura 7 – Estrutura diamante do silício: (a) vizinhança tetraédrica e (b) célula unitária.

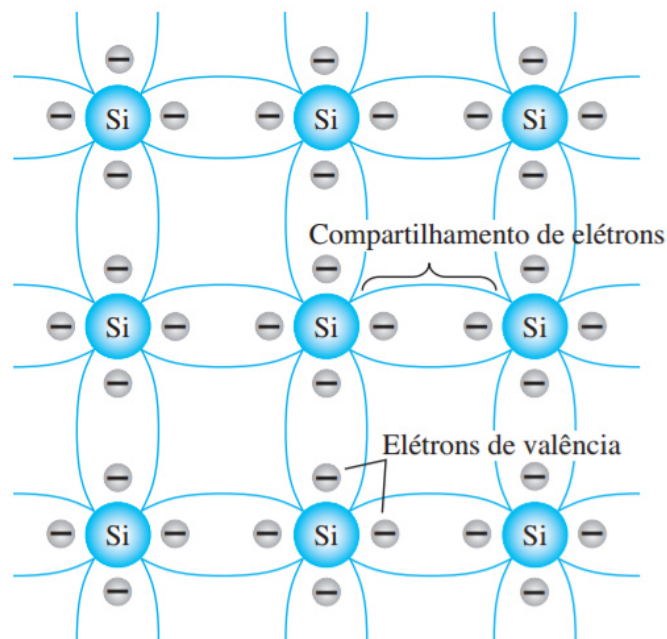


Fonte: Adaptado de Neamen (2012).

3.3.1 Ligações covalentes no silício

A coesão do cristal de silício decorre de ligações covalentes: os quatro elétrons de valência de cada átomo são compartilhados com seus vizinhos mais próximos, resultando em uma configuração eletrônica mais estável, com oito elétrons ao redor de cada átomo. (Neamen, 2012; Boylestad; Nashelsky, 2013). A representação esquemática dessas ligações é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Ligações covalentes no silício

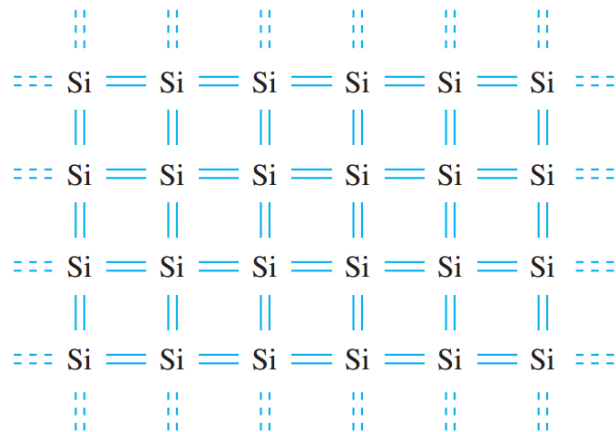


Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013).

3.3.2 Semicondutor intrínseco

No semicondutor intrínseco, o cristal é constituído por um único elemento, por exemplo, silício puro (Malvino; Bates, 2016). A energia térmica pode romper ligações covalentes, liberando elétrons e criando lacunas. Esses processos ocorrem em pares: um elétron livre e uma lacuna (Boylestad; Nashelsky, 2013). O movimento sucessivo de elétrons para preencher lacunas gera um fluxo efetivo de lacunas em sentido oposto ao deslocamento dos elétrons; por convenção, esse é o sentido da corrente (Boylestad; Nashelsky, 2013). Em equilíbrio térmico, a concentração de elétrons livres é igual à de lacunas (Malvino; Bates, 2016). Uma visualização da rede intrínseca é mostrada na Figura 9.

Figura 9 – Rede de silício intrínseca



Fonte: Neamen (2012).

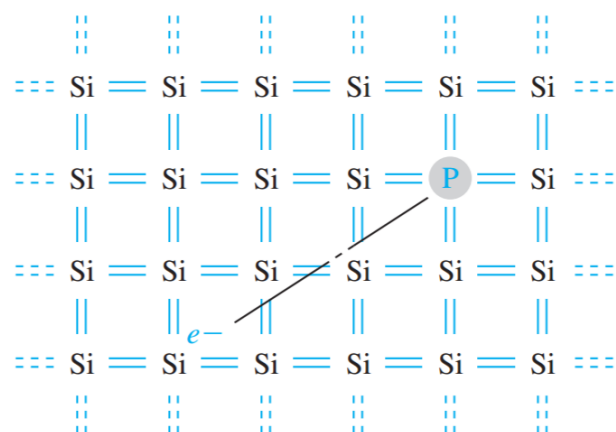
3.3.3 Dopagem e semicondutores extrínsecos

Para aumentar a condutividade, realiza-se a dopagem com a introdução de impurezas controladas no cristal intrínseco, ajustando as concentrações relativas de elétrons e lacunas (Malvino; Bates, 2016). Com dopagem adequada, um tipo de portador torna-se predominante e obtém-se o semiconductor extrínseco (Neamen, 2012). Essa capacidade de modulação precisa, característica de materiais como Si, Ge e GaAs, é central para aplicações do silício (Neamen, 2012; Boylestad; Nashelsky, 2013).

3.3.3.1 Semicondutores do tipo n

A dopagem com impurezas pentavalentes (doadores), fósforo (P), arsênio (As) ou antimônio (Sb), fornece elétrons extras à rede. Como resultado, os elétrons livres são portadores majoritários e as lacunas são minoritárias (Boylestad; Nashelsky, 2013; Malvino; Bates, 2016). Um exemplo de rede de silício dopada com fósforo encontra-se na Figura 10.

Figura 10 – Silício dopado com fósforo

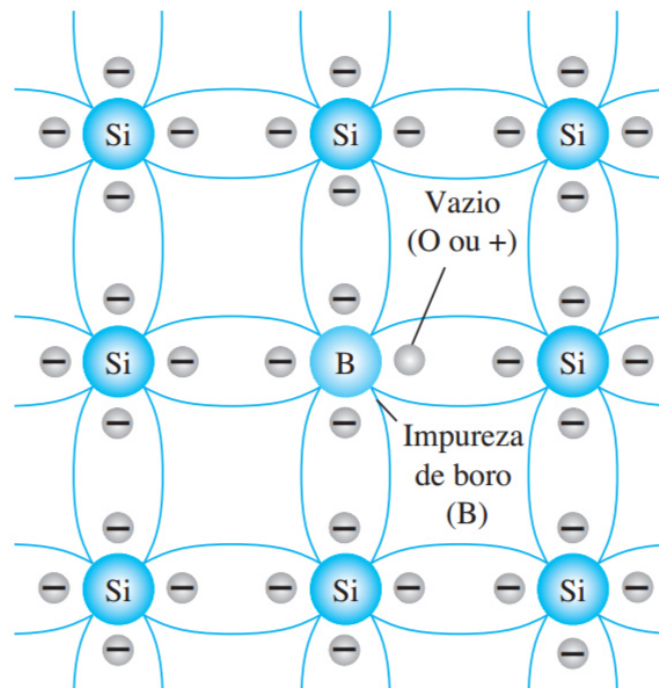


Fonte: Neamen (2012).

3.3.3.2 Semicondutores do tipo p

Já a dopagem com impurezas trivalentes (aceitadoras), boro (B), gálio (Ga) e índio (In), cria vacâncias em ligações covalentes, isto é, lacunas. Nessas condições, as lacunas são portadoras majoritárias e os elétrons, minoritários (Boylestad; Nashelsky, 2013; Malvino; Bates, 2016). O nível energético associado ao aceitador situa-se entre as bandas de valência e condução e favorece a captura de elétrons da valência, originando lacunas móveis (Neamen, 2012). A inserção de boro na rede é apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Impureza aceitadora (boro) em rede de silício

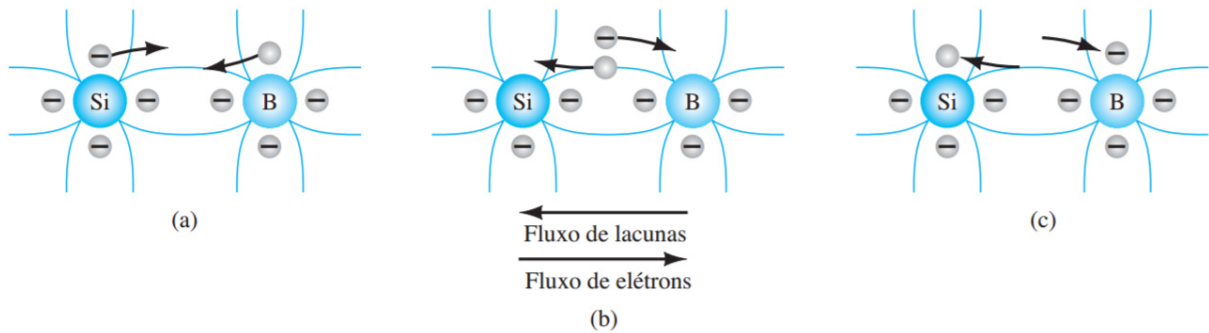


Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013).

3.3.4 Mecanismo de condução no material tipo p

A condução no material tipo p ocorre primordialmente pelo deslocamento de lacunas. Quando um elétron de valência preenche uma lacuna, uma nova lacuna surge na posição anterior, resultando em um movimento aparente das lacunas no sentido do campo elétrico (Boylestad; Nashelsky, 2013). Os aceitadores ionizados permanecem fixos na rede, enquanto elétrons e lacunas se deslocam como portadores móveis (Neamen, 2012). O mecanismo de deslocamento das lacunas é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Movimento de lacunas em material tipo p (sequência)



Fonte: Boylestad & Nashelsky (2013).

3.3.5 Crescimento e fabricação de *wafers* de silício

A indústria exige silício de altíssima pureza, tipicamente com impurezas abaixo de uma parte em 10^{10} átomos. O método Czochralski é a técnica dominante para a produção de lingotes monocristalinos: um cristal semente é imerso no silício fundido e lentamente tracionado com rotação, solidificando um lingote cilíndrico que será fatiado em *wafers*. Sobre esses substratos, emprega-se crescimento epitaxial para ajustar perfis de dopagem em camadas finas, com destaque para processos de deposição química na fase vapor (CVD), que permitem junções abruptas e controle fino do dopante, sendo isso uma etapa crucial para a fabricação de dispositivos (Neman, 2012). A combinação controlada de regiões tipo n e tipo p fundamenta a operação de dispositivos semicondutores clássicos (Boylestad; Nashelsky, 2013).

3.4 SÍNTESE DE FILMES DE DIAMANTE POR CVD

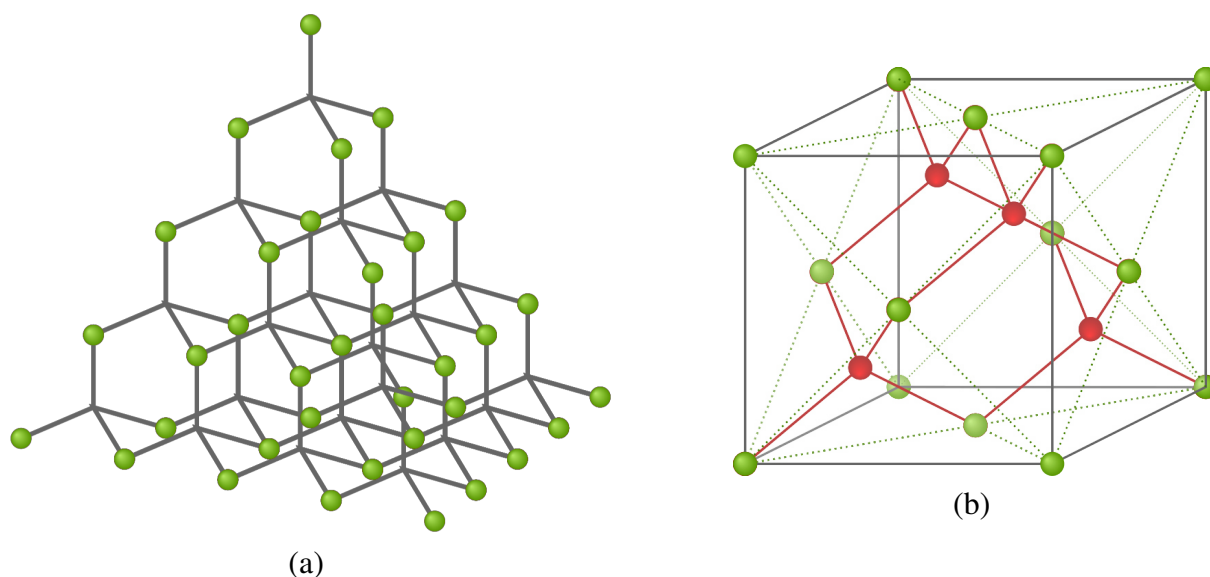
Em 1952, William Eversole, da Union Carbide, realizou a primeira síntese documentada e reprodutível de diamante. Esse feito foi alcançado através de um método a baixas pressões, ou seja, pelo método de deposição química a partir da fase vapor (CVD) (Angus, 2014; Barros *et al.*, 2005).

3.4.1 Estrutura cristalina do diamante

O diamante representa a forma de carbono mais concentrada, possuindo uma estrutura ditada pela hibridização sp^3 dos elétrons de valência. Através dela, cada átomo de carbono compartilha seus quatro elétrons com átomos adjacentes, estabelecendo uma unidade tetraédrica com comprimento de ligação de aproximadamente 1,54 Å. Essa hibridização sp^3 gera ligações covalentes (as mais fortes conhecidas) que conferem ao diamante suas propriedades únicas. Os ângulos entre as ligações são idênticos ($109^{\circ}28'$), garantindo uma separação homogênea entre os átomos de carbono (Nor *et al.*, 2010), como pode ser observado na Figura 13a.

Quanto à sua estrutura cristalina, a unidade repetitiva do diamante é composta por oito átomos em uma organização fundamentalmente cúbica, como visto na Figura 13b. Esse arranjo cúbico e altamente simétrico permite que os cristais de diamante adotem diferentes hábitos (formatos). O mais comum é o octaedro, mas eles também podem se manifestar como cubos, dodecaedros ou combinações destas formas (Nor *et al.*, 2010).

Figura 13 – Estrutura cristalina do diamante: (a) rede tridimensional das ligações tetraédricas entre átomos de carbono, (b) célula unitária cúbica



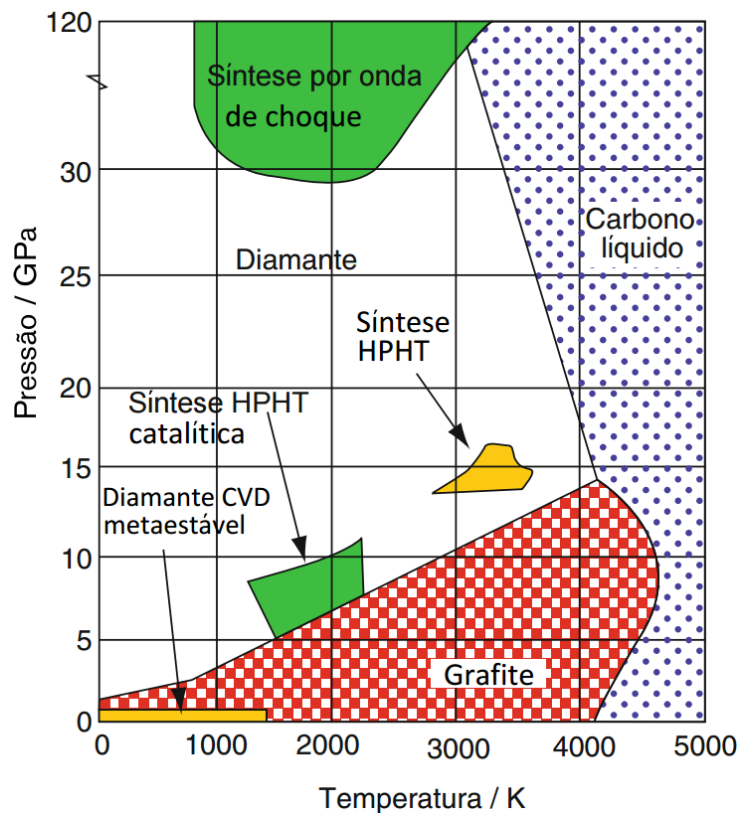
Fonte: Adaptado de Physics in a Nutshell (2025)).

3.4.2 Método HFCVD: princípios e operação

As pesquisas iniciais sobre a síntese de filmes de diamante por métodos CVD empregavam principalmente a decomposição térmica dos gases utilizados como fontes de carbono. Esses métodos iniciais permitiram o crescimento homoepitaxial de diamante a pressões menores que 1 atm com temperaturas mantidas próximas a 900 °C, entretanto com uma taxa de crescimento de 1 nanômetro por hora. O crescimento homoepitaxial do diamante consiste no fato de que a deposição da camada de diamante sintético ocorre sobre um substrato de mesma composição e estrutura, ou seja, cristais de diamante natural como substrato, resultando em uma continuidade estrutural entre a camada depositada e o substrato. Pesquisas posteriores a essas demonstraram a possibilidade do crescimento de diamante CVD em superfícies diferentes do diamante, na presença de átomos de hidrogênio durante a deposição química (Srikanth; Jiang, 2011).

A relação entre temperatura e pressão que possibilita a formação do diamante é representada na Figura 14, no diagrama de fases do carbono, o qual evidencia as regiões de estabilidade do grafite, do diamante e do carbono líquido, bem como as faixas de operação dos principais métodos de síntese, como HPHT, CVD e síntese por onda de choque (Nor *et al.*, 2010).

Figura 14 – Diagrama de fases do carbono



Fonte: Adaptado de Nor *et al.* (2010).

O método mais difundido na síntese de filmes finos de diamante CVD é a deposição química em fase de vapor por filamento quente (do inglês *Hot Filament Chemical Vapor Deposition*, sigla HFCVD) (Barros *et al.*, 2005). Essa técnica possibilita o crescimento de diamantes em baixas pressões, na ordem de 20 a 40 Torr ($\sim 2,67$ a $5,33 \times 10^{-6}$ GPa), e temperaturas relativamente baixas em comparação com o método HPHT (Srikanth; Jiang, 2011). Para isso, utilizam-se filamentos de metais refratários, como tungstênio, tântalo e rênio, que devem ser aquecidos a temperaturas acima de 2000 °C para realizar a decomposição térmica das moléculas da mistura gasosa. A taxa de crescimento do diamante no método HFCVD é aplicável para fins industriais, sendo ela por volta de $1 \mu\text{m h}^{-1}$ (Srikanth; Jiang, 2011).

A mistura gasosa utilizada no método HFCVD consiste de gás metano (CH_4) altamente diluído em hidrogênio (H_2). Essa mistura é introduzida na câmara do reator, que contém filamentos quentes posicionados a uma distância de alguns milímetros (8-10 mm) acima do substrato, que por sua vez chegam a uma temperatura de aproximadamente 700 °C a 900 °C. Quando as moléculas gasosas entram em contato com a superfície dos filamentos aquecidos, ocorre sua decomposição térmica, gerando radicais de hidrocarboneto (CH_2^\bullet , CH^\bullet , C^\bullet) e átomos de hidrogênio (H^\bullet) (Barros *et al.*, 2005; Nor *et al.*, 2010; Srikanth; Jiang, 2011).

O processo de crescimento do diamante por CVD começa pela geração de sítios ativos na superfície, resultante de reações de abstração de hidrogênio, conforme descrito na Equação 1. Em sequência, radicais de hidrocarbonetos, principalmente CH_3^\bullet , adsorvem-se nesses sítios ativos, como apresentado na Equação 2, onde o termo C_d representa um radical superficial. A quantidade de sítios disponíveis para nucleação é determinada pelo equilíbrio entre os processos de ativação superficial, descritos pela Equação 1, e de passivação, decorrentes da recombinação com hidrogênio, conforme a Equação 3 (Srikanth; Jiang, 2011).



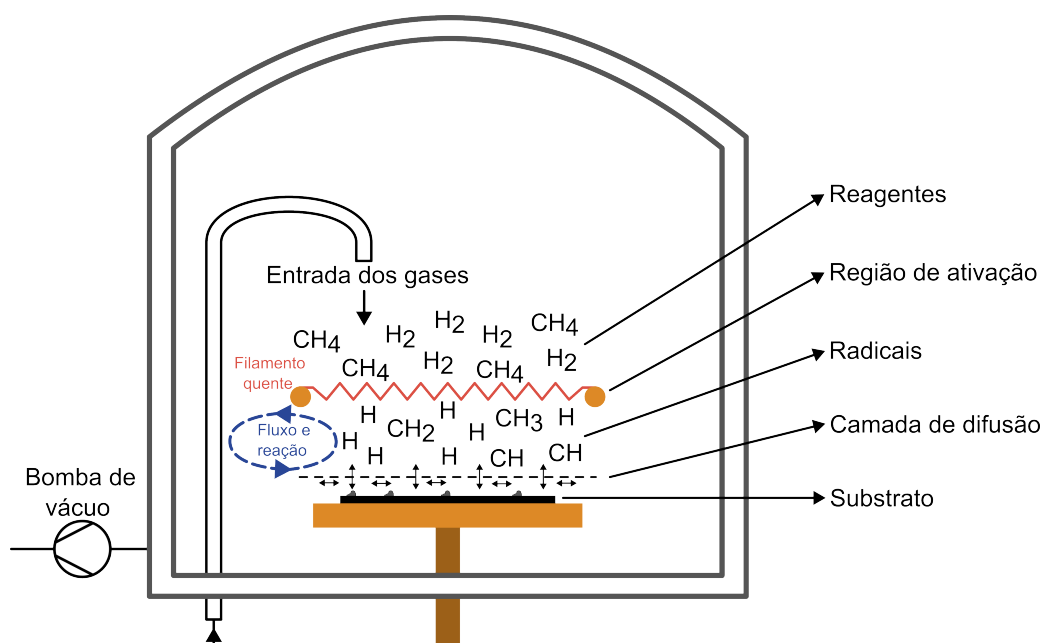
3.4.3 Reações de superfície e formação do filme no substrato

O radical metila (CH_3^\bullet), espécie predominante, difunde-se na superfície e adsorve-se nas regiões ativadas, onde tem início a nucleação cristalina. O átomo de carbono do radical ancora-se ao substrato, enquanto seus três hidrogênios são removidos por reação com hidrogênio atômico, formando H_2 , ou por combinação com outro CH_3^\bullet , gerando CH_4 . Cada remoção libera uma ligação no carbono superficial, permitindo a incorporação de um novo radical metila. Esse ciclo de adição e abstração, descrito pela Equação 2, repete-se continuamente, originando os grãos cristalinos que constituem o filme fino de diamante (Barros *et al.*, 2005; Nor *et al.*, 2010; Srikanth; Jiang, 2011).

Os demais radicais de hidrocarbonetos (CH_2^\bullet , CH^\bullet , C^\bullet) também contribuem para o crescimento do filme, porém com participação significativamente menor que o metila, desempenhando papel secundário no processo (Barros *et al.*, 2005; Nor *et al.*, 2010).

A Figura 15 ilustra de forma simplificada o método HFCVD no interior de um reator, evidenciando a decomposição térmica da mistura CH_4/H_2 sobre o filamento aquecido e a subsequente difusão dos radicais formados (H^\bullet , CH^\bullet , CH_2^\bullet , CH_3^\bullet) em direção ao substrato, conforme descrito anteriormente.

Figura 15 – Esquema simplificado da decomposição térmica no método HFCVD



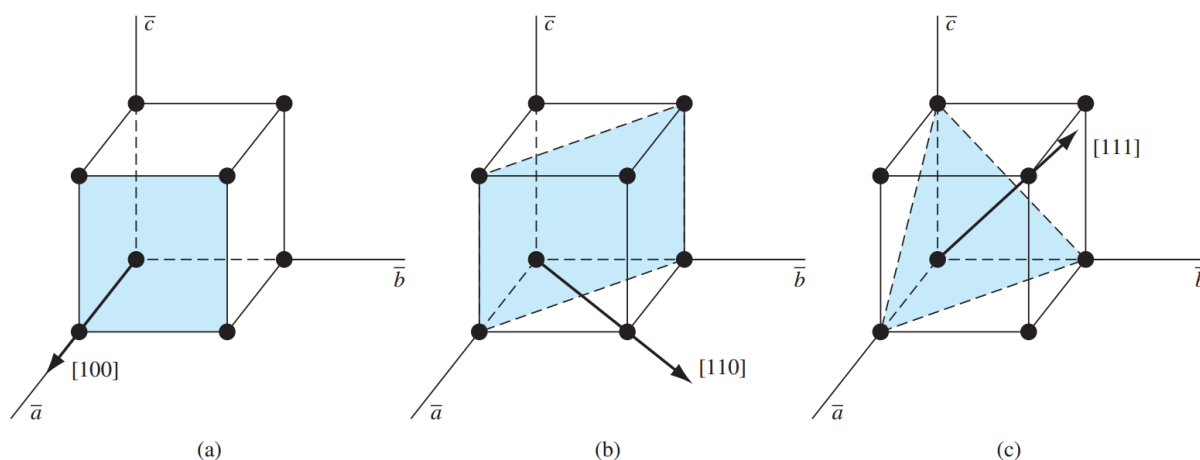
Fonte: Adaptado de Nor *et al.* (2010).

3.4.4 Substrato de silício e sua preparação superficial

No contexto do método de deposição química a vapor (CVD), o silício é amplamente adotado como substrato por combinar disponibilidade, compatibilidade com processos industriais e possibilidade de preparação superficial. Ainda assim, o desempenho do filme depende de fatores como o desajuste de rede e a incompatibilidade térmica entre filme e substrato, além da eventual formação de camadas intermediárias de carvão, que podem favorecer a nucleação e o crescimento do diamante sobre Si (Nor *et al.*, 2010).

Como dito anteriormente, a rede cristalina do Si é do tipo diamante. Suas direções e planos são descritos pelos índices de Miller, que definem a orientação em estruturas cúbicas. A escolha da face cristalina influencia diretamente a energia superficial e a densidade de sítios reativos. As direções [100], [110] e [111] apresentam empacotamentos atômicos distintos e, portanto, diferentes energias de ligação e cinéticas de adsorção, com impacto na nucleação e no crescimento durante CVD (Ma; Lu; Zhang, 2023; Neamen, 2012). A Figura 16 mostra esquemas das principais direções cristalográficas.

Figura 16 – Três direções cristalográficas e seus respectivos planos: (a) plano (100) e direção [100], (b) plano (110) e direção [110], (c) plano (111) e direção [111]



Fonte: Neamen (2012).

A eficiência do Si como substrato também varia com a orientação cristalográfica e com o tipo de dopagem. Em geral, amostras do tipo n favorecem o acoplamento no método CVD por plasma (PECVD) e a deposição quando comparadas às do tipo p (Ma; Lu; Zhang, 2023). Além disso, a orientação [111], por apresentar maior densidade atômica linear, tende a oferecer mais sítios para a formação de ligações sp^3 , resultando em filmes de maior dureza quando comparada à [100] (Ma; Lu; Zhang, 2023; Neamen, 2012). Segundo Ma, Lu & Zhang (2023), diferenças no ponto de viragem de potência e nos modos de condução, com elétrons dominando em substratos tipo n e lacunas em substratos tipo p, evidenciam que a microestrutura do filme responde às propriedades elétricas e à orientação do substrato.

Como a nucleação em Si polido é naturalmente limitada, procedimentos de preparação superficial são recomendados. Estratégias como abrasão com pasta de diamante ou implantação iônica de Si^+ geram defeitos em nanoescala, elevam a densidade de núcleos e aumentam a taxa de crescimento, sem alterar a composição do substrato (Nor *et al.*, 2010; Srikanth; Jiang, 2011).

Embora o custo por quilate de diamante CVD venha diminuindo, o investimento de capital permanece significativo. Por isso, a seleção do silício e a otimização do seu preparo superficial são determinantes para a viabilidade econômica do processo (Asmussen; Reinhard, 2002).

O método CVD, particularmente em sua modalidade HFCVD, consolidou-se como alternativa viável à síntese HPHT ao permitir a deposição de filmes de diamante em condições de pressão e temperatura significativamente mais brandas. O processo fundamenta-se na decomposição térmica de misturas de metano e hidrogênio sobre filamentos metálicos aquecidos, gerando radicais que promovem a nucleação e o crescimento de filmes finos de diamante. Além disso, a escolha do substrato e sua preparação superficial influenciam diretamente a qualidade do filme e a viabilidade do processo (Asmussen; Reinhard, 2002; Nor *et al.*, 2010).

3.5 PROPRIEDADES DOS FILMES DE DIAMANTE

O diamante puro é constituído unicamente por átomos de carbono (C). Esses átomos estão organizados em uma estrutura cristalina, onde cada átomo de carbono forma ligações covalentes com quatro outros átomos de carbono vizinhos, criando um arranjo tetraédrico muito forte e rígido (Asmussen; Reinhard, 2002).

As propriedades excepcionais do diamante e, conseqüentemente, dos filmes de diamante CVD possibilitam uma vasta gama de aplicações úteis. O diamante possui extrema dureza, alta condutividade térmica, alta resistividade elétrica, baixo coeficiente de atrito, elevado grau de inércia química, baixa função de trabalho de elétrons, grande lacuna de energia, baixa absorção de infravermelho e alta tensão de ruptura (Asmussen; Reinhard, 2002).

A Tabela 3 apresenta uma comparação das principais propriedades do diamante em relação a semicondutores estabelecidos como silício, carbeto de silício, nitreto de gálio e óxido de gálio (Nebel, 2023).

Tabela 3 – Propriedades básicas do diamante em comparação com Si, 4H-SiC, GaN e Ga₂O₃

Propriedades/Materiais	Diamante	Si	4H-SiC	GaN	Ga ₂ O ₃
Band gap (eV)	5,47	1,12	3,26	3,4	4,5–5,3
Mobilidade de elétrons (cm ² /Vs) (300 K)	1900–2300	1500	900	1250	200–300
Mobilidade de lacunas (cm ² /Vs) (300 K)	1500–2300	600	100	200	–
Constante dielétrica	5,7	11,9	9,7	9,5	10
Condutividade térmica (W/cmK)	25	1,48	4,9	1,3	0,27
Velocidade de saturação de elétrons (10 ⁷ cm/s)	2,7	1	2,7	2,7	2
Campo de ruptura (10 ⁵ V/cm)	100	3	30	30	80
Dureza (kg/mm ²)	10000	1000	4000	>1200	–
Temperatura de Debye (K)	1860	645	1200	608	738

Fonte: Adaptado de Nebel (2023).

Certas propriedades do diamante são incomparáveis e excepcionais. Por exemplo, o diamante apresenta a maior dureza de qualquer material conhecido, registrando 10 na escala de Mohs em termos de arranhões e abrasões, devido à sua estrutura cristalina altamente covalente. Além disso, possui a maior condutividade térmica, com um valor experimental de aproximadamente $20 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$ à temperatura ambiente, cinco vezes maior que o cobre. Isso o torna um excelente material para a dissipação eficiente de calor em aplicações eletrônicas. Além disso, a alta inércia química do diamante, o torna muito resistente a ácidos e bases (Asmussen; Reinhard, 2002).

3.5.1 Propriedades mecânicas e elásticas

A compressibilidade do diamante, ou seja, sua relação entre a tensão de tração e a deformação linear, também chamada de módulo de Young, tem o valor de 1050 GPa, sendo aproximadamente cinco vezes maior que o do aço (Asmussen; Reinhard, 2002; Davis, 1993). Valores

reportados na literatura chegam a 1200 GPa, significativamente superiores aos 130 GPa do silício e 448 GPa do carbeto de silício (Nebel, 2023). Além disso, a sua resistência à clivagem é de aproximadamente 400 kg/mm^2 (Asmussen; Reinhard, 2002).

Apresentando um baixo coeficiente de atrito, com valor próximo ao do Teflon (0,05), o diamante é ideal para aplicações em revestimentos anti-desgaste e rolamentos (Asmussen; Reinhard, 2002; Davis, 1993).

Na faixa de valores de temperatura de 300 K a 1200 K , o diamante apresenta um coeficiente de dilatação térmica de $0,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ a $4,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ com o aumento da temperatura. Esses valores, expressos com unidade de medida de K^{-1} , são baixos em comparação com outros materiais. Tal propriedade é de grande utilidade em dispositivos que requerem operação em altas temperaturas (Asmussen; Reinhard, 2002).

3.5.2 Propriedades elétricas

O diamante puro apresenta um band gap com um valor de 5,47 eV a uma temperatura de 300 K. Esse valor é grande o suficiente para que, em temperaturas próximas da temperatura ambiente, o material seja um isolante, com uma constante dielétrica de aproximadamente 5,7, pois a concentração de portadores intrínsecos é desprezível. Ademais, a resistividade do diamante puro varia entre 10^{14} a $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ (Asmussen; Reinhard, 2002).

Através da dopagem do diamante com o elemento boro (B), há um aumento da quantidade de lacunas na banda de valência e, conseqüentemente, ocorre a redução de sua resistividade elétrica proporcionalmente ao aumento da concentração de boro introduzido no material. A resistividade do diamante dopado com boro pode chegar a valores tão baixos quanto $0,1 \Omega \cdot \text{cm}$. Portanto, o diamante dopado com boro pode ser utilizado como um semicondutor do tipo p (Asmussen; Reinhard, 2002). O diamante dopado com boro apresenta uma ampla janela eletroquímica de aproximadamente 3,5 V combinada com baixíssimas correntes residuais, destacando-se em aplicações eletroquímicas (Nebel, 2023).

3.5.3 Propriedades ópticas

O diamante puro apresenta um índice de refração de 2,4 em 600 nm. Sendo assim, sua transmissão óptica é excepcionalmente ampla, possuindo a maior banda de transmissão óptica entre os materiais sólidos, abrangendo desde a região do ultravioleta (com corte em aproximadamente 225 nm) até o infravermelho distante, exibindo propriedades ópticas notáveis (Nebel, 2023). Além disso, o diamante puro apresenta alta transparência no espectro visível. Na região infravermelha de 2,5 e 6 μm , ocorre absorção óptica devido à excitação de fônons, com coeficiente máximo próximo a 12 cm^{-1} . Impurezas podem alterar essas propriedades, conferindo coloração ou opacidade ao material (Asmussen; Reinhard, 2002).

3.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DO FILME DE DIAMANTE

3.6.1 Microscopia Óptica de Reflexão

Dado que o contraste inerente na microestrutura da maioria dos materiais é muito sutil para o olho humano, técnicas de contraste, como as descritas a seguir, são necessárias para uma visualização adequada (Leal, 2000).

A microscopia de reflexão é uma técnica analítica voltada à observação da luz refletida pela superfície da própria amostra, especialmente apropriada para o estudo de materiais com alta refletividade, como metais e determinados tipos de revestimentos. Em sistemas confocais, a iluminação é concentrada sobre o espécime por meio da lente objetiva, e a porção refletida da luz retorna pelo mesmo trajeto óptico, sendo detectada após atravessar espelhos e diafragmas para a formação da imagem (Leal, 2000).

O funcionamento da microscopia de reflexão baseia-se no princípio da epi-iluminação, em que a luz incide diretamente sobre a superfície do material, sendo empregado quando o objeto de estudo não é translúcido (Leal, 2000).

3.6.1.1 Microscopia de Campo Claro

A microscopia de campo claro é uma das técnicas microscópicas mais comuns, frequentemente adotada em laboratórios pela sua simplicidade. Em sua configuração por transmissão, o princípio de funcionamento consiste em iluminar a amostra por baixo, geralmente com uma lâmpada de LED ou halogênio. A luz que atravessa o espécime é então coletada e ampliada pelas lentes do sistema. O resultado é uma imagem na qual a amostra, que absorve parte da luz, aparece como uma silhueta escura contra um fundo claro iluminado (Yoshikura, 2023).

Quando aplicada à microscopia de reflexão, a técnica de campo claro adapta o mesmo princípio óptico, porém empregando a epi-iluminação para gerar contraste. Nesse caso, a luz incide sobre a superfície do espécime e o contraste é produzido pela fração refletida, resultando em uma imagem que evidencia as características superficiais do material (Leal, 2000).

3.6.1.2 Microscopia de Polarização

A principal função da microscopia de polarização é identificar propriedades materiais como a birrefringência. O sistema utiliza um primeiro filtro (polarizador) para criar luz que vibra em um único plano. Um segundo filtro (analisador), posicionado de forma cruzada, normalmente bloquearia essa luz. No entanto, se uma amostra birrefringente for inserida entre eles, ela divide o feixe de luz em dois novos vetores ortogonais, que são característicos do seu arranjo cristalino. Como esses dois vetores viajam em velocidades de propagação diferentes, eles conseguem passar pelo analisador, tornando a estrutura visível. A técnica permite, assim, observar a orientação dos planos cristalinos, e o uso de um compensador (outro filtro birrefringente) auxilia na identificação dos eixos rápidos e lentos da amostra (Leal, 2000).

3.6.1.3 Microscopia de Contraste Interferencial Diferencial

A técnica de contraste interferencial diferencial (DIC), ou Nomarski, é considerada um dos métodos de contraste mais importantes da microscopia óptica por gerar imagens com um nítido aspecto tridimensional. Seu princípio baseia-se em dividir a luz polarizada em duas frentes, fazê-las atravessar a amostra em caminhos ligeiramente diferentes e, em seguida, recombiná-las. Ao serem recombinadas, as frentes interferem entre si. O contraste da imagem é gerado justamente pelas modificações que a amostra causou em cada frente (devido a variações de densidade, espessura ou índice de refração). O aparato óptico que realiza essa tarefa consiste em um polarizador, um prisma birrefringente no condensador (para dividir a luz), um segundo prisma (de Wollaston, na objetiva) e um analisador (para recombinar as frentes e permitir a interferência) (Leal, 2000).

3.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) representa uma ferramenta essencial na análise morfológica de filmes de diamante CVD. Segundo Barros *et al.* (2005), esta técnica permite investigar aspectos topográficos e morfológicos das superfícies dos filmes depositados. A aplicação da MEV, conforme observado por Asmussen & Reinhard (2002), caracteriza-se por sua natureza predominantemente qualitativa, sendo particularmente eficaz na observação de características superficiais e de fenômenos relacionados ao crescimento, tais como formações em degraus e estruturas insulares presentes nas superfícies diamantadas. Embora a técnica forneça imagens visualmente ricas em informações sobre a estrutura cristalina, Nor *et al.* (2010) destaca uma limitação significativa: a incapacidade de identificar a composição química do material analisado sem o auxílio de técnicas complementares. Além disso, o autor adverte que a aparência externa dos cristais pode ser enganosa, uma vez que estruturas cristalinas com morfologia aparentemente adequada podem conter camadas subjacentes de carbono amorfo, as quais não são detectáveis por meio de uma análise morfológica isolada.

3.6.3 Espectrometria por Dispersão de Energia

A espectrometria por dispersão de energia (EDS) é uma técnica analítica acoplada ao microscópio eletrônico de varredura que possibilita identificar a composição química dos materiais. Seu princípio baseia-se na equação de Planck, segundo a qual a energia dos fótons de raios X emitidos pela amostra relaciona-se diretamente à sua frequência eletromagnética. O sistema detector opera rapidamente, registrando simultaneamente fótons em diferentes comprimentos de onda e gerando histogramas que correlacionam a energia (em keV) com a quantidade de fótons captados (Dedavid; Gomes; Machado, 2007).

Durante a análise, é possível examinar toda a área varrida pelo feixe eletrônico ou concentrar-se em regiões pontuais, lineares ou específicas da superfície. A interpretação dos resultados fundamenta-se em bancos de dados que associam as energias características aos

elementos presentes, embora a técnica apresente limitações de sensibilidade, não detectando elementos leves como hidrogênio, lítio e berílio (Dedavid; Gomes; Machado, 2007).

A escolha adequada da tensão de aceleração é fundamental para otimizar a excitação dos elementos de interesse. Recomenda-se utilizar tensões de até 10 kV para elementos leves e superiores a 10 kV para elementos mais pesados, considerando que a produção máxima de fótons ocorre quando a tensão aplicada é aproximadamente 2,5 vezes maior que a energia dos fótons desejados (Dedavid; Gomes; Machado, 2007).

3.6.4 Espectroscopia Raman

Entre as técnicas de caracterização, a espectroscopia Raman consolidou-se como método de referência para a avaliação quantitativa de filmes de diamante CVD. A técnica apresenta elevada capacidade de distinguir diferentes arranjos de ligações carbônicas, viabilizando a discriminação entre as diversas formas alotrópicas do carbono, como diamante, grafite, fases amorfas e carbono hidrogenado (Davis, 1993).

De acordo com Barros *et al.* (2005), a análise Raman possibilita o estudo da microestrutura dos filmes através da detecção de ligações sp^2 , além de fornecer informações sobre tensões internas geradas pela inserção de dopantes na estrutura cristalina do diamante. A identificação das diferentes formas de carbono é possível através de suas assinaturas espectrais características: o diamante cristalino apresenta um sinal nítido em $\sim 1332\text{ cm}^{-1}$, o grafite exibe modos ativos próximos de 1580 cm^{-1} (com banda adicional em $\sim 1355\text{ cm}^{-1}$ para a forma microcristalina), enquanto materiais amorfos mostram bandas largas em aproximadamente 1550 cm^{-1} e 1355 cm^{-1} (Davis, 1993; Nor *et al.*, 2010). Conforme destacado por Nor *et al.* (2010), a técnica demonstra particular eficiência na detecção de fases grafíticas, cuja intensidade de sinal supera significativamente aquela produzida pelo diamante. Entretanto, Davis (1993) alerta para uma limitação importante: pequenas quantidades de ligações sp^2 podem dominar o espectro devido às diferenças nas seções transversais de espalhamento, podendo mascarar a presença de fase diamante e tornando a interpretação dos resultados mais complexa.

3.6.5 Difração de Raios X

A Difração de Raios X (DRX) configura-se como uma metodologia não destrutiva aplicada à determinação de parâmetros cristalográficos e à avaliação do grau de cristalinidade dos filmes. Conforme descrito por Barros *et al.* (2005), a técnica fornece informações sobre orientação preferencial dos cristalitos, composição de fases e características estruturais dos materiais depositados. Nor *et al.* (2010) explica que a técnica fundamenta-se na interação entre radiação X e os elétrons atômicos, produzindo padrões de difração característicos sob condições geométricas específicas determinadas pela lei de Bragg. A análise dos difratogramas permite evidenciar a presença de estruturas cristalinas diamantadas e, em determinadas condições, grafíticas, embora a detecção de fases amorfas apresente limitações, não sendo essas fases adequadamente

identificadas por essa técnica (Nor *et al.*, 2010). Adicionalmente, o autor ressalta que deslocamentos nas posições dos picos de difração fornecem informações sobre o estado de tensões do filme: deslocamentos para ângulos maiores indicam compressão, enquanto deslocamentos para ângulos menores sugerem tração. Estas tensões residuais, originadas da incompatibilidade entre diamante e substrato, influenciam diretamente a adesão do filme depositado (Nor *et al.*, 2010).

3.6.6 Técnicas Complementares de Caracterização

O conjunto de técnicas disponíveis para caracterização de filmes de diamante CVD estende-se além dos métodos principais, podendo ser empregadas de forma combinada para análises mais abrangentes. Barros *et al.* (2005) apresenta um panorama dessas metodologias complementares: a Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM) oferece resolução superior à MEV, sendo apropriada para identificação de defeitos cristalinos e análise estrutural interna; a Microscopia de Força Atômica (AFM) proporciona avaliação topográfica em escala nanométrica; a Espectroscopia Eletrônica Auger (AES) viabiliza a análise composicional de superfícies e interfaces; a Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por Raio-X (XPS) permite caracterização química das camadas superficiais; e a Espectrometria de Massa de Íon Secundário (SIMS) possibilita a quantificação de dopantes e o mapeamento de sua distribuição espacial nos filmes. Davis (1993) complementa que as microscopias eletrônicas, tanto por transmissão quanto por varredura, alcançam ampliações entre 1000 a 450 000 vezes, com elevada resolução. Cada técnica, entretanto, apresenta aplicações preferenciais: a microscopia eletrônica de transmissão (TEM) mostra-se mais eficiente na análise de características estruturais internas, enquanto a microscopia eletrônica de varredura (MEV) destaca-se na avaliação de propriedades morfológicas de superfície.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve em detalhes o processo de pesquisa. A seção de Preparação dos Filmes explica a síntese do material, incluindo a preparação do substrato e os parâmetros de deposição. A seguir, as técnicas de caracterização são apresentadas: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) para análise morfológica e elementar, e Microscopia Óptica para avaliação inicial.

4.1 PREPARAÇÃO DOS FILMES DE DIAMANTE CVD

A síntese dos filmes de diamante foi realizada através da técnica de deposição química em fase vapor por filamento quente (HFCVD), empregando-se um reator equipado com filamentos de tungstênio como fonte de ativação térmica dos gases precursores.

Como substratos para o crescimento dos filmes finos de diamante, foram selecionadas pastilhas (*wafers*) comerciais de silício monocristalino de grau semicondutor, compreendendo duas configurações eletrônicas distintas: silício dopado tipo p e silício de alta pureza (intrínseco). Os substratos de silício tipo p e os substratos de silício intrínseco apresentavam orientação cristalográfica [100], ambos com espessura nominal padronizada de 0,5 mm e acabamento superficial polido especular.

A escolha destes substratos visou investigar a influência das propriedades do substrato sobre o crescimento do diamante CVD, utilizando o silício intrínseco como controle para avaliar os efeitos da dopagem tipo p nas características dos filmes depositados.

Antes do processo de crescimento do filme, as pastilhas de silício passaram por tratamento de superfície para otimizar a nucleação. O procedimento consistiu em polimento manual utilizando tecido e pasta diamantada contendo grãos micrométricos de diamante. Após o polimento, realizou-se limpeza dos wafers utilizando um limpador ultrassônico (Instrutherm modelo LU-200) em solução de partes iguais de água destilada e álcool etílico, visando à remoção completa do excesso de pasta da superfície do silício.

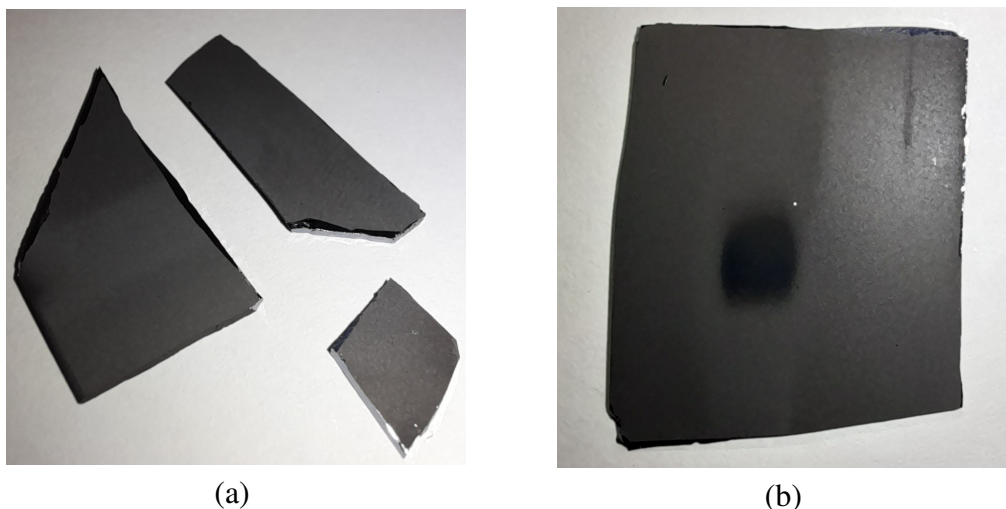
O reator de filamento quente foi configurado para operar sob pressão controlada de 20 Torr, mantendo um fluxo total de gases de 200 sccm (*Standard Cubic Centimeter per Minute*). A atmosfera reacional consistiu em uma mistura de metano (1,5% v/v) e hidrogênio (98,5% v/v), onde o metano atuou como fonte de carbono. Já o hidrogênio, dissociado pelo filamento aquecido em hidrogênio atômico, promoveu a decomposição do metano e o aquecimento do substrato para a deposição do diamante.

Os filamentos de tungstênio foram responsáveis pelo aquecimento dos substratos, mantendo uma temperatura aproximada de 800 °C, monitorada através de um termopar instalado no interior do reator.

O tempo de deposição máximo foi de 6 horas, sendo influenciado pelo estado de degradação dos filamentos de tungstênio. O envelhecimento progressivo destes filamentos afeta diretamente a eficiência de dissociação térmica e a estabilidade operacional, influenciando tanto a temperatura de processo quanto a qualidade de deposição do filme de diamante sobre o substrato de silício.

Ao término do processo de crescimento por HFCVD, observou-se a formação de um filme de diamante de coloração cinza sobre as pastilhas de silício. A transição visual das pastilhas polidas para as recobertas com filme demonstrou a eficácia do processo de deposição. Em uma das amostras, pequenas áreas circularmente delimitadas não apresentaram recobrimento, sem prejuízo às etapas de caracterização. Na Figura 17, a imagem (a) apresenta pequenos fragmentos de filme depositado sobre substrato de silício tipo p, sem defeitos aparentes, enquanto a imagem (b) corresponde a uma amostra preparada em substrato de silício intrínseco, na qual a aproximação excessiva do filamento de tungstênio durante a deposição ocasionou dano térmico, resultando em uma área, na região central, sem cobertura por filme.

Figura 17 – Amostras de filmes de diamante obtidos por HFCVD: (a) fragmentos sem defeitos visíveis, (b) porção com dano térmico



Fonte: Autoria própria.

As amostras de filme fino de diamante depositadas sobre wafer de silício foram cortadas em pequenos fragmentos, com dimensões adequadas para fixação nos porta-amostras de alumínio por meio de fita de carbono condutiva, garantindo bom contato elétrico para as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Embora o diamante puro seja isolante, a presença do substrato de silício e o uso de fita condutiva permitiram a obtenção das imagens sem necessidade de metalização prévia. Para as análises de microscopia óptica, não foi requerido tratamento superficial adicional devido à natureza refletiva dos filmes de diamante.

4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA DE REFLEXÃO

As análises morfológicas preliminares foram realizadas por meio de microscopia óptica de reflexão utilizando um microscópio motorizado Zeiss Axio Imager Z2m. Foram empregadas três técnicas de contraste distintas: campo claro, polarização linear e contraste por interferência diferencial (DIC).

As observações foram conduzidas utilizando objetivas de diferentes aumentos, permitindo magnificações de 1000× e 1600×. A iluminação foi otimizada para cada técnica, utilizando fonte de luz branca com controle de intensidade para campo claro e sistema de polarização cruzada para DIC.

A técnica de campo claro foi empregada para análise morfológica básica, permitindo visualização da homogeneidade superficial dos filmes, identificação de defeitos macroscópicos e avaliação da cobertura do substrato. A polarização linear foi utilizada para caracterizar a birrefringência dos materiais e determinar a orientação cristalográfica das estruturas presentes. O DIC foi aplicado para realçar variações de relevo, topografia e espessura, além da identificação de defeitos como riscos, inclusões ou heterogeneidades na superfície dos filmes, proporcionando caracterização da textura superficial com maior sensibilidade.

As análises por microscopia óptica objetivaram caracterizar morfolologicamente os resultados de forma complementar ao MEV, avaliar a homogeneidade superficial em escala micrométrica, identificar defeitos visíveis opticamente, documentar a qualidade geral dos filmes depositados e correlacionar características ópticas e morfológicas.

4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As análises morfológicas de alta resolução foram realizadas por meio de microscopia eletrônica de varredura utilizando um microscópio Zeiss EVO LS 15. O equipamento operou com tensões elétricas de aceleração de 8 kV e 15 kV, distância de trabalho de 8,5 a 10 mm e magnificações de 5.000× e 20.000×, dependendo da característica analisada.

Utilizaram-se três tipos de detectores com finalidades distintas: detector de elétrons secundários (SE) para análise topográfica de alta resolução, detector de elétrons retroespalhados (BSE) para contraste composicional e detector padrão de elétrons secundários (SCD) para análise morfológica geral.

As análises por MEV tiveram como objetivo avaliar a morfologia superficial dos filmes depositados, a homogeneidade da cobertura do substrato, a presença de defeitos como trincas, poros ou inclusões, e o tamanho e distribuição dos grãos de diamante.

4.4 ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA

As análises composicionais foram realizadas utilizando sistema de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) acoplado ao microscópio eletrônico de varredura. Para análise composicional por EDS, utilizou-se tensão de aceleração de 8 kV. A determinação da tensão mínima de excitação dos elétrons foi realizada a partir de uma tabela periódica para análise de EDS, considerando os elementos carbono (C), tungstênio (W), silício (Si) e boro (B). Para as análises foram empregadas duas estratégias complementares: análise de área para determinação da composição média regional e análise pontual para caracterização de regiões específicas de interesse. Esta abordagem dual permitiu avaliar tanto a homogeneidade composicional do filme em escala micrométrica quanto possíveis variações locais na microestrutura.

A utilização de EDS visou determinar a composição elementar dos filmes em diferentes regiões das amostras, avaliar a pureza dos filmes de diamante depositados, identificar possíveis contaminantes ou elementos residuais do processo de deposição, e quantificar a presença dos elementos constituintes do substrato e do filme.

4.5 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS

As imagens de microscopia óptica foram adquiridas com câmera digital acoplada ao microscópio e processadas no software AxioVision (Zeiss) para ajuste de contraste e calibração dimensional. Foram capturadas imagens com diferentes técnicas e ampliações para caracterização morfológica. As imagens de MEV foram processadas por software para ajustes de brilho e contraste. Os espectros EDS foram processados no software AZtec (Oxford Instruments) para quantificação elementar. Para garantir a representatividade dos resultados, a análise de ambas as técnicas microscópicas partiu de duas amostras de cada condição experimental, com observação de pelo menos quatro campos aleatórios por amostra, cobrindo assim diferentes regiões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos a partir das técnicas de caracterização aplicadas aos filmes de diamante CVD, os quais foram depositados sobre substratos de silício intrínseco e tipo p. Foram empregadas as técnicas de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para realizar uma avaliação abrangente das propriedades microestruturais dos filmes.

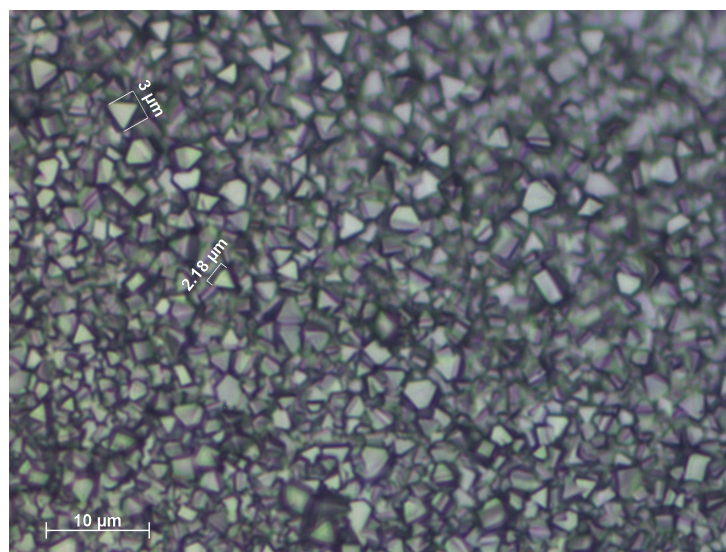
5.1 CARACTERÍSTICAS DOS FILMES DE DIAMANTE EM SUBSTRATO TIPO P

5.1.1 Microscopia óptica

A microscopia óptica foi empregada como abordagem inicial para a caracterização morfológica dos filmes de diamante CVD, permitindo a observação das características superficiais em escala mesoscópica. Esta técnica fornece informações valiosas sobre a homogeneidade, a continuidade do filme e a presença de defeitos superficiais.

A Figura 18 apresenta uma imagem de microscopia óptica em campo claro, obtida com ampliação de 1000 \times , do filme de diamante depositado sobre um substrato de silício intrínseco. A análise visual da superfície revela uma textura granular, característica de filmes policristalinos, com boa cobertura e aderência ao substrato, não sendo observados defeitos microscópicos. A medição dos grãos de diamante, realizada por software, indica que a maioria possui dimensões entre 1 e 4 micrômetros.

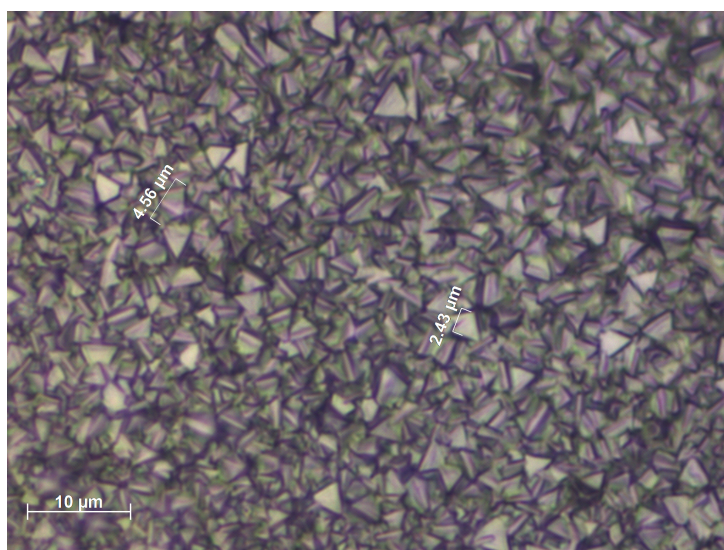
Figura 18 – Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício intrínseco (ampliação: 1000 \times , técnica: campo claro)



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 19 exibe a imagem de microscopia óptica em campo claro do filme de diamante depositado sobre substrato de silício tipo p, obtida nas mesmas condições de análise. A morfologia superficial apresenta características semelhantes às do filme sobre substrato intrínseco, com textura policristalina e boa cobertura. A medição dos grãos de diamante revela uma faixa de tamanho similar, entre 1 e 4 micrômetros, sugerindo que a dopagem do substrato não influenciou significativamente as dimensões dos grãos formados.

Figura 19 – Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício tipo p (ampliação: 1000×, técnica: campo claro)

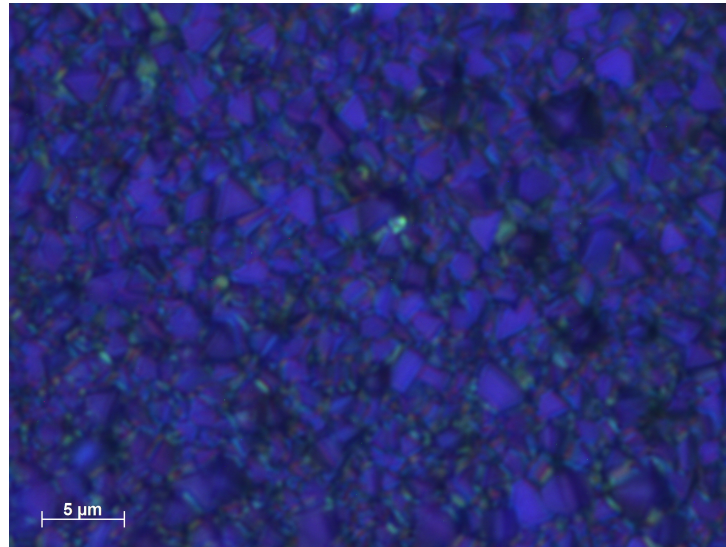


Fonte: Elaboração própria.

A técnica de campo claro, baseada na iluminação direta da amostra, proporciona uma visão geral da morfologia superficial. Ela permite identificar variações de contraste causadas por diferenças na topografia e composição, sendo útil para uma avaliação inicial. No entanto, é importante notar que essa técnica apresenta menor sensibilidade a sutis variações de relevo, podendo não revelar detalhes finos da microestrutura superficial quando comparada a modalidades de contraste, cujos resultados são apresentados na sequência.

A Figura 20 apresenta a imagem de microscopia óptica com polarização linear do filme de diamante CVD depositado sobre substrato de silício intrínseco, obtida com ampliação de 1600×. A técnica de polarização linear evidencia as diferentes orientações cristalográficas dos grãos através das variações de contraste e coloração. A coloração púrpura predominante sugere uma orientação cristalina preferencial na maior parte do filme, enquanto as sutis variações cromáticas observadas realçam os contornos que delimitam cada cristalito. Essa clara delimitação dos contornos de grão permite uma visualização mais detalhada da morfologia policristalina em comparação à técnica de campo claro.

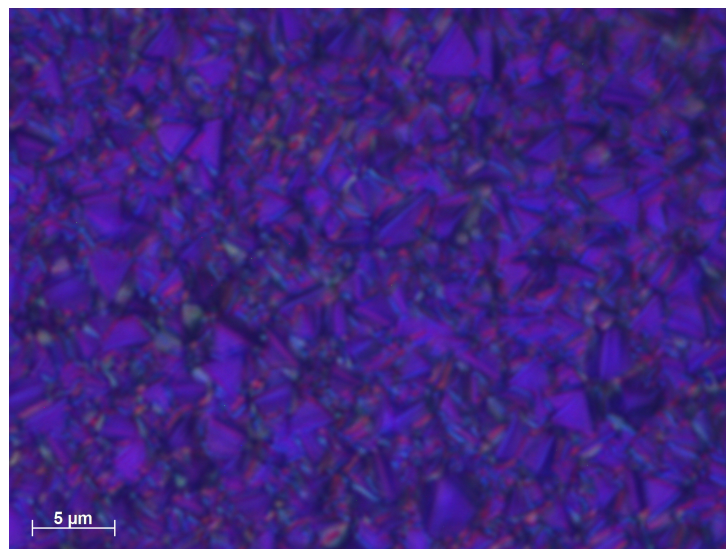
Figura 20 – Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício intrínseco (ampliação: 1600×, técnica: polarização linear)



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 21 exibe a micrografia do filme depositado sobre silício tipo p, obtida sob as mesmas condições. Observa-se uma coloração predominantemente púrpura, indicando orientações cristalográficas iguais entre os grãos. Os contornos de grão mostram-se mais nítidos que na amostra anterior, com contrastes mais pronunciados, o que pode sugerir uma estrutura com grãos de dimensões ligeiramente superiores. As variações cromáticas avermelhadas, embora mais intensas, estão concentradas nos limites de grão, não havendo evidências de defeitos ou heterogeneidades macroscópicas na superfície do filme.

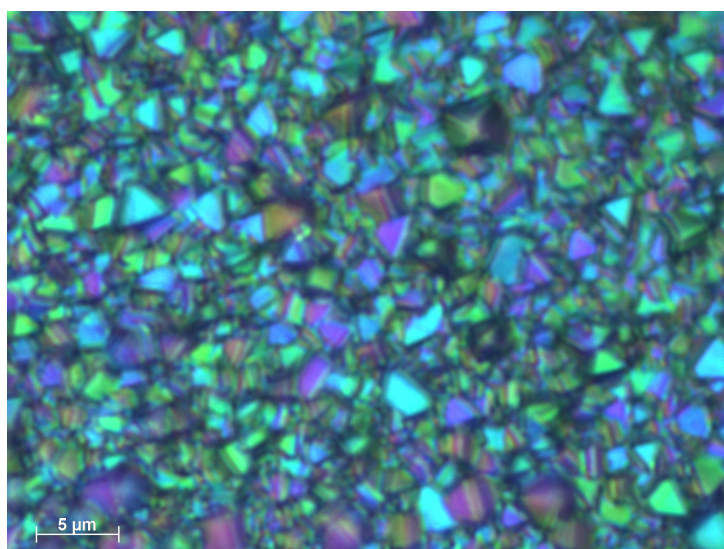
Figura 21 – Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício tipo p (ampliação: 1600×, técnica: polarização linear)



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 22 apresenta a imagem de microscopia óptica por contraste de interferência diferencial (DIC) do filme de diamante depositado sobre substrato de silício intrínseco, obtida com ampliação de 1600 \times . A análise revela uma superfície relativamente uniforme com boa cobertura do substrato, uma textura granular característica de filmes policristalinos e boa aderência ao substrato sem sinais de delaminação. A técnica DIC, sensível a pequenas variações de espessura óptica e índice de refração da amostra, proporciona padrões de interferência com coloração espectral e aparência pseudo-tridimensional. Os gradientes cromáticos observados resultam da interferência construtiva e destrutiva da luz polarizada após passagem pelo prisma de Wollaston, convertendo diferenças de fase imperceptíveis em variações de intensidade e cor, permitindo a detecção de microestruturas topográficas não visíveis nas outras imagens de microscopia.

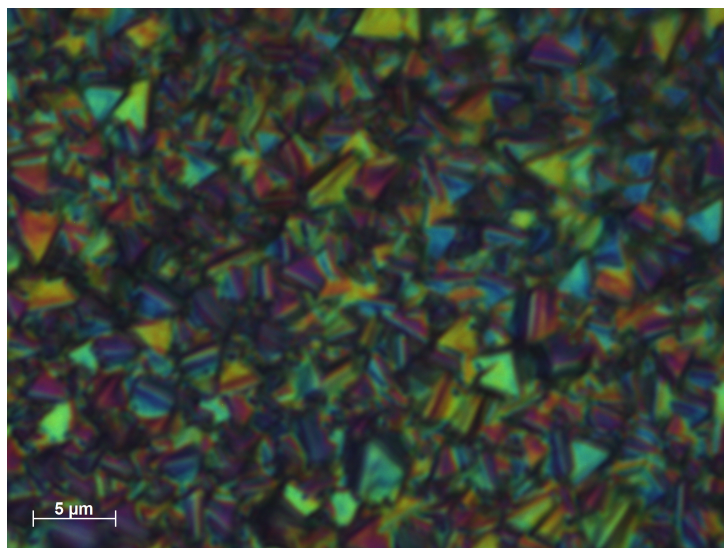
Figura 22 – Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício intrínseco (ampliação: 1600 \times , técnica: DIC)



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 23 exibe a imagem de microscopia óptica por DIC do filme de diamante depositado sobre substrato de silício tipo p, obtida nas mesmas condições de análise. A morfologia superficial apresenta características similares ao filme sobre substrato intrínseco, com textura policristalina e boa cobertura. A principal diferença observa-se na paleta de cores de interferência: tons amarelos e magentas em contraste com os verdes e azuis do substrato intrínseco. Esta variação cromática resulta da extrema sensibilidade da técnica DIC a variações minúsculas nos ajustes do microscópio ou pequenas diferenças nas propriedades ópticas dos filmes, suficientes para alterar os padrões de interferência.

Figura 23 – Imagem de microscopia óptica do filme de diamante CVD sobre substrato de silício tipo p (ampliação: 1600×, técnica: DIC)



Fonte: Elaboração própria.

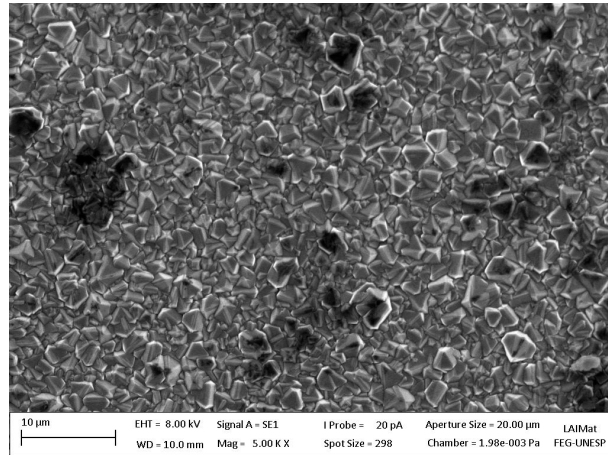
Em suma, a microscopia óptica, embora possua menor resolução quando comparada à MEV, oferece uma visão panorâmica das amostras. Essa perspectiva é fundamental para avaliar a homogeneidade em escala macroscópica e para identificar regiões de interesse que justifiquem análises mais detalhadas por técnicas de maior poder de ampliação.

5.1.2 Microscopia eletrônica de varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada para investigar as características morfológicas superficiais dos filmes finos de diamante depositados por deposição química em fase vapor (CVD). As imagens obtidas revelaram detalhes da microestrutura, uniformidade e qualidade cristalina dos filmes, possibilitando a identificação de parâmetros como rugosidade superficial, porosidade e presença de defeitos estruturais.

A Figura 24 apresenta a imagem de MEV de uma amostra de filme fino de diamante depositado sobre substrato de silício intrínseco, obtida com detector de elétrons secundários (SE) e ampliação de 5000×. A análise morfológica mostra que o filme apresenta uma microestrutura relativamente homogênea, caracterizada pela presença de cristais de diamante com distribuição granulométrica variada, resultando na formação de uma camada policristalina. Observam-se também regiões de contraste mais escuro dispersas sobre os grãos cristalinos, que podem estar associadas à presença de fases alótropas do carbono, como grafite ou carbono amorfo, ou ainda a contaminantes introduzidos durante a deposição ou manuseio da amostra.

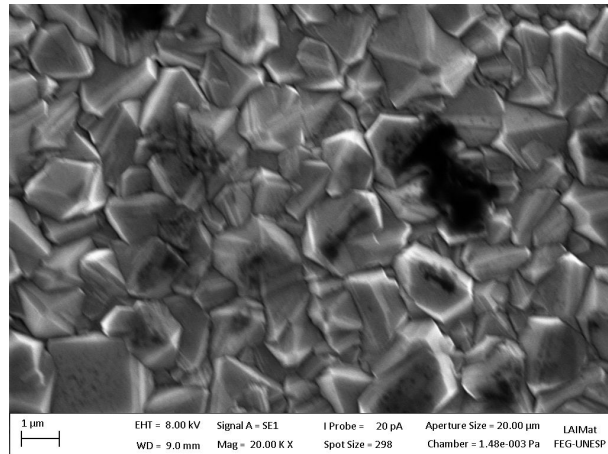
Figura 24 – MEV do filme de diamante CVD depositado sobre substrato de silício intrínseco (ampliação: 5000×).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 25 apresenta a mesma amostra, agora observada com ampliação de 20.000×, permitindo uma visualização mais detalhada da morfologia superficial. Nessa escala, torna-se evidente o facetamento dos cristais de diamante e a presença de descontinuidades sutis entre os grãos, as quais não eram perceptíveis na imagem com menor ampliação. Esses detalhes reforçam a natureza policristalina do filme e a existência de grãos de diferentes tamanhos.

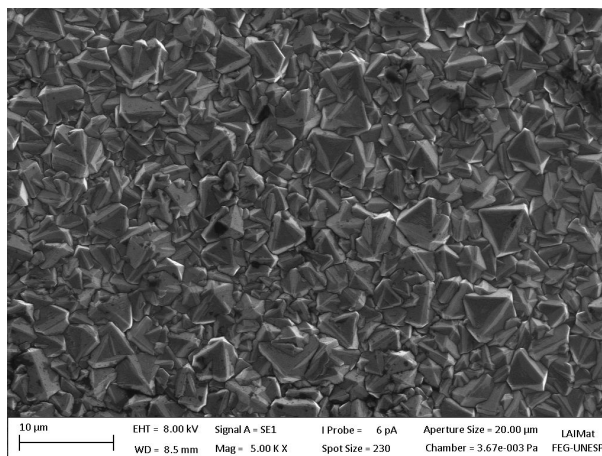
Figura 25 – MEV do filme de diamante CVD depositado sobre substrato de silício intrínseco (ampliação: 20.000×).



Fonte: Elaboração própria.

Já a Figura 26 exibe a imagem de MEV do filme de diamante depositado sobre substrato de silício dopado tipo p, obtida nas mesmas condições de análise (detector SE, ampliação de 5000×). A morfologia superficial observada apresenta características semelhantes às do filme crescido sobre substrato intrínseco, exibindo uma microestrutura policristalina com grãos de dimensões heterogêneas distribuídos de maneira relativamente uniforme.

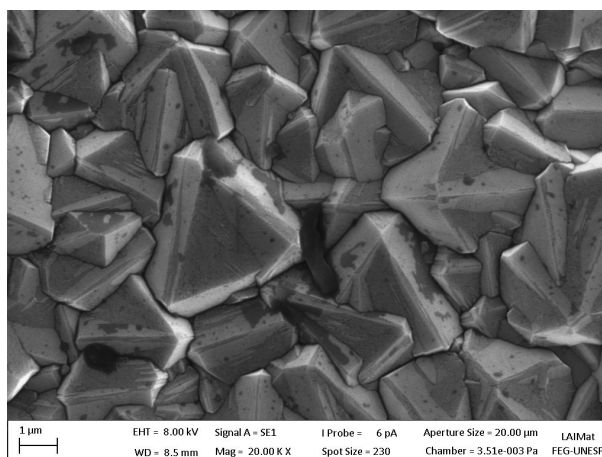
Figura 26 – MEV do filme de diamante CVD depositado sobre substrato de silício tipo p (ampliação: 5000×).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 27, obtida em ampliação de 20.000×, permite observar com maior clareza o facetamento dos cristais no substrato tipo p, evidenciando bordas mais definidas e superfícies cristalinas mais regulares em comparação ao filme depositado sobre substrato intrínseco. Essa diferença sugere que a dopagem do substrato pode influenciar discretamente a nucleação e o crescimento dos cristais de diamante, favorecendo uma morfologia mais bem definida.

Figura 27 – MEV do filme de diamante CVD depositado sobre substrato de silício tipo p (ampliação: 20.000×).



Fonte: Elaboração própria.

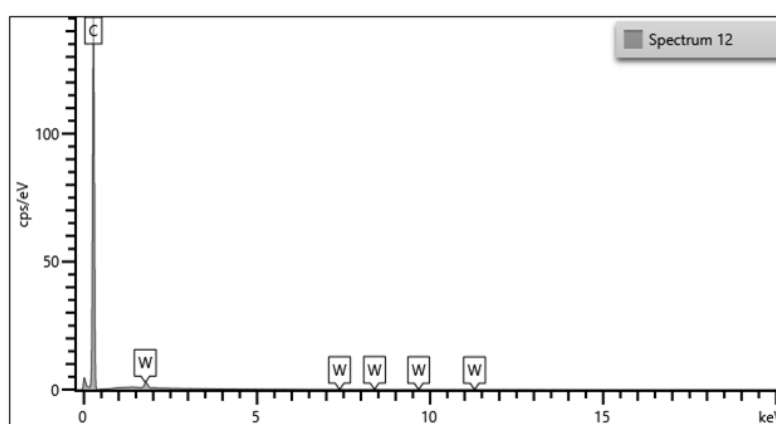
A análise comparativa entre as amostras revela que, embora ambos os filmes apresentem características gerais semelhantes, o filme depositado sobre substrato tipo p (Figura 27) mostra cristais de diamante com morfologia mais bem definida e dimensões ligeiramente superiores em relação ao filme crescido sobre substrato intrínseco (Figura 25). Adicionalmente, o facetamento mais consistente dos grãos no substrato tipo p reforça a hipótese de que o tipo de dopagem exerce influência sobre o processo de nucleação e crescimento cristalino durante a deposição CVD.

5.1.3 Resultados da EDS

A espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi empregada para identificar qualitativamente a composição química dos filmes finos de diamante obtidos por deposição química em fase vapor (CVD). Esta técnica detecta raios X característicos emitidos pelos elementos presentes na amostra quando excitados pelo feixe de elétrons no microscópio eletrônico de varredura, permitindo identificar os constituintes químicos e avaliar possíveis contaminações do processo de crescimento.

O espectro EDS do filme depositado sobre substrato de silício intrínseco (Figura 28) revela predominância do pico característico do carbono, acompanhado de picos residuais de tungstênio oriundo do filamento utilizado no processo CVD.

Figura 28 – Espectro EDS do filme de diamante CVD sobre substrato de silício intrínseco



Fonte: Elaboração própria.

A análise semi-quantitativa, apresentada na Tabela 4, confirma a elevada pureza do filme, com concentração atômica de carbono superior a 99%.

Tabela 4 – Resultados da análise EDS para o filme de diamante CVD sobre substrato de silício intrínseco

Elemento	Série	Wt%	Wt% Sigma	At%
Carbono (C)	K	98,17	0,08	99,88
Tungstênio (W)	M	1,83	0,08	0,12
Total		100,00		100,00

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados quantitativos evidenciam a eficácia do processo CVD na síntese de filmes de alta qualidade. O carbono representa 98,17% em peso (99,88% atômico), enquanto o tungstênio constitui apenas 1,83% em peso (0,12% atômico). Esta baixa concentração de tungstênio é típica de processos de deposição por filamento quente, resultante da evaporação gradual dos filamentos em altas temperaturas durante o crescimento.

A ausência completa de picos de silício confirma que a espessura do filme é suficiente para atenuar totalmente o sinal do substrato, indicando boa cobertura e uniformidade da deposição. A elevada razão carbono/tungstênio obtida valida a eficiência do processo na produção de filmes de diamante com composição adequada e mínimos níveis de contaminação.

O filme depositado sobre substrato de silício tipo p apresentou comportamento similar, caracterizado pela mesma predominância de carbono e presença residual de tungstênio, demonstrando a consistência do processo de deposição independentemente do tipo de dopagem do substrato.

5.2 APLICAÇÕES DOS FILMES DE DIAMANTE CVD EM SUBSTRATO TIPO P

Os filmes de diamante CVD depositados sobre substrato de silício tipo p apresentaram superfície homogênea, boa cobertura e textura policristalina com grãos bem definidos, conforme observado nas micrografias de MEV (Figura 26 e Figura 27). Em comparação com o filme crescido sobre silício intrínseco, nota-se um facetamento mais evidente e contornos de grão mais regulares (Figura 25 em relação à Figura 27), o que sugere um crescimento mais estável e deposição controlada nas condições empregadas. A análise EDS indicou elevada pureza, com predominância de carbono e apenas traços residuais de tungstênio, sem detecção do sinal do substrato de silício (Figura 28 e Tabela 4), evidenciando filmes contínuos e com espessura suficiente para atenuar o espectro proveniente do substrato.

No Capítulo 2, foram apresentadas aplicações industriais do diamante CVD, destacando-se seu uso em componentes mecânicos, dispositivos eletrônicos, sensores e revestimentos protetores. À luz dos resultados obtidos para o substrato tipo p, é possível estabelecer correlações diretas entre as propriedades observadas e essas aplicações.

5.2.1 Relação entre propriedades caracterizadas e aplicações

As evidências morfológicas e químicas obtidas neste trabalho sustentam cenários de uso nos quais estabilidade térmica, resistência ao desgaste e continuidade da camada são requisitos fundamentais. A Tabela 5 sintetiza a relação entre propriedades e aplicações com base nos resultados apresentados.

Tabela 5 – Propriedades observadas dos filmes de diamante CVD neste trabalho e aplicações discutidas

Propriedade do filme	Aplicações
Morfologia policristalina com grãos facetados e contornos regulares	Revestimentos de baixo atrito e com elevada uniformidade de cobertura (selos, válvulas e componentes sujeitos à abrasão e erosão), apresentando ganhos de durabilidade reportados na literatura (Wheeler, 2018).
Boa cobertura e espessura (ausência de pico de Si no EDS)	Camadas contínuas para proteção em ambientes severos e para aplicações de dissipação e gestão térmica, com interesse na integração a dispositivos de alta potência (Chernykh <i>et al.</i> , 2022).
Alta pureza	Janelas e elementos ópticos, além de superfícies estáveis para sensores (Salvatori <i>et al.</i> , 2020; Weng <i>et al.</i> , 2023).

Fonte: Elaboração própria.

5.2.2 Influência do substrato tipo p na morfologia do filme

Os filmes crescidos sobre silício tipo p apresentaram facetamento mais consistente e contornos de grão mais definidos que aqueles depositados sobre silício intrínseco (Figura 25 e Figura 27). Essa morfologia regular favorece aplicações que demandam superfícies aderentes, como revestimentos tribológicos e elementos expostos a fluxos térmicos elevados. A compatibilidade com rotas usuais de integração em Si é preservada, aspecto relevante para dispositivos eletrônicos e aplicações de gestão térmica (Chernykh *et al.*, 2022; Weng *et al.*, 2023).

Ambas as amostras exibiram microestrutura policristalina com heterogeneidade granulométrica, característica que pode impactar propriedades associadas à rugosidade e às fronteiras de grão. Dessa forma, embora o substrato tipo p favoreça uma morfologia mais definida, o caráter policristalino do filme permanece inalterado.

5.2.3 Potenciais aplicações dos filmes obtidos

5.2.3.1 Revestimentos tribológicos e de proteção

A presença de grãos facetados, contornos regulares e boa cobertura observada nas micrografias atende aos requisitos para componentes expostos à abrasão, erosão e corrosão, incluindo aplicações na indústria petrolífera, onde condições severas são frequentes (Wheeler, 2018). A continuidade do filme, inferida pela ausência de sinal do substrato no EDS, é essencial para garantir desempenho uniforme em áreas extensas.

A morfologia cristalina bem definida e a homogeneidade dos filmes depositados sobre silício tipo p indicam desempenho promissor no revestimento de componentes críticos, como selos mecânicos de bombas e válvulas de estrangulamento, frequentemente submetidos a desgaste severo por fluidos contendo partículas sólidas e agentes corrosivos (Wheeler, 2018).

A integridade estrutural do filme, confirmada pela ausência de exposição do substrato no EDS, reforça seu potencial como barreira protetora eficaz, contribuindo para o aumento da vida útil e a redução de custos de manutenção.

5.2.3.2 Gestão térmica e integração em silício

A morfologia observada nos filmes depositados sobre substrato tipo p, combinada à continuidade e à estabilidade química do diamante, corrobora sua aplicabilidade em estruturas de Si com alta densidade de potência, aproveitando a elevada condutividade térmica do material (Chernykh *et al.*, 2022; Weng *et al.*, 2023). Os resultados de cobertura e regularidade superficial são compatíveis com esses cenários.

Além disso, a formação bem-sucedida de cristais diretamente sobre silício dopado mostram a viabilidade técnica de integrar esses filmes como dissipadores térmicos em dispositivos de alta frequência e potência, alinhando-se às estratégias de mitigação do autoaquecimento em heteroestruturas do tipo *GaN-on-Diamond* (Chernykh *et al.*, 2022).

5.2.3.3 Elementos e sensores ópticos

A elevada pureza identificada por EDS, aliada à continuidade do filme, favorece seu emprego como janela óptica e como superfície de referência em sistemas interferométricos. Além disso, a homogeneidade micrométrica e a estabilidade termoquímica características do diamante são compatíveis com as observações experimentais deste trabalho.

Essas características ampliam o potencial do material para aplicações ópticas e permitem seu uso em dispositivos com requisitos mais rigorosos. Quando associadas às propriedades intrínsecas do diamante, como alta dureza e elevada condutividade térmica, tornam-se especialmente relevantes para a fabricação de membranas empregadas em sensores de pressão baseados em interferômetros de Fabry-Pérot (Salvatori *et al.*, 2020). Em conjunto, essas propriedades dos filmes de diamante asseguram a integridade mecânica necessária para uma operação precisa mesmo em condições severas, nas quais sensores convencionais frequentemente apresentam falhas.

5.2.4 Aspectos ambientais e valor agregado do metano

A utilização de metano (CH_4) como fonte de carbono no processo CVD permite valorizar fluxos gasosos de baixo valor econômico, como gás associado, gás residual industrial ou biometano, convertendo-os em filmes finos de diamante de alto valor tecnológico. Sob condições adequadas de captação, vedação e tratamento de efluentes gasosos, essa rota tecnológica pode mitigar emissões provenientes de queima e vazamentos ao converter um gás de alto potencial de aquecimento global em carbono sólido funcional. A magnitude do benefício ambiental depende do balanço energético do reator e da intensidade carbônica da matriz elétrica, o que torna recomendável a realização de Análise de Ciclo de Vida contemplando a purificação do

CH₄, o consumo de H₂ e o pós-tratamento. Dessa forma, em cenários nos quais o processo CVD é alimentado por biometano ou resíduos gasosos industriais e opera utilizando energia de baixa pegada carbônica, o processo maximiza os ganhos ambientais ao reduzir emissões de poluentes e valorizar resíduos gasosos transformando-os em produtos de alto desempenho.

5.2.5 Limitações experimentais e considerações sobre aplicabilidade

As técnicas empregadas forneceram evidências de cobertura, aderência, morfologia (granulação, facetamento e contornos) e composição predominantemente carbonosa com traços de tungstênio, sustentando as aplicações mecânicas, térmicas e ópticas discutidas.

Contudo, a ausência de espectroscopia Raman impõe limitações importantes: (i) impossibilidade de quantificar frações sp²/sp³, relevantes para perdas ópticas, estabilidade e pureza do filme; (ii) ausência de avaliação de tensões residuais via deslocamento de banda, que afeta aderência e confiabilidade; e (iii) falta de investigação direta de fases não-diamante. Adicionalmente, a EDS não distingue estados de hibridização do carbono, e a MEV não fornece parâmetros elétricos ou ópticos quantitativos.

O desajuste de expansão térmica entre diamante e silício pode gerar tensões interfaciais em ciclagem térmica. Embora não tenham sido observados indícios de delaminação, a avaliação mecânica e de tensões excede o escopo deste estudo.

6 CONCLUSÃO

Filmes finos de diamante foram obtidos por deposição química a partir da fase vapor (CVD) sobre substratos de silício tipo p, empregando metano e hidrogênio como gases de processo. Os filmes foram caracterizados quanto às suas propriedades físico-químicas, visando avaliar o potencial desses materiais principalmente para a indústria de petróleo e gás, e demais aplicações que demandam alta resistência mecânica, estabilidade térmica e inércia química.

Este trabalho caracterizou filmes finos de diamante obtidos por deposição química a partir da fase vapor (CVD) sobre substratos de silício tipo p, empregando metano e hidrogênio como gases de processo. Partiu-se da necessidade de compreender as propriedades físicas e químicas desses filmes para aplicações na indústria de petróleo e gás, que demandam materiais com alta resistência mecânica, estabilidade térmica e inércia química.

Os resultados das análises por EDS e MEV confirmaram a obtenção de filmes com composição essencialmente carbonosa e presença apenas residual de tungstênio proveniente do filamento. A espessura depositada foi suficiente para atenuar completamente o sinal do substrato nas medidas de superfície. As imagens de microscopia revelaram grãos facetados distribuídos de forma relativamente homogênea, com nucleação densa e crescimento mais pronunciado nas amostras de silício tipo p quando comparadas ao silício intrínseco. Esses achados indicam que o método empregado é capaz de produzir recobrimentos com as características esperadas para filmes de diamante crescidos por CVD.

Quanto aos objetivos propostos, foi possível identificar propriedades de interesse industrial, descrever as etapas do processo de deposição e apontar aplicações potenciais nas quais esses revestimentos podem trazer benefícios concretos. Vale mencionar também o aspecto ambiental associado ao uso de metano: recursos de baixo valor comercial, como gás associado ou biometano, podem ser transformados em materiais de alto valor agregado, reduzindo simultaneamente emissões atmosféricas que ocorreriam por queima ou vazamento.

Entre as limitações do estudo, reconhece-se a falta de espectroscopia Raman, técnica fundamental para quantificar as fases de carbono presentes e avaliar a qualidade cristalina do diamante. Também não foram realizadas medições diretas de espessura e aderência, nem testes em condições que simulem o ambiente operacional real. Para avanços futuros, sugere-se incluir essas caracterizações, realizar ensaios mecânicos mais detalhados, otimizar parâmetros do processo CVD e validar o desempenho dos filmes em situações práticas de uso industrial.

Em resumo, o trabalho forneceu evidências experimentais consistentes sobre a viabilidade técnica de filmes de diamante CVD em silício tipo p para aplicações que exigem alta confiabilidade. Embora persistam questões a serem investigadas, os resultados obtidos representam uma contribuição para o desenvolvimento de materiais avançados destinados a ambientes severos de operação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Processamento de gás natural**. São Paulo: ANP, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/processamento-de-gas-natural>. Acesso em: 13 fev. 2024.
- ANGUS, J. C. Diamond synthesis by chemical vapor deposition: the early years. **Diamond and Related Materials**, Amsterdam, v. 49, p. 77–86, 2014. ISSN 0925-9635. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2014.08.004>. Acesso em: 22 ago. 2024.
- ASMUSSEN, J.; REINHARD, D. **Diamond films handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 9780429222634. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780203910603>.
- BARROS, R. C. M. *et al.* Filmes de diamante CVD dopado com boro. parte I. histórico, produção e caracterização. **Química Nova**, Sociedade Brasileira de Química, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 317–325, 2005. ISSN 0100-4042. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000200024>. Acesso em: 22 abr. 2024.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria dos circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013. ISBN 978-85-64574-21-2.
- CANDELARESI, D.; SPAZZAFUMO, G. 1 - introduction: the power-to-fuel concept. In: SPAZZAFUMO, G. (ed.). **Power to fuel**. Cambridge: Academic Press, 2021. p. 1–15. ISBN 978-0-12-822813-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822813-5.00005-9>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- CHERNYKH, M. *et al.* GaN-based heterostructures with CVD diamond heat sinks: a new fabrication approach towards efficient electronic devices. **Applied Materials Today**, Amsterdam, v. 26, p. 101338, 2022. ISSN 2352-9407. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101338>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- DAVIS, R. F. **Diamond films and coatings: development, properties and applications**. Park Ridge: Noyes Publications, 1993. ISBN 0-8155-1323-2.
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. ISBN 978-85-7430-702-2. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10923/22337>. Acesso em: 20 out. 2025.
- ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. **Methane**: chemical compound. Chicago: Britannica, 2025. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/methane>. Acesso em: 30 out. 2025.
- FARAH, M. A. **Petróleo e seus derivados: definição, constituição, aplicação, especificações, características de qualidade**. Reimpr. Rio de Janeiro: LTC, 2013. ISBN 978-85-216-2052-5.
- GAYDAYCHUK, A. *et al.* Solid particle erosion of CVD diamond films deposited at different methane concentration. **Wear**, Amsterdam, v. 494-495, p. 204239, 2022. ISSN 0043-1648. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204239>. Acesso em: 7 ago. 2024.

LEAL, L. H. M. **Fundamentos de microscopia**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2000. ISBN 85-85881-94-1.

MA, H.; LU, J.; ZHANG, L. Effects of different silicon substrates on the structure and properties of deposited diamond-like carbon films. **Physica Status Solidi A**, Hoboken, v. 220, n. 13, p. 2200799, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pssa.202200799>. Acesso em: 20 out. 2025.

MALVINO, A. P.; BATES, D. J. **Eletrônica: volume 1**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. v. 1. ISBN 978-85-8055-577-6.

NEAMEN, D. A. **Semiconductor physics and devices: basic principles**. 4th. ed. New York: McGraw-Hill, 2012. ISBN 978-0-07-352958-5.

NEBEL, C. E. CVD diamond: a review on options and reality. **Functional Diamond**, Taylor & Francis, Abingdon, v. 3, n. 1, p. 2201592, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/26941112.2023.2201592>. Acesso em: 7 jun. 2025.

NOR, R. M. *et al.* Diamond: synthesis, characterisation and applications. In: YAHYA, N. **Carbon and oxide nanostructures**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. (Advanced structured materials, v. 5), p. 195–217. ISBN 978-3-642-14673-2. Disponível em: https://doi.org/10.1007/8611_2010_17. Acesso em: 22 abr. 2024.

PHYSICS IN A NUTSHELL. **Diamond structure**. [Göttingen, 2025]. Disponível em: <https://www.physics-in-a-nutshell.com/article/13/diamond-structure>. Acesso em: 14 out. 2025.

PLANT, G. *et al.* Inefficient and unlit natural gas flares both emit large quantities of methane. **Science**, New York, v. 377, n. 6614, p. 1566–1571, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.abq0385>. Acesso em: 13 jun. 2024.

SALVATORI, S. *et al.* Thin diamond film on silicon substrates for pressure sensor fabrication. **Materials**, MDPI, Basel, v. 13, n. 17, p. 3697, 2020. ISSN 1996-1944. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13173697>. Acesso em: 17 jun. 2024.

SRIKANTH, V. V. S. S.; JIANG, X. Synthesis of diamond films. In: BRILLAS, E.; MARTÍNEZ-HUITLE, C. A. (ed.). **Synthetic diamond films**. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. cap. 2, p. 21–55. ISBN 9781118062364. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118062364.ch2>. Acesso em: 23 ago. 2024.

WENG, J. *et al.* Investigation on the preparation of large area diamond films with 150–200 mm in diameter using 915 MHz MPCVD system. **Vacuum**, Amsterdam, v. 217, p. 112543, 2023. ISSN 0042-207X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112543>. Acesso em: 5 ago. 2024.

WHEELER, D. W. Applications of diamond to improve tribological performance in the oil and gas industry. **Lubricants**, MDPI, Basel, v. 6, n. 3, p. 84, 2018. ISSN 2075-4442. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/lubricants6030084>. Acesso em: 10 jun. 2024.

YOSHIKURA, T. **What is brightfield microscopy?** Tokyo, 2023. Disponível em: <https://evidentscientific.com/en/insights/what-is-brightfield-microscopy>. Acesso em: 20 out. 2025.

APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES DERIVADAS DO TRABALHO

Este Apêndice apresenta a divulgação da pesquisa de iniciação científica, que teve como produto este Trabalho de Conclusão de Curso, realizada por meio de resumos expandidos publicados em anais de eventos. As referências dos resumos estão listadas a seguir:

- CAMPOS, Yago dos Santos; GOUVÊA, Evaldo Chagas; SOUZA, Teófilo. Filme de diamante CVD a partir de gás metano em substrato de silício tipo p: caracterização e aplicações na indústria. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP: "CIÊNCIA EM TEMPOS DE CRISE CLIMÁTICA E SOCIAL", 36., 2024, Guaratinguetá. **Anais** [...]. Águas de Lindóia (SP) Hotel Bendito Cacao Family Resort, 2024. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/xxxvicicunesp/1008898-FILME-DE-DIAMANTE-CVD-A-PARTIR-DE-GAS-METANO-EM-SUBSTRATO-DE-SILICIO-TIPO-P-CARACTERIZACAO-E-APLICACOES-NA-INDU>. Acesso em: 27/11/2025
- CAMPOS, Yago dos Santos; GOUVÊA, Evaldo Chagas; SOUZA, Teófilo. Filme de diamante CVD a partir de gás metano em substrato de silício tipo p: caracterização e aplicações na indústria. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP: "CIÊNCIA E LIBERDADE DE PENSAMENTO EM UMA ÉPOCA DE EXTREMOS", 37., 2025, Guaratinguetá. **Anais** [...]. Águas de Lindóia (SP) Hotel Bendito Cacao Family Resort, 2025. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/xxxviicicunesp/1407897-FILME-DE-DIAMANTE-CVD-A-PARTIR-DE-GAS-METANO-EM-SUBSTRATO-DE-SILICIO-TIPO-P-CARACTERIZACAO-E-APLICACOES-NA-INDU>. Acesso em: 27/11/2025
- CAMPOS, Yago dos Santos; GOUVÊA, Evaldo Chagas; SOUZA, Teófilo. Filme de diamante CVD a partir de gás metano em substrato de silício tipo p: caracterização e aplicações na indústria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE VÁCUO NA INDÚSTRIA E NA CIÊNCIA, 46., 2025, São Carlos. **Anais** [...]. São Carlos (SP) Universidade Federal de São Carlos, 2025.