



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOYCE CAVALCANTE DA SILVA

**NANOCOMPÓSITOS VERDES PARA APLICAÇÃO EM ELETRÔNICA  
FLEXÍVEL**

NATAL  
2019  
JOYCE CAVALCANTE DA SILVA

# **NANOCOMPÓSITOS VERDES PARA APLICAÇÃO EM ELETRÔNICA FLEXÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli.

Natal

2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

Seção de Informação e Referência  
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Cavalcante, J. S.

Nanocompósitos verdes para aplicação em eletrônica flexível / Joyce Cavalcante da Silva. - Natal, 2019.

39f.: il.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Antonio Eduardo Martinelli.

1. Nanocelulose. 2. Látex. 3. Nanocompósitos verdes. 4. Eletrônica flexível. I. Martinelli, Antonio Eduardo. III. Título.

RN/UF/

## **FOLHA DE AVALIAÇÃO OU APROVAÇÃO**

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Monografia do(a) candidato(a) Joyce Cavalcante da Silva, realizada em 16.04.2019.

BANCA EXAMINADORA:

---

Professor Doutor Antonio Eduardo Martinelli - Orientador  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE (UFRN)

---

Professora Doutora Ana Paula Cysne Barbosa- Avaliadora  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE (UFRN)

---

Mestre Érick Stéfano Silveira Guerra- Avaliador  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE (UFRN)

## DEDICATÓRIA

À Mainha, Niely, Naninha, Piticolas, Bia, Monique, Amara, Yuri, Vilma e Lucas pelo suporte incondicional.

Aos meus orientadores, Rubia Figueredo Gouveia, Juliana da Silva Bernardes, Murilo Santhiago e Antonio Eduardo Martinelli pela atenção, paciência, conselhos e direções.

Ao Comitê Gestor do 28º Programa Bolsas de Verão e ao CNPEM, pela excepcional organização das atividades e pelo suporte dado ao meu trabalho.

A você, leitor, pelo prestígio da sua atenção, e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Neste projeto foram preparados nanocompósitos poliméricos de látex de borracha natural reforçados com nanocristais de celulose (CNC). As nanoceluloses são candidatas promissoras como aditivos para produção de nanocompósitos devido à sua abundância, biodegradabilidade e boas propriedades mecânicas. Desta forma, a utilização dessa matéria prima renovável se faz ainda mais interessante quando são incorporadas em polímeros naturais, promovendo vários benefícios ambientais. No entanto, a maioria dos polímeros naturais possuem fracas propriedades mecânicas, limitando as suas aplicações. Nesse sentido, o uso de nanoceluloses como fase de reforço nesses materiais produziu nanocompósitos com propriedades mecânicas melhoradas. Por fim, eletrodos de carbono foram incorporados na superfície dos nanocompósitos de látex e nanocelulose, através de um processo de deposição direta e visando a obtenção de eletrodos flexíveis e transparentes, com excelentes respostas elétricas. Os materiais foram caracterizados quanto às suas topografias, propriedades mecânicas, elétricas e de adesão entre o substrato e o nanocompósito.

**Palavras-chave:** nanocelulose, látex, nanocompósitos verdes, eletrônica flexível.

## ABSTRACT

In this project, polymeric nanocomposites were made from natural rubber latex reinforced with nanocrystalline cellulose (NCC). Nanocellulose is a very promising material to use as additive on the fabrication of nanocomposites due to its abundance, biodegradability and great mechanical properties. Because of that reason, the utilization of this renewable raw material is even more interesting when applied in natural polymers, leading to environmental benefits. The use of nanocellulose as reinforcement to elastomeric materials improved the mechanical properties of the nanocomposites produced. Carbon electrodes were integrated to the green nanocomposites through direct deposition, aiming the achievement of flexible and transparent electrodes, with excellent electric responses. The materials were characterized on morphological, topographical, mechanical, electrical and adhesive properties between the substrate and nanocomposite.

**Keywords:** nanocellulose, natural rubber, green nanocomposites, flexible electronics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: estrutura química básica de celulose, exemplificando a unidade de repetição celobiótica.....	13
Figura 2: representação da estrutura molecular do polímero látex, o cis-poliisopreno.....	14
Figura 3: demonstração de como foi realizado o procedimento de diálise.....	18
Figura 4: deposição de tinta condutora na superfície do nanocompósito verde.....	22
Figura 5: ilustração do método de recobrimento por transferência.....	22
Figura 6: características visuais dos filmes de látex produzidos.....	24
Figura 7: características visuais dos filmes dos nanocompósitos 2,5% CNC.....	24
Figura 8: características visuais dos filmes dos nanocompósitos 3,5% CNC.....	24
Figura 9: Aspectos visuais dos eletrodos verdes produzidos em posições distintas.....	25
Figura 10: aspectos visuais das tintas, secas em substratos de vidro.....	26
Figura 11: gráfico tensão vs. deformação representativo dos filmes 100% látex e nanocompósitos com 2,5% CNC e 3,5% CNC, produzidos através do método de casting.....	28
Figura 12: zoom da figura 11, demonstrando o regime de deformação elástica a partir do qual foram extraídos os respectivos módulos de Young dos nanocompósitos analisados.....	28
Figura 13: microscopias de força atômica de uma área de 10 $\mu$ m <sup>2</sup> do substrato de látex.....	30
Figura 14: microscopia de força atômica de uma área de 10 $\mu$ m <sup>2</sup> do substrato com 97,5% látex e 2,5% CNC.....	30



Figura 15: microscopia de força atômica de 10 $\mu\text{m}^2$ do substrato com 96,5% látex e 3,5% CNC.....	30
Figura 16: microscopia de força atômica de uma área de 10 $\mu\text{m}^2$ da superfície da tinta condutora T10, depositada em um substrato com 96,5% látex e 3,5% CNC.....	31
Figura 17: microscopia de força atômica de uma área de 10 $\mu\text{m}^2$ do substrato com 96,5% látex e 3,5% CNC. Imagens feitas da superfície da amostra que, no processo de secagem, estava em contato direto com a placa de vidro.....	32
Figura 18: resistência de folha (sheet resistance) das tintas com 0%, 5% e 10% de látex, respectivamente.....	33
Figura 19: comportamento elétrico dos eletrodos verdes com a adição da tinta com 5% de látex nos substratos (linhas cheias) e da tinta com 10% de látex nos substratos (linhas tracejadas).....	34
Figura 20: representação da perda de contato elétrico da tinta T5 no substrato 2,5% CNC, que ocorreu em função do surgimento de fissuras irreversíveis na superfície da tinta.....	34
Figura 21: microtomografias de raio X, em duas dimensões, da seção transversal do eletrodo verde .....	35
Figura 22: microtomografias de raio X, em três dimensões, da seção transversal do eletrodo verde, com variação longitudinal.....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: teor de sólido das amostras de látex dialisadas.....	19
Tabela 2: teor de sólido das amostras de nanocelulose fibrilada.....	19
Tabela 3: teor de sólido médio das amostras analisadas e seus respectivos desvios padrão.....	19
Tabela 4: formulação utilizada para a fabricação dos compósitos poliméricos de látex e CNC.....	20
Tabela 5: formulação da tinta condutora T0, sem a adição de látex.....	21
Tabela 6: formulação das tintas condutoras T5 e T10, respectivamente.....	21
Tabela 7: medidas iniciais dos corpos de prova que sofreram fratura dentro da sessão útil estabelecida por norma.....	27
Tabela 8: características mecânicas dos substratos poliméricos produzidos.....	29
Tabela 9: dados de rugosidade de superfície RMS e área superficial medidos via microscopia de força atômica.....	31
Tabela 10: comparação da RMS e da área superficial entre as duas faces do substrato com 96,5% látex e 3,5% CNC.....	33

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Objetivos do projeto.....	16
3. Materiais e metodologia experimental.....	17
3.1. Materiais utilizados.....	17
3.1.1 Materiais utilizados no preparo dos nanocompósitos verdes.....	17
3.1.2 Materiais utilizados no preparo das tintas condutoras.....	17
3.2. Diálise do látex.....	17
3.2.1. Materiais utilizados.....	17
3.2.2. Procedimento experimental.....	18
3.3. Determinação do teor de sólido das amostras.....	18
3.4. Preparação e <i>casting</i> dos filmes.....	19
3.5. Preparo das tintas condutoras.....	20
3.6. Método de recobrimento por deposição da tinta condutora ( <i>silk screen</i> ).....	21
3.7. Método de recobrimento por transferência da tinta condutora.....	22
3.8. Técnicas de caracterização utilizadas.....	22
4. Resultados e discussões.....	24
4.1. Análise estética e funcional dos filmes dos nanocompósitos verdes de látex e CNC.....	24
4.2. Análise dos resultados obtidos através dos métodos de recobrimento do nanocompósito com trilhas de tinta condutora.....	25
4.2.1. Método de recobrimento por deposição da tinta condutora.....	25
4.2.2. Método de recobrimento por transferência da tinta condutora e seus problemas.....	25
4.3. Análise e caracterização mecânica dos nanocompósitos de látex e CNC.....	26
4.4. Análise da topografia e rugosidade dos nanocompósitos através da utilização da microscopia de força atômica (AFM).....	29
4.5. Análise das respostas elétricas dos eletrodos verdes produzidos.....	33

4.6. Análise da percolação da tinta no eletrodo verde através da microtomografia de raios X.....	35
5. Considerações finais.....	37
6. Referências bibliográficas.....	38

## 1. Introdução

Um material compósito é o resultado da combinação de dois ou mais materiais distintos, ou ainda formas alotrópicas de um mesmo material, que atuam em sinergia e que permanecem distintos e separados por uma interface. Dessa forma, uma matriz (polimérica, cerâmica ou metálica) é reforçada com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas, ópticas, térmicas, elétricas, de abrasão, etc.

A celulose nanocristalina (CNC) é um polímero natural biodegradável. Trata-se de um material nanoestruturado produzido a partir de insumos celulósicos, como o algodão, papel e o bagaço da cana de açúcar. A celulose é considerada o polímero mais abundante da terra [1] e consiste em um homopolissacarídeo linear composto por unidades de  $\beta$ -D-glucopiranosas, unidas por ligações do tipo  $\beta$ -1-4, onde cada monômero possui três grupos hidroxilas, como ilustrado na figura 1.

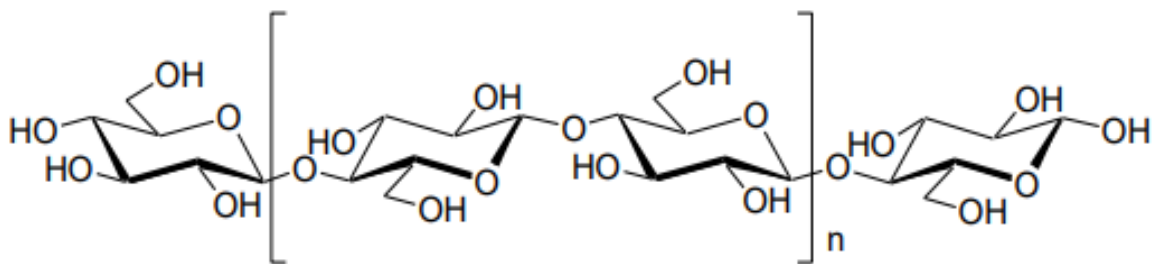


Figura 1: estrutura química básica de celulose, exemplificando a unidade de repetição celobiótica [2].

Tais grupos hidroxilas têm a habilidade de formar ligações intermoleculares de hidrogênio, que atuam de forma significativa na ordenação cristalina de tal material, governando as suas propriedades físicas e reológicas [3].

As forças intermoleculares [de hidrogênio] vão determinar decisivamente a maioria das propriedades físicas do polímero: temperatura de fusão, solubilidade, cristalinidade, difusão, permeabilidade a gases e vapores, deformação e escoamento envolvendo em todos os casos a quebra e formação de ligações intermoleculares. Quanto mais fortes forem essas forças, maior a atração entre cadeias, tornando-se mais difícil todo e qualquer evento que envolva a separação e/ou fluxo de uma cadeia sobre a outra [4].

A utilização de nanopartículas de celulose (ex.: nanocristais, nanofibras, *whiskers*, etc) como reforço em nanocompósitos é uma área de interesse relativamente nova, tanto que os primeiros trabalhos na área começaram a ser

publicados a partir dos anos 2000. Além do baixo custo dos insumos, o uso de partículas de celulose como reforço tem inúmeras vantagens bem conhecidas como, por exemplo, baixa densidade, natureza renovável, baixo consumo de energia, altas propriedades específicas, abrasividade moderada durante o processamento, biodegradabilidade, reatividade de superfície razoável (que pode ser utilizada para a grafitação de grupos químicos específicos) e disponibilidade quase que ilimitada [5].

O material tipicamente utilizado para nanoreforço é a celulose I, extraída por métodos tradicionais de branqueamento de fibras de lignocelulose. A celulose I é responsável pelo melhoramento mecânico de propriedades dos biopolímeros em função da sua alta cristalinidade [2]. A elevada cristalinidade da nanocelulose, que pode chegar a até 90%, influencia diretamente na resistência mecânica final do compósito, uma vez que a medida em que o grau de cristalinidade de um polímero cresce, o módulo elástico, a resistência ao escoamento e a dureza também aumentam [3].

O látex é uma dispersão coloidal estável de nanopartículas poliméricas, produzidas através de polimerização heterogênea via radicais livres [6]. O látex, ou borracha natural, é obtido a partir da *Hevea brasiliensis*, um tipo de seringueira. Sua nomenclatura oficial, determinada pela IUPAC, é cis-poliisopreno. Sua estrutura molecular pode ser observada na figura 2 a seguir.

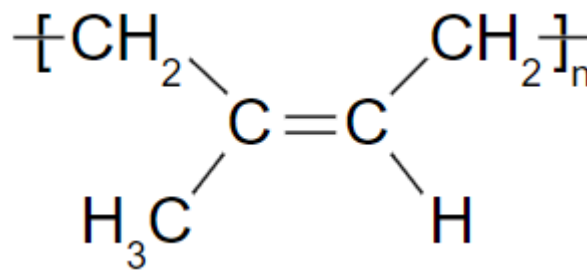


Figura 2: representação da estrutura molecular do polímero látex, o cis-poliisopreno.

A borracha natural é classificada como elastômero, pela baixa densidade de ligações cruzadas que permitem o movimento relativo entre cadeias de maneira reversível. Elastômeros são polímeros que, à temperatura ambiente, podem ser deformados repetidamente a pelo menos duas vezes o seu comprimento original. Retirado o esforço, deve voltar rapidamente ao seu tamanho original [4]. Por esses

motivos, o látex é um grande candidato para ser usado como substrato para aplicações que exige alongamento e reversibilidade, como na eletrônica flexível.

O objetivo principal do projeto é elaborar eletrodos flexíveis e alongáveis para tecnologia vestível, obtidos através de biopolímeros. A ideia é partir de matérias primas verdes, pelo reaproveitamento de resíduos sólidos da biomassa. Dando origem a um nanocompósito biodegradável, livre da utilização de solventes tóxicos, ou seja, produzidos em meio aquoso, e com propriedades mecânicas e ópticas que poderão substituir materiais poliméricos de origem fóssil.

Para garantir a condutividade elétrica do eletrodo verde, usou-se uma tinta condutora composta por *carbon black* (negro de fumo), glicerina, água, látex, e celulose nanofibrilada (CNF). Os dois últimos componentes foram adicionados para intensificar a interação da tinta com o substrato polimérico, melhorando a compatibilização das interfaces híbridas. Os eletrodos foram submetidos a deformações cíclicas de até 30%, que é o limite máximo de alongamento das fibras de colágeno presentes na derme [8] e que, portanto, assegurariam a aplicação dos mesmos no ramo de tecnologia vestível.

Sendo assim, a motivação deste trabalho é desenvolver métodos de fabricação e compatibilização dos nanocompósitos verdes, avaliar a percolação da tinta no nanocompósito, medir a reversibilidade das propriedades elétricas da tinta condutora após deformação mecânica do substrato e contribuir para o uso dos materiais desenvolvidos para sua aplicação como eletrodos flexíveis na área de tecnologia vestível.

Para isto, produziu-se nanocompósitos poliméricos constituídos por uma matriz de látex, reforçada com CNC, sendo adicionada uma camada de tinta condutora sobre os nanocompósitos, que é composta por CNF, negro de fumo (NF), glicerina e água.

## **2. Objetivos do projeto**

Para este projeto, propõe-se o desenvolvimento de um eletrodo verde, flexível e alongável, bem como métodos para aprimorar o espalhamento das tintas condutoras utilizadas e aperfeiçoar a compatibilização de interfaces, garantindo a condução elétrica da tinta após esforços mecânicos cíclicos, e assegurando a reversibilidade da condução elétrica da tinta do eletrodo. Sendo assim, os principais objetivos do projeto são:

- a) Desenvolver nanocompósitos flexíveis e transparentes utilizando o látex de borracha natural e nanocelulose como fase dispersa;
- b) Criar e aperfeiçoar métodos para compatibilizar as tintas condutoras (nanomateriais de carbono) com os nanocompósitos produzidos;
- c) Caracterizar os eletrodos verdes quanto à morfologia, topografia, propriedades mecânicas e elétricas.



### **3. Materiais e metodologia experimental**

#### **3.1. Materiais utilizados**

##### **3.1.1 Materiais utilizados no preparo dos nanocompósitos verdes**

Para a fabricação do nanocompósito elastomérico foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Látex de borracha natural, extraído de seringueiras, com aproximadamente 500 nm de diâmetro;
- b) Nanocristais de celulose, extraídos do bagaço da cana de açúcar, com 2,3 a 4,5 nm de diâmetro;
- c) Água destilada.

##### **3.1.2 Materiais utilizados no preparo das tintas condutoras:**

Para a fabricação da tinta condutora foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Celulose nanofibrilada, extraída do bagaço da cana de açúcar;
- b) Negro de fumo comercial (marca Cabot);
- c) Látex de borracha natural, extraído de seringueiras, com aproximadamente 500 nm de diâmetro;
- d) Glicerina comercial (marca Synth);
- e) Água destilada.

#### **3.2. Diálise do látex:**

O processo de diálise foi utilizado para neutralizar o pH da dispersão aquosa de látex, removendo o hidróxido de amônio. Uma membrana semipermeável e seletiva ao tamanho das partículas (peso molecular) foi responsável por retirar o hidróxido de amônio (usado para a estabilização coloidal das partículas de látex). Na diálise, partículas maiores que os poros, como o látex (com diâmetro médio de aproximadamente 500 nm), ficam retidas dentro da membrana, ao passo em que partículas menores que o tamanho dos poros da membrana/tubo, como o  $\text{NH}_4\text{OH}$ , passam seletivamente.

##### **3.2.1. Materiais utilizados:**

- a) Béquer de 4000mL;
- b) Água destilada;
- c) Membrana para diálise;
- d) Fios de nylon (para amarrar as membranas);
- e) Prendedores;

f) Fitas de pH;

### 3.2.2. Procedimento experimental:

Mediu-se o pH da água uma vez ao dia durante o período de 3 dias (tempo necessário para a neutralização da dispersão), trocando-se a água do béquer logo depois da realização de cada medida. Após o primeiro dia do experimento, a água do béquer apresentou pH igual a 10. No segundo dia, o pH medido foi igual a 8 e, no terceiro dia, o pH medido foi igual a 7 (condição ideal). Na figura 3, tem-se a demonstração do procedimento de diálise.



Figura 3: demonstração de como foi realizado o procedimento de diálise.

Posteriormente, a dispersão de látex em água foi armazenada em recipientes vedados de vidro para dar início à fabricação do nanocompósito.

### 3.3. Determinação do teor de sólido das amostras.

Duas amostras de látex dialisado do mesmo lote, mas de potes diferentes, (AL e BL) e amostras de celulose nanofibrilada (ACNF) foram analisadas. Para a pesagem das amostras, foram colocados 2ml de látex em cada placa de Petri. Para as CNF's a meta foi pesar aproximadamente 2 gramas em cada placa de Petri.

Inicialmente, pesaram-se as placas de petri vazias. Em seguida, adicionou-se as respectivas quantidades de látex e CNF, descritas anteriormente. A massa úmida foi, então, definida pela subtração das duas medidas anteriores. As amostras foram submetidas à secagem à vácuo por 24 horas, na temperatura de 60°C. A estufa utilizada é da marca Quimis, modelo 0319V2.

Após a secagem, mediram-se as massas das placas de Petri com suas respectivas amostras e subtraiu-se desses valores a massa de cada placa, obtendo, por fim, os valores das massas secas de cada uma das amostras.

Para a determinação do teor de sólido das amostras, usou-se a seguinte formulação:

$$\text{Teor de sólido} = (\text{massa seca} \times 100\%) / \text{massa úmida}$$

Dessa forma, foram obtidos os resultados mostrados nas tabelas 1 e 2:

Tabela 1: teor de sólido das amostras de látex dialisadas.

	AL1	AL2	AL3	BL1	BL2	BL3
Teor de sólido (%)	44,32	44,32	43,92	43,85	44,98	46,40

Tabela 2: teor de sólido das amostras de nanocelulose fibrilada.

	ACNF1	ACNF2	ACNF3
Teor de sólido(%)	0,64	0,62	0,67

Com tais dados, foi possível calcular a média e o desvio padrão do teor de sólido das amostras analisadas, como mostrado na tabela 3 a seguir:

Tabela 3: teor de sólido médio das amostras analisadas e seus respectivos desvios padrão.

	AL	BL	ACNF
Teor de sólido médio (%)	44,08	45,08	0,64
Desvio padrão	0,188	1,042	0,019

### 3.4. Preparação e *casting* dos filmes:

Neste projeto a fabricação dos nanocompósitos verdes foi feita por *casting*. Elaborou-se um processo de manufatura em que um reforço específico e uma matriz polimérica solubilizada são unidos com o auxílio de um agitador magnético. Em *casting*, a mistura é vertida em um molde e conduzida à secagem, para a posterior evaporação dos solventes utilizados [7]. Dessa forma, através desse método, visa-se produzir nanocompósitos verdes contendo uma matriz de látex reforçada com 2,5% e 3,5%, em peso, de CNC.

As formulações presentes na tabela 4 foram utilizadas para a produção dos substratos poliméricos compostos por látex e CNC. É recomendado notar que os

cálculos de massa em questão levaram em consideração os teores de sólido presentes na tabela 3.

Tabela 4: formulação utilizada para a fabricação dos compósitos poliméricos de látex e CNC.

Nome dos filmes	Composição	Massa de CNC (g)	Massa de látex (g)	Água destilada (ml)
2,5% CNC	2,5% CNC + 97,5% Látex	0,21	18,0	20,0
3,5% CNC	3,5% CNC + 96,5% Látex	0,29	17,8	28,0
100% látex	100% de látex	0	17,9	24,0

Os materiais foram pesados em balança analítica e colocados em béqueres de 50 ml. A diluição da CNC em água foi feita com o auxílio de um sonicador (ultrassom de pontas da marca SONICS VibraCell), nas seguintes condições:

- a) Tempo: 1:30 minutos;
- b) Pulso: 10 em 10 segundos;
- c) Amplitude 40%;
- d) Ponta: 13 mm.

Em seguida, o látex foi agitado em um agitador magnético enquanto a dispersão (de CNC e água destilada) foi inserida, gota a gota, com o auxílio de uma pipeta pasteur. No caso dos filmes de látex puro, o volume de água relativo ao processo foi, da mesma forma, inserido no béquer que continha apenas látex. O tempo total de mistura foi de 10 minutos para cada uma das composições.

Após o preparo, 13 gramas de cada dispersão foram vertidas em cada uma das placas de petri que foram, então, levadas à estufa da marca Ethiktechnology, sendo submetidas à temperatura de 50°C durante 20h.

### 3.5. Preparo das tintas condutoras:

Com base nos teores de sólido obtidos previamente (tabela 3), tintas condutoras foram produzidas e testadas. Suas composições podem ser encontradas na tabela 5 abaixo:

Tabela 5: formulação da tinta condutora T0, sem a adição de látex.

Proporção utilizada		Massa úmida de CNF (g)	Massa seca de CNF (g)	Negro de fumo (g)	Glicerina (g)	Água (ml)
CNF	NF					
1	4	20	0,13	0,51	0,21	10

Mantendo-se a mesma proporção entre o negro de fumo (NF) e a celulose nanofibrilada, outras duas composições da tinta foram elaboradas com a adição de 5% e 10% de látex, respectivamente, considerando-se a massa seca dos compostos utilizados. As formulações em questão podem ser encontradas na tabela 6.

Tabela 6: formulação das tintas condutoras T5 e T10, respectivamente.

Porcentagem de látex (%)	Massa úmida de CNF (g)	Massa seca de CNF (g)	Negro de fumo (g)	Glicerina (g)	Látex (g)	Água (ml)
5%	20	0,12	0,5154	0,2255	0,07306	10
10%	20	0,12	0,5154	0,2362	0,1461	10

Os componentes das tintas foram homogeneizados por cinco minutos no Ultra-Turrax (marca Ika, modelo T10basic). Logo após, a mistura foi submetida ao ultrassom de pontas nas seguintes condições:

- a) Tempo: 5 minutos;
- b) Pulso: 10 em 10 segundos;
- c) Amplitude 40%;
- d) Ponta: 13 mm.

### 3.6. Método de recobrimento por deposição da tinta condutora (*silk screen*):

Esta técnica de recobrimento dos filmes de nanocompósito verde é bastante similar ao procedimento de *silk screen*. Assim sendo, depositaram-se trilhas de tinta condutora, com 3 diferentes composições, sobre os filmes secos com o auxílio de uma pipeta pasteur. A partir de testes prévios, observou-se que 6 gotas seria a quantidade ideal de tinta a ser depositada em uma área de 30mmx10mm.

A tinta foi espalhada com o auxílio de um bastão de vidro, movimentado por 10 (dez) vezes no plano xy, alternando-se os sentidos: de cima para baixo e de baixo para cima. Imagens dos procedimentos podem ser vistas na figura 4.

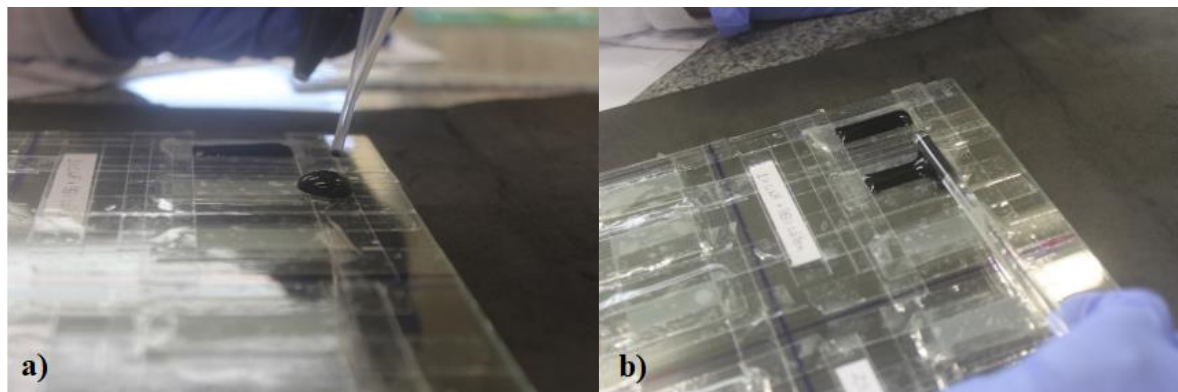


Figura 4: deposição de tinta condutora na superfície do nanocompósito verde. a) adição de gotas da tinta com o auxílio de uma pipeta pasteur e b) espalhamento da tinta com o auxílio de um bastão de vidro.

### 3.7. Método de recobrimento por transferência da tinta condutora:

No método de transferência, a tinta condutora deve ser inicialmente depositada, com o auxílio de uma pipeta pasteur, em um substrato de vidro para secagem individual. Em seguida, adiciona-se o nanocompósito ainda líquido na superfície da tinta e, após a secagem do nanocompósito, deve-se remover o eletrodo verde do substrato de vidro com o auxílio de uma espátula, como ilustrado na figura 5 a seguir.

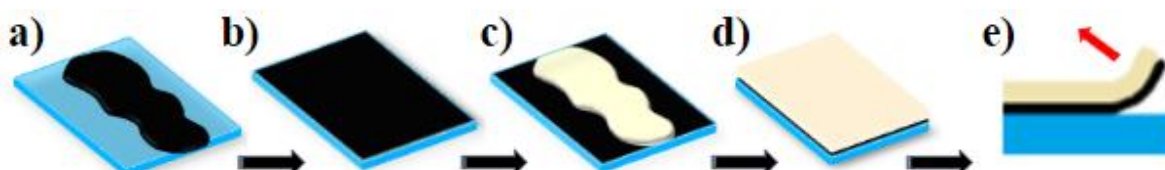


Figura 5: ilustração do método de recobrimento por transferência. a) deposição da tinta condutora sobre o substrato de vidro, b) espalhamento e secagem da tinta, c) deposição do nanocompósito verde na superfície da tinta, d) secagem do nanocompósito sobre a tinta e e) remoção do eletrodo verde do substrato de vidro.

### 3.8. Técnicas de caracterização utilizadas

Para a caracterização das amostras, com a obtenção de dados qualitativos e quantitativos, optou-se pela realização dos seguintes ensaios: ensaio de tração, microscopia de força atômica, microtomografia de raios X e ensaios de caracterização elétrica por deformação em fadiga.

Os ensaios de tração foram realizados com o objetivo de caracterizar mecanicamente os nanocompósitos elastoméricos produzidos. Para isto, utilizou-se a máquina universal de ensaios mecânicos (marca EMIC, modelo DL 2000) com a célula de carga Trd 18 e o extensômetro Trd 15. A leitura e análise dos dados foi

feita através dos *softwares* Tesc e VirMaq. A velocidade utilizada no ensaio foi de 100 mm/min. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D882-02.

Nesse projeto, utilizou-se o microscópio de força atômica da marca MultiMode, do fabricante Bruker. A varredura da topografia das superfícies das amostras analisadas foi realizada com uma ponteira piramidal de silício. Os dados foram analisados e tratados com o auxílio dos *softwares* Nanoscope e Gwyddion, respectivamente.

O microtomógrafo de alta resolução do fabricante Bruker, modelo Skyscan 1272, foi utilizado para a reconstrução tridimensional da amostra analisada (eletrodo com o nanocompósito 3,5% CNC, recoberto com a tinta T10). A voltagem e a corrente utilizadas foram de 20kV e 175 $\mu$ A, respectivamente. A resolução (tamanho de pixel) da imagem foi de 3  $\mu$ m, enquanto que a resolução do detector foi de 1640x2452 (número de linhas x número de colunas).

Para a análise das propriedades elétricas dos eletrodos, fizeram-se medidas de resistência de folha em filmes secos das tintas T0, T5 e T10, com o auxílio do multímetro ET-2082C, da marca Minipa. As amostras foram submetidas à deformações de até 30% com a assistência da morsa PD-376 da marca Pro'sKit.

## 4. Resultados e discussões

### 4.1. Análise estética e funcional dos filmes dos nanocompósitos verdes de látex e CNC:

Através do método de casting, foram produzidos filmes com estética excepcional. Os filmes de látex puro e os nanocompósitos elaborados através da metodologia experimental descrita são transparentes, flexíveis e alongáveis, como observados nas figuras 6, 7 e 8 abaixo:



Figura 6: características visuais dos filmes de látex produzidos. a) filme submetido a tensões nulas; b) demonstração da flexibilidade do filme e c) demonstração da alongabilidade do filme.



Figura 7: características visuais dos filmes dos nanocompósitos 2,5% CNC. a) filme submetido a tensões nulas; b) demonstração da flexibilidade do filme e c) demonstração da alongabilidade do filme.

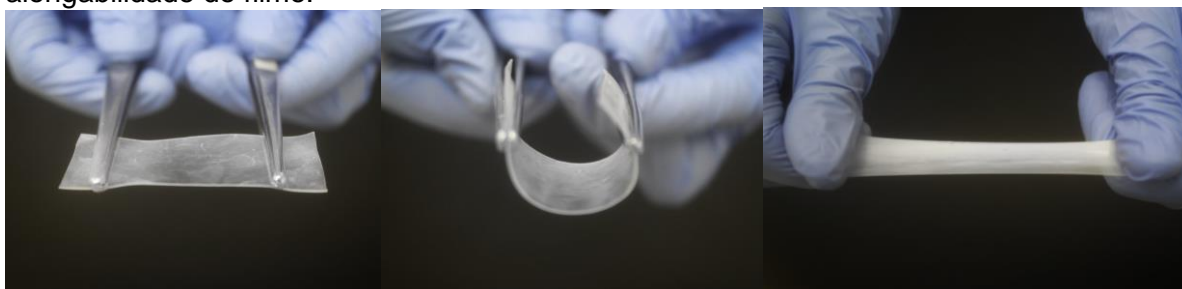


Figura 8: características visuais dos filmes dos nanocompósitos 3,5% CNC. a) filme submetido a tensões nulas; b) demonstração da flexibilidade do filme e c) demonstração da alongabilidade do filme.

Pôde-se verificar que os filmes de látex puro possuíam extrema adesividade, o que prejudica fortemente a trabalhabilidade dos mesmos para o desenvolvimento de produtos com esta aplicação. Constatou-se que essa aderência prejudicial foi



reduzida com o aumento gradativo nos teores de CNC adicionados aos nanocompósitos 2,5% CNC e 3,5% CNC.

## **4.2. Análise dos resultados obtidos através dos métodos de recobrimento do nanocompósito com trilhas de tinta condutora:**

### **4.2.1. Método de recobrimento por deposição da tinta condutora:**

Através do método de recobrimento por deposição, notou-se a baixa adesão da tinta T0 em todos os substratos. A baixa compatibilidade foi remediada através da introdução de látex nas composições das tintas, uma vez que observou-se uma alta aderência dos substratos produzidos às tintas T5 e T10. Na figura 9, observa-se os aspectos visuais dos eletrodos produzidos em sua melhor condição.



Figura 9: aspectos visuais dos eletrodos verdes produzidos em posições distintas. Na imagem, mostra-se o substrato polimérico 3,5% CNC, unido à tinta T10. a) posição frontal e b) posição diagonal.

### **4.2.2. Método de recobrimento por transferência da tinta condutora e seus problemas:**

Como a tinta possui baixa adesão ao substrato de vidro, notou-se o despregamento prematuro entre a tinta e o substrato (figura 10), dando origem à fissuras na tinta antes mesmo de o nanocompósito ser depositado em sua superfície. Dessa maneira, comprometeu-se a estabilidade geral do compósito e, pela ausência de tempo hábil para complementar os procedimentos experimentais que incluiriam o aprimoramento das técnicas de recobrimento por transferência, não foi possível obter resultados promissores a partir desta técnica.

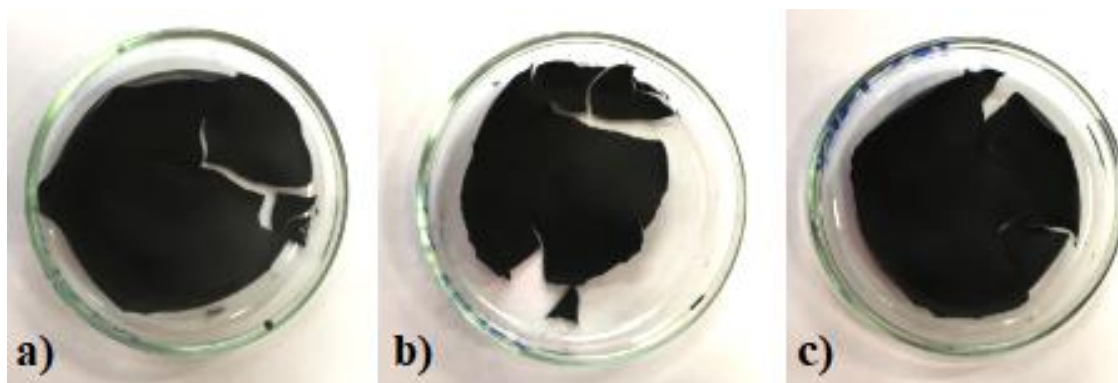


Figura 10: aspectos visuais das tintas, secas em substratos de vidro. a) T0, b) T5 e c) T10. Em todos os casos houve quebra e descolamento prematuro.

#### 4.3. Análise e caracterização mecânica dos nanocompósitos de látex e CNC:

Existem vários tipos de ensaios para caracterizar as propriedades mecânicas de polímeros. Eles podem ser estáticos, dinâmicos, destrutivos, não destrutivos, de curta duração, de longa duração, etc. As solicitações podem ocorrer na forma de tensão ou de deformação. Grande parte dos ensaios mecânicos podem ser registrados por meio de curvas de tensão vs. deformação [4].

Diversos modos são comumente aplicados para solicitar um polímero de forma estática, dentre eles: tração, compressão, flexão, cisalhamento, etc. Os ensaios de tração são os mais populares entre todos. Os principais parâmetros que quantificam a resistência mecânica dos polímeros em ensaios tensão-deformação são: módulo de Young ou de elasticidade, tensão e deformação no escoamento, tensão máxima, tensão e deformação na ruptura e tenacidade [4].

Para a caracterização mecânica dos nanocompósitos elastoméricos produzidos, foram realizados ensaios de tração. Pelo fato da máquina ser elétrica, com software incorporado ao equipamento, fez-se necessário apenas as medidas iniciais dos corpos de prova - que são descritas com mais detalhes na tabela 7 - e um operador de máquina para configurar o software e prender os corpos de prova às garras da mesma.

Dez corpos de prova (CP's) de cada concentração foram submetidos ao ensaio de tração. No entanto, apenas um corpo de prova de cada concentração fraturou sob condições ideais, ou seja, a fratura ocorreu dentro da seção útil dos corpos de prova. Sendo assim, as medidas destes CP's estão descritas na tabela 7. Os demais CP's fraturaram em regiões muito próximas às garras da máquina e, de acordo com as leis da mecânica da fratura, devem ser descartados, uma vez que tal condição invalida as possíveis informações a serem obtidas acerca dos corpos de

prova, já que as garras atuaram como concentradoras de tensão, impedindo a viabilização dos resultados esperados.

Tabela 7: medidas iniciais dos corpos de prova que sofreram fratura dentro da sessão útil estabelecida por norma.

	Largura (mm)	Altura (mm)	Seção útil (mm)	Espessura (mm)	Área transversal (mm <sup>2</sup> )
CP 100% Látex	12,5	50	30	0,270	3,375
CP 2,5% CNC	12,5	50	30	0,396	4,950
CP 3,5% CNC	12,5	50	30	0,360	4,500

Como o ensaio realizado proporcionou dados de tempo, força e deslocamento, as medidas acima fizeram-se importantes para que os cálculos da tensão e deformação pudessem ser feitos. Para tanto, as seguintes fórmulas foram utilizadas para o cálculo da tensão e da deformação respectivamente:

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ e } \varepsilon = \frac{\Delta L \times 100}{L_0}$$

Onde:

$\sigma$  = Tensão (Pa);

F = Força aplicada (N);

A = área da seção transversal do corpo de prova(m);

$\varepsilon$  = deformação (%);

$\Delta L$  = variação do comprimento inicial, ou seja,  $L_f - L_0$  (m);

$L_0$  = comprimento inicial/seção útil (m).

De posse das formulações acima, para o cálculo da tensão todas as colunas referentes às forças foram divididas pelas áreas das seções transversais iniciais exibidas na tabela 7. Ao passo em que, para o cálculo da deformação, as colunas do deslocamento foram multiplicadas por cem (para obter-se a deformação em porcentagem) e divididas pelo comprimento inicial (sessão útil), que também encontra-se na tabela 7. Os resultados estão exibidos a seguir:

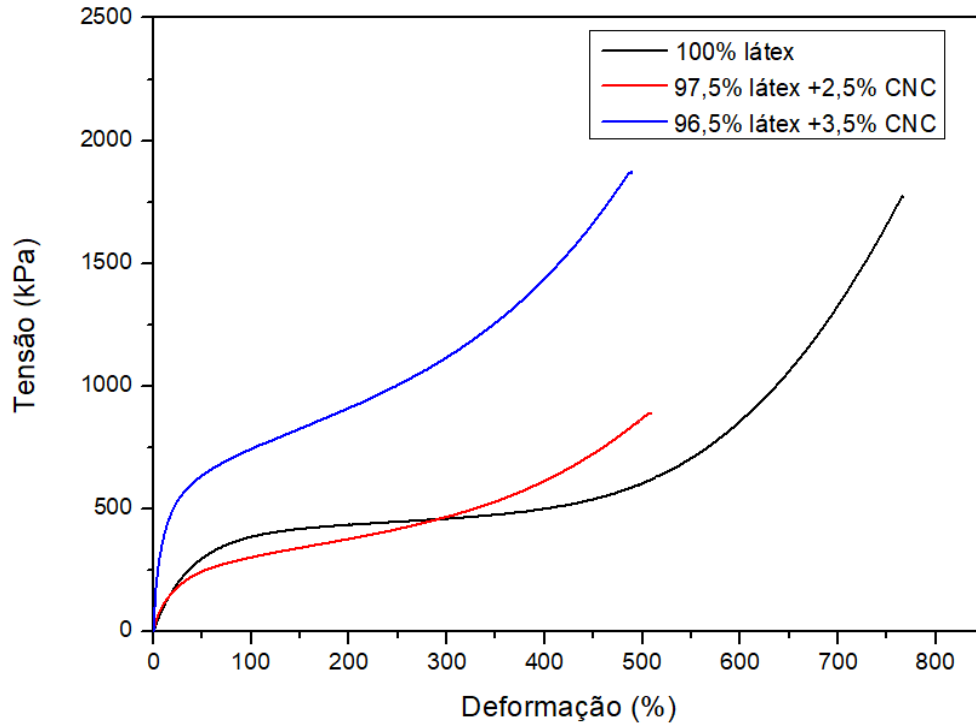


Figura 11: gráfico tensão vs. deformação representativo dos filmes 100% látex e nanocompósitos com 2,5% CNC e 3,5% CNC, produzidos através do método de casting.

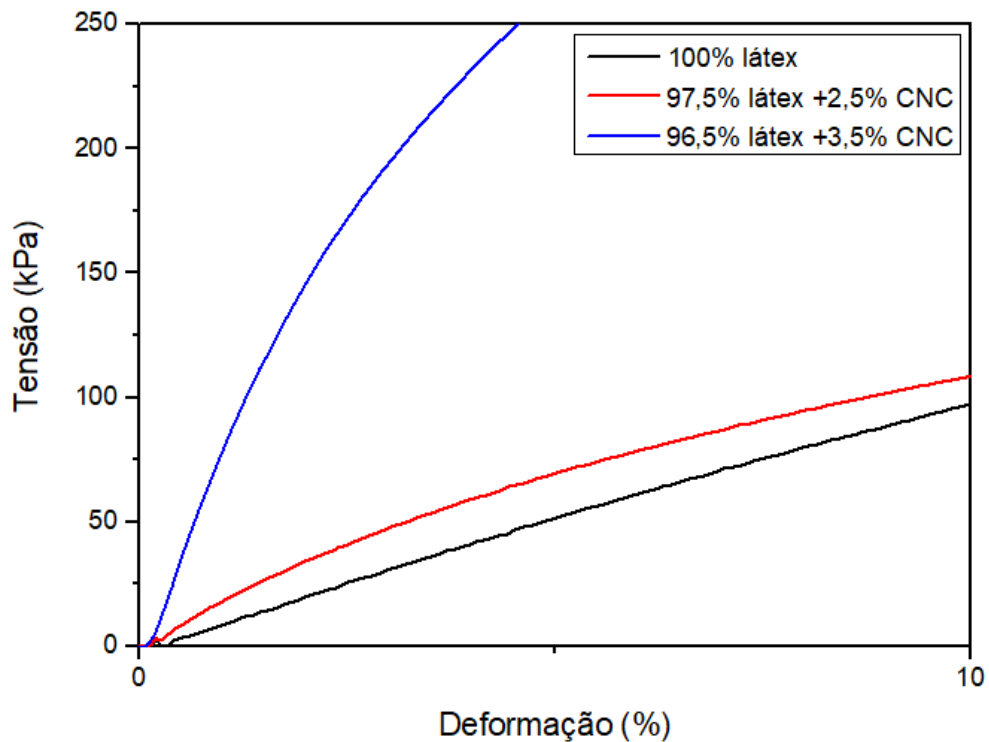


Figura 12: zoom da figura 11, demonstrando o regime de deformação elástica a partir do qual foram extraídos os respectivos módulos de Young dos nanocompósitos analisados.

Na figura 11, observa-se o comportamento mecânico representativo dos filmes de látex e dos nanocompósitos submetidos ao ensaio de tração. A determinação das tensões de ruptura e deformações máxima foram feitas a partir do

gráfico exposto na figura 11. Através da determinação do coeficiente angular da reta linear governada pela lei de Hooke, ainda no regime de deformação elástica apresentado pelos filmes (regime exposto na figura 12), obtiveram-se os seus respectivos módulos de Young. A tenacidade, por sua vez, foi determinada a partir do cálculo da área abaixo das curvas do gráfico tensão vs. deformação.

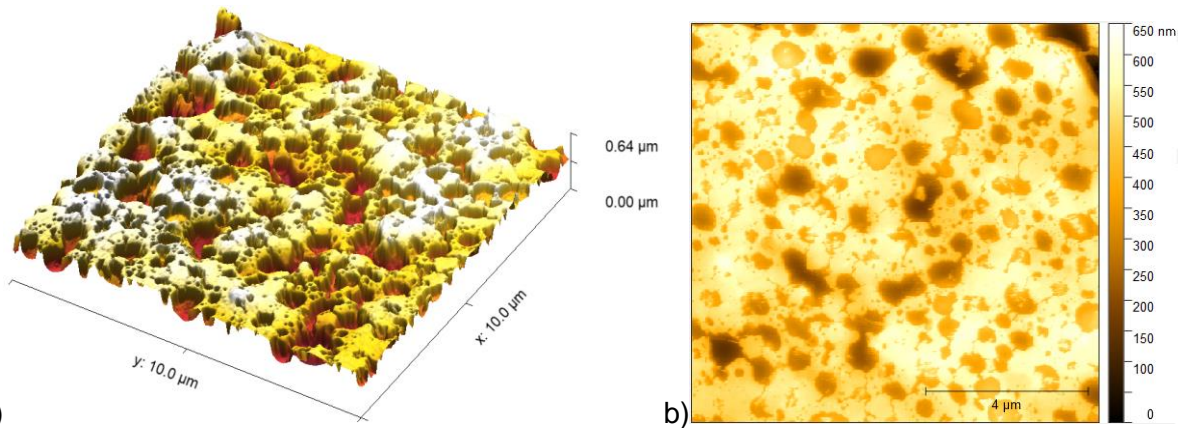
Tabela 8: características mecânicas dos substratos poliméricos produzidos.

	Látex	2,5% CNC	3,5% CNC
Módulo de Young (kPa)	697	934	5186
Tenacidade (kJ/m <sup>3</sup> )	506	236	527
Tensão de Ruptura (kpa)	1770	885	1872
Deformação máxima (%)	767	508	489

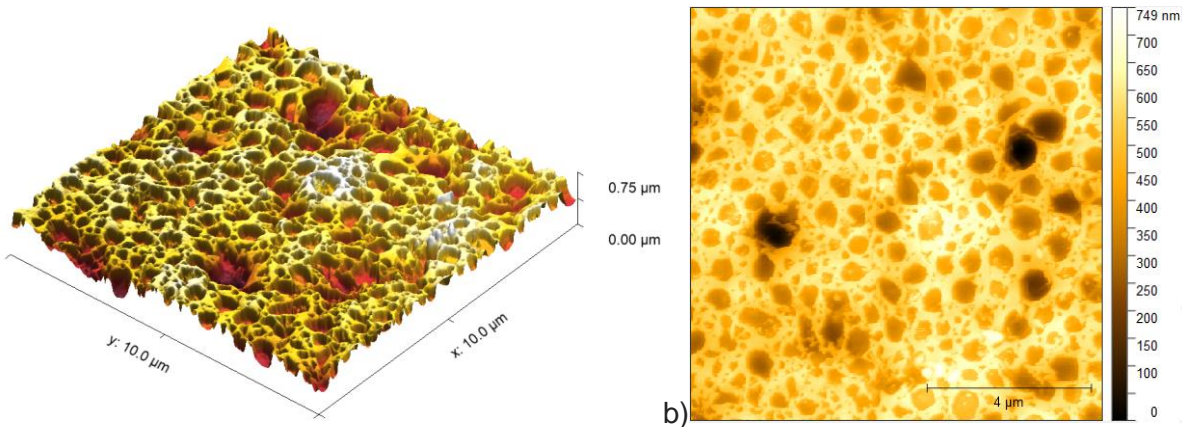
Através da tabela 8, pode-se verificar que o compósito 3,5% CNC apresentou melhores propriedades mecânicas como módulo de Young, tenacidade e tensão de ruptura, mantendo uma deformação razoável de quase 500%.

#### **4.4. Análise da topografia e rugosidade dos nanocompósitos através da utilização da microscopia de força atômica (AFM):**

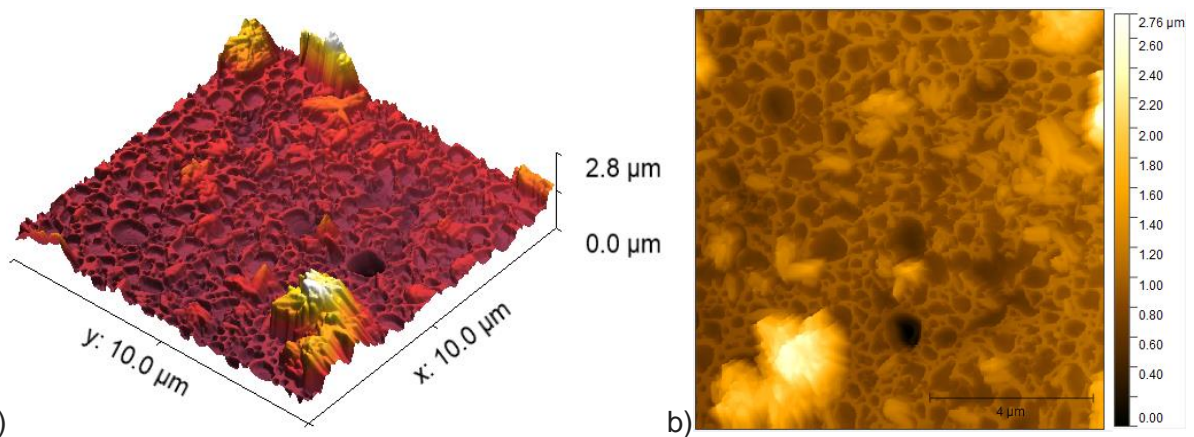
O microscópio de força atômica faz parte de uma família de microscópios utilizados para observar localmente diversas propriedades da superfície de uma amostra, os *Scanning Probe Microscopes* (SPMs). O princípio básico de funcionamento dos SPMs é a detecção da interação entre uma ponta de prova e a superfície de uma amostra. Com tais equipamentos, a resolução vai da faixa da escala micrométrica à atômica, com a possibilidade de obtenção de imagens tridimensionais [9]. As imagens obtidas a partir desta análise podem ser conferidas nas figuras 13, 14, 15, 16 e 17.



a) Figura 13: microscopias de força atômica em a) três dimensões e b) duas dimensões de uma área de  $10\mu\text{m}^2$  do substrato de látex.



a) Figura 14: microscopia de força atômica em a) três dimensões e b) duas dimensões de uma área de  $10\mu\text{m}^2$  do substrato com 97,5% látex e 2,5% CNC.



a) Figura 15: microscopia de força atômica em a) três dimensões e b) duas dimensões de uma área de  $10\mu\text{m}^2$  do substrato com 96,5% látex e 3,5% CNC.

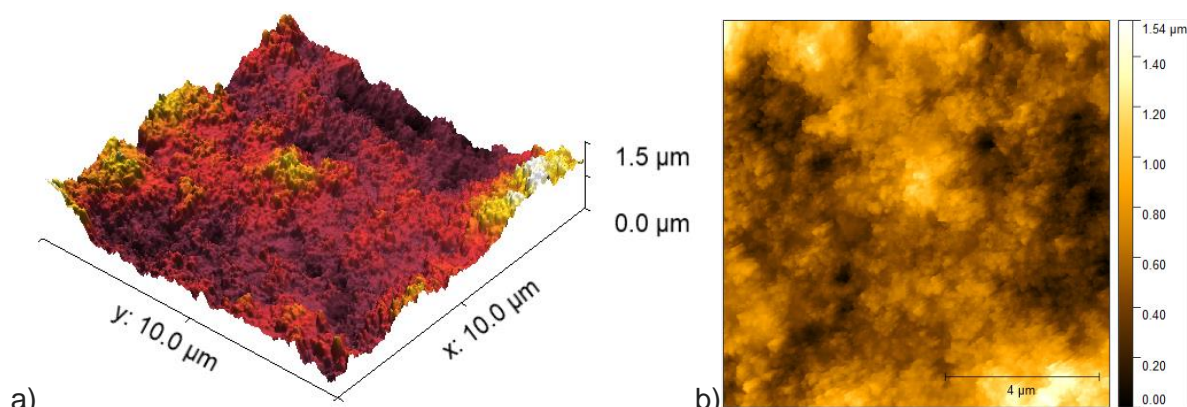


Figura 16: microscopia de força atômica em a) três dimensões e b) duas dimensões de uma área de  $10\mu\text{m}^2$  da superfície da tinta condutora T10, depositada em um substrato com 96,5% látex e 3,5% CNC.

A partir das imagens obtidas, o *software* Gwyddion determinou dados de rugosidade e área superficial de regiões representativas da amostra, estes dados estão contidos na tabela 9 abaixo:

Tabela 9: dados de rugosidade de superfície RMS e área superficial, medidos via microscopia de força atômica.

	Rugosidade média quadrática (RMS) de superfície (nm)	Área superficial ( $\mu\text{m}^2$ )
100%látex	96	139
2,5% CNC	102	153
3,5% CNC	300	203
T10	233	159

De acordo com a tabela 9, verificou-se um aumento da rugosidade média quadrática (RMS) de superfície e da área superficial dos substratos poliméricos em função do aumento da concentração de celulose nos filmes. Como a rugosidade de superfície é determinada pelo desvio médio da raiz quadrada de cada pixel do perfil avaliado, e a área superficial determina a medida de área na superfície do filme, sugere-se que a adição de cristais de celulose no substrato polimérico possibilita o aumento da adesão entre o substrato e a tinta condutora, viabilizando um melhor ancoramento da tinta nos filmes que possuem essa composição.

Na figura 16, percebe-se que a tinta T10 aderiu bem aos poros presentes no filme com 3,5 % de CNC, cobrindo-os. Deve-se considerar que a elevada rugosidade e elevações topográficas observadas na superfície da tinta pode estar ocorrendo devido a reprodução do padrão da superfície do substrato.

Um outro fator relevante que deve ser apontado é que a rugosidade média e a área superficial dos substratos poliméricos podem variar conforme o lado escolhido dos filmes. No processo de secagem, a superfície do nanocompósito que fica em contato direto com a atmosfera da estufa possui uma maior tendência a apresentar elevada rugosidade, em função das diferentes reatividades e dos diferentes coeficientes de difusão apresentados pela superfície e pelo bulk [10] da dispersão.

Dessa forma, é de fundamental importância destacar que as figuras 13, 14, 15 e 16 são imagens feitas da superfície dos filmes que, no processo de secagem, estavam em contato direto com a atmosfera da estufa e que, por esta razão, tendem a apresentar maior rugosidade. Essa superfície mais reativa é, então, considerada por este trabalho como a face ideal para a aplicação e o melhor ancoramento da tinta condutora.

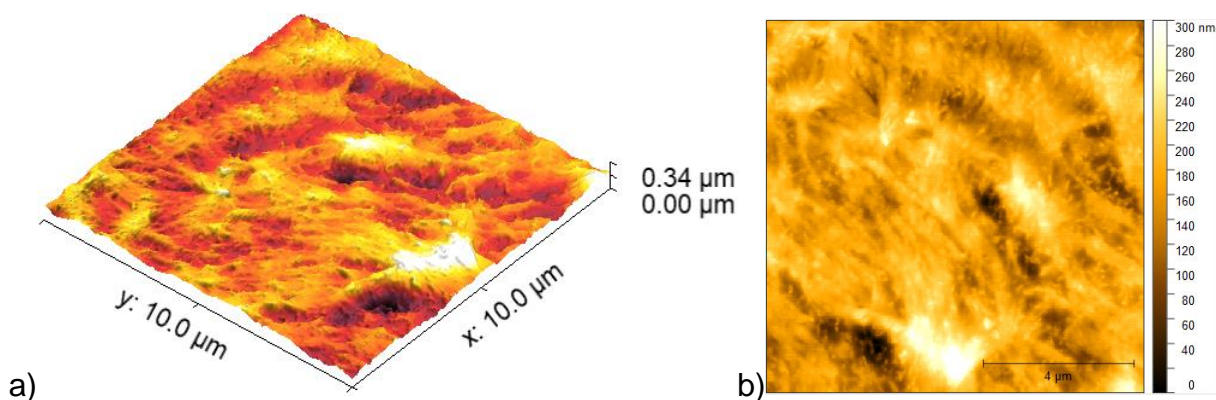


Figura 17: microscopia de força atômica em a) três dimensões e b) duas dimensões de uma área de  $10\mu\text{m}^2$  do substrato com 96,5% látex e 3,5% CNC. Imagens feitas da superfície da amostra que, no processo de secagem, estava em contato direto com a placa de vidro.

Na figura 17 e tabela 10, apresentam-se os resultados obtidos a partir da análise topográfica do filme 3,5% CNC da superfície que, no processo de secagem, estava em contato direto com o vidro da placa de petri. Nesse sentido, percebe-se a redução da RMS e da área superficial em relação à outra face do mesmo filme.



Tabela 10: comparação da RMS e da área superficial entre as duas faces do substrato com 96,5% látex e 3,5% CNC.

	Rugosidade média quadrática (RMS) de superfície (nm)	Área superficial ( $\mu\text{m}^2$ )
3,5% CNC face em contato com o ar	300	203
3,5% CNC face em contato com o vidro	38	104

#### 4.5. Análise das respostas elétricas dos eletrodos verdes produzidos:

Para a análise das propriedades elétricas dos eletrodos, fizeram-se medidas de resistência de folha em filmes secos das tintas T0, T5 e T10. Os resultados obtidos encontram-se na figura 18.

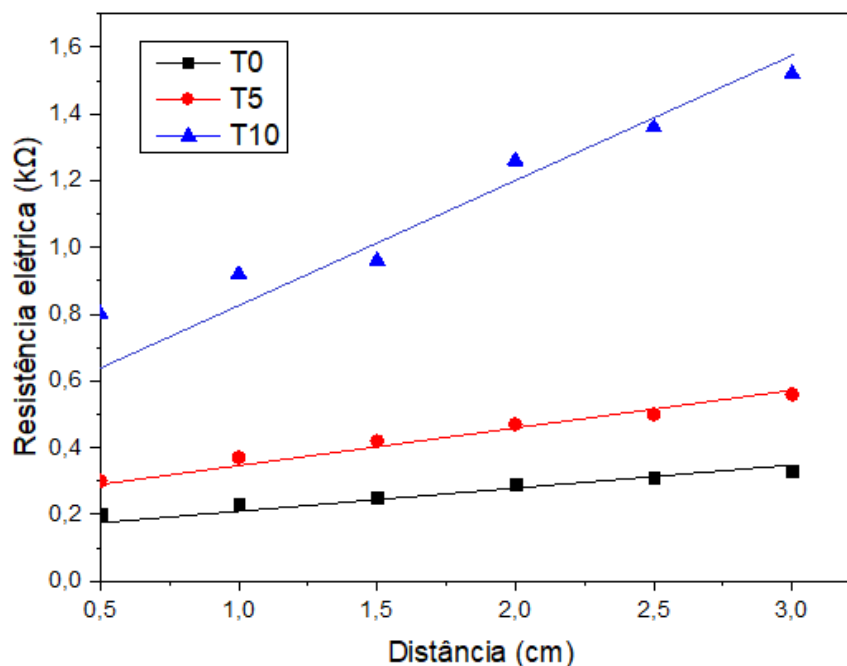


Figura 18: resistência de folha (sheet resistance) das tintas com 0%, 5% e 10% de látex, respectivamente.

Como a adesão da tinta condutora T0 (sem a adição de látex) foi ruim, decidiu-se fazer a medição do comportamento dos eletrodos flexíveis que possuíam apenas as tintas T5 e T10, acopladas aos três substratos elastoméricos produzidos: 2,5% CNC, 3,5% CNC e 100% látex. As amostras foram submetidas à deformações de até 30% (limite máximo de alongamento das fibras de colágeno presentes na derme [8]). Os resultados são mostrados na figura 19.

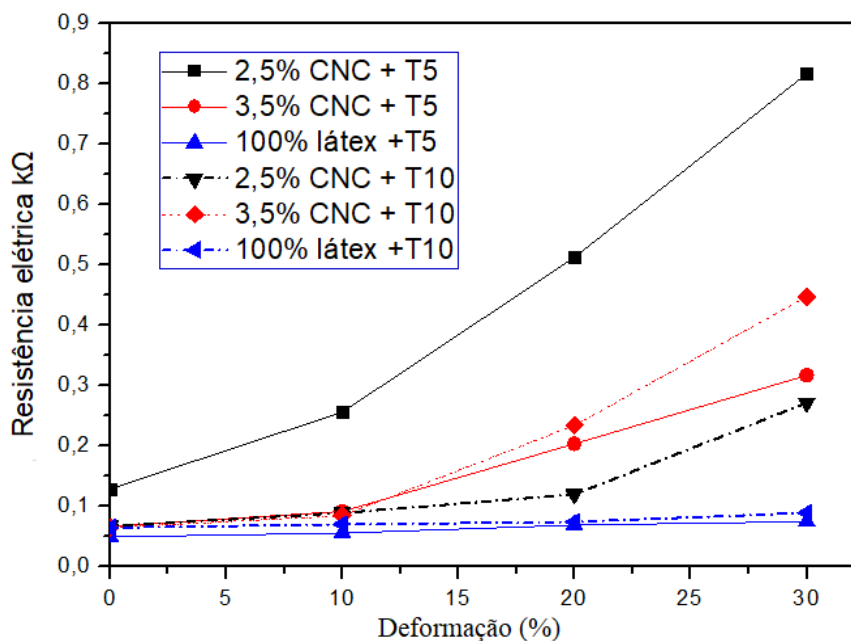


Figura 19: comportamento elétrico dos eletrodos verdes com a adição da tinta com 5% de látex nos substratos (linhas cheias) e da tinta com 10% de látex nos substratos (linhas tracejadas). Os eletrodos foram submetidos a ciclos de deformações de 0%, 10%, 20% e 30% em relação ao seu tamanho original.

O comportamento atípico do eletrodo com o substrato contendo 2,5% de CNC, se deve à falta de adesão entre a tinta e o filme, que resultou em fissuras permanentes das tintas e na consequente falta de contato elétrico entre as ilhas mostradas na figura 20 a seguir.

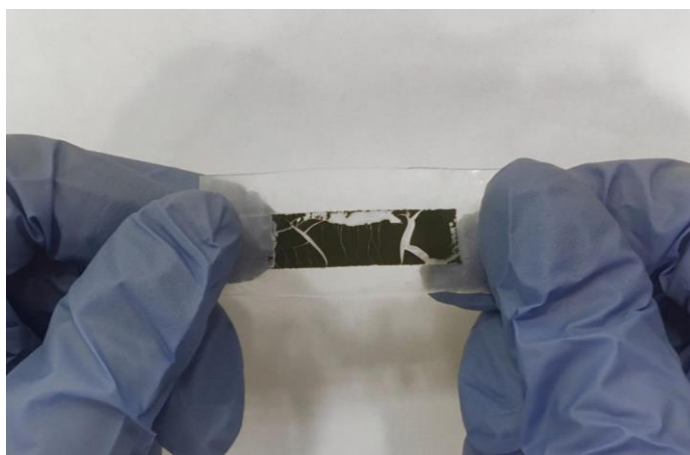


Figura 20: representação da perda de contato elétrico da tinta T5 no substrato 2,5% CNC, que ocorreu em função do surgimento de fissuras irreversíveis na superfície da tinta, causadas pela baixa aderência da mesma ao filme.

Quanto às propriedades elétricas dos eletrodos, de um modo geral, notou-se que a adição de látex (material eletricamente isolante) nas tintas aumentou a resistência elétrica das mesmas, pois essa partícula é isolante. No entanto, houve um aumento na adesão entre o eletrodo e o substrato em virtude da melhor

compatibilização das interfaces híbridas, que apresentaram boa afinidade química e mecânica por possuírem composições semelhantes. No geral, as tintas apresentaram uma melhor aderência no substrato de látex, porém, tal substrato apresenta extrema adesividade, o que reduz drasticamente a sua trabalhabilidade neste tipo de aplicação. Sendo assim, o comportamento elétrico relevante dos eletrodos com o substrato 3,5% CNC se mostrou competente porque o compósito polimérico em questão apresentou boa sinergia com ambas as tintas (T5 e T10).

#### 4.6. Análise da percolação da tinta no eletrodo verde através da microtomografia de raios-X:

Na técnica de microtomografia de raios-X, uma imagen 3D é feita a partir da combinação de várias projeções bidimensionais de um objeto tridimensional [11]. Ademais, a utilização de filtros de radiação permite a adaptação das condições adquiridas para a ampla gama das densidades específicas de cada material analisado. Dessa forma, a diferenciação com base na densidade de cada componente é feita a partir de um padrão de cores [11]. Sendo assim, as figuras 21 e 22 foram obtidas a partir dessa sistemática.

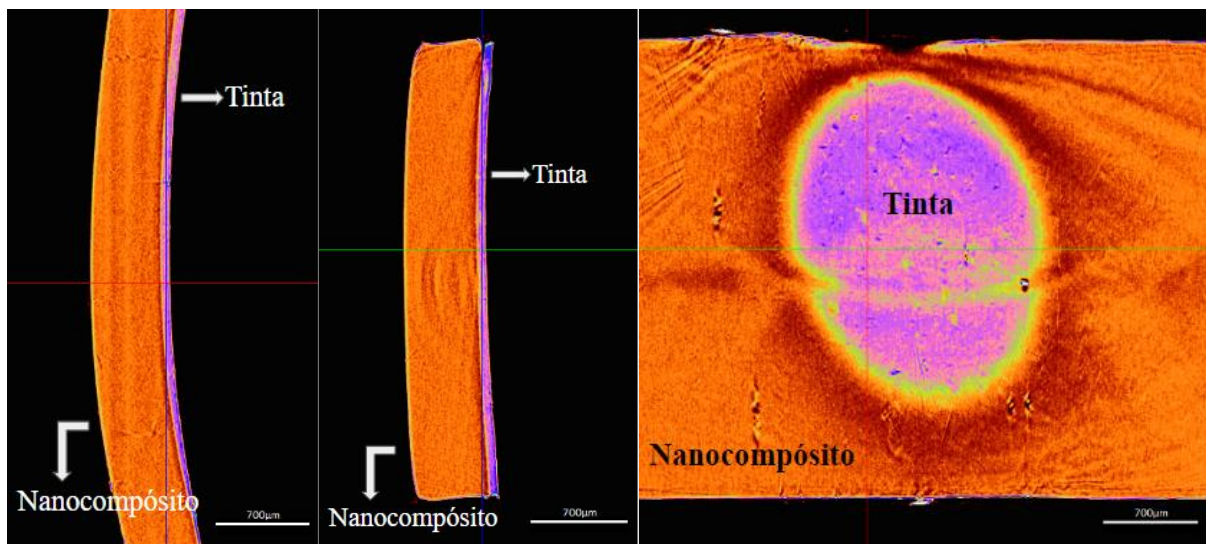


Figura 21: microtomografias de raios X, em duas dimensões, da seção transversal do eletrodo verde.

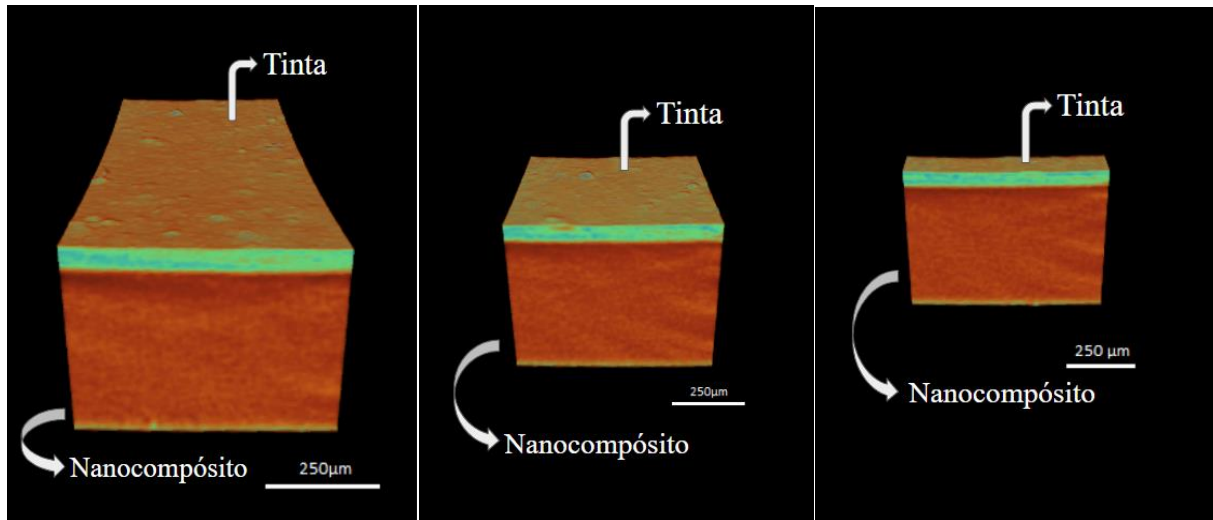


Figura 22: microtomografias de raios X, em três dimensões, da seção transversal do eletrodo verde, com variação longitudinal.

Na figura 21 avalia-se, uma imagem bidimensional, a regularidade no espalhamento da tinta T10 em relação ao substrato 3,5% CNC. Na figura 22, pela avaliação da seção transversal do eletrodo verde, com variação longitudinal, nota-se a percolação uniforme da tinta no substrato do nanocompósito em questão, apresentando uma boa adesão substrato-tinta. As imagens obtidas por microtomografia de raios X revelam a homogeneidade no recobrimento com a tinta condutora pelo método de deposição, assegurando a confiabilidade do método para a aplicação em eletrônica flexível.

## 5. Considerações finais

Pela análise de AFM, comprovou-se que o aumento da rugosidade superficial dos filmes ocorreu com a adição gradativa de celulose em suas composições e que a face dos substratos que, na secagem, estava em contato direto com a atmosfera da estufa (superfície mais reativa) é considerada por este trabalho como a face ideal para a aplicação da tinta condutora. Sabendo disso, o nanocompósito 3,5% CNC apresentou um melhor ancoramento e percolação das tintas condutoras, o que reitera os dados obtidos através dos ensaios de resistência elétrica, nos quais os substratos com 3,5% de celulose obtiveram um excelente desempenho, demonstrando condições ideais para a utilização em tecnologia vestível. O fenômeno de percolação homogênea pôde ser corroborado pela utilização da técnica de microtomografia de raios-X, que apontou uma ótima uniformidade e adesão na interface com a tinta condutora T10 pelo método de deposição, assegurando a confiabilidade do método para a aplicação em eletrônica flexível.

No contexto ambiental, o reaproveitamento de resíduos sólidos proporcionado pela adição de CNC nos nanocompósitos 3,5% CNC alia-se à sua melhor resistência mecânica e à melhor trabalhabilidade desses nanocompósitos, que não possuem a extrema adesividade presente nos filmes de látex puro.

No futuro, pretende-se trabalhar na elaboração de tintas com composições variadas, visando o estabelecimento de uma condição de equilíbrio das propriedades elétricas e de adesão de interfaces - tanto pelo método de recobrimento por deposição, como pelo método de recobrimento por transferência. Há, ainda, a necessidade de trabalhar em caracterizações eletroquímicas da superfície dos eletrodos, bem como em futuras análises da modificação de interface ocasionada pelo envelhecimento dos substratos e seus possíveis efeitos na adesão e percolação da tinta no nanocompósito.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] DUFRESNE, A. **Polymer nanocomposites from Biological Sources**. Em Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, 2ª ed.; Nalwa, H.S., Ed. American Scientific Publisher: Valencia, CA, USA.
- [2] SIQUEIRA, G., BRAS, J. DUFRESNE, A. **Cellulosic Bionanocomposites: A Review of Preparation, Properties and Applications**. Polymers, v. 2, n. 4, p. 728-765, 2010.
- [3] JOHN M.J.; THOMAS, S. **Biofibres and biocomposites**. Carbohydr. Polym. 2008, 71, 343-364.
- [4] CANEVAROLO, S. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.
- [5] TSERKI, V., ZAFEIROPOULOS, N.E., SIMON, F., PANAYIOTOU, C. A. **Study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres**. Compos. A-Appl. Sci. Manuf. V. 36, p. 1110-1118, 2005.
- [6] SMEETS, N.M.B., IMBROGNO, S. e BLOEMBERGEN, S. **Carbohydrate functionalized hybrid latex particles**. Acesso em: 17 fev. 2019.
- [7] SALEHIFAR M, BELADI, N.M., ALIZADEH, R. e AZIZI M.H. **Effect of LDPE/MWCNT films on the shelf life of Iranian Lavash bread**. Pelagia Res Libr 2013;3:183e8.
- [8] SILVER, F. H., FREEMAN, J. W. e DEVORE, D. **Viscoelastic properties of human skin and processed dermis**. Skin Res. Technol., v. 7, p. 18–23, 2001.
- [9] BOWEN, W.; HILAL, N. **Atomic force microscopy in process engineering**. Tradução. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [10] RÄTZ, A. **Turing-type instabilities in bulk–surface reaction–diffusion systems**. Journal of Computational and Applied Mathematics. v. 289, 2015.
- [11] BRUKER. **SkyScan1272 User Manual**. V1.1, 2013.
- [12] Heikenfeld, J., JAJACK, A., ROGERS, J., GUTRUF, P., TIAN, L., PAN, T., LI, R., KHINE, M., KIM, J., WANG, J. e KIM, J. **Wearable sensors: modalities, challenges, and prospects**. Lab Chip, 2018, 18, 217.
- [13] LIPOMI, D. **Stretchable Figures of Merit in Deformable Electronics**. Advanced Materials, v. 28, n. 22, p. 4180-4183, 2015.
- [14] KIM, D. et al. **Flexible and Stretchable Electronics for Biointegrated Devices**. Annual Review of Biomedical Engineering, v. 14, n. 1, p. 113-128, 2012.

- [15] CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Grupo Gen - LTC, 2000.
- [16] NATHAN, A. et al. **Flexible Electronics: The Next Ubiquitous Platform**. Proceedings of the IEEE, v. 100, n. Special Centennial Issue, p. 1486-1517, 2012.
- [17] SIRÓ, I. e PLACKETT, D. **Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review**. Cellulose. v. 17, n. 3, p. 459-494, 2010.
- [18] DUFRESNE, A. **Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial**. Materials Today, v. 16, n. 6, p. 220-227, 2013.
- [19] SPERLING, L.H. **Introduction to physical polymer science**. Wiley Interscience, 4. ed, 2006.
- [20] KLEMM, D. et al. **Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials**. Green Nanomaterials, p. 5438 – 5466, 2011.
- [21] CHENG, T., YIZHOU, Z. LAI, W. E HUANG, W. **Stretchable Thin-Film Electrodes for Flexible Electronics with High Deformability and Stretchability**. Materials Today, v. 27, p. 3349–3376, 2015.
- [22] ASTM international. ASTM D882-02: **Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting**.