

APROVEITAMENTO DE MINERAIS E REJEITOS PARA SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS FUNCIONAIS

Samuel Marques de Sousa¹; Helane Lucia Oliveira de Morais²; Ana Paula Moreira Barboza³; Joyce Cristina Cruz Santos⁴; Elisângela Silva Pinto⁵; Mariana de Castro Prado⁶

1 Samuel Marques de Sousa, Bolsista IFMG, Graduando em Engenharia Civil, IFMG Campus Santa Luzia, Santa Luzia - MG; marques.sousa06@gmail.com

2 Helane Lucia Oliveira de Morais, Técnica em química IFMG Campus Santa Luzia; helane.morais@ifmg.edu.br

3 Ana Paula Moreira Barboza, Pesquisadora da UFOP, Campus Ouro Preto, ana.barboza@ufop.edu.br

4 Joyce Cristina Cruz Santos, Pesquisadora UFMG, Campus Pampulha, cruzsantosjoycec@gmail.com

5 Elisângela Silva Pinto, Pesquisadora do IFMG, Campus Ouro Preto; elisangela.pinto@ifmg.edu.br

6 Mariana de Castro Prado: Pesquisadora da UFOP, Campus Ouro Preto; mariana.prado@ufop.edu.br

Palavras-chave: Polímeros, filossilicatos, reforço, óxido de grafeno e compósito.

RESUMO

O estudo dos compósitos poliméricos é fundamental para o desenvolvimento tecnológico, no entanto para chegar a tal avanço é de suma importância conhecer as suas principais etapas, desde os conceitos básicos dos polímeros até as técnicas mais avançadas para o desenvolvimento da pesquisa, por isso, este trabalho buscou primeiramente compreender todas as etapas da criação de um compósito polimérico a base de álcool polivinílico (PVA), polivinilpirrolidona (PVP) e policloreto de vinila (PVC). Em seguida foram realizados diversos testes para otimizar a metodologia de obtenção de filmes de PVA, PVC e PVP, cujo principais parâmetros foram concentração, tempo de homogeneização, repouso, temperatura da estufa e tempo de secagem. Após sua produção, os filmes foram caracterizados de acordo com sua massa, espessura e intumescimento. Obteve-se assim um padrão, cuja relação espessura por volume por área obedece a uma equação linear. Já o teste de intumescimento apresentou um inchamento nos filmes com o passar do tempo, no entanto não ocorreu a sua dissolução, o que não é esperado devido o PVA ser muito solúvel em água. Ao finalizar a etapa de caracterização dos filmes poliméricos, foi preciso encontrar uma receita que atendesse a espessura especificada na norma *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D882/02, tanto para o PVA quanto para o PVC. Por fim, realizou-se os testes de esfoliação de três filossilicatos (talco, mica e jade), primeiramente o Colato de Sódio (SC – *Sodium cholate*) foi escolhido como o surfactante principal, devido a sua eficiência, em um segundo momento iniciou os testes para se obter a metodologia que maximiza a esfoliação dos minerais, verificou-se que o talco foi o mineral que apresentou melhores resultados nas análises de Microscopia de Varredura por Sonda (SPM – Scanning Probe Microscopy). Entretanto os testes de esfoliação da mica apresentaram flocos muito aglomerados, devido a carga de superfície do mineral, para resolver esse problema serão testados surfactantes catiônicos e não-iônicos.

INTRODUÇÃO:

Os estudos dos materiais melhorados estão intrinsecamente ligados ao desenvolvimento da sociedade, eles surgiram para atender uma demanda que busca por um produto com melhor desempenho mecânico e/ou térmico, além da incorporação de estudos que levem a diminuição da geração de resíduos (ou ao aproveitamento destes), maior eficiência energética, menor custo e outros aspectos relacionados à sustentabilidade.

Um material que é comumente utilizado em pesquisas são os polímeros, que incluem plásticos e borrachas. Segundo Canevarolo Jr. (2002) os polímeros são macromoléculas formadas pela união de milhares de unidades de moléculas (monômeros), iguais ou não. Essa união acontece devido a uma reação em cadeia, com ajuda de temperatura e catalisadores.

Os polímeros apresentam inúmeras propriedades de interesse, tais como a grande ductilidade e flexibilidade (permitindo que sejam moldados em diversos formatos) e uma baixa massa específica,

permitindo a confecção de peças mais leves que de metal, por exemplo. Frequentemente apresentam custo de produção mais baixo que as alternativas, tornando-se opções economicamente vantajosas.

Os compósitos de matriz polimérica foram elaborados a fim de reforçar materiais poliméricos e estender suas possibilidades de aplicação. Atualmente os tipos mais comuns são os compósitos com reforço de fibra de vidro, fibra de carbono e fibras aramidadas (Callister e Rethwisch, 2013). No geral esses compósitos apresentam alto desempenho mecânico.

Nas últimas décadas, o emprego de materiais nanométricos para a produção de compósitos poliméricos apresentou-se grande interesse no meio acadêmico (Meneghetti e Qutubuddin, 2006; Paul e Robeson, 2008; Zou et al., 2008). Visto que esses nanomateriais apresentam características peculiares, como por exemplo os materiais bidimensionais (Butler et al., 2013). Estes possuem grandes dimensões laterais mas espessura reduzida, podem ter apenas um átomo em sua menor dimensão.

Duas das principais classes de nanomateriais estudadas para esse fim são os compostos a base de carbono, como grafeno, nanotubos, óxido de grafeno (GO - *graphene oxide*) e nanofibras (Ramanathan et al., 2007; Paul e Robeson, 2008; Gonçalves et al., 2010; Zhao et al., 2010; Potts et al., 2011; Singh et al., 2011; Park e Bae, 2017) e os compostos a base de silicatos (naturais ou sintéticos) produzidos na escala nanométrica (Makiniemi et al., 2015; Zare, 2015; Chen et al., 2017; Yuce et al., 2017).

Um problema na fabricação de compósitos poliméricos a base de carbono é o seu custo, tendo em vista que sua produção em larga escala ainda não é realizada ou é muito dispendiosa, aumentando assim o valor da produção. A partir disso surgiu a motivação para este trabalho: estudar o emprego de minerais filossilicatos provindos de rejeitos de mineração do estado de Minas Gerais, para o melhoramento de propriedades mecânicas e térmicas de matrizes poliméricas.

Os minerais escolhidos para a pesquisa foram o talco, jade e mica. O talco também conhecido como esteatita, é um filossilicato com composição química $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$. É o principal componente da pedra-sabão, rocha amplamente empregada no artesanato encontrado na região de Ouro Preto - MG e outras cidades históricas próximas (Alencar et al., 2015; Torres et al., 2015). Alencar *et al.* reportaram, recentemente, medidas das propriedades mecânicas de talco em flocos de poucas camadas de espessura (nanotalco). Eles encontraram um limite de resistência à tração (*breaking strength*) para tração uniaxial entre 29 a 33 Nm^{-1} (grafeno: 42 Nm^{-1} Lee *et al.*, 2008) e um módulo de elasticidade bidimensional de 181 Nm^{-1} , metade do valor predito para o grafeno (Alencar *et al.*, 2015). Sendo assim, o talco com dimensões nanométricas ainda é um material com propriedades mecânicas extremamente interessantes e com um custo de obtenção mais baixo, especialmente no estado de Minas Gerais, onde são considerados como rejeitos da indústria de pedra sabão e podem ser usados como fonte do material (Torres *et al.*, 2015).

No que se refere a mica podemos considerar, por exemplo, suas aplicações como material que aumenta a resistência e flexibilidade de cimentos a base de gesso, além de suas propriedades de condução de calor (Yoder et al., 1955). Há ainda dois materiais que podem ser utilizados como agentes de reforço em matrizes poliméricas os minerais, lizardita e antigorita, do grupo da serpentina (Rocca, 2006). Filossilicatos como antigorita e lizardita possuem clivagem basal perfeita e proeminente, e as lamelas de clivagem (placas) são flexíveis e raramente quebradiças. De um modo geral, os filossilicatos apresentam dureza baixa, inferior a 4 Mohs e densidade relativamente baixa comparado a outros silicatos (Capitani e Mellini, 2004).

METODOLOGIA:

PVA

Para chegar à metodologia para obtenção dos filmes de PVA deu-se início a um conjunto de quatro experimentos que foram realizados segundo Santos (2011). O passo inicial foi a homogeneização da solução, na qual o PVA foi colocado lentamente em um frasco com água destilada e logo após foi deixado em banho. Foi utilizada agitação magnética e aquecimento a 90°C para a dissolução do PVA. Logo em seguida a solução foi colocada em placas de Petri e deixada em repouso para que o solvente evaporasse de forma natural. Cada placa recebeu um volume diferente de solução. Após esse repouso, as amostras foram colocadas na estufa para completar a secagem.

As principais diferenças entre os testes estão na variação da metodologia a partir de resultados obtidos nos testes anteriores, como por exemplo, a variação do tempo de homogeneização, o tempo de repouso da amostra para secagem natural, o tempo em estufa para a secagem final e, por fim, a temperatura na qual a estufa foi mantida.

PVP

Para a obtenção dos filmes de PVP foi utilizado uma metodologia similar ao do PVA, entretanto alterou-se o solvente utilizado, substituindo a água destilada pelo álcool etílico. Consequentemente diminuiu-se a temperatura da chapa aquecedora de 90°C para 50°C.

PVC

A metodologia para fabricação de filmes de PVC também é similar ao de PVA, entretanto difere-se em alguns aspectos, primeiramente dissolveu-se o PVC em um frasco com Tetraidrofurano (THF) sem necessitar de calor, e, por fim, após o período de homogeneização a solução é colocada na placa de petri para a secagem natural, dispensando assim a utilização de estufa. Entretanto foi preciso colocar um parafilme em cima da placa de petri com pequenos furos para que a evaporação aconteça de forma lenta.

TESTE DE INTUMESCIMENTO

Logo após cada filme ser retirado da estufa, iniciou a fase de caracterização dos mesmos, sendo essa caracterização através da massa de cada filme e também uma média da espessura de 5 pontos diferentes em cada amostra.

Outro teste realizado com a finalidade de obter uma caracterização das amostras foi o teste de intumescimento, o qual foi preparado segundo Santos (2011). Para isso foram cortadas 10 amostras de filme de PVA de 1,5 cm x 1,5cm, os quais foram colocados em recipientes com 35 ml de água para assim descobrir como se dá a absorção de água pelos filmes no decorrer do tempo. As amostras foram retiradas da água nos respectivos tempos: 5 min; 10 min; 15 min; 30 min; 60 min; 90 min; 120 min; 150 min; 180 min; 1440 min.

Para o cálculo do intumescimento foi utilizado a seguinte fórmula

$$I = \frac{M_i - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Eq. 1} \quad \text{Onde: } M_i \text{ é a massa intumescida e } M_s \text{ é a massa seca.}$$

ESFOLIAÇÃO

Nesta etapa do projeto, iniciam-se os testes de esfoliação dos filossilicatos, que são minerais com estrutura em folhas e composição básica Si_2O_5 . Entre eles foram utilizados a Esteatita [$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$], Jade [$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] e Mica [$\text{KM}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$], com intuito de se obter em larga escala folhas bidimensionais dos minerais e em tamanhos manométricos, para isso foi utilizado o método de Backes et al. (2016).

O método de esfoliação em fase líquida (LPE – *liquid-phase exfoliation*) apresenta-se a vantagem de esfoliar no meio aquoso, onde o material que se deseja obter em nanoescala é colocado em uma solução com surfactante na presença de ondas mecânicas fornecidas pelo ultrassom (Figura 1). Essas ondas mecânicas vão fornecer a energia suficiente para romper as ligações de van der Waals e a presença do surfactante irá permitir que as nanofolhas não voltem a se agregarem.



Figura 1: Esfoliação em fase líquida
Fonte: Autor

Para o processo de esfoliação inicialmente foi preparada uma solução com 50 mL de água destilada e 300 mg de surfactante (os primeiros testes foram com o SDS e posteriormente SC). Em seguida adiciona-se 100 mg do pó do mineral que se deseja esfoliar, um processo similar pode ser visto na Figura 2 (A, B), diferenciando apenas o material esfoliado.

Para a próxima fase utilizou-se um banho ultrassônico para realizar a esfoliação, variando o tempo de exposição à energia ultrassônica. Logo após as soluções foram centrifugadas para selecionar os tamanhos das nanocamadas. Esse processo é repetido quantas vezes forem necessárias (Figura 2 H), logo em seguida é retirado do sobrenadante final com o auxílio de uma pipeta uma quantidade da solução esfoliada, que por sua vez irá ser depositada em um substrato de silício a uma certa temperatura, por fim as amostras são analisados pela técnica SPM.

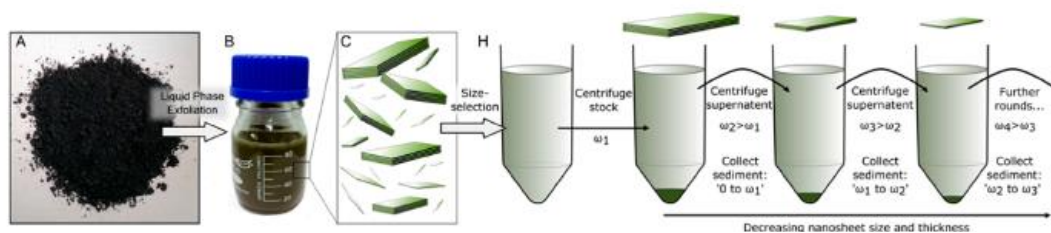


Figura 2: Esfoliação de grafite em fase líquida com diversas etapas de centrifugação.
Fonte: Backes et al. (2016).

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

FILMES DE PVA

Na obtenção do filme de PVA, o objetivo principal era a definição dos parâmetros para sua fabricação, com isso foram realizados 4 experimentos, na qual varia-se os valores dos parâmetros até encontrar a receita final do filme (tabela 1).

Tabela 1: Parâmetros de filmes de PVA ideais

Parâmetros	Concentração (%)	Tempo de homogeneização (min)	Repouso (h)	Temperatura estufa (°C)	Tempo de secagem (h)	Volume solução (mL)	Espessura (mm)	Massa (g)
Amostra 1	5	40	48	40	24	10	0,125	0,568
Amostra 2	10	60	48	40	24	6	0,124	0,566

Fonte: autor

Como pode ser observado um volume de 10 mL da concentração 5% corresponde à resultados similares ao volume de 6 mL da amostra com concentração de 10%, sendo os resultados da espessura e da massa mais precisos, todos eles muito próximos.

Para se encontrar um grau de linearidade foi preciso alterar o tempo de repouso e diminuir a temperatura da estufa do procedimento de Santos (2011), pois assim o material teria mais tempo para secar a uma baixa temperatura, permitindo que o material tenha uma plasticidade.

O filme que será utilizado para aplicação das nanofolhas dos filossilicatos tem que ter espessura menor 0,25 mm segundo a norma *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D882/02 (ASTM, 2002), para isso utilizou-se da curva linear de espessura X volume por área gerada pelos experimentos anteriores, com os cálculos chegou-se a um volume em torno de 15 a 18mL para uma área de 27,80 cm² e 5% de concentração, que corresponde a espessura especificada.

FILMES DE PVP

Para a obtenção dos filmes de PVP foram utilizados os mesmos parâmetros a fim de identificar a metodologia ideal, no entanto não foi possível chegar a uma receita, pois o filme de PVP primeiramente apresentou uma característica vítrea após a secagem na estufa, sendo impossível retirar a amostra da placa de petri.

No segundo experimento foi excluído a secagem da amostra em estufa, por promover a cristalização da mesma, sendo um efeito indesejável da pesquisa. Com isso deixou-se apenas em repouso na temperatura ambiente, entretanto isso não foi o suficiente para secar completamente a amostra, apresentando sempre um elevado teor de umidade.

FILMES DE PVC

Para produção do filme de PVC foi realizado 2 testes (Tabela 2). No primeiro teste foram analisadas duas amostras da solução do filme, uma amostra de 8 e 12 mL em uma placa de petri de 27,81 cm².

Tabela 2: teste para obter filmes de PVC

Parâmetros	Concentração (%)	Solvente	Tempo de homogeneização (min)	Repouso [dia(s)]
Teste 1	4	THF	30	1
Teste 2	2	THF	30	3

Fonte: Autor

Após o fim do repouso, observou que as duas amostras estavam quebradiças, não sendo possível retirá-las inteira da placa de petri. Isso se deu pelo fato das amostras terem se solidificado rapidamente após o contato com o ar, devido ao baixo ponto de ebulição do THF.

Para resolver esse problema, no segundo teste diminuiu-se a concentração da solução e cobriu-se a placa de petri com parafina após colocar a solução para iniciar o processo de repouso. Com isso a amostra ficou mais tempo em repouso para que acontecesse a secagem por completo, no entanto o filme ficou em um estado flexível, sendo possível retirar por completo da placa de petri.

Para conseguir uma espessura ideal (ASTM, 2002) foi preciso fazer um filme em torno de 18 mL à concentração de 4% e com uma placa de petri de 25,52 cm².

TESTE DE INTUMESCIMENTO

Os experimentos de intumescimento nos filmes de PVA apresentaram inchamento nos filmes. Apresentaram também em um primeiro instante um crescimento do intumescimento no decorrer do tempo e em um segundo instante, mas especificamente após 60 minutos, os filmes pararam de intumescer e permaneceram consideravelmente constantes (gráfico 1).

Era esperado que os filmes de PVA inchassem, pois em contato com a água as cadeias, que eram inicialmente de PVA-PVA, passarem a ser de PVA-água-PVA, provocando assim a variação de volume (SANTOS, 2011). No entanto, era esperado que o PVA se dissolvesse em menos de 1 hora, o que claramente não aconteceu, pode se observar que nem o filme que ficou de molho por 24 horas foi completamente dissolvido.

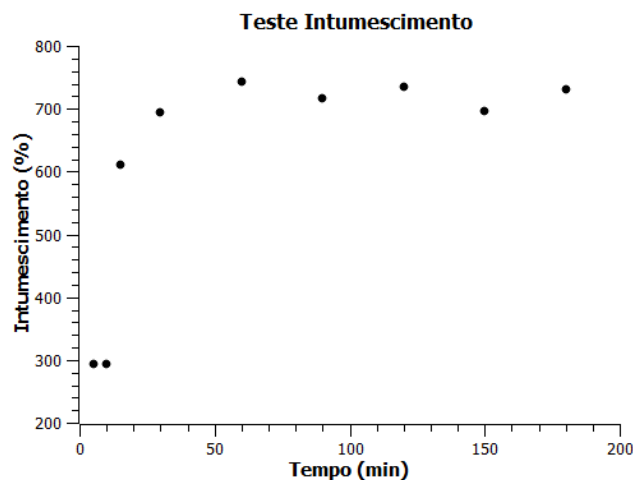


Gráfico 1: Resultado Teste de intumescimento

Fonte: Autor

Dois fatos podem explicar esse acontecimento, ou pelo fato do PVA utilizado ter um baixo grau de hidrólise (SANTOS, 2011), ou pelo fato de a água está em temperatura ambiente, visto que em trabalhos similares, como segundo BLANCHON et al. (1991) as amostras são colocadas em água à cerca de 34°C.

ESFOLIAÇÃO

Foram realizados diversos testes de esfoliação, variando diversos parâmetros, como por exemplo o surfactante utilizado, tempo no ultrassom, tempo e velocidade de rotação da centrífuga. Com isso foi possível obter diversos resultados para cada mineral utilizado, otimizando assim os melhores produtos a fim de se alcançar a receita final dos parâmetros que permite o maior número de nanofolhas com uma pequena espessura.

O talco foi o filossilicato que apresentou melhores resultados, com o padrão encontrado foi possível observar muitos flocos, no entanto as amostras estavam muito densas (Figura 3), é possível concluir que o procedimento de esfoliação está produzindo flocos de poucos nanômetros de espessura, porém a alta densidade na amostra depositada em Si/SiO_x não permite a individualização dos flocos e medidas precisas de suas dimensões. A partir disso buscou-se diminuir a concentração das soluções ou/ e aumentar a velocidade da centrífuga, a fim de pode visualizar com maior propriedade os flocos.

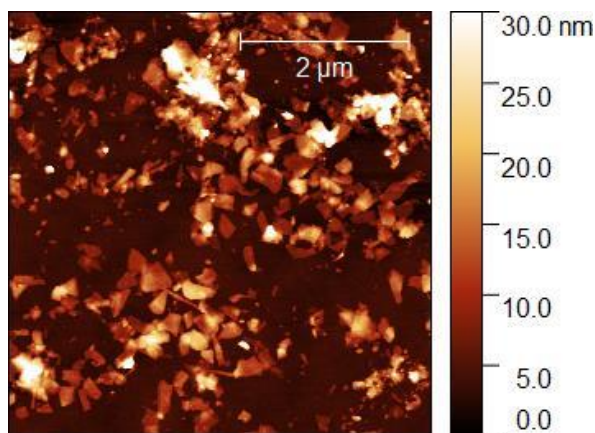


Figura 3: amostra de flocos de talco

Fonte: Autor

Quanto a mica e a jade apresentaram maiores dificuldades na esfoliação, no caso da mica é devido a carga de superfície que surge após acontecer a clivagem, permitindo que o material se agregue. E no caso da jade é devido a estrutura do material em si. Para contornar o problema da mica, vai ser testados surfactantes não-iônicos e catiônicos.

CONCLUSÕES:

Encontrou-se a receita para produção de filmes de PVA e PVC, com os respectivos gráficos de linearidade de espessura X volume por área.

Para a fabricação de um filme segundo as normas necessita-se de um volume entorno de 16 mL à concentração de 5% e uma área de 27,80 cm² para o PVA e de aproximadamente 18 mL à concentração de 4% e uma área de 25,52 cm² da placa de petri.

O filme de PVP não foi possível de ser fabricado, pois o filme se vitrificava ao ser submetido a secagem na estufa.

A esfoliação dos filossilicatos apresentou-se ótimos resultados para o talco, no entanto é preciso encontrar um meio de diminuir a concentração para poder encontrar os flocos desagregados. Quanto a mica e a jade não foram bons os resultados, por causa da carga de superfície e a estrutura dos minerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALENCAR, A. B. et al. Experimental and theoretical investigations of monolayer and few-layer talc. **2d Materials**, v. 2, n. 1, p. 8, Mar 2015.

ASTM - American Standard Testing and Material; ASTM D882/02: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, New York, 2002

BACKES, Claudia et al. Guidelines for exfoliation, characterization and processing of layered materials produced by liquid exfoliation. **Chemistry of Materials**, v. 29, n. 1, p. 243-255, 2016.

BLANCHON, Sylvene et al. Permeability of progesterone and a synthetic progestin through methacrylic films. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 72, n. 1, p. 1-10, 1991.

BUTLER, S. Z. et al. Progress, Challenges, and Opportunities in Two-Dimensional Materials Beyond Graphene. **ACS Nano**, v. 7, n. 4, p. 2898-2926, Abr 2013.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 817 ISBN 978-85-216-2124-9.

CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogo e engenheiros**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CAPITANI, G.; MELLINI, M. The modulated crystal structure of antigorite: The m=17 polysome. **American Mineralogist**, v. 89, n. 1, p. 147-158, Jan 2004.

CHEN, R. S.; AHMAD, S.; GAN, S. Characterization of recycled thermoplastics-based nanocomposites: Polymer-clay compatibility, blending procedure, processing condition, and clay content effects. **Composites Part B-Engineering**, v. 131, p. 91-99, Dec 2017.

GONCALVES, G. et al. Graphene oxide modified with PMMA via ATRP as a reinforcement filler. **Journal of Materials Chemistry**, v. 20, n. 44, p. 9927-9934, 2010.

LEE, C. et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. **Science**, v. 321, n. 5887, p. 385-388, Jul 2008. ISSN 0036-8075.

MAKINIEMI, R. O. et al. Conducting, Self-Assembled, Nacre-Mimetic Polymer/Clay Nanocomposites. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 7, n. 29, p. 15681-15685, Jul 2015.

MENEGHETTI, P.; QUTUBUDDIN, S. Synthesis, thermal properties and applications of polymer-clay nanocomposites. **Thermochimica Acta**, v. 442, n. 1-2, p. 74-77, Mar 2006.

PARK, S. H.; BAE, J. Polymer Composite Containing Carbon Nanotubes and their Applications. **Recent Patents on Nanotechnology**, v. 11, n. 2, p. 109-115, 2017.

PAUL, D. R.; ROBESON, L. M. Polymer nanotechnology: Nanocomposites. **Polymer**, v. 49, n. 15, p. 3187-3204, Jul 2008.

POTTS, J. R. et al. Graphene-based polymer nanocomposites. **Polymer**, v. 52, n. 1, p. 5-25, Jan 2011.

RAMANATHAN, T. et al. Graphitic nanofillers in PMMA nanocomposites - An investigation of particle size influence on nanocomposite and dispersion and their properties. **Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics**, v. 45, n. 15, p. 2097-2112, Aug 2007.

ROCCA, R. R. *Estudo comparativo entre as propriedades dos centros luminescentes e paramagnéticos da antigorita e da lizardita do grupo da serpentina: Mg₃[SiO₅](OH₄)*. Instituto de Física, USP, 2006, 86p. (Dissertação, Mestrado em Física).

SANTOS, Joyce Cristina Da Cruz. "SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE NANOCOMPÓSITOS PVA/NANOTUBOS DE CARBONO PARA POTENCIAL APLICAÇÃO BIOMÉDICA. 2011.

SINGH, V. et al. Graphene based materials: Past, present and future. **Progress in Materials Science**, v. 56, n. 8, p. 1178-1271, Oct 2011.

TORRES, H. S. S.; VARAJAO, A.; SABIONI, A. C. S. Technological properties of ceramic produced from steatite (soapstone) residues-kaolinite clay ceramic composites. **Applied Clay Science**, v. 112, p. 53-61, Aug 2015.

YODER, H.S., EUGSTER, H.P. Synthetic and natural muscovites. **Geochimica et Cosmochimica Acta**: 8: 225-280, 1955.

YUCE, E. et al. Properties and applications of nanoclay reinforced open-porous polymer composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 134, n. 46, Dec 2017.

ZARE, Y. New models for yield strength of polymer/clay nanocomposites. **Composites Part B-Engineering**, v. 73, p. 111-117, May 2015.

ZHAO, X. et al. Enhanced Mechanical Properties of Graphene-Based Poly(vinyl alcohol) Composites. **Macromolecules**, v. 43, n. 5, p. 2357-2363, Mar 2010.

ZOU, H.; WU, S. S.; SHEN, J. Polymer/silica nanocomposites: Preparation, characterization, properties, and applications. **Chemical Reviews**, v. 108, n. 9, p. 3893-3957, Sep 2008.

Participação em Congressos, publicações e/ou pedidos de proteção intelectual:

PRADO, M. C. ; **SOUZA, S. M.** ; MORAIS, H. L. O. ; SANTOS, J. C. C. ; VASCONCELOS, C. K. B. ; VIANA, M. ; PINTO, E. S. ; NEVES, B. R. A. ; BARBOZA, A. P. M. . PRODUÇÃO E FUNCIONALIZAÇÃO DE MATERIAIS BIDIMENSIONAIS A PARTIR DE MINERAIS, 7º encontro do INCT de nanomateriais de carbono. 2019.