

FABRICAÇÃO DE HETEROESTRUTURAS BASEADAS EM MATERIAIS 2D

Bianca Tieppo (IC) e Lúcia Akemi Miyazato Saito (Orientador).

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

A utilização dos materiais bidimensionais (2D) para aplicações elétricas e fotônicas tem sido estimulada pela possibilidade da construção de dispositivos compactos e de alta performance. Isso se deve, principalmente, ao domínio das técnicas de empilhamento controlado numa sequência pré-determinada, composto de diferentes camadas de materiais 2D que se mantêm unidas através de forças de Van der Waals, formando as chamadas heteroestruturas. Atualmente, as heteroestruturas apresentam um vasto campo de aplicações, já que as diversas possibilidades de montagem e interação entre materiais 2D proporcionam novas propriedades e características. Na área da fotônica, uma das montagens que gerou grande interesse na comunidade científica foi a combinação de grafeno e nitreto de boro hexagonal (h-BN) devido a propriedade capacitiva que apresenta quando as camadas são combinadas de forma que o material dielétrico (h-BN), esteja empilhado entre as camadas condutoras de grafeno. Essa estrutura poderia então ser acoplada a um guia de onda, por exemplo, e, ao interagir com a luz, realizar a modulação eletro-óptica, uma operação essencial na fotônica e comunicações ópticas. Por isso, o foco deste projeto está na determinação de uma sequência de métodos eficientes que atendam os objetivos de projetar e testar cada etapa de fabricação de uma heteroestrutura grafeno/h-BN/grafeno e caracterização de suas propriedades elétricas e fotônicas para futura aplicação na modulação eletro-óptica.

Palavras-chave: Materiais 2D; Heteroestruturas, Fotônica.

ABSTRACT

The use of two-dimensional (2D) materials for electrical and photonic applications has been stimulated by the possibility of compact and high-performance devices. This is mainly due to the controlled stacking techniques of different layers of 2D materials in a predetermined sequence, which are kept together by Van der Waals forces to design the heterostructures. Nowadays, these heterostructures have a wide range of applications, since the different possibilities of assembly and interaction between 2D materials provide new properties and characteristics. In the area of photonics, one of the assemblies that generated great interest in the scientific community was the combination of graphene and hexagonal boron nitride (h-BN) because of the capacitive properties that this heterostructure presents when the layers are combined to stack the dielectric material (h-BN) between two conductive layers of graphene. This structure could be joined together to a waveguide, which by interacting with light can control the electro-optical modulation, an essential operation in photonics and lightwave communications. Therefore, the focus of this project is to determine a sequence of efficient methods that meet the objectives of designing and testing each step of the fabrication of a graphene/h-BN/graphene heterostructure and characterizing its electrical and photonic properties for future application in electro-optical modulation.

Keywords: 2D materials; Heterostructures; Photonics.

1. INTRODUÇÃO

O grafeno, material 2D isolado pela primeira vez em 2004, pôde ser obtido através da esfoliação mecânica do grafite, por dois pesquisadores da Universidade de Manchester. Composto por átomos de carbono, o grafeno é uma camada monoatômica (VIEIRA SEGUNDO; VILAR, 2016) de estrutura hexagonal com propriedades e características únicas, tais como flexibilidade mecânica e condutividade elétrica, relacionadas diretamente a sua estrutura que permite que os elétrons se comportem como partículas sem massa e se movam de forma eficaz e rápida sem se dispersarem (NETO; GUINEA; PERES, 2006). Esse material de grande importância para a pesquisa têm gerado estudos para aplicações em sistemas de armazenamento (capacitores, baterias), dispositivos semicondutores, sistemas de energia eletroquímica, materiais compósitos poliméricos com propriedades elétricas e mecânicas diferenciadas, e ainda foi precursor para grandes avanços relacionados aos materiais bidimensionais obtidos através de estruturas lamelares por diferentes técnicas (NOVOSELOV; CASTRO NETO, 2012).

Além das suas propriedades e aplicações excepcionais, o grafeno pode proporcionar outras inúmeras possibilidades de propriedades adaptadas se combinado com os outros materiais bidimensionais, como o nitreto de boro hexagonal (h-BN), os dicalcogenetos de metais de transição (TMDCs), entre outros. Essa combinação, conhecida como heteroestruturas de Van der Waals, se dá pelo isolamento de planos atômicos de materiais 2D e empilhamento dos mesmos em uma sequência pré-determinada. Ligações covalentes proporcionarão estabilidade no plano dos materiais 2D, enquanto as forças de Van der Waals serão suficientes para manter a pilha de materiais unida (GEIM; GRIGORIEVA, 2013). Na Figura 1 tem-se a ilustração representando os diversos materiais bidimensionais que podem ser empilhados como numa montagem em blocos. Através dessa montagem, algumas heteroestruturas foram fabricadas e diferentes propriedades foram identificadas, possibilitando a construção de dispositivos ou componentes eletrônicos e fotônicos.

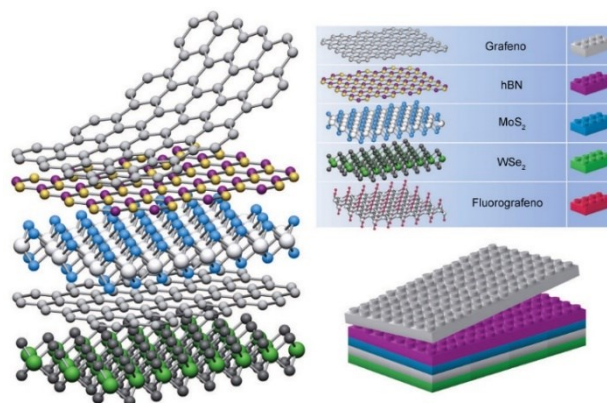


Figura 1. Ilustração esquemática da produção de uma heteroestrutura de materiais bidimensionais por ligações de Van der Waals. Figura traduzida e adaptada de (GEIM; GRIGORIEVA, 2013).

A principal vantagem em se utilizar a montagem de Van der Waals para a fabricação de heteroestruturas com materiais atômicamente finos é a variedade da proporcionalidade e flexibilidade, se comparada àquelas feitas com materiais convencionais ligados covalentemente, já que naquelas há falta de ligações pendentes nas superfícies dos materiais.

Embora já existam muitos estudos e testes experimentais no campo da pesquisa sobre as heteroestruturas, ainda é necessário domínio das técnicas de empilhamento e transferência dos materiais 2D visando a reprodutibilidade na fabricação de dispositivos. A escolha e otimização dos métodos de transferência para o empilhamento são cruciais para o reagrupamento das camadas de forma controlada levando em consideração a espessura, número de camadas atômicas e tamanho lateral para a montagem e, conseqüentemente, a obtenção de novas propriedades para integração em dispositivos nanométricos complexos. E, por isso, esse trabalho está voltado para a determinação de uma sequência de métodos que atenda tais exigências e que possibilite a montagem em escala industrial de heteroestruturas com propriedades capacitivas para aplicações em dispositivos fotônicos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os materiais bidimensionais têm chamado cada vez mais atenção para aplicações em eletrônica, fônica e optoeletrônica devido as propriedades elétricas e ópticas que apresentam. Com a integração de estruturas formadas por materiais 2D, cria-se assim um novo conceito de dispositivos fotônicos, diferente dos baseados nos próprios materiais brutos, os cristais. O grafeno, por exemplo, tem sido usado em inúmeros dispositivos que operam em faixas espectrais amplas, como os eletrodos

transparentes em displays, células solares, moduladores ópticos e fotodetectores (SUN; MARTINEZ; WANG, 2016).

Atualmente no âmbito da pesquisa, a principal forma de construção desses dispositivos são as heteroestruturas de Van der Waals, que possibilitam a criação de novas propriedades elétricas e ópticas através do reagrupamento de diferentes materiais 2D. Uma das propriedades já identificadas em estruturas na literatura é a propriedade capacitiva descrita no artigo de Chun-Chung Chen e colaboradores. A montagem é feita através do empilhamento de uma camada de material dielétrico disposta entre duas camadas de material condutor paralelas entre si. Os resultados obtidos mostraram um aumento no transporte de elétrons e controle de absorção de luz nessa estrutura (CHEN et al., 2015).

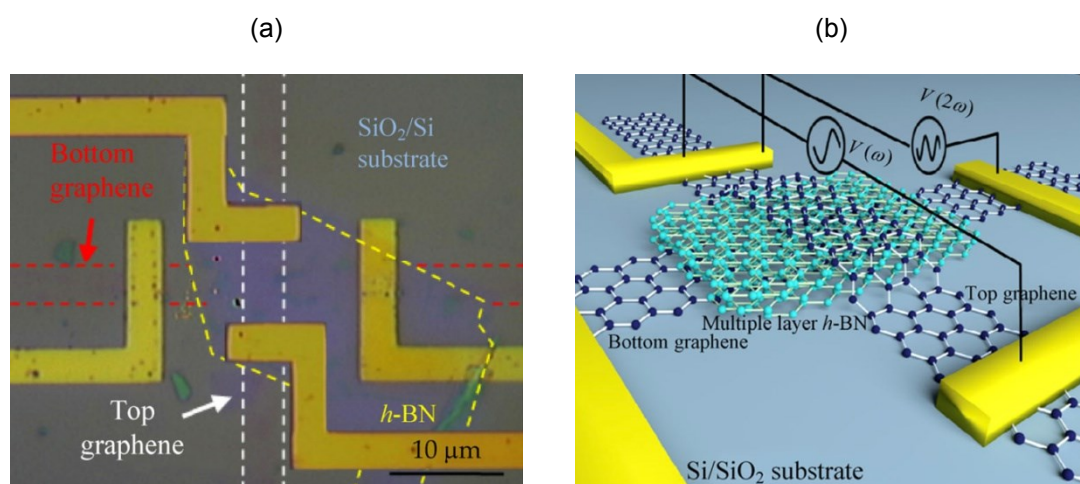


Figura 2. (a) Imagem por microscopia óptica de uma heteroestrutura de grafeno/h-BN/grafeno (b) Diagrama esquemático do dispositivo e configuração para medidas (CHEN et al., 2015).

A heteroestrutura de grafeno/h-BN/grafeno apresentada na Figura 2 está relacionada com a possibilidade de integração e acoplamento a um guia de onda. As camadas de grafeno são o meio ativo que realiza a modulação da luz quando uma diferença de potencial é aplicada na estrutura capacitiva, ou seja, entre as camadas de grafeno. Mas antes da transferência para o dispositivo, deve-se considerar o processo de montagem da heteroestrutura em si, tais como 1) métodos de obtenção dos materiais 2D; 2) técnicas de transferência para maior controle do empilhamento; 3) controle das superfícies e intercamadas sempre ultra limpas, fundamentais para um dispositivo de alto desempenho.

Um método de transferência de materiais eficiente e viável ao objetivo do projeto encontrado na literatura foi o “*All-Dry Transfer*”, ou seja, transferência a seco por estampagem, descrito no artigo de Andres Castellanos-Gomez e colaboradores (CASTELLANOS-GOMEZ et al., 2014). Esse método evita a utilização de camadas de

polímeros de sacrifício e utilização de solventes prejudiciais aos materiais do substrato e, conseqüentemente, facilita os processos de fabricação da heteroestrutura. Por isso, foi utilizado como a base para algumas das etapas de transferência executadas até o momento.

A base desse método está voltada para a utilização de um material viscoelástico (*Gelfilm* da *Gelpack*) com ajuda de uma mesa de trabalho adequada para realizar o empilhamento. No material viscoelástico, são depositados os cristais bidimensionais a serem transferidos, por esfoliação mecânica. Após isso, o objetivo é selecionar flocos finos e planos com o auxílio de um microscópio óptico ou espectroscopia Raman. Com o floco identificado, a lâmina de vidro é colocada em um suporte móvel com três eixos, enquanto que o substrato no qual é construída a heteroestrutura deve ser fixado em um suporte fixo da mesa de trabalho. Através do microscópio óptico, o floco é novamente localizado e, então, posicionado acima do substrato, ambas as superfícies entram em contato, são pressionadas e, após isso, removidas lentamente.

Além desse, um segundo método pode ser utilizado para transferência de materiais crescidos artificialmente (CVD - *Chemical Vapor Deposition*), descrito no artigo de Seonyeong Kim e colaboradores (KIM et al., 2016). Comumente utilizado, o “*Wet Transfer*”, ou seja, transferência molhada (ou úmida), tem como base a utilização de uma camada de polímero de sacrifício que protegerá o material que se encontra em um substrato metálico, como cobre, enquanto o mesmo é corroído em uma solução.

Os processos abordados detalhadamente a seguir, são repetidos para realizar o empilhamento de novas camadas de materiais bidimensionais e, por fim, ter como resultado um “material artificial” montado em uma sequência escolhida com precisão de uma camada atômica (BARCELOS, 2015).

3. METODOLOGIA

A preparação das amostras tem como base as técnicas encontradas na literatura utilizadas para a produção das heteroestruturas: a transferência a seco com uso de um material viscoelástico, o PDMS (polidimetilsiloxano) (CASTELLANOS-GOMEZ et al., 2014), e a transferência molhada baseada na utilização de uma camada de um polímero sacrificial, o PMMA (polimetilmetacrilato) (KIM et al., 2016) ou, novamente, o PDMS (DA COSTA, 2017). Mas, antes de utilizá-las, a obtenção dos materiais a serem utilizados se faz necessária.

Sucintamente, o h-BN, é obtido de forma manual por esfoliação mecânica e transferido para uma superfície de PDMS disposta em uma lâmina de vidro. Um floco desse material é selecionado na superfície do PDMS e transferido através do contato de superfícies sobre o grafeno, esse crescido pela deposição de vapor químico (CVD) e transferido para o substrato. Por fim, uma última camada de grafeno obtida também de forma manual é transferida para uma nova superfície de PDMS em uma lâmina de vidro e, em seguida, depositada acima da estrutura obtida. Para isso, é utilizado um microscópio óptico e um aparato configurado para atuar com dois suportes: um suporte móvel micromanipulado por três eixos de rotação (X-Y-Z) aprimorado para atender às necessidades do projeto e um suporte fixo. No suporte móvel, as lâminas de microscópios com os materiais viscoelásticos fixados em sua superfície são posicionadas, enquanto no suporte fixo fica o substrato da heteroestrutura a ser produzida.

Durante e após a preparação das amostras, a análise e caracterização das amostras são feitas para identificar a qualidade e características dos materiais e, então, da estrutura. Essas são realizadas através da utilização do microscópio óptico (observar o empilhamento e as áreas superficiais), microscópio de força atômica (determinar a espessura dos materiais e da estrutura), do Raman (definir a qualidade dos materiais e da estrutura) e do analisador de parâmetros (medir as propriedades elétricas da estrutura).

A preparação e análise são itens abordados de forma específica posteriormente, pois, antes, é necessário entender como cada material 2D é obtido de forma que se tenha camadas finas para as aplicações deste projeto. Os métodos mais eficientes para essa obtenção são a esfoliação micromecânica e o crescimento por deposição de vapor químico (CVD).

Na esfoliação micromecânica, uma fita Nitto contendo o material 2D, em vista o h-BN e a segunda camada de grafeno, é pressionada contra si mesma e separada repetidamente por algumas vezes para que algumas camadas do material se desprendam, sejam transferidas e distribuídas em outras partes da fita, obtendo flocos mais finos. Após esfoliar o material, uma parte da fita contendo o material é posicionada e pressionada sobre uma superfície do material viscoelástico PDMS (*Gelfilm* da *Gelpack*) disposta em uma lâmina de vidro, e, após um tempo, retirada rapidamente para transferência. A Figura 3 apresenta a sequência desse processo de transferência de materiais bidimensionais esfoliados mecanicamente. Toda a superfície do PDMS, após a esfoliação e a transferência, é visualizada e varrida por microscopia óptica e espectroscopia Raman para que os flocos mais relevantes em

questão de tamanho e espessura, ou seja, suficientemente grandes, finos e planos, possam ser selecionados por meio da escala e das diferenças de contraste de cor.

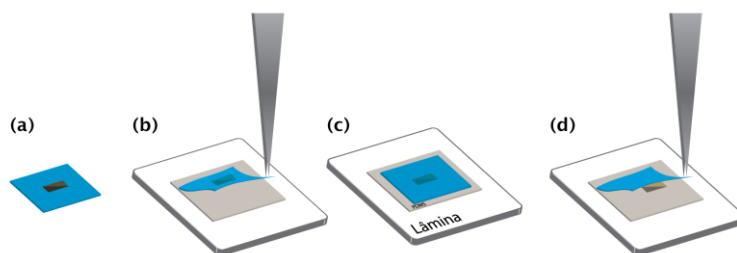


Figura 3. Transferência de materiais esfoliados mecanicamente (a) Uma parte da fita Nitto contendo o material esfoliado é selecionada (b), (c) A fita é posicionada e pressionada contra o substrato desejado, o PDMS sobreposto sobre a lâmina de vidro. (d) Retira-se a fita para que a transferência seja feita.

Já na deposição de vapor químico, o crescimento de materiais 2D envolve reações químicas ativadas de precursores em um ambiente especialmente projetado, um forno tubular com temperatura média de 1000°C. A qualidade final dos materiais é, totalmente relacionada aos precursores, condições, atmosferas, substratos e catalisadores (YU et al., 2015). Para cada material, há variações no processo de produção. No caso da primeira camada de grafeno, o crescimento é feito diretamente em folhas de cobre através da inserção de gases que contêm carbono, o metano, por exemplo, e do processo de catálise em uma estrutura com condições específicas. O filme formado é predominantemente grafeno de uma camada com menos de 5% da área de grafeno de duas e três camadas (LI et al., 2009). Após as etapas de produção, o grafeno depositado no substrato metálico deve ser transferido para um substrato alvo como mostrado na Figura 4. O método mais comum para isso é o *Wet Transfer* baseado na utilização do polímero sacrificial, o PMMA, que reveste e protege o material, enquanto o substrato de cobre é corroído por uma solução de persulfato de amônio. Com a corrosão do cobre, o PMMA com o grafeno é retirado com uma lâmina de vidro e colocado em água deionizada para limpeza, seguidamente da retirada do PMMA com acetona e álcool isopropílico (KIM et al., 2016).

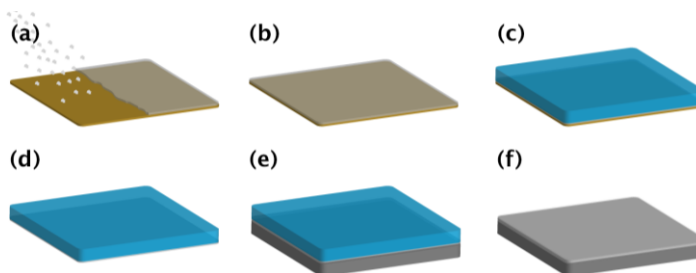


Figura 4. Transferência de cristais 2D crescidos por deposição de vapores químicos (CVD). (a), (b) O cristal 2D é crescido sobre uma superfície metálica. (c) Uma camada sacrificial é depositada acima do material crescido. (d) A superfície metálica é, então, corroída. (e) Faz-se a transferência para o substrato desejado. (f) E, finalmente, a retirada da camada sacrificial.

Com os materiais 2D produzidos, é feita a caracterização, para determinar o número de camadas e a qualidade do material. Por esse motivo, é utilizada a espectroscopia Raman, considerando-se o fato de que cada material possui uma impressão digital e há diferenças notáveis em seus espectros. Na Figura 5, pode ser observado o espectro Raman do grafeno, que possui dois picos característicos, um na banda G próximo a 1580 cm^{-1} e outro na banda 2D próximo de 2715 cm^{-1} . Através da relação de intensidade entre eles, é possível identificar o número de camadas dos flocos.

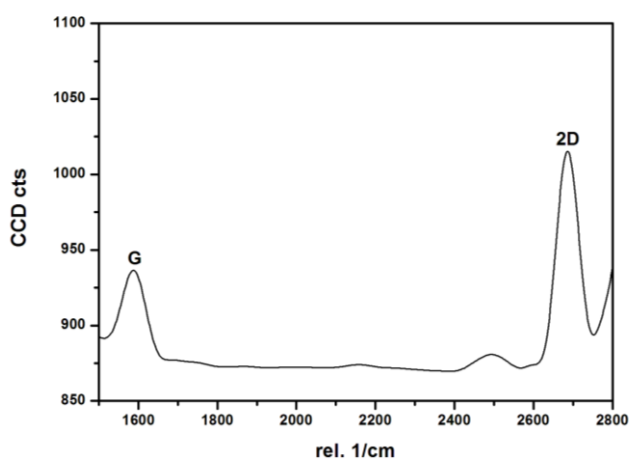


Figura 5. Espectro Raman do grafeno. A diferença do número de camadas é observada pela forma dos picos das bandas G e 2D. Neste caso, uma monocamada, já que a banda 2D tem o dobro da banda G.

Na Figura 6 é apresentado o espectro Raman do h-BN que possui um pico característico próximo a 1366 cm^{-1} .

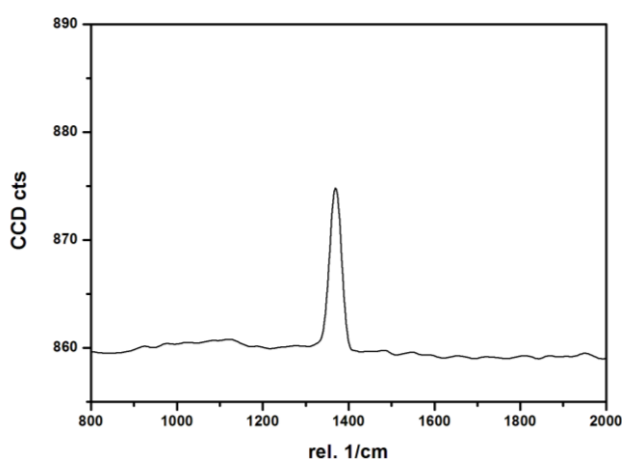


Figura 6. Espectro Raman do h-BN. A diferença do número de camadas é observada pela variação do pico próximo a 1366 cm^{-1} .

A quantidade de processos de obtenção dos materiais 2D, transferência para o substrato e a combinação dos materiais está relacionada diretamente à quantidade de camadas e, conseqüentemente, a aplicação da heteroestrutura. No caso da

estrutura capacitiva, serão três camadas de materiais bidimensionais, sendo as camadas externas de material condutor, o grafeno, e a camada interna de material dielétrico, o h-BN.

Com os flocos já preparados, selecionados e caracterizados, iniciam-se as etapas de transferência para empilhamento dos mesmos. A primeira camada de grafeno já está posicionada na superfície da lâmina de vidro para produção da heteroestrutura. As próximas etapas, então, consistem no empilhamento das outras duas camadas acima do grafeno.

A primeira camada a ser transferida é a de h-BN e o floco selecionado encontra-se na superfície do PDMS. Para o processo, é utilizado o método descrito no artigo de Andres Castellanos-Gomez e colaboradores (CASTELLANOS-GOMEZ et al., 2014). O método evita a utilização de polímeros de transferência e solventes contaminantes, e, conseqüentemente, facilita os processos de fabricação. Esse depende justamente do material viscoelástico no qual estão depositados os flocos de h-BN a serem transferidos, o PDMS.

A lâmina de vidro é colocada no suporte móvel com três eixos, enquanto que o substrato alvo de construção da heteroestrutura é fixado em um suporte fixo da mesa de trabalho. Através do microscópio óptico, o floco é localizado e, então, posicionado acima do substrato alvo para que as superfícies entrem em contato, estejam pressionadas e, após um tempo, sejam separadas lentamente. Por ser um material viscoelástico, o PDMS escoa como um líquido, facilitando a transferência do material para o substrato alvo em contato. Esse processo deve ser repetido para realizar o empilhamento de outros materiais bidimensionais e se ter como resultado um material artificial montado em uma sequência escolhida com precisão de uma camada atômica (BARCELOS, 2015). A mesa de trabalho juntamente com o microscópio utilizados são apresentados na Figura 7.

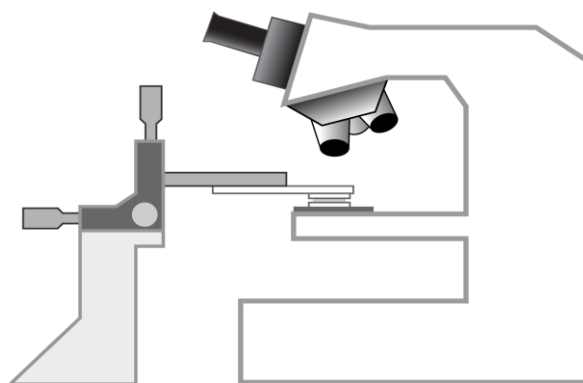


Figura 7. Ilustração da mesa de trabalho: suporte fixo e suporte móvel posicionados sob as objetivas de um microscópio óptico.

Inicialmente, a lâmina de vidro com o PDMS e h-BN esfoliado é colocada no suporte móvel com sua região voltada para baixo e a lâmina de vidro com o grafeno CVD é posicionada no suporte fixo. Através do microscópio óptico, o floco de h-BN é localizado e, então, posicionado acima da outra lâmina. Esse posicionamento entre uma superfície e outra só são possíveis através da rotação dos eixos X e Y, e, principalmente, da variação do foco do microscópio óptico, porque a luz do microscópio atravessa tanto a lâmina quanto o material viscoelástico, que é transparente, podendo, assim, visualizar o floco e alinhá-lo acima do outro. As duas superfícies, seguidamente, entram em contato através da rotação do eixo Z para que o floco escolhido possa ser transferido da superfície do PDMS acima do grafeno na lâmina de vidro. Ao ser feito um contato efetivo entre ambas, as superfícies são separadas lentamente e, então, o floco é transferido.

Para a segunda camada de grafeno esfoliado, esse processo de transferência de um substrato para outro é repetido e essa é posicionada e alinhada as camadas anteriormente empilhadas. Finalmente, obtém-se a heteroestrutura desejada com as três camadas de materiais.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os resultados de cada material 2D obtido para montagem da heteroestrutura foram observados através da microscopia óptica e caracterizados por espectroscopia Raman e microscopia de força atômica (AFM). Esses podem ser observados nas figuras a seguir.

A primeira etapa consiste na caracterização do grafeno CVD produzido por pesquisadores do *MackGraphe* por espectroscopia Raman. Os espectros são obtidos em diversos pontos da amostra e a imagem da Figura 8 a seguir mostra que a área analisada é composta em grande parte por grafeno devido a presença das bandas G (1580 cm^{-1}) e 2D (2715 cm^{-1}).

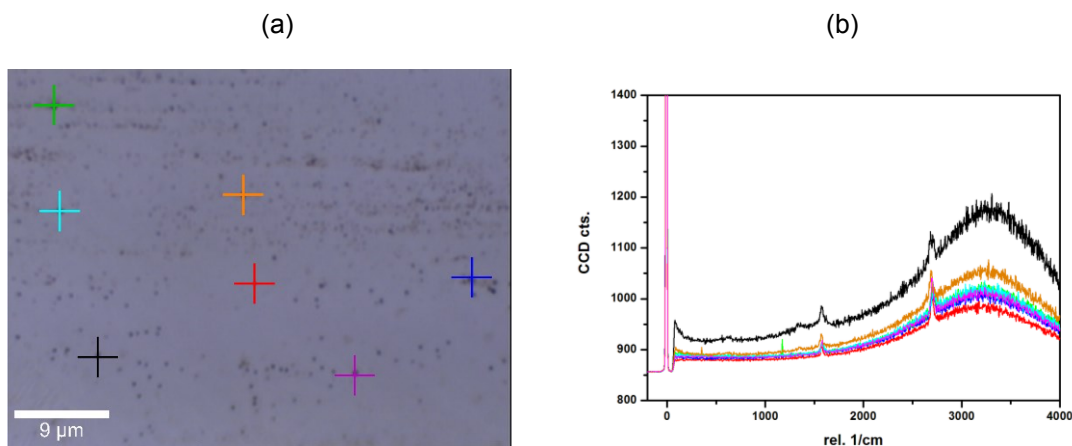


Figura 8. (a) Imagem por microscopia óptica do grafeno crescido em folha de cobre (b) Espectros dos pontos indicados em (a).

A segunda etapa consiste na caracterização do segundo material obtido, o h-BN esfoliado em PDMS. Os parâmetros de maior interesse são as suas dimensões, que podem ser observadas por microscopia de força atômica (AFM) apresentada na Figura 9. Através das escalas, é possível identificar a espessura, largura e comprimento. A escala numérica indica que o floco possui aproximadamente $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ e a escala de cores indica que o floco possui aproximadamente 300 nm de espessura.

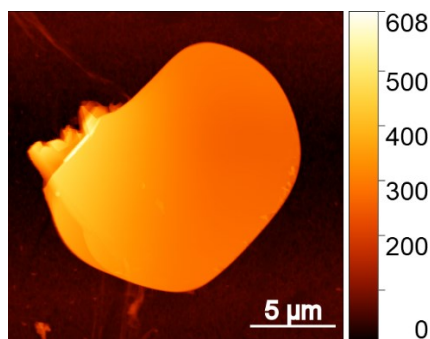


Figura 9. Imagem por microscopia de força atômica (AFM) do h-BN esfoliado com tamanho lateral de aproximadamente $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ e espessura de aproximadamente 300 nm.

Após as caracterizações realizadas, o primeiro empilhamento é realizado. O h-BN esfoliado e transferido na superfície do PDMS é posicionado acima da área de interesse do grafeno CVD transferido na lâmina de vidro como mostra a Figura 10. Com o contato das superfícies, o h-BN é sobreposto no grafeno.

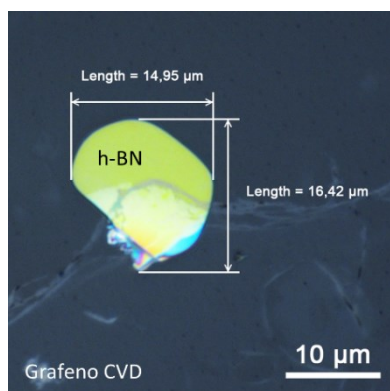
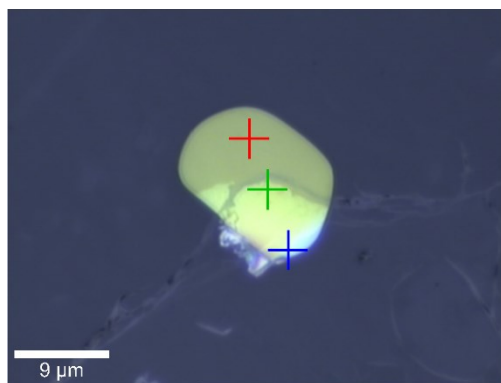


Figura 10. Imagem por microscopia óptica da heteroestrutura grafeno/h-BN.

Para confirmar a presença e o contato dos dois materiais, mesmo sendo visível, a amostra é caracterizada novamente por espectroscopia Raman. Dessa forma, observa-se nos espectros a presença dos dois materiais e, principalmente, a região em que ambos estão unidos. Na Figura 11 temos a imagem de microscopia óptica com as indicações em vermelho (apenas h-BN), verde e azul (h-BN e grafeno) destacando as regiões onde foram medidos os espectros Raman.

(a)



(b)

(c)

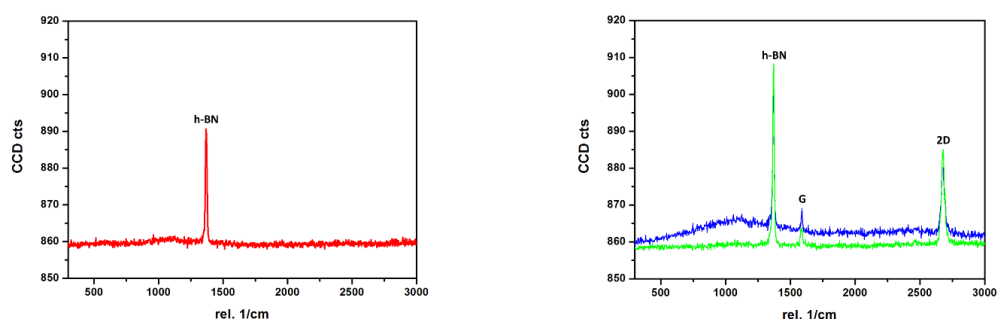


Figura 11. (a) Imagem por microscopia óptica da heteroestrutura (b) Espectro da região do h-BN indicado em a (c) Espectros da região de contato dos dois materiais, grafeno e h-BN indicados em a.

Os métodos de transferência são eficientes para as aplicações do projeto: os flocos podem ser facilmente transferidos de superfície para superfície. E, por isso, uma

nova tentativa é realizada para o empilhamento da terceira camada, o grafeno esfoliado. Por isso, a terceira etapa consiste na caracterização do terceiro material obtido, o grafeno esfoliado em PDMS. Aqui, os parâmetros de maior interesse são as suas dimensões e número de camadas, esses que podem ser observadas por microscopia óptica e espectroscopia Raman, respectivamente. A escala numérica indica que o floco possui aproximadamente $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ e os espectros obtidos na área do floco indicam que esse possui apenas uma camada.

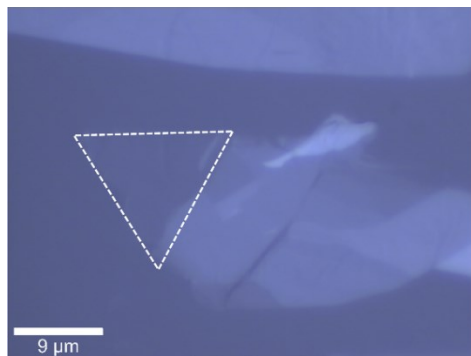


Figura 12. Imagem por microscopia óptica do grafeno esfoliado ($15 \times 15 \mu\text{m}^2$). A região pontilhada representa a área de interesse.

(a)

(b)

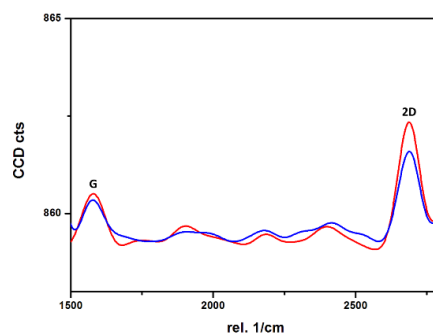


Figura 13. (a) Imagem por microscopia óptica do grafeno esfoliado (b) Espectros dos pontos indicados em a.

Nessa etapa, é necessária a retirada de flocos que podem atrapalhar a transferência. Para isso, é utilizado um método desenvolvido por pesquisadores do *MackGrappe* que utiliza uma micropipeta. Com a coleta e cura de uma microgota de polímero na ponta da micropipeta, é possível retirar os flocos da amostra por micromanipulação. Finalmente, após isso, é possível realizar a transferência do floco, novamente, pelo contato das superfícies.

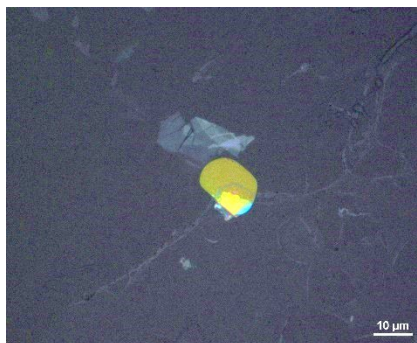


Figura 14. Heteroestrutura obtida através da metodologia utilizada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos de transferência utilizados são eficientes e atendem os objetivos do projeto, a montagem de heteroestruturas de Van der Waals baseadas em materiais bidimensionais. O domínio das técnicas de empilhamento são fundamentais para uma estrutura com superfícies e intercamadas limpas e, por isso, o foco deste trabalho estava voltado para a determinação de um modelo de fabricação que fosse reproduzível.

O objetivo de construir e caracterizar as heteroestruturas baseadas em materiais bidimensionais foi alcançado, uma vez que foi possível observar por espectroscopia Raman os picos de ambos os materiais utilizados para a combinação: grafeno e h-BN. Ainda assim, o aprimoramento da metodologia deve ser contínuo para que a melhor heteroestrutura com propriedades excepcionais seja fabricada e, também, para superar o maior desafio da atualidade, a fabricação de dispositivos em larga escala com reprodutibilidade.

Por isso, pretende-se prosseguir com o trabalho utilizando esses e outros métodos alternativos em desenvolvimento por pesquisadores do *MackGraphe* que facilitará a transferência do grafeno CVD através da utilização do PDMS como polímero sacrificial. O diferencial está na pressão controlada que é aplicada no sistema PDMS/grafeno/folha de cobre e, após a corrosão do cobre, PDMS/grafeno/substrato alvo para aprimorar o contato das superfícies. O processo de corrosão e lavagem é semelhante ao *Wet Transfer*. Após a transferência, a área do grafeno deverá ser visualizada e varrida por microscopia óptica e espectroscopia Raman para determinar o número de camadas predominante e a qualidade do material transferido.

Com todas as etapas estabilizadas, o próximo passo será a caracterização elétrica e integração das estruturas em dispositivos visando as áreas da eletrônica e fônica.

6. REFERÊNCIAS

- BARCELOS, I. D. **Estudo de propriedades estruturais e óticas de heteroestruturas formadas com materiais bidimensionais**. 2015. 2015.
- CASTELLANOS-GOMEZ, A. et al. Deterministic transfer of two-dimensional materials by all-dry viscoelastic stamping. **2D Materials**, v. 1, n. 1, p. 1–34, 2014.
- CHEN, C. C. et al. Thermoelectric transport across graphene/hexagonal boron nitride/graphene heterostructures. **Nano Research**, v. 8, n. 2, p. 666–672, 2015.
- DA COSTA, M. C. F. **Grafeno e seus derivados: estudo das propriedades de superfície e processos de transferência para substratos poliméricos**. 2017. 2017.
- GEIM, A. K.; GRIGORIEVA, I. V. Van der Waals heterostructures. **Nature**, v. 499, n. 7459, p. 419–425, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nature12385>>.
- KIM, S. et al. Robust graphene wet transfer process through low molecular weight polymethylmethacrylate. **Carbon**, v. 98, n. 1, p. 352–357, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2015.11.027>>.
- LI, X. et al. Large area synthesis of high quality and uniform graphene films on copper foils. **Science (New York, N.Y.)**, v. 324, n. 5932, p. 1312–1314, 2009.
- NETO, A. C.; GUINEA, F.; PERES, N. M. Drawing conclusions from graphene. **Physics World**, v. 19, n. 11, p. 33–37, nov. 2006. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/2058-7058/19/i=11/a=34?key=crossref.5356347b1fd909b4a00f6b22fa472f6e>>.
- NOVOSELOV, K. S.; CASTRO NETO, A. H. Two-dimensional crystals-based heterostructures: Materials with tailored properties. **Physica Scripta**, n. T146, p. 1–6, 2012.
- SUN, Z.; MARTINEZ, A.; WANG, F. Optical modulators with 2D layered materials. **Nature Photonics**, v. 10, n. 4, p. 227–238, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2016.15>>.
- 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**, v. 2, n. 2, p. 54–57, 2016.

YU, J. et al. Synthesis of high quality two-dimensional materials via chemical vapor deposition. **Chemical Science**, v. 6, n. 12, p. 6705–6716, 2015.

Contatos: biancatieppo@gmail.com; lucia.saito@mackenzie.br