

Uma revisão geral sobre as propriedades, mecanismos de produção e aplicações do grafeno

Gustavo Harro Wehle (Universidade Estadual de Santa Catarina) gustavo.wehle@gmail.com

Diogo José Horst (Universidade Federal de São Paulo) diogohorst@gmail.com

Charles Adriano Duvoisim (Universidade Federal de São Paulo) charlesadrianoduvoisim@gmail.com

Rogério de Almeida Viera (Universidade Federal de São Paulo) rogerioaviera@gmail.com

Resumo:

Nos últimos anos testemunhamos uma revolução do grafeno e das suas aplicações. É um assunto que a cada dia ganha mais notoriedade principalmente pelas áreas da ciência e da engenharia. Esta breve revisão apresenta as principais contribuições de artigos de pesquisa sobre o grafeno e suas propriedades, seus mecanismos de produção e seu potencial de aplicação. A revisão bibliográfica foi realizada pela busca de literatura nos bancos de dados científicos Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO e Google Acadêmico. Como pode ser visto as ótimas propriedades do grafeno fazem com que o mesmo seja material-chave para gerar uma revolução e desenvolver novas pesquisas para serem aplicadas em diversos campos tais como: armazenamento de energia, eletrônica, purificação e descontaminação, petróleo e gás, catálise, filmes finos, sensores e biossensores, materiais compósitos entre muitos outros aplicativos a serem descobertos.

Palavras chave: Grafeno, nanotubos de carbono, Nanotecnologia, Nanociências, Nanoengenharia.

An overview on properties, production mechanisms and applications of graphene

Abstract:

Recent years witnessed a revolution in graphene and its applications. Today, it is a hot topic in science and engineering circles, and attracts more and more interest. This short review presents the main contributions of research articles on graphene and its properties, production mechanisms and potential applications. The bibliographic review was performed searching literature in the Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO and Google Scholar scientific databases. As can be seen the optimal properties of graphene makes it a revolutionary precursor key material for research and development to be applied in many fields such as: energy storage, electronics, purification and decontamination, oil and gas, catalysis, thin films, sensors and biosensors, composite materials among many others applications to be discovered.

Key-words: Graphene, Carbon nanotubes, Nanotechnology, Nanosciences, Nanoengineering.

1. Introdução

O foco atual da pesquisa e desenvolvimento sobre grafeno seguiu as ideias e experimentos inovadores feitos em 2004 por A.K. Geim e K. Novoselov, os quais foram premiados com o Prêmio Nobel de Física em 2010 (THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS, 2010).

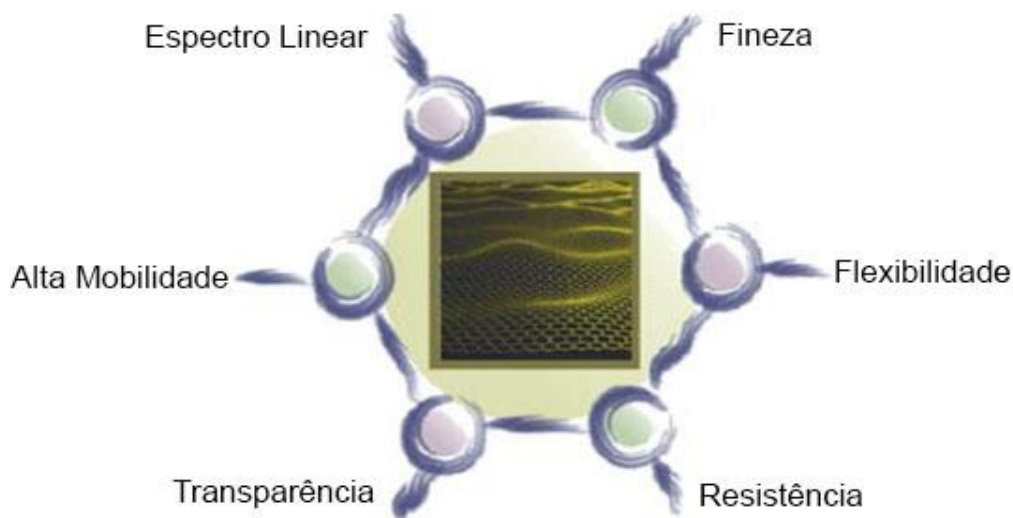
Do grafite ao diamante, o grafeno é sem dúvida, o material mais revolucionário de hoje, é considerado muito superior se comparado ao plástico e o silício. É um material leve, excelente condutor térmico e elétrico, quase transparente e com excelente resistência mecânica. O grafeno é o material mais fino conhecido no universo e também o mais forte já medido. Sua carga de operação exibe uma mobilidade própria gigante, não possui massa, e pode viajar por micrômetros sem espalhar à temperatura ambiente. O grafeno pode suportar uma densidade de corrente até seis vezes maior que a do cobre, tem uma alta condutividade térmica e rigidez, é impermeável aos gases, e reconcilia qualidades conflitantes como fragilidade e ductilidade. O interesse da Física e da Ciência dos materiais está subindo aceleradamente sobre o grafeno. Excepcionalmente este material é bidimensional, exibe uma alta qualidade cristalina e eletrônica, apesar da sua curta história, já revelou ter utilidade para diversas aplicações as quais serão brevemente discutidas aqui (GEIM & NOVOSELOV, 2007).

Este cristal de carbono provém de distintas propriedades físico químicas, uma enorme resistência mecânica e um excelente desempenho como condutor termoeletrônico. Essas características estão fazendo o grafeno ser uma alternativa para substituir muitos materiais tradicionais em várias aplicações (GHANY et al., 2017).

A sua estrutura eletrônica é muito incomum; os seus elétrons se comportam como se não tivessem massa, sendo muito mais leves que os portadores de carga dos dias de hoje, o que leva a a gerar altas velocidades de transmissão, gerando um grande potencial para criar novos equipamentos eletrônicos muito mais rápidos que os atuais (MUELLER et al., 2010).

O grafeno é quase transparente, absorvendo apenas 2,3% da luz incidente (NAIR et al., 2008), é muito adequado para aplicações fotovoltaicas e em optoeletrônica (BONACCORSO et al., 2010). Devido à sua espessura final, o grafeno é muito flexível, mas ao mesmo tempo, é o material mais forte que conhecemos, cerca de 300 vezes mais forte se comparado a um aço do mesmo peso, (LEE et al., 2008) e também é , o melhor condutor de calor que não apenas possibilita obter uma eletrônica flexível, como também permite muitas aplicações que necessitam ser leves e resistentes (BALADIN et al., 2008).

Algumas das propriedades superlativas do grafeno são dadas na Figura 1 abaixo:



Fonte: Avouris & Xia (2012)

Figura 1 - As propriedades exclusivas do grafeno podem ser utilizadas, separadamente ou em combinação, criando novas aplicações, como por exemplo conseguir tornar um composto eletrônico transparente e flexível.

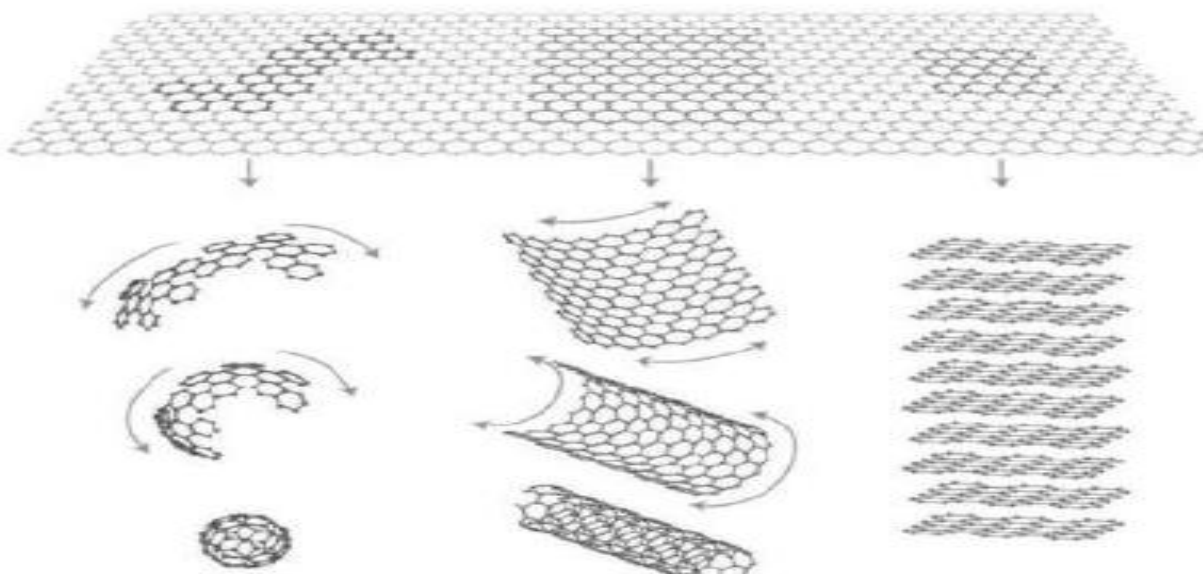
Em especial, o grafeno é um material com propriedades magníficas que o torna um excelente candidato para aplicações avançadas em futuros não tão distantes na eletrônica e fotônica. (KINARET et al., 2011).

Resumidamente, o grafeno se caracteriza como um conceito novo na classe dos materiais fornecendo um novo ramo para diversas aplicações. Dentro deste contexto, essa pequena revisão apresenta as principais contribuições de artigos e pesquisas sobre as propriedades do grafeno, incluindo a produção de mecanismos e seus potenciais de aplicação. Para esse fim, a revisão bibliográfica foi realizada através de buscas por artigos científicos no Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO e Google Scholar base de dados científicos.

2. Revisão da Literatura

2.1 Tecnologia de Processamento

Sua estrutura única da ao grafeno propriedades superiores, tais como transparência, alta condutividade elétrica e térmica, além de ótima resistência mecânica, flexibilidade inerente e uma enorme área de superfície (SUN et al., 2011). Antes de ser descoberto, o grafeno era considerado um material puramente teórico, que só serviu para explicar a formação de outras formas alotrópicas do carbono, uma vez que se acreditava que sua estrutura não seria estável como ilustrado na Figura 2:



Fonte: Geim & Novoselov (2007).

Figura 2 - Grafeno como material de construção 2D, pode ser embrulhado para formar fulerenos (0D), enrolado para formar nanotubos (1D) ou empilhado para formar grafite (3D)

O grafeno consiste em uma única camada de átomos de carbono, dispostos em uma rede hexagonal com um número de propriedades ideais para várias aplicações, podendo ser obtido por vários métodos dentre eles, a esfoliação mecânica usando o método *Scotch-Tape* (COHEN-KARNI et al., 2010), a deposição de vapor químico (CVD) (HUANG et al., 2010) e também por redução química do óxido de grafite (HE et al., 2010).

O método *Scotch-Tape* baseado em clivagem mecânica possui uma grande desvantagem se comparado aos outros métodos, devido ao seu baixo rendimento do grafeno, o que o torna inadequado para uso em larga escala (LARISKA et al., 2012).

A superfície livre de defeitos ou altamente cristalina do grafeno parece ser quimicamente inerte. A superfície do grafeno puro geralmente interage com outras moléculas através de adsorção física (interações π - π).

Para permitir que a superfície do grafeno seja mais reativa, defeitos ou grupos funcionais de superfície são geralmente introduzidos. Por exemplo, doping químico com átomos B e N e a introdução de grupos funcionais tais como carboxila, carbonila e grupos amina, podem ajustar as propriedades da superfície e da eletrônica do grafeno (XU et al., 2013).

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE PREPARAÇÃO DE GRAFENO

Métodos de Preparação	Materiais e Metodos	Técnicas de Operação
Esfoliação Mécânica	HOPG (grafite pirolítica altamente orientada)	Scotch-tape
Epitaxial crescimento em SiC	4H-/6H – SiC Wafer	Dissorção Térmica do Substrato de Si sob alta temperatura ($> 1000^{\circ}\text{C}$) e UHV (vácuo ultra alto)
Crescimento CVD epitaxial	Hidrocarbonetos (como CH ₄)	Deposição de vapor químico sob alta temperatura
Redução Química do Óxido de Grafite	Grafeno	Esfoliação e oxidação do grafite, subsequente da redução de óxido de grafite
Esfoliação em Fase Líquida	Grafeno	Dispersão e esfoliação do grafite em solventes orgânicos
Desenrolando Nanotubos de Carbono	Nanotubos de Carbono	Solução baseada na ação oxidativa de KMnO ₄ e H ₂ SO ₄ , ou ataque de plasma

Fonte: Adaptado de Chen et al., (2010).

Tabela 1 - Comparação de diferentes métodos de preparação de grafeno

2.2 Propriedades do grafeno

A condutividade elétrica do grafeno é de até 2.104 S / cm e a mobilidade eletrônica é de $2.105\text{ cm}^2 / \text{V.s}$, a qual é mais de 100 vezes maior que a do silício. A condutividade térmica do grafeno a temperatura ambiente pode chegar a 5000 W / m.K (para comparação, o cobre é de 400 W / m.K), o que sugere o uso potencial para o gerenciamento térmico em uma variedade de aplicações. Possui uma área superficial muito alta ($2600\text{ m}^2 / \text{g}$), muito maior que as áreas de superfície de grafite ($10\text{ m}^2 / \text{g}$) e nanotubos de carbono ($1300\text{ m}^2 / \text{g}$) (VIEIRA SEGUNDO & VILAR, 2016).

Em termos de propriedades ópticas, o grafeno tem quase total transparência. Pode absorver uma fração de 2,3% da luz (WEI & KIVIOJA, 2013). Suas propriedades ópticas estão fortemente relacionadas às suas propriedades eletrônicas, bem como à sua baixa estrutura eletrônica de pouca energia, onde as bandas cônicas se encontram no Ponto Dirac. O sistema

do grafeno exibe um comportamento que permite o ajuste de propriedades ópticas ultrarrápidas (YAO, 2013).

Recentemente, materiais baseados em grafeno foram fabricados com sucesso pela técnica de deposição por eletroforese e exibiram várias propriedades extraordinárias. Alguns materiais à base de grafeno preparados pelo processo de eletroforese incluem: filmes de grafeno, compósitos de grafeno não metálicos, compostos de nanopartículas à base de metalgrafeno e compostos de grafeno e polímeros (MA et al., 2018).

Essas propriedades notáveis tornam o grafeno promissor em aplicações como: materiais compósitos poliméricos, foto-eletrônicos, transistores de efeito de campo e de junção, sistemas eletromecânicos, sensores e sondas, armazenamento de hidrogênio e sistemas de energia eletroquímica (HOU et al., 2011).

2.3 Industrialização da tecnologia de grafeno

Durante os últimos 32 anos, foram registrados no banco de dados Scopus mais de 103.000 artigos de pesquisa os quais tinham o título citando o grafeno. Esta excepcional reputação do grafeno é devida a inúmeras razões; o mais significativo parece ser porque suas propriedades físicas são incomparáveis, resultando em diversas aplicações nos campos da ciência e tecnologia (TIWARI et al., 2018).

A pesquisa do grafeno é um exemplo de uma nanotecnologia emergente, na qual as descobertas na academia são rapidamente transferidas para aplicações. O conceito translacional de nanotecnologia é tipicamente associado à biomedicina onde é um elo bem estabelecido entre pesquisa básica e estudos clínicos, mas a princípio também pode ser aplicado à Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC): o exemplo mais marcante é a magnetoresistência gigante que se moveu de uma descoberta acadêmica para uma tecnologia de armazenamento de informações dominante em questão de poucos anos. Da mesma forma, o grafeno tem o potencial de causar um profundo impacto na TIC a curto e longo prazo, integrando componentes de grafeno com a eletrônica baseada em silício e Substituir gradualmente o silício em algumas aplicações, permitindo não só melhorias substanciais de desempenho como também permitindo aplicações completamente novas. (KINARET, et al., 2011).

Cada vez mais, a sociedade moderna depende dos avanços das comunicações sem fio. A espinha dorsal dos sistemas sem fio é o uso de transistores de frequência de rádio capazes de amplificar os sinais e fornecer ganho eletrônico em altas frequências (SCHWIERZ, 2011).

Transistores à base de grafeno podem melhorar o desempenho em aplicações de radiofrequência devido à alta mobilidade eletrônica observada no grafeno (VELIGURA et al., 2011). Resultados significativos podem ser observados tanto em altas frequências quanto em temperaturas criogênicas, aumentando a faixa de operação em comparação aos dispositivos convencionais (WU et al., 2011).

A aplicação de grafeno na indústria de petróleo e gás só foi popularizada nos últimos anos, com a maior parte da pesquisa ocorrendo dentro dos últimos dez anos. Devido às suas propriedades químicas, estruturais, elétricas e mecânicas exclusivas, ele mostra aplicabilidade para muitas áreas dentro da indústria de petróleo e gás, como, nas áreas de perfuração, lubrificação, dessalinização, revestimentos anticorrosivos, cimentação, separação óleo-água, limpeza de derramamento de óleo e estabilização de emulsão (NEUBERGER et al., 2018).

2.4 Armazenamento de Energia e Eletrônica

A energia é um dos maiores desafios deste século e está relacionada com a economia sustentável global (WEI & KIVIOJA, 2013). A crescente demanda por consumo mundial de energia requer o desenvolvimento de sistemas e dispositivos de alto desempenho que possibilitem um consumo mais eficiente, além de evitar danos ao meio ambiente e o esgotamento de recursos a longo prazo. Como resultado, esforços estão sendo feitos para pesquisar e desenvolver novos materiais para uso em sistemas de armazenamento de energia. Os materiais à base de carbono têm sido o foco de vários estudos recentes voltados para aplicações eletroquímicas, em virtude de suas propriedades, estrutura e abundância, aliados ao fato de serem ambientalmente benignos. Entre esses materiais, o grafeno é o mais recente alótropo do carbono (VIEIRA SEGUNDO & VILAR, 2016).

O grafeno é um dos materiais mais promissores para o pós-silício eletrônico devido às suas excelentes propriedades físicas e eletrônicas. Em particular, redes 2D exclusivas de átomos de carbono híbridos sp^2 organizados em estrutura de favo de mel fazem do grafeno um material com excepcional potencial para eletrônica, sendo utilizado em várias aplicações possíveis: fotodetectores, células fotovoltaicas, sensores, diodos emissores de luz orgânicos, transistores de filmes finos orgânicos, super capacitores e aplicações catalíticas, sendo essencial para modular precisamente suas propriedades eletrônicas (ZHAN et al., 2014; LEE et al., 2018).

Nas últimas duas décadas, o grafeno foi fundido com o conceito de material fotovoltaico (PV) e exibiu um papel significativo como um eletrodo transparente, com elétron e camada de *buffer* interfacial em dispositivos celulares. A eficiência de conversão de energia superou 20,3% para células solares de perovskita à base de grafeno e atingiu a eficiência de 10% para células solares orgânicas de heterojunção em massa. Exceto a parte de extração de carga e transporte para os eletrodos, o grafeno tem outro papel exclusivo de proteção do dispositivo contra a degradação ambiental através de sua estrutura de rede 2D compactada e fornece estabilidade ambiental a longo prazo para dispositivos fotovoltaicos (MAHMOUDI et al., 2018).

Devido às suas propriedades, tem sido relatado que o uso do grafeno e materiais à base de carbono são usados para fabricar eletrodos e para efetuar armazenamento de energia eletroquímica (ZHANG et al., 2010; TAN & LEE, 2013).

Os eletrodos de grafeno podem aumentar a capacitância dos supercapacitores em 20 a 30%. O fato do material ter uma grande área de superfície, permite uma maior capacidade de armazenamento dos íons dos eletrólitos utilizados na fabricação destes dispositivos (ZHANG et al., 2014).

Vários trabalhos relatam as vantagens do uso de nanocompósitos de grafeno e como material de eletrodo em baterias de íons de lítio (LIU et al., 2011; ZHOU et al., 2010; WINTER et al., 1998; LIANG & ZHI 2009; LIAN et al., 2010).

Exibindo uma maior capacidade reversível e um desempenho cíclico muito melhor quando comparado aos eletrodos de grafite (BROWNSON & BANKS, 2010).

2.5 Outras Aplicações

Efetuando uma pesquisa na literatura envolvendo nanotubos de carbono e grafeno, observa-se uma abundante área em potencial para a aplicação destes materiais, algumas destas aplicações serão brevemente resumidas abaixo: Compósitos: sem dúvida, a maior possibilidade para a aplicação de nanotubos de carbono (*tipo multiwall*) está na área de materiais, principalmente

com polímeros (BYRNE & GUN'KO 2010). Relação de aspecto (comprimento/ diâmetro) dos nanotubos faz com que o limite de percolação destes dispersos em matrizes seja extremamente baixo. A introdução de nanotubos de quantidades variadas (0,01% até 20%) em polímeros, tem como resultado, o aumento da resistência térmica, mecânica e da sua condutividade (MATOS et al., 2017).

No caso dos compósitos, uma das maiores promessas é a aplicação de grafeno em sua estrutura molecular (SINGH et al., 2011).

Sensores e biossensores: como suas propriedades são fortemente dependentes do meio ambiente, o grafeno e os nanotubos de carbono (paredes múltiplas), têm sido usados como sensores extremamente sensíveis às mais diversas análises, incluindo biomoléculas (CAVA et al., 2012; SOUZA et al., 2011).

Além disso, variações na condutividade, fluorescência, propriedades ópticas, impedância, piezoelectricidade, alterações espectroscópicas, entre outras, em função da adsorção de moléculas-alvo nas paredes dos nanotubos ou na superfície do grafeno, são facilmente detectáveis, o que resulta em sensores com limites de detecção muito baixos e alta seletividade. Sensores para gases, toxinas, fragmentos de DNA, os mais diversos tipos de biomoléculas, fármacos, entre muitos outros, têm sido continuamente descritos na literatura. (ZARBIN, 2013).

Filmes finos: umas das aplicações mais populares nos últimos anos para nanotubos de carbono e grafeno são os seus diferentes nanocompósitos (incluindo condutores polímeros e nanofios) os quais estão na preparação de eletrodos condutores transparentes, visando substituir o ITO (óxido de índio dopado com óxido com estanho), para uso em telas sensíveis ao toque, LEDs e OLEDs, células solares flexíveis, entre outros (SALVATIERRA et al., 2013; KHOLMANOV et al., 2013). Filmes para revestimento e proteção anti-corrosão também apresentam aplicação (DE VOLDER et al., 2013).

Meio ambiente: várias aplicações de nanotubos de carbono em processos de purificação e descontaminação como filtros e membranas (GUPTA & SALEH, 2013) ou como foto e eletro catalisadores para a oxidação de contaminantes foram relatados (AN & YU, 2011).

Catálise: os nanotubos de carbono e o grafeno são materiais ideais para suportar catalisadores (óxidos, metálicos ou mesmo moleculares); várias reações também são catalisadas pelo nanotubo ou grafeno (ZHU, et al., 2013).

3. CONCLUSÃO

As propriedades ótimas do grafeno fazem dele um material-chave precursor revolucionário para pesquisa e desenvolvimento a ser aplicado em muitos campos, tais como: armazenamento de energia, eletrônica, purificação e descontaminação, petróleo e gás, catálise, filmes finos, sensores e biossensores, materiais compostos entre muitos outros aplicativos a serem descobertos.

Referências

THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS. 2010. The Nobelprize.org website. [Online]. Available: <http://nobelprize.org/nobel/>

AN, X. & YU, J.C. *Graphene-based photocatalytic composites*. RSC Advances, 1:1426-1434, 2011.

AVOURIS, P.; XIA, F. *Graphene applications in electronics and photonics*. MRS Bulletin, 37(12):1225-1234, 2012.

- BALADIN, A.A.; GOSH, S.; BAO, W. BAO; CALIZO, I.; TEWELDEBRHAN, D.; MIAO, F.; LAO, C.N.** *Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene*. Nano Letters, 8(3):902-907, 2008.
- BONACCORSO, F.; SUN, Z.; HASAN, T.; FERRARI, A.C.** *Graphene photonics and optoelectronics*. Nature Photonics, 4:611- 622, 2010.
- BROWNSON, D.A.C.; & BANKS, C.E.** *Graphene electrochemistry: an overview of potential applications*. Analyst, 135:2768–2778, 2010.
- BYRNE, M. T. & GUN'KO, Y. K.** *Recent advances in research on carbon nanotube-polymer composites*. Adv. Mater., 8;22(15):1672-1688, 2010.
- CAVA, C.E.; SALVATIERRA, R.V.; ALVES, D.C.B.; FERLAUTO, A.S.; ZARBIN, A.J.G.; ROMAN, L.S.** *Self-assembled films of multi-wall carbon nanotubes used in gas sensors to increase the sensitivity limit for oxygen detection*. Carbon, 50(5):1953- 1958, 2012.
- CHEN, D.; TANG, L.; LI, J.** *Graphene-based materials in electrochemistry*. Chemical Society Reviews, 39:3157-3180, 2010.
- COHEN-KARNI, T.; QING, Q.; LI, Q.; FANG, Y.; LIEBER, C.M.** *Graphene and nanowire transistors for cellular interfaces and electrical recording*. Nano Letters, 10(3):1098-1102, 2010.
- DE VOLDER, M.F.L.; TAWFICK, S. H.; BAUGHMAN, R. H.; HART, A.J.** Carbon nanotubes: present and future commercial applications. Science, 339(6119):535-539, 2013.
- GEIM, G.A.K. & NOVOSELOV, K.S.** *The rise of graphene*. Nature Materials, 6:183-191, 2007.
- GHANY, N.A.A.; GHANY, S.A.; ELSHERIF.; HANDAL, H.T.** *Revolution of Graphene for different applications: State-of-the-art*. Surfaces and Interfaces, 9:93-106, 2017.
- GUPTA, V.K.; & SALEH, T.A.** *Sorption of pollutants by porous carbon, carbon nanotubes and fullerene- an overview*. Environ. Sci. Pollut. Res. Int., 20(5):2828-2843, 2013.
- HE, Q.; SUDIBYA, H.G.; YIN, Z.; WU, S.; LI, H.; BOEY, F.; HUANG, W.; CHEN, P.; ZHANG, H.** *Centimeter-long and large-scale micropatterns of reduced graphene oxide films: fabrication and sensing applications*. ACS Nano, 4(6):3201- 3208, 2010.
- HOU, J.; SHAO, Y.; ELLIS, M.W.; MOORE, R.B.; YI, B.** *Graphene-based electrochemical energy conversion and storage: fuel cells, supercapacitors and lithium ion batteries*. Physical Chemistry Chemical Physics, 13:15384-15402, 2011.
- HUANG, Y.; DONG, X.; SHI, Y.; LI, C.M.; LI, L.J.; CHEN, P.** Nanoelectronic biosensors based on CVD grown graphene. Nanoscale, 2(8):1485-1488, 2010.
- KHOLMANOV, S.H.; DOMINGUES, H.; CHOU, X.; WANG, C.; TAN, J-Y.; KIM, H.; LI, R.; PINER, A.J.G.; ZARBIN, R.S.; RUOFF.** *Reduced Graphene Oxide/Copper Nanowire Hybrid Films as High-Performance Transparent Electrodes*. ACS Nano, 7(2):1811–1816, 2013.
- KINARET, J.; FERRARI, A.C.; FAL'KO, V.; KIVIOJA, J.** *Graphene- Driven Revolutions* .In ICT and Beyond. Procedia Computer Science, 7:30–33, 2011.
- LARISKA, M.; HUANG, J.; TOK, A.; KNOLL, W.; NOWAK, C.** An improved synthesis route to graphene for molecular sensor applications. Materials Chemistry and Physics, 136:304- 308, 2012.
- LEE, C.; WEI, X.; KYSTAR, J.W.; HONE, J.** *Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene*. Science, 321(5887):385-388, 2008.
- LEE, H.; PAENG, K.; KIM, I.S.** *A review of doping modulation in graphene*. Synthetic Metals, 244:36-47, 2018. I.N.
- LIAN, P.; ZHU, X.; LIANG, S.; LI, Z.; YANG, W.; WANG, H.** *Large reversible capacity of high quality graphene sheets as an anode material for lithium-ion batteries*. Electrochimica Acta, 55:3909-3914, 2010.
- LIANG, M.; & ZHI, L.** *Graphene-based electrode materials for rechargeable lithium batteries*. Journal of Materials Chemistry, 19:5871-5878, 2009.

- LIU, W.R.; KUO, S.L.; LIN, C.Y.; CHIU, Y.C.; SU, C.Y.; WU, H.C.; C.T. Hsieh, *Characterization and electrochemical behavior of graphene-based anode for Li-ion batteries*. The Open Materials Science Journal, 5(Suppl 1: M6):236-241, 2011.
- MA, Y.; HAN, J.; WANG, M.; X.S. Chenjia, *Electrophoretic deposition of graphene-based materials: A review of materials and their applications*. Journal of Materiomics, 4(2):108-120, 2018.
- MAHMOUDI, T.; WANG, Y.; HAHN, Y-B. *Graphene and its derivatives for solar cells application*. Nano Energy, 47:51- 65, 2018.
- MATOS, C.F.; GALEMBECK, F.; ZARBIN, A.J.G. *Nanocompósitos Multifuncionais de Látex de Borracha Natural e Nanoestruturas de Carbono*. Revista Virtual de Química, 9(1):73-96, 2017.
- MUELLER, T.; XIA, F.; AVOURIS, P. *Graphene photodetectors for high-speed optical communications*. Nature Photonics, 4:297-301, 2010.
- NAIR, R.R.; BLAKE, P.; GRIGORENKO, A.N.; NOVOSELOV, K.S.; BOOTH, T.J.; STAUBER, T.; PERES, M.R.; GEIM, A.K. *Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene*. Science, 320(5881):1308, 2008.
- NEUBERGER N.; ADIDHARMA, H.; ADIDHARMA.; FAN, M. *Graphene: A review of applications in the petroleum industry*. Engineering, 167:152-159, 2018.
- SALVATIERRA, R.V.; CAVA, C.E.; ROMAN, L.S.; ZARBIN, A.J.G. *ITO-Free and Flexible Organic Photovoltaic Device Based on High Transparent and Conductive Polyaniline/Carbon Nanotube Thin Films*, Advanced Functional Materials, 23(12):1490-1499, 2013.
- SCHWIERZ, F. *Industry-compatible graphene transistors*. Nature, 472, 41-42, 2011.
- SINGH, V.; JOUNG, D.; ZHAI, L.; DAS, S.; KHONDAKER, S.I.; SEAL, S. *Graphene based materials: Past, present and future*. Prog. Mater. Sci., 56, 1178, 2011.
- SOUZA, L.P.; CALEGARI, F.; ZARBIN, A.J.G.; MARCOLINO, L.H.; JUNIOR, M.F.J.; BERGAMINI, *Voltammetric determination of the antioxidant capacity in wine samples using a carbon nanotube modified electrode*. Agric. Food Chem., 59(14):7620-7625, 2011.
- SUN, Y.; WU, Q.; SHI, G. *Graphene based new energy materials*. Energy & Environmental Science, 4:1113-1132, 2011.
- TAN, Y.B. & LEE, J.M. *Graphene for supercapacitor applications*. Journal of Materials Chemistry A, 1:14814- 14843, 2013.
- TIWARI, S.K.; MISHRA, R.K.; HA, S.K. HUCZKO, A. *Evolution of Graphene Oxide and Graphene: From Imagination to Industrialization*. Chem. Nano. Mat., 4(7):598:620, 2018.
- VELIGURA, A.; ZOMER, P. J.; VERA-MARUN, I. J.; JÓZSA, C.; GORDIICHUK, P.; VAN WEES, B. *Relating Hysteresis and Electrochemistry in Graphene Field Effect Transistors*. Journal of Applied Physics, 110, 113708, 2011.
- VIEIRA SEGUNDO, J.E.D.; & VILAR, E.O. *Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos*. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, 11(2):54-57, 2016.
- WEI, D. & KIVIOJA, J. *Graphene for energy solutions and its industrialization*. Nanoscale, 7;5(21):10108-26, 2013.
- WINTER, M.; BESENHARD, J.O.; SPAHR, M.E.; NOVÁK, P. *Insertion electrode materials for rechargeable lithium batteries*. Advanced Materials, 10(10):725-763, 1998.
- WU, Y.; LIN, Y-M.; BOL, A.A.; JENKINS, K.A.; XIA, F.; ET AL. *High-frequency, scaled graphene transistors on diamond-like carbon*. Nature, 472:74-78, 2011.
- XU, C.; XU, B.; GU, Y.; XIONG, Z.; SUN, J.; ZHAO, X. S. *Graphene-based electrodes for electrochemical energy storage*. Energy & Environmental Science, 6:1388-1414, 2013.
- YAO, F. *Carbon-based nanomaterials as an anode for lithium ion battery [thesis]*. Micro and nanotechnologies/Microelectronics. Palaiseau: École Polytechnique X, Sungkyunkwan University Department of Energy Science (DOES) IBS Center for Integrated Nanostructure Physics, 173 p., 2013.

ZARBIN, A.J.G.; & OLIVEIRA, M.M. *Nanoestruturas de Carbono (Nanotubos, Grafeno): Quo Vadis?* Quim. Nova, 36(10):1533-1539, 2013.

ZHAN, X.; LI, P.; CHEN, Q.; WANG, K.; WEI, J.; WU, D.; ZHU, H. *Evaluation of layer-by-layer graphene structures as supercapacitor electrode materials.* Journal of Applied Physics, 115, 024305, 2014.

ZHANG, L.L.; ZHOU, R.; ZHAO, X.S. *Graphene-based materials as supercapacitor electrodes.* Journal of Materials Chemistry, 20:5983–5992, 2010.

ZHOU, G.; WANG, D.; LI, F.; ZHANG, L.; LI, N.; WU, Z.; WEN, L.; LU, G.; CHENG, H. *Graphene-wrapped Fe₃O₄ anode material with improved reversible capacity and cyclic stability for lithium ion batteries.* Chemistry of Materials, 22:5306- 5313, 2010.

ZHU, J.; HOLMEN, A.; CHEN, D. *Carbon Nanomaterials in Catalysis: Proton Affinity, Chemical and Electronic Properties, and their Catalytic Consequences, Special Issue: The World of Catalysis.* ChemCatChem, 5(2):357-357, 2013.