



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

**JANE IANUCHAUSKAS SILVESTRE**

**Estudo das propriedades elétricas e dielétricas de um  
nanocompósito polimérico condutor a base de resina epóxi e nanotubos  
de carbono**

Rosana – SP

2022

**Jane Ianuchauskas Silvestre**

**Estudo das propriedades elétricas e dielétricas de um  
nanocompósito polimérico condutor a base de resina epóxi e nanotubos  
de carbono**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria de Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Rosana, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos.

Rosana – SP

2022

S587e

Silvestre, Jane Ianuchauskas

Estudo das propriedades elétricas e dielétricas de um nanocompósito polimérico condutor a base de resina epóxi e nanotubos de carbono / Jane Ianuchauskas Silvestre. --

Rosana, 2022

50 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana

Orientador: Renivaldo José dos Santos

1. Resina Epóxi. 2. MWCNT. 3. Compósito Polimérico Condutor,. 4. Propriedades Elétricas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**JANE IANUCHAUSKAS SILVESTRE**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADA EM ENGENHARIA DE ENERGIA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Professor Assistente Doutor  
José Francisco Resende da Silva  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA**

Dr. Renivaldo José dos Santos.  
Orientador/UNESP-Rosana

Dr. Michael Jones da Silva.  
UNESP-Rosana

Me. Carlos Toshiyuki Hiranobe.  
UNESP- Rosana

Julho, 2022.

Dedico este trabalho a todos aqueles que acreditaram em mim e sempre me apoiaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e a pessoa mais importante para a realização deste trabalho, Eu, por não ter desistido. Agradeço a minha família por tudo que fizeram, pois sem eles nada disso seria possível. Agradeço aos amigos que sempre estiveram comigo, mas em especial agradeço a Otávio Mariotto, Costelinha e Samantha Regina por aturar-me desde o primeiro dia de aula. Agradeço ao meu Orientador, aos membros da banca examinadora, e a todos os Professores por auxiliar e compartilhar todo conhecimento necessário para chegar até aqui.

“Na hora da luta, a sabedoria vale mais que  
a força bruta para conseguir a vitória.”

Provérbios 21:22

## Resumo

Neste trabalho foi estudado as propriedades elétricas e dielétricas de um nanocompósitos à base de resina epóxi (RE) e nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT). As amostras foram preparadas com quantidades fixas de RE (3g) e diferentes concentrações mássicas de MWCNT (variando de 0,25 a 3%) e obtidas por meio do método *casting*. Foram realizadas análises elétricas por meio dos métodos duas pontas em corrente contínua e usando um analisador de impedância. As análises da condutividade elétrica *dc* demonstraram que uma transição isolante-semicondutor ocorreu no nanocompósitos RE/MWCNT entre as concentrações de 0,5 e 1% de MWCNT, ou seja, essa é a região de percolação onde ocorre a formação do primeiro caminho ininterrupto de MWCNT no interior do nanocompósito. As análises de condutividade elétrica *ac* demonstraram que as amostras apresentam características de sólidos, no qual à medida que a frequência do campo elétrico aumenta a condutividade elétrica *ac* também se torna maior. No entanto, para as amostras com concentrações superiores a 1% MWCNT, a condutividade real *ac* apresentou duas regiões bem definidas, isto é, uma dependente e outra independente da frequência. Similar comportamento foi observado para a impedância elétrica das amostras do nanocompósitos RE/MWCNT, uma vez, essa grandeza é inversamente proporcional a condutividade elétrica *ac*. Por fim, foi avaliado a permissividade dielétrica relativa das amostras do nanocompósitos RE/MWCNT, no qual foi possível observar que à medida que a concentração de MWCNT foi aumentada, também houve um aumento da dessa grandeza. Isso ocorre porque quanto maior a concentração de MWCNT no interior do nanocompósitos, maior também será a quantidade de portadores de cargas presos nas interfaces resina epóxi-MWCNT.

**Palavras-Chave:** Resina Epóxi, MWCNT, Compósito Polimérico Condutor, Propriedades Elétricas.

## Abstract

In this work, the electrical and dielectric properties of a nanocomposite based on epoxy resin (ER) and multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) were studied. The samples were prepared with fixed amounts of RE (3g) and different mass concentrations of MWCNT (ranging from 0.25 to 3%) and obtained by casting method. Electrical analyses were conducted by means of the two-ended direct current method and using an impedance analyzer. The dc electrical conductivity analysis demonstrated that an insulating-semiconductor transition occurred in the RE/MWCNT nanocomposite between the 0.5 and 1% MWCNT concentrations, i.e., this is the percolation region where the formation of the first uninterrupted MWCNT path inside the nanocomposite occurs. The analysis of electrical conductivity ac demonstrated that the samples present characteristics of solids, in which as the electric field frequency increases the electrical conductivity ac also becomes higher. However, for samples with concentrations higher than 1% MWCNT, the real conductivity ac presented two well defined regions, that is, one frequency dependent and the other independent of the frequency. Similar behavior was observed for the electrical impedance of the RE/MWCNT nanocomposite samples, since this quantity is inversely proportional to the electrical conductivity ac. Finally, the relative dielectric permittivity of the RE/MWCNT nanocomposite samples was evaluated, in which it was possible to observe that as the MWCNT concentration was increased, there was also an increase in this magnitude. This is because the higher the concentration of MWCNTs within the nanocomposites, the greater the amount of charge carriers trapped in the epoxy resin-MWCNT interfaces.

**Keywords:** Epoxy Resin, MWCNT, Conductive Polymer Composite, Electrical Properties.

## **Lista de Tabela**

Tabela 1: Massa utilizadas para confecção das amostras do nanocompósitos RE/MWCNT ..... 33

Tabela 2: Variáveis utilizadas para cálculo da  $\sigma_{dc}$ , como corrente e voltagem medidas em cada amostra do nanocompósito RE/MWCNT. .... 36

## Lista de Figuras

Figura 1: Representação gráfica de nanotubos de carbono de parede simples (a) e paredes múltiplas (b).....	23
Figura 2: Conectividade de compósito bifásico .....	29
Figura 3: Amostras do nanocompósito RE/MWCNT com diferentes concentrações de MWCNT. ....	34
Figura 4: Amostra pura (100% epóxi) metalizada com tinta condutora .....	34
Figura 5: Análise da $\sigma dc$ em função da concentração mássica de MWCNT para o nanocompósito RE/MWCNT .....	37
Figura 6: Gráficos da condutividade real (a) e imaginária (b) em função da frequência das amostras do nanocompósito RE/MWCNT.....	39
Figura 7: Gráficos da impedância real (a) e imaginária (b) em função da frequência das amostras do nanocompósito RE/MWCNT.....	42
Figura 8: Gráficos da permissividade real (a) e imaginária (b) em função da frequência das amostras do nanocompósito RE/MWCNT.....	44

## **Lista de siglas e abreviações**

ac – alternating current (corrente alternada);

Circuito RC - composto de um resistor, um capacitor e uma força eletromotriz;

CNT - carbon nanotubes (nanotubos de carbono);

dc - direct current (corrente contínua);

eq. – equação;

eqs. – equações;

FEIS – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira;

MWCNT – Multi-walled carbon nanotubes (nanotubos de carbono de paredes múltiplas);

NTC - nanotubos de carbono;

TCC – trabalho de conclusão de curso;

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais;

UNESP – Universidade Estadual Paulista;

## Lista de símbolos

a e b componentes cartesianas

A área metalizada na amostra

$\sigma$  condutividade;

$\sigma_{ac}$  condutividade corrente alternada;

$\sigma_{dc}$  condutividade corrente contínua;

$\sigma^*$  condutividade complexa;

$\sigma' (f)$  componente real da condutividade;

$\sigma'' (f)$  componente imaginária da condutividade

$\delta$  ângulo da defasagem entre as constantes dielétricas real e imaginária;

B susceptância

$\epsilon^*$  permissividade dielétrica complexa;

$\epsilon_0$  permissividade elétrica do vácuo;

$\epsilon'$  componente real da permissividade componente;

$\epsilon''$  componente imaginária da permissividade constante;

$\mu$  mobilidade elétrica;

$\theta$  ângulo de fase entre  $I$  e  $V$

$\emptyset$  ângulo de fase;

$\omega$  frequência angular;

d espessura da amostra;

$G^*$  condutância complexa;

G condutância

$i$  número imaginário;

$I$  fasor da corrente;

$I^*$  corrente de resposta amplitude;

$I_m$  amplitude da corrente

$I_0$  amplitude da corrente elétrica;

e espessura;

f frequência;

L espessura;

RE resina epóxi;

R resistência elétrica (Ohm);

Rl resistência elétrica de volume;

S vetor planar do sistema ortogonal de eixos;

t tempo;

T temperatura;

V volume;

$V^*$  tensão aplicada;

$V_m$  amplitude da tensão;

$V_0$  amplitude da tensão;

$V$  fasor da tensão;

Y admitância

$Y^*$  admitância complexa;

$\omega$  frequência angular;

$X_C$  reatância capacitiva

Z impedância;

$Z^*$  impedância elétrica complexa;

# SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>17</b>
2.1. RESINA EPÓXI.....	17
2.1.1. <i>Propriedades</i> .....	18
2.1.2. <i>Processos e utilidades</i> .....	20
2.2. NANOTUBOS DE CARBONO.....	22
2.3. COMPÓSITOS .....	25
2.3.1. <i>Tipos de Compósitos</i> .....	26
2.3.2. <i>Compósitos Poliméricos</i> .....	27
2.3.3. <i>Conectividade</i> .....	28
2.4. PROPRIEDADES ELÉTRICAS E DIELETRICAS .....	29
2.4.1. <i>Condutividade</i> .....	29
2.4.2. <i>Impedância</i> .....	30
2.4.3. <i>Permissividade</i> .....	31
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>32</b>
3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	32
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
4.1. MATERIAIS.....	33
4.2. PREPARO DO NANOCOMPÓSITO RE/MWCNT .....	33
4.3. PROPRIEDADES ELÉTRICAS E DIELETRICAS .....	35
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
5.1. ANÁLISES DE CONDUTIVIDADE.....	36
5.2. ANÁLISES DE IMPEDÂNCIA.....	40
5.3. ANÁLISES DE PERMISSIVIDADE .....	43
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>47</b>

## 1. INTRODUÇÃO

De forma a otimizar as propriedades dos nanocompósitos, têm-se utilizado a combinação das melhores características entre a matriz polimérica e às cargas nanométricas. Assim, materiais compósitos são oriundos da união de dois ou mais materiais imiscíveis que, uma vez que combinados, resultam em outro composto que possui propriedades diferentes e amplificadas quando comparados aos materiais isoladamente (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

O material que será inserido à matriz polimérica possui dimensão nanométrica, o composto polimérico resultante é designado como nanocompósito. Para a aplicação estrutural em indústrias, é feita a combinação de polímeros reforçados com materiais os quais potencializam as suas propriedades elétricas, térmicas e mecânicas (MADRONA et al, 2021). Dessa maneira, sendo a resina epóxi (RE) um polímero com alto desempenho e que possui múltiplas características e diversas funcionalidades, esta possui bom desempenho diante de temperaturas elevadas, sendo aplicados em diferentes setores das indústrias automobilística, aeroespacial, microeletrônica, etc.

Diante da incorporação das cargas de nanotubos de carbono nas matrizes poliméricas, com baixos níveis de concentração dessas partículas condutoras é possível que o compósito apresente condutividade elétrica, quando comparadas a outras configurações que utilizam diferentes tipos e concentrações de cargas condutivas, a exemplo das fibras de carbono. Esse fato pode ser relacionado com a geometria dos nanotubos de carbono, que apresenta elevada razão de aspectos influenciados pela sua forma de bastão (BACKES, 2016).

Para SANTOS et al 2018, devido ao acelerado processo de cura, além da alta resistência mecânica, a impermeabilidade, a possibilidade de moldagem a frio e a sua estabilidade dimensional, as resinas epóxi são, costumeiramente, utilizadas para confeccionar protótipos, modelos e moldes em diversas aplicações, isto é, desde o seu uso na metalmecânica até mesmo no uso odontológico.

Estes compósitos geralmente são aplicados em dispositivos eletrônicos e sensores piezoelétricos, com isso torna-se necessário descobrir o comportamento de tais materiais quando estes são submetidos à ação de um campo elétrico externo ou quando determinada força é aplicada sobre o nanocompósito. Com isso o presente trabalho visa realizar um estudo das propriedades elétricas e dielétricas do nanocompósito.

Para atingir o propósito previamente estabelecido, esta pesquisa foi organizada em sete capítulos, a contar por esta introdução, que visa contextualizar o tema de pesquisa. O segundo capítulo, apresentará a revisão bibliográfica, sendo uma breve fundamentação teórica, de forma a apresentar os principais conceitos e temas discutidos na pesquisa. O terceiro capítulo mostra os objetivos gerais e específicos deste trabalho. Em seguida, o quarto capítulo aborda a metodologia utilizada para obtenção do compósito polimérico como também os métodos utilizados para as análises das propriedades elétricas e dielétrica. No quinto e sexto capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos e a conclusão, compilando todas as informações e dados levantados. Para finalizar, o sétimo capítulo encerra apresentando as referências bibliográficas que subsidiaram o desenvolvimento da pesquisa.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção serão abordados os fundamentos teóricos que embasaram o desenvolvimento da pesquisa. Para isso, serão apresentados conceitos relativos a RE, aos materiais compósitos, aos nanotubos de carbono, a condutividade elétrica, impedância, dentre outros.

### 2.1. Resina Epóxi

De acordo com Titta *et al* (2020), o termo “Resina” consiste em um termo genérico usado para designar polímeros, pré-polímeros e/ou a combinação de vários aditivos ou componentes que sejam quimicamente reativos. Dessa forma, vale dizer que as propriedades físico-químicas da resina afetam, significativamente, as suas características, assim como a fabricação dos plásticos reforçados

O termo “resina epóxi” (*RE*) (também chamada de poliepóxido ou resina epoxídica) é usado para designar a forma curada e também a não curada de resinas constituídas pela presença de pelo menos dois grupos epóxis terminais. Assim, os primeiros produtos denominados hoje de RE surgiram no ano de 1891, sendo a condensação de epóxidos e aminas relatada e patenteada pela primeira vez pelo pesquisador Paul Schlack da Alemanha em 1934 (KERSTING, 2004).

Pierre Castan, em meados da década de 30, produziu um material termofixo no qual possuía baixo ponto de amolecimento quando reagia com anidrido fólico e formava uma resina. Naquele momento, Castan trabalhava para a companhia De Trey Frères, desenvolvendo produtos para confecção de dentaduras e próteses. Dessa maneira, as primeiras resinas epóxi comerciais foram as resinas obtidas a partir da reação de bisfenol-A e epiclorigrina, em 1938, identificadas por Pierre Castan. Em 1943, a empresa Ciba-Geigy, uma empresa química suíça, conduziu importantes pesquisas resultando em 1945 a primeira patente de aplicação de resinas epóxi como adesivos, sendo comercializados a partir de 1946 (KERSTING, 2004).

Assim, até o início da década de 60 a comercialização de resinas epóxi já era realizada pela Shell, Devoe and Raynolds, Union Carbide, Dow Chemical e a Reicholds

Chemical (KERSTING, 2004). Ademais, de acordo com o autor supracitado, nos anos 70, foram realizadas pela empresa Ciba-Geigy importantes pesquisas nas quais envolveram a aplicação de hidantoínas, resultando, assim, nas primeiras resinas epóxi com anéis heterocíclicos. Já em 1976, a empresa Shell Chemical introduziu no mercado materiais fabricados a base de bisfenol-A hidrogenado, visando, dessa forma, a fabricação de resinas resistentes à radiação UV (KERSTING, 2004).

### 2.1.1. Propriedades

De acordo com Nasseh (2011), a RE consiste em um polímero sintético termofixo que possui ligações cruzadas muito fortes, sendo, assim, resinas de alto desempenho e, conseqüentemente, de suma importância para a engenharia. Ademais, o autor ressalta que essa resina exibe vantagens no que tange ao processo de cura e propriedades mecânicas (MADRONA *et al*, 2021).

Vale dizer que os polímeros conhecidos como termorrígidos ou termofixos consistem em materiais plásticos que são maleáveis apenas durante o momento de sua fabricação, não sendo possível remodelá-los posteriormente, uma vez que em sua tentativa esses materiais se decompõem (DURIGAN NETO *et al*, 2018). Assim, são formadas por, no mínimo, dois grupos funcionais de epóxi que com a adição de um endurecedor, ocorre a formação de um polímero termorrígido (XAVIER JARGENBOSKI *et al*, 2016).

Ademais, as resinas são classificadas como termoplásticas e termofixas, cujas diferenças são encontradas no comportamento destas resinas ao serem aquecidas. Dessa forma, as resinas termoplásticas são aquelas que se fundem em um líquido viscoso que é capaz de sofrer grandes deformações ao serem modeladas e solidificadas da forma que se deseja. Dentre as principais resinas termoplásticas destaca-se o polietileno, o polipropileno e o nylon (TITA *et al*, 2007).

Para TITA *et al* (2007), as resinas termofixas podem, a princípio, formar ligações químicas intercruzadas, com o processo de cura, e, posteriormente, caso a taxa de aquecimento permaneça, podem vir a sofrer uma decomposição térmica, destacando-se para as resinas epóxis, os poliésteres e as fenólicas. Já Madrona *et al* (2021) explicam que o processo de cura é dado, a princípio, pela polimerização de anéis C-O-C, que são

abertos enquanto estão presentes nas moléculas de RE, posteriormente há um rearranjo das ligações juntando as moléculas para a formação das cadeias, e então adiciona-se um endurecedor visando reticular as cadeias.

Os polímeros termorrígidos são responsáveis por possuírem cadeias formando redes tridimensionais fixas nas quais impedem a movimentação das estruturas reticulares, fator que confere maior resistência mecânica, bem como maior dureza e rigidez, além de baixa ductilidade e resistência altas temperaturas (MADRONA *et al*, 2021).

Atualmente existe uma grande quantidade e variedade de resinas epóxis disponíveis, de forma a apresentarem diferentes propriedades conforme o tipo de epóxi, bem como os agentes de cura, o procedimento de cura e as variadas formulações existente (ZACHARUK *et al*, 2011).

Dentre essas propriedades, Susin (2014) evidencia a alta resistência à tração, a boa resistência química a solventes, além das boas propriedades adesivas, a estabilidade estrutural, o baixo custo e a, por fim, a facilidade de processamento. Essas propriedades são oriundas do processo de reticulação da resina, uma vez que essa se transforma em um material termorrígido que se configuram em uma estrutura em forma de rede tridimensional de cadeias cruzadas (SUSIN, 2014).

Ressalta-se, ainda, a viscosidade como uma importante propriedade da RE, sendo diretamente associada a massa molecular e a sua distribuição, além dos solventes utilizados e a forma como foi constituída quimicamente (ZACHARUK *et al*, 2011). Dessa forma, a baixa viscosidade desta resina, conseqüentemente, faz com que haja alinhamento entre seus fios, devido a saturação adequada de suas fibras (CARNEIRA; TEIXEIRA, 2008).

Assim, por apresentarem alto desempenho, resinas epóxi são capazes de ser três vezes mais fortes que outras resinas conhecidas como éster vinílicas, além de serem materiais termoestáveis e possíveis de resistir a maiores impactos que estas sem sofrer danos devido, dentre outros fatores a seus grupos aromáticos (NETO *et al*, 2018). Ademais, vale dizer que estas resinas possuem, também, alta resistência à degradação ambiental e quando expostas a água não iram inflar (DURIGAN NETO *et al*, 2018).

Destarte, de acordo com os estudos desenvolvidos por Hack *et al* (2019), diversos estudos têm demonstrado que a adição de nanomateriais na matriz polimérica, como por exemplo na RE, tem resultado em sua melhoria ao modificar as propriedades mecânicas, térmicas e elétricas.

Durigan Neto *et al* (2018) salientam ainda que, dentre os fatores que influenciam as características finais da RE, bem como o tempo de trabalho, constitui o chamado *pot life*, ou seja, o endurecedor utilizado em seu tratamento. Os autores explicam que, sem a utilização do endurecedor, em temperatura ambiente e em estado puro, as moléculas do epóxi não reagem entre si, possibilitando, assim, ser armazenadas durante longo período de tempo em ambiente inerte.

Vale dizer que, resinas epóxi possuem baixa densidade, isto é, cerca de 1,3 g/ml à temperatura ambiente, fator que favorece as propriedades de adesão e mecânicas, o que otimiza, assim, a aplicação em juntas adesivas para, dentre outras indústrias, a automobilística e aeroespacial de alto desempenho (SANTOS, 2019).

Entretanto, por ser um polímero, a RE apresenta alta degradação térmica, baixa temperatura de ignição e combustão, passando por cinco estágio, sendo eles aquecimento, pirólise, ignição, propagação e, por fim, extinção (HACK, *et al*, 2019). Ademais, essas resinas são frágeis após sua cura quando relacionadas a compósitos termoplásticos semicristalinos, este comportamento é influenciado pelas tensões localizadas que fará o material apresentar, por sua vez, microtrincas que possibilitará, em regiões com pequenas deformações, o aparecimento de fraturas prematuras (ZACHARUK *et al*, 2011).

### 2.1.2. Processos e utilidades

A RE possui como vantagem a facilidade em se adaptar a diferentes processos industriais e as suas aplicações. Dessa maneira, a reação de cura, sendo uma reação exotérmica, acontece em temperaturas ambiente ou em temperatura elevada, além da possibilidade, para isso, da utilização da radiação ultravioleta. Ademais, a combinação de endurecedores, aditivos e catalisadores otimizam o processo de cura (KERSTING, 2004).

Gonçalves *et al* (2010) explicam que as resinas epóxi tornam-se em polímeros termorrígidos após a adição de agentes de cura, isto é, os endurecedores. Vale dizer que a “cura” consiste em um processo, em que a resina, endurecedor e outros reagentes deixam de ser uma mistura com peso molecular baixo e passa a ser um material altamente reticulado.

Por sua vez, o endurecer influencia a cinética da reação e processamento, sendo estes importantes fatores que alteram as propriedades finais da resina. Os endurecedores

são classificados em amínicos alifáticos ou aromáticos e em amínicos anidridos (MADRONA *et al*, 2021). No que tange a porcentagem do agente de cura a ser utilizado na resina, os autores supracitados aduzem que esta deve estar relacionada a cura total, de forma que nenhum grupo epóxi ou endurecedor possa chegar ao final do processo sem reagir. Dessa forma, a reação de cura das resinas epóxi procede-se em etapas sem que ocorra a liberação de subprodutos voláteis, facilitando, assim, a operação, uma vez que não necessita da aplicação de pressão para evitar a emissão de vapores tóxicos (KERSTING, 2004).

Madrona *et al* (2021) explicam que as propriedades que se espera da RE são obtidas após a ocorrência do processo de cura, no qual é responsável por transformar o reagente de baixo peso molecular em um produto reticulado, que é uma característica de polímeros termorrígidos, mostrando traços tanto da RE quanto do endurecedor que foi adicionado durante o processo.

As resinas epóxis são confeccionadas através da condensação do bisfenol-A com epicloridrina. Assim, após a cura, é possível conseguir um material polimérico com alta dureza, resistência a produtos químicos e estabilidade dimensional, bem como melhorias em suas propriedades elétricas (OLIVEIRA, 2015).

Para o autor,

“Seu uso se distribui em diversos setores, sendo de grande utilidade para revestimentos de proteção para partes metálicas, aparelhos, navios, sendo também utilizado na indústria de computadores em compósitos reforçados com fibras para placas de circuitos entre outras utilidades” (OLIVEIRA, 2015, pg. 1586).

De acordo com Backes (2016), constitui em um material com aplicação em diversas áreas, como por exemplo, na produção de componentes elétricos e eletrônicos (dissipação eletrostática e encapsamento de circuitos integrados), em tintas e vernizes utilizadas para cobertura de superfícies, nas áreas da construção civil e engenharia, automotiva, aviação, marítima, dentre outras aplicações.

Destarte, as resinas epóxi possuem diversas utilidades e aplicabilidade, sobretudo nas indústrias, por exemplo, pode ser utilizada como materiais isolantes, encapsulantes, prime anticorrosivo, calafante, remendo de trincas e de fissuras em paredes, adesão do concreto novo ao concreto antigo, piso industrial monolítico, rejunte e junta de dilatação, adesivos para metais e madeiras utilizados em colagem naval, automotivas, de móveis, aeromodelismo, aeronaves e, por fim, em bijuterias (SANTOS *et al*, 2018).

Constituindo em um material muito versátil, a RE pode ser utilizada como isolante térmico, facilitando assim a confecção de peças elétricas na construção civil, além da possibilidade de ser aplicada como adesivos em peças de madeira e de metais. Ademais, ao endurecer, o brilho da RE sobre a superfície dos materiais favorece a sua aparência, sendo muito utilizada como revestimento de móveis e pisos, por exemplo. A RE é utilizada, ainda, na confecção de peças artesanais, como esculturas, pedras e bijuteria (DURIGAN NETO *et al*, 2018).

Salienta-se, ainda, conforme aduzem os autores, que a RE é muito utilizada nas tarefas de manutenção industrial, isto é, funciona como adesivo ou primer anticorrosivo, ou mesmo como revestimento de alta resistência para produtos químicos.

## **2.2. Nanotubos de Carbono**

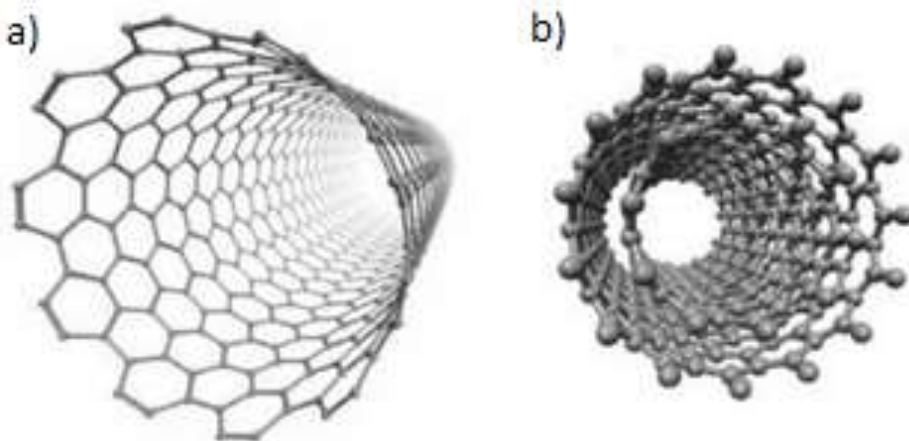
Para Sales (2013), um dos mais importantes elementos químicos presentes na natureza é o carbono, possuindo maior número de estruturas distintas e complexas. Dessa forma, ao considerar apenas as ligações dos átomos de carbono entre si, destaca-se para a conhecida presença do diamante e do grafite em suas formas alotrópicas (SALES, 2013).

Assim, vale dizer que existem diversas formas de ligação entre esses átomos visando a formação dos nanotubos de carbono, uma vez que esta ligação reflete, diretamente, no seu desempenho do material, assim como em suas características e utilização (SALES, 2013). Segundo o autor, em relação a geometria, as principais características, e até as mais relevantes, desses materiais conhecidos como Nanotubos de Carbono se dão devido ao diâmetro e a quiralidade, isto é, o arranjo que os hexágonos dos átomos de carbono se posicionam diante do eixo tubular.

Reportados, em 1991, a princípio por Sumio Iijima (IIJIMA, 1991) através da identificação de finas agulhas de carbono formadas sobre eletrodos que foram utilizados na preparação de fulerenos durante uma descarga elétrica na evaporação, os Nanotubos de Carbono possuíam paredes múltiplas (ARAÚJO, 2010). De acordo com os autores supracitados, os Nanotubos de paredes simples ao serem identificados foram reportados logo em seguida, no ano de 1993, por Iijima e Ichihashi, que buscaram sintetizar nanotubos de carbono, com o mesmo método, com diâmetro de apenas um nanômetro.

Assim, em termos estruturais, nanotubos de carbono podem possuir paredes simples, enrolamento de uma folha de grafeno, ou paredes múltiplas, enrolamento de duas ou mais camadas de grafeno distanciadas entre si (MADRONA *et al*, 2021).

Figura 1: Representação gráfica de nanotubos de carbono de parede simples (a) e paredes múltiplas (b)



Fonte: Zarbin; Oliveira (2013).

É de suma importância citar que o desenvolvimento de tal classe desses materiais é dada pela dependência de suas propriedades relacionadas com o tamanho das partículas que os constituem. Se, por exemplo, as partículas ultrapassarem tamanhos críticos, provavelmente haverá mudanças em suas propriedades ópticas, elétricas mecânicas e magnéticas. Isto posto, afirma-se, ainda, que esses valores dos tamanhos críticos estão relacionados tanto aos materiais quanto suas propriedades avaliadas (ZARBIN, 2007).

Salienta-se, ainda, que as propriedades dos nanotubos de carbono podem variar com a geometria, quiralidade, diâmetro e comprimento do tubo, arranjo atômico, originando, assim partículas condutoras e semicondutoras, apresentando valores médios de condutividade elétrica de  $0,1 \text{ S.cm}^{-1}$  para semicondutores e  $10^3$  a  $10^4 \text{ S.cm}^{-1}$  para os condutores (SANTOS, 2019).

Os Nanotubos de Carbono, segundo os ensinamentos de Madrona *et al* (2021) são dessa forma estruturas cilíndricas obtidas através das folhas de grafeno, isto é, um microcristal tubular de grafite leve, e que possui razão de aspecto alta, possuindo também boas propriedades mecânicas e elétricas.

Isto posto, salienta-se que os nanotubos de carbono são formados por carbonos em arranjos hexagonais que se configuram em pequenos cilindros, possuindo, normalmente, pequeno diâmetro com mínimos angstroms, bem como poucos nanômetros,

além de possuir vários centímetros de comprimento (HERBEST; MACÊDO; ROCCO, 2004). Dessa maneira, os Nanotubos de Carbono são caracterizados através do enrolamento de forma concêntrica, das camadas cilíndricas de grafeno com cavidade interna oca e diâmetro de dimensão nanométrica (ARNECKE *et al*, 2022).

De acordo com Sales (2013), os Nanotubos de Carbono são os materiais mais resistentes e rígidos conhecidos atualmente, sendo eles alótropos do carbono com uma nanoestrutura cilíndrica onde suas relações de comprimento assumem valores superiores a 100 000 000:1, isto é, valor muito superior à de qualquer outro material.

Assim, estes materiais, ou seja, os Nanotubos de Carbono, possuem tanto propriedades elétricas como propriedades térmicas extraordinárias, que são somadas a uma boa estabilidade química, nas quais tem despertado diversos interesse na sua utilização por possuir variadas aplicações, sobretudo em compósitos poliméricos para prepará-los a fim de obter resistência mecânica elevada à tração e flexão, por exemplo, além de possuir grande estabilidade térmica (LOPES *et al*, 2016).

Para Durigan Neto *et al* (2018), a produção dos Nanotubos de Carbono pode ocorrer de três métodos, sendo eles a deposição química de vapor, a descarga por arco elétrico e, por fim, ablação por laser, sendo que, os últimos dois citados, baseiam -se na composição dos átomos de carbono sublimados obtidos com evaporação do grafite sólido. Enquanto a deposição química, por sua vez, é a decomposição de uma fonte de carbono gasoso de forma que os nanotubos sejam depositados em um substrato e, a partir desse, consigam crescer.

Devido às suas diversas propriedades, essa nova família de alótropos de carbono são considerados interessantes e promissores para a indústria devido a sua alta resistência mecânica e capilaridade, sem contar que apresentam estrutura eletrônica única (HERBEST; MACÊDO; ROCCO, 2004).

Dentre suas várias possibilidades de aplicações potenciais, os autores frisam para a obtenção de compósitos com elevada resistência mecânica ou condutividade, além dos sensores, dispositivos para armazenar e converter energia, semicondutores nanométricos, entre outros. Sob a perspectiva de aplicações, os nanotubos de carbono poderiam ser utilizados, ainda, em materiais polimérico, processos catalíticos, peneiras moleculares, material de armazenar hidrogênio, além de possuírem outras possibilidades de aplicação (HERBEST; MACÊDO; ROCCO, 2004).

Um fator condicionante para materiais compósitos ter nanotubos de carbono adicionados em sua matriz, é o custo, pois possui grande oscilação, variando muito

conforme o tipo, método que foi sintetizado e seus níveis de purificação utilizados (SALES, 2013). De acordo com os estudos de Araújo (2010), nanotubos de carbono quando usados para reforçar uma matriz, este possui diversas vantagens em relação aos agentes de reforço tradicionais, por exemplo as fibras de vidro. Fator este que demonstra o aumento das propriedades mecânicas e elétricas quando este é adicionado, em pequenas frações, em materiais compósitos poliméricos.

Todavia, o principal obstáculo na obtenção dos nanocompósitos está na dispersão uniforme dos nanotubos de carbono na matriz polimérica, já que existe certa tendência considerável de aglomeração dos nanotubos de carbono devido à força de atração de área superficial das nanopartículas (ARAÚJO, 2010). Diante disso, diversas técnicas são utilizadas, de forma individual e mescladas, para incorporar o reforço na matriz, sendo as principais verificáveis a mistura das soluções, procedimento de fusão e a polimerização *in situ*, que para minimizar os problemas de dispersão proporciona maior controle sobre a dispersão das cargas e, conseqüentemente, promover uma melhor interação do polímero com as nanocarga (KENNY *et al.*, 2011).

Por fim, ressalta-se que a nanotecnologia possibilita muitas aplicações em diversas áreas da ciência, facilitando o aprimoramento de sistemas e materiais, uma vez que os nanomateriais possuem potencial promissor, o que gera grande expectativas econômicas e tecnológicas (DELLA FLORA, 2019). Dessa forma e segundo a autora supracitada, esse novo rumo da ciência tem possibilitado que cientistas e pesquisadores manipulem estruturas com maior precisão inferindo maior eficiência no tratamento de suas características físicas e químicas, além de potencializar as propriedades dos materiais envolvidos.

### **2.3. Compósitos**

Os principais requisitos exigidos pela indústria de aplicação, isto é, os custos envolvidos, a disponibilidade, sobretudo, as propriedades mecânicas e a finalidade interferem diretamente no material que será utilizado diante das diversas aplicação dos compósitos (MADRONA *et al.*, 2021).

Desta forma, tem aumentado significativamente os estudos relacionados a área de materiais compósitos, principalmente no que tange às suas propriedades mecânicas, na

busca de amplificá-las, de forma a atender as demandas competitivas do mercado (MADRONA *et al*, 2021).

Dentre esses materiais, ressalta-se a confecção dos materiais nanocompósitos, que visam entrelaçar as principais características de uma matriz polimérica. Assim, atualmente, dentre os insumos utilizados frequentemente na indústria, destacam-se as nanopartículas, os nanotubos de carbono e o grafeno, dentre outros (ARNECKE *et al*, 2022).

### 2.3.1. Tipos de Compósitos

Ademais, materiais compósitos são classificados como compósitos particulados, compósitos fibrosos ou compósitos estruturais. Sendo os particulados subdivididos em grandes e pequenos, os fibrosos em contínuo ou descontínuo, e os estruturais em laminados e sanduíche (GONÇALVES *et al*, 2010). No que tange aos tipos de compósitos, os mais utilizados e conhecidos são aqueles obtidos com uma matriz polimérica e um reforço, podendo ser caracterizados por fibras longas ou curtas, cristais ou partículas (DURIGAN NETO *et al*, 2018).

Vale dizer que materiais compósitos são compostos por duas ou mais fases, isto é, uma matriz contínua que irá envolver a fase dispersa. Assim, as propriedades desses materiais dependem tanto das propriedades das fases constituintes, quanto de sua concentração, distribuição, tamanho, forma e orientação das partículas na fase dispersa (ARNECKE *et al*, 2022).

De forma sucinta, os autores supracitados explicam que é função da matriz unir reforços em uma unidade rígida, uma vez que este componente tem a responsabilidade de garantir a resistência mecânica dos materiais compósitos, sendo normalmente constituídos por fibras que, por possuírem pequeno diâmetro, inibe a característica de fragilidade do material (ARNECKE *et al*, 2022).

Coerente ao exposto, Titta *et al* (2007) explicam que um material compósito pode ser multifase, que busca combinar as suas propriedades de forma a aumentar o desempenho deste material quando comparado a cada fase de sua composição, quando empregadas de forma isolada.

Ademais, os compósitos podem, ainda, serem classificados através de sua matriz, sendo categorizados constituintes de metal, cerâmica ou polímero. No que tange ao tipo de reforço, assim como sua orientação, os compósitos também são classificados através do modo como é estruturada as formas de partículas, se estas estão dispostas aleatoriamente, seguindo uma direção ou mesmo em fibras contínuas, descontínuas, alinhadas e randômicas (SHEIKH-AHMAD, 2009). Por fim, salienta-se a existência dos compósitos híbridos, os quais são constituídos por camadas diferentes que possuem diversos tipos de materiais e variam a disposição das fibras desses materiais (DURIGAN NETO *et al*, 2018).

### 2.3.2. Compósitos Poliméricos

Os compósitos poliméricos, isto é, plásticos com reforços de fibras, são estruturas compostas, de forma sucinta, por fibras que possuem elevada resistência e são envolvidas em uma matriz polimérica, isto é, uma resina (CARNEIRA; TEIXEIRA, 2008).

Dessa forma, de acordo com Araújo (2010), os compósitos poliméricos são materiais estruturais utilizados para variadas aplicação, a exemplo das indústrias automobilísticas e outras, nas quais estão frequentemente presentes. Assim, estas indústrias utilizam estes compósitos em diversas aplicações de forma a reduzir o peso dos componentes de seus materiais, assim como amplificar a resistência mecânica e a química.

Por muito tempo a indústria e centros de pesquisa trabalham com compósitos. Todavia, estes reforços estão a nível micrométrico, com proximidade entre a matriz polimérica e a interface (SUSIN, 2014). Vale dizer, ainda, que tais materiais são formados por fase polimérica constante e outra dispersa, a fase contínua pode ser um termoplástico ou um termorrígido e a fase dispersa, são nanopartículas, e o compósito resultante é denominado como nanocompósito (ARAÚJO, 2010).

Salienta-se que as resinas epóxi constituem em uma das maneiras mais utilizadas devido a sua versatilidade quando comparadas as demais matrizes poliméricas existentes que são utilizadas na obtenção de compósitos (SUSIN, 2014).

Isto posto, qualquer material multifásico que apresente em suas fases significativa proporcionalidade e, que quando juntas apresentem alterações em suas propriedades, são denominados de materiais compósitos, isto apenas se as fases e a interface constituintes do compósito forem distintas (CALLISTER, 2008).

Salienta-se que esses materiais compósitos devem ser oriundos de um processo artificial e nunca derivados de forma natural, possuindo assim um grau de complexidade maior que os materiais estruturais isotrópicos, a exemplo são os materiais metálicos (LEVY NETO; PARDINI, 2018).

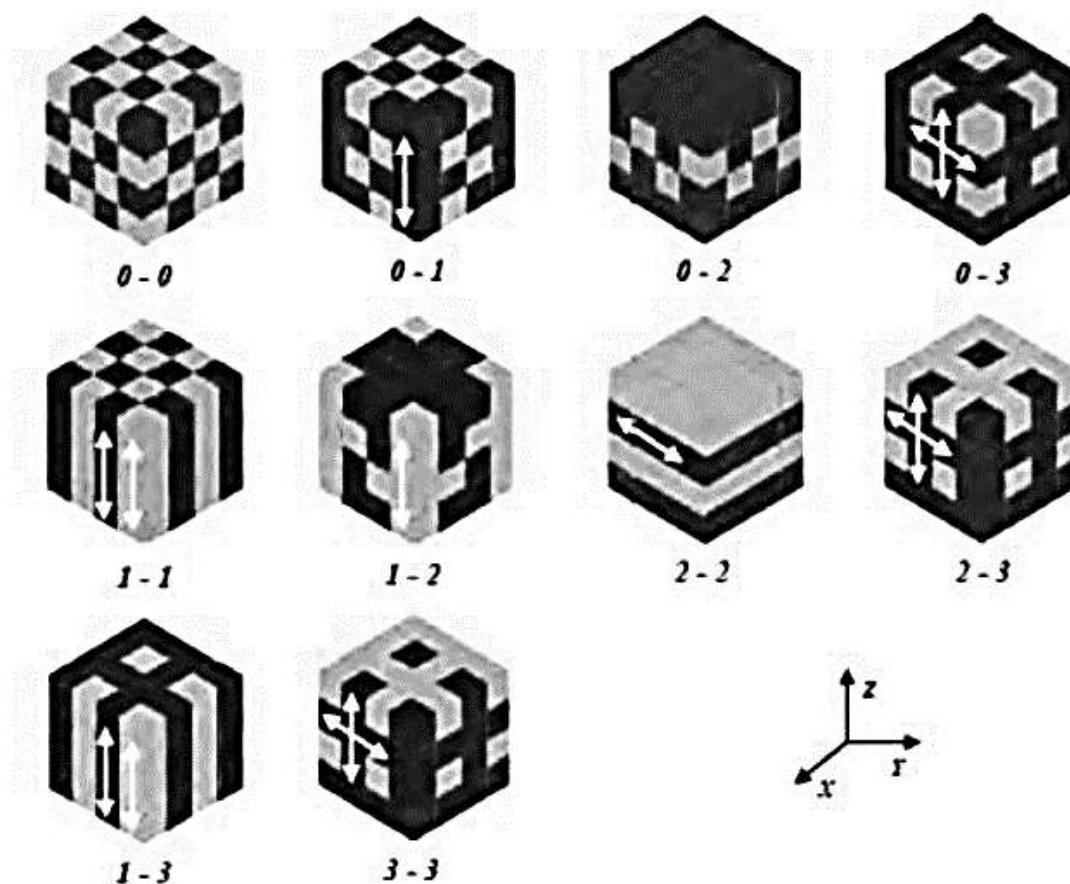
Vale dizer que, as propriedades desses compósitos são influenciadas por diversos fatores e variáveis, possibilitando, assim, que sejam feitos ajustes na fabricação do material, quando necessário, de forma a atender as demandas de um projeto específico (LEVY NETO; PARDINI, 2018).

### 2.3.3. Conectividade

A conectividade consiste em uma importante característica no desenvolvimento das propriedades em sólidos considerados multifásicos, sem que as propriedades físicas modifiquem em ordens de magnitude conforme as conexões feitas (BACKES, 2016).

Assim, quando se trata de materiais compósitos, cada fase pode estar espacialmente conectada em zero, uma, duas ou até mesmo três dimensões espaciais. Sendo que, quando o índice é 0 significa que tal fase não estará conectada em nenhuma das direções (x, y ou z), enquanto quando este for 1, mostra que a fase está conectada apenas em uma direção, e assim por diante (BACKES, 2016). Dessa forma, Askeland e Phulé (2008) explicam que a conectividade busca descrever como as duas ou mais fases de um compósito são unidas.

Figura 2: Conectividade de compósito bifásico



Fonte: Sanches (2012).

## 2.4. Propriedades Eléctricas e dieléctricas

### 2.4.1. Condutividade

Os Nanotubos de Carbono são cada dia mais usados como reforço na manufatura dos materiais compósitos uma vez que, dentre outros fatores, apresentam altos valores de condutividade eléctrica em relação ao uso de outros materiais, a citar pelas fibras de carbono (SILVA, 2009).

De acordo com Paula (2013), a condutividade relaciona-se com os fenômenos de espalhamento de elétrons, que consiste na aplicação de um campo eléctrico que resulta na aceleração das cargas eléctricas. Desse modo, no que concerne a propriedades eléctricas,

uma matriz isolante se torna condutora ao adicionar materiais condutores, a exemplo de partículas metálicas ou nanopartículas de carbono.

Assim, no que tange às propriedades elétricas e a elevada razão de aspecto, o uso de Nanotubos de Carbono é evidenciado pelo seu tamanho nanométrico capaz de obter alta condutividade elétrica ao ser combinado, podendo, dessa forma, transformar um material que é eletricamente considerado um isolante em um material composto condutor (MADRONA *et al*, 2021).

Madrona *et al* (2020) explicam ainda que, além da influência apresentada pela razão do aspecto, quanto maior for a dispersão dos nanotubos de carbono em um polímero, menor será o limiar de percolação observado, uma vez que a condução de cargas elétricas ocorre através da interligação dos nanotubos de carbono que formam redes, possibilitando, assim, a passagem de elétrons por um caminho ininterrupto.

A dispersão de cargas influencia diretamente no processo de construção dessas redes, o aglomeramento das nanopartículas pode comprometer o limiar de percolação, fazendo com que esse se torne elevado devido má dispersão dos elementos (MADRONA *et al*, 2021).

Isto posto, a condução elétrica em nanotubos de carbono tem recebido atenção tanto por pesquisadores acadêmicos como das indústrias devido às suas diversas possibilidades de aplicação em materiais eletrônicos pela possibilidade a alta condutividade elétrica dos compósitos de polímeros com quantidades relativamente baixas de cargas e facilidade de processamento (COELHO; MORALES, 2017).

#### 2.4.2. Impedância

Quando se trata de estudar propriedades elétricas dos materiais, é muito utilizada a técnica conhecida como espectroscopia de impedância, uma vez que tem como objetivo compreender os diferentes processos de condução. Assim, pode-se afirmar que a impedância consiste na oposição de um circuito à passagem de corrente elétrica alternada através de um material (SILVA, 2009).

A resistência, proveniente do resistor, constitui em uma dissipação de energia em forma de calor, e a reatância, na energia armazenada em campos elétricos e magnéticos sem perda de calor. Assim, a reatância consiste em uma oposição natural de

indutores ou de capacitores diante da variação de corrente elétrica observada em circuitos de corrente alternada. (GONZATTO NETO, 2015). Dessa forma, a impedância é dita como a ação de resistências e reatância, isto é, a oposição a corrente alternada que flui no material. (PAULA *et al*, 2022).

#### 2.4.3. Permissividade

Por sua vez, a permissividade constitui-se em uma propriedade na qual uma substância possui habilidade inata a resistência de uma carga elétrica induzida dentro da estrutura do material. Dessa forma, constitui em uma grandeza relacionada a capacidade de uma substância ser polarizada e armazenar energia devido ao campo elétrico externo (PAULA *et al*, 2022).

Os autores explicam que a permissividade dielétrica é representada pela letra grega ( $\epsilon$ ) e sua unidade é dada em Farads por metro (F/m). Assim, quando o dielétrico é adicionado entre as placas de um capacitor, devido a sua permissividade dielétrica a capacidade de armazenamento de um capacitor pode aumentar.

Ressalta-se, portanto, que a permissividade elétrica constitui na habilidade de polarização de um material sob um campo elétrico externo aplicado, cancelando, desta forma, parcialmente o campo dentro do material. Assim, os materiais que resistem à formação deste campo são conhecidos como materiais dielétricos ou isoladores (PAULA *et al*, 2022).

### **3. OBJETIVOS**

Estudo das propriedades elétricas e dielétricas de nanocompósito baseados em resina poliéster de alta densidade com diferentes concentrações mássicas de MWCNT.

#### **3.1. Objetivos específicos**

- Avaliar a sinergia das fases das propriedades elétricas e dielétricas finais do nanocompósito condutor.
- Estudar a variação da concentração da fase condutora sobre a propriedade elétrica do nanocompósito condutor.
- Realizar um estudo do campo elétrico *ac* sobre as propriedades elétricas e dielétricas do nanocompósito condutor.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os materiais e a metodologia utilizada para confecção e análises das propriedades elétricas do nanocompósito.

### 4.1. Materiais

A base do nano compósito utilizada neste trabalho foi a RE transparente 2001(0,670 kg) com endurecedor 3154 (0,330 kg) da Readeleaser, que segundo o fabricante esta é de fácil processamento, boa fluidez, excelente transparência e boa retenção de cores, boa adesão, alta dureza e resistência à abrasão, contração mínima, excelentes propriedades dielétricas com alta isolamento, resistência química elevada, especialmente ao intemperismo e umidade, estabilidade aos ciclos térmicos, impactos e ações mecânicas e não libera subprodutos.

Os nanotubos de carbono (MWCNT) foram obtidos pelo CTNano (centro de tecnologia em Nanomateriais - UFMG), com as seguintes características: (i) pureza dos nanotubos: > 90%; (ii) Outras estruturas de carbono: < 2%; (iii) Contaminantes: ~ 5% de pó catalizador (Fe - CO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); (iv) Diâmetro médio: 20nm; (v) Comprimento médio: 12µm.

### 4.2. Preparo do Nanocompósito RE/MWCNT

As amostras dos nanocompósitos RE/MWCNT foram preparada com diferentes concentrações mássicas de MWCNT como apresentado na Tabela 1. Foram preparadas seis amostras com quantidade fixa de RE (2 g) e endurecedor (1 g), totalizando 3g do polímero, e variada as concentrações mássicas de MWCNT de 0,25 a 3,0%, como mostra a Tabela 1.

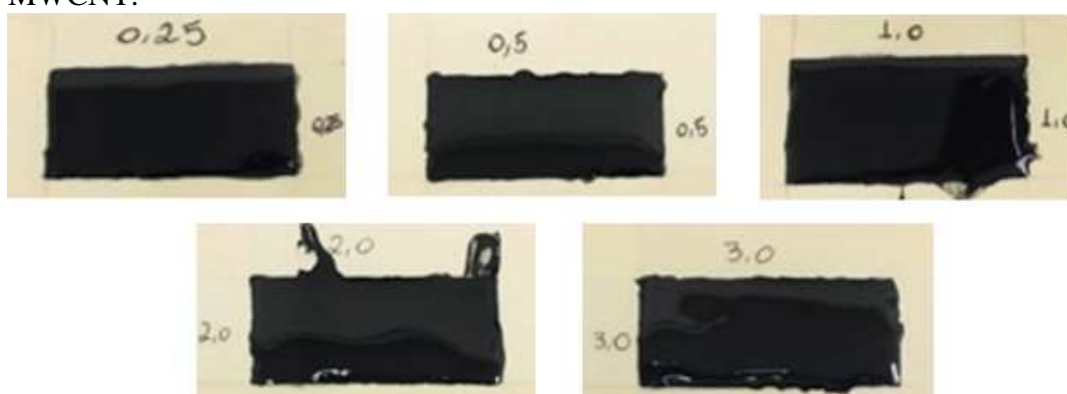
Tabela 1: Massa utilizadas para confecção das amostras do nanocompósitos RE/MWCNT

Amostras RE/MWCNT	Massa Epóxi (g)	MWCNT (g)
-------------------	-----------------	-----------

<b>100</b>	3,0	0,0000
<b>99,75/0,25</b>	3,0	0,0075
<b>99,5/0,5</b>	3,0	0,0151
<b>99,0/1,0</b>	3,0	0,0303
<b>98,0/2,0</b>	3,0	0,0610
<b>97,0/3,0</b>	3,0	0,0928

Fonte: Próprio autor.

Figura 3: Amostras do nanocompósito RE/MWCNT com diferentes concentrações de MWCNT.



Fonte: Próprio autor.

Com as concentrações de cada amostra definidas, a RE e o nanotubos de carbono foram misturados mecanicamente a temperatura ambiente com um agitador magnético por aproximadamente 5 minutos para homogeneização. Após esse tempo foi adicionado o endurecedor a dispersão e novamente misturando por 1 minuto. As misturas foram vertidas em um molde de papel como mostra a Figura 3, onde permaneceu por 24h para cura e polimerização. Após a cura, cada amostra foi dividida em 3 partes e cada uma dessas partes foi metalizada com tinta condutora (Figura 4) para realizar as análises elétricas e dielétricas.

Figura 4: Amostra pura (100% epóxi) metalizada com tinta condutora



Fonte: Próprio autor.

### **4.3. Propriedades elétricas e dielétricas**

As análises da condutividade elétrica dc ( $\sigma_{dc}$ ) foram realizadas utilizando o método de duas pontas, onde foi aplicado uma tensão constante de 50 V, com uma fonte de tensão modelo 247 high voltage supply e a corrente foi medida usando um eletrômetro modelo 610C ambos da KEITHLEY Instruments. Tais análises foram realizadas a temperatura ambiente, nos laboratórios do departamento de física e química da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS-UNESP).

As propriedades elétricas e dielétricas foram investigadas com um analisador de impedância da Solartron, modelo SI 1260 entre a faixa de frequência de  $10^{-2}$  Hz a  $10^6$  Hz. As amostras foram testadas à temperatura ambiente de 25 °C.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Análises de Condutividade

Materiais poliméricos como a RE são considerados isolantes, pois estes materiais não possuem portadores de cargas livres em seu interior para se deslocar quando um campo elétrico externo é aplicado. No entanto, é possível diminuir a resistência elétrica interna de polímero isolante adicionando partículas e nanopartículas condutoras, tais como: os nanotubos de carbono, visando obter um compósito polimérico condutor. No presente trabalho a condutividade  $dc$  ( $\sigma_{dc}$ ) das amostras do nanocompósito RE/MWCNT foi calculada utilizando os dados da Tabela 2 e da Equação 1:

$$\sigma = \frac{I d}{V A} \quad (1)$$

onde  $I$  é a corrente,  $V$  é a tensão aplicada,  $d$  é a espessura e  $A$  ( $6,362 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ ), a área de contato metalizada da amostra.

Tabela 2: Variáveis utilizadas para cálculo da  $\sigma_{dc}$ , como corrente e voltagem medidas em cada amostra do nanocompósito RE/MWCNT.

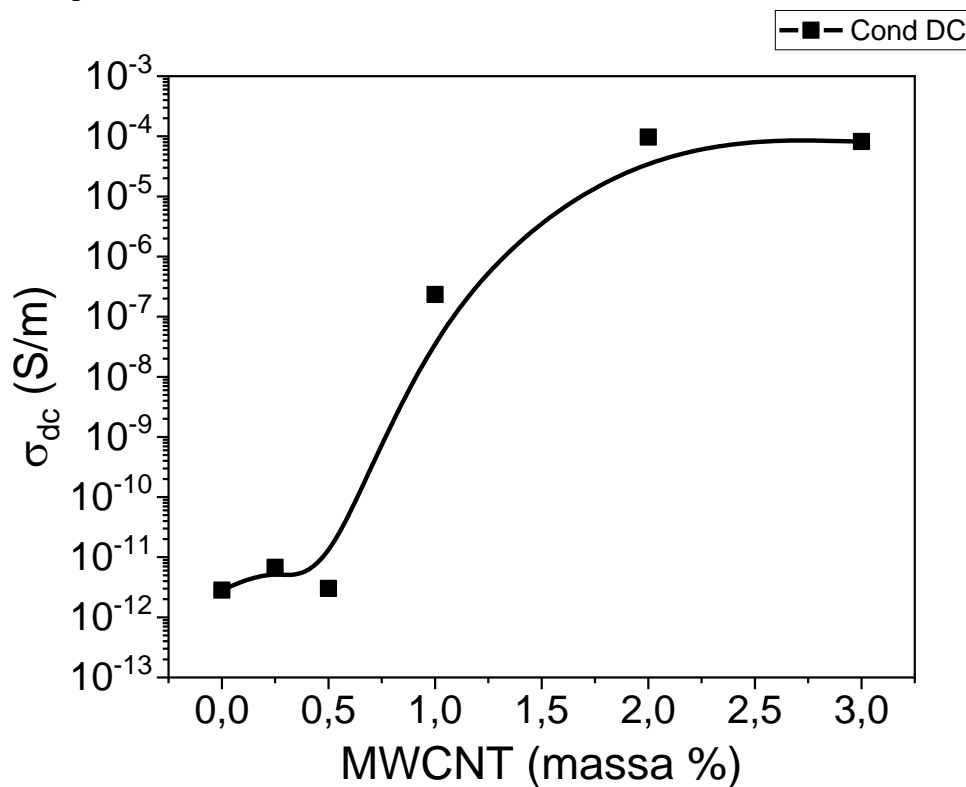
RE/MWCNT (%)	I (A)	V (V)	d (m)	$\sigma$ (S)
<b>100</b>	$4,1 \times 10^{-12}$	50	0,0022	$2,83 \times 10^{-12}$
<b>99,75/0,25</b>	$1,2 \times 10^{-11}$	50	0,0018	$6,79 \times 10^{-12}$
<b>99,5/0,5</b>	$6,0 \times 10^{-12}$	50	0,0016	$3,01805 \cdot 10^{-12}$
<b>99,0/1,0</b>	$5,5 \times 10^{-7}$	50	0,00135	$2,33 \times 10^{-7}$
<b>98,0/2,0</b>	$1,4 \times 10^{-4}$	50	0,0022	$9,68 \times 10^{-5}$
<b>97,0/3,0</b>	$1,7 \times 10^{-4}$	50	0,00153	$8,17 \times 10^{-5}$

Fonte: Próprio autor

Na figura 5, pode-se observar que a  $\sigma_{dc}$  aumenta de acordo com o aumento da concentração de nanotubos de carbono, com uma forte transição entre 0,5 e 1% de MWCNT. Observa-se que acima de 1% de MWCNT a  $\sigma_{dc}$  são entre 5 (1% de MWCNT) a 8 (3% de MWCNT) ordens de magnitude superior a matriz pura. Esse comportamento está realizado ao fato que a medida de MWCNT é aumentada no interior da matriz RE,

ocorre a formação de uma rede condutora de MWCNT no interior do nanocompósitos RE/MWCNT. Essa rede condutora de MWCNT, se comporta como trilhas pelas quais os portadores de cargas se deslocam quando um campo elétrico é aplicado sobre nanocompósito RE/MWCNT.

Figura 5: Análise da  $\sigma_{dc}$  em função da concentração mássica de MWCNT para o nanocompósito RE/MWCNT



Fonte: Próprio autor.

Nota-se também que entre 0,5 e 1,0% da concentração de MWCNT ocorre uma forte transição de isolante-semicondutor no nanocompósitos RE/MWCNT, demonstrando que neste intervalo ocorre a percolação do sistema, ou seja, é nessa concentração crítica de MWCNT que é formado o primeiro caminho ininterrupto de MWCNT, denominado como limiar de percolação.

Também é possível notar que a amostra com 0,5% de nanotubos de carbono apresentou condutividade inferior a amostras com menor concentração, isso pode estar relacionado a má dispersão das partículas na matriz, indicando que houve a formação de aglomerados em partes da amostra que não foi realizado as medições. Madrona *et al* (2020) explica que a dispersão dos nanotubos de carbono possui grande influência na condutividade da amostra e na definição do limiar de percolação. A formação de

aglomerados, mostra que houve uma má dispersão das nanopartículas e isso faz com que essas regiões da amostra se tornam mais condutora que as demais regiões (COELHO; MORALES, 2017).

A frequência do campo elétrico  $ac$  é outro parâmetro que tem forte influência na condutividade do compósito. Isso porque quando ocorre a inversão do campo elétrico com tempo, também ocorre o movimento e a inversão dos portadores de cargas, ou seja, portadores de carga positivo acompanham o campo elétrico, enquanto as cargas negativas se deslocam em sentido contrário. Além disso, também ocorre o efeito de polarização dessas entidades carregadas e tal efeito contribui diretamente na condutividade materiais com baixa concentração de cargas livres (CALLISTER, 2008).

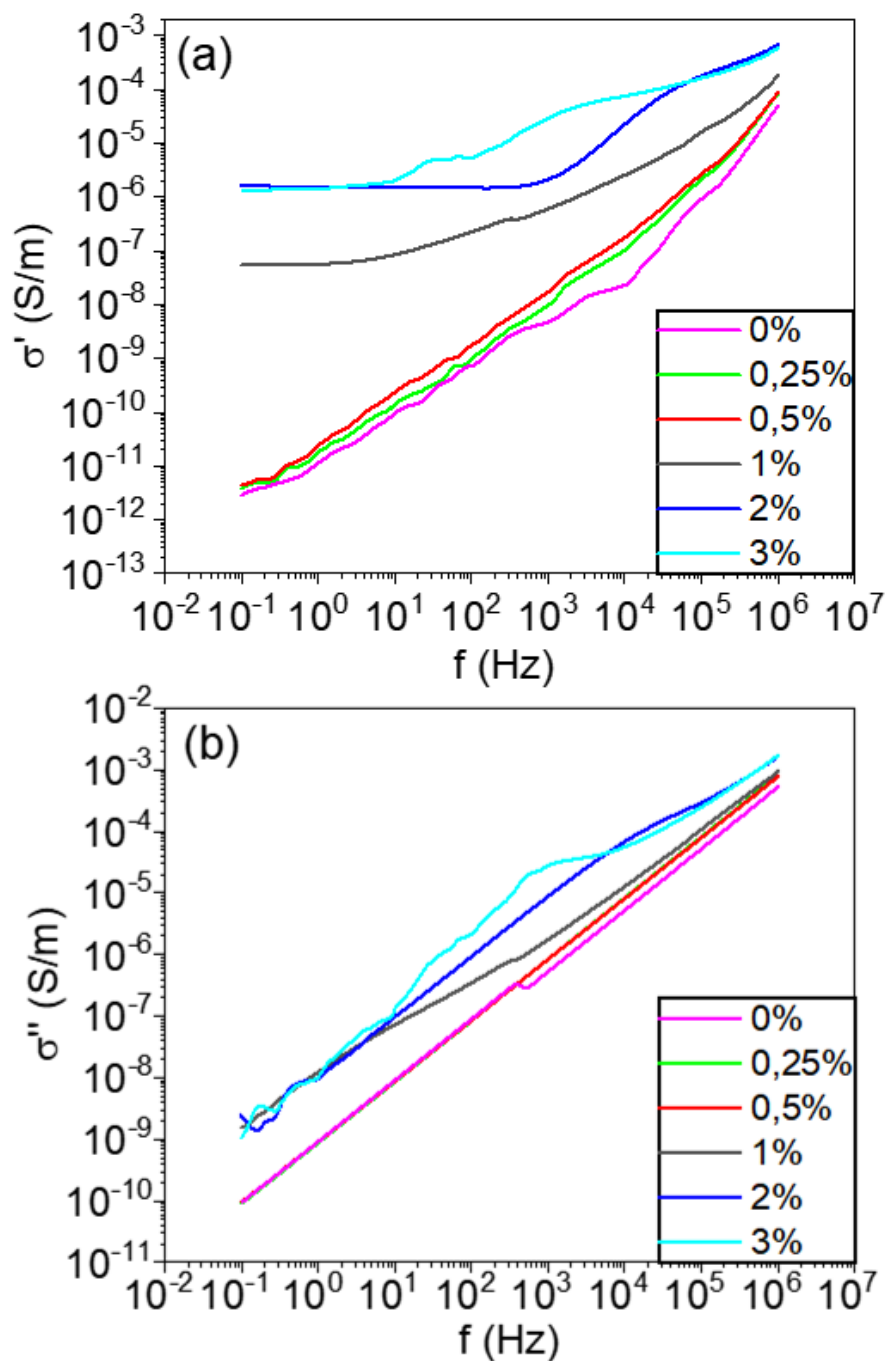
Além disso, a respostas dos portadores de cargas em relação ao campo elétrico depende da frequência de oscilação. Por exemplo, em regime de baixas frequências do campo elétrico, os portadores de cargas tendem a se deslocarem distâncias maiores e consequentemente com maiores barreiras de energia (DA SILVA *et al*, 2012.). Por outro lado, para altas frequências, os portadores de cargas tendem a ficar em regiões menores saltando entre estados localizados, com menores barreiras de potencial (DA SILVA *et al*, 2012.)

Comportamento semelhante da condutividade elétrica real em função da frequência ( $\sigma'(f)$ ) pode ser observado para as amostras do nanocompósito RE/MWCNT, como ilustrado na Figura 6. Para amostras com concentrações inferiores a 1% de MWCNT, o comportamento de  $\sigma'(f)$  é totalmente dependente da frequência, ou seja, a condutividade aumenta de acordo com a elevação da frequência. E isso se deve ao fato de o processo de condução estar relacionado com efeito polarização de cargas espaciais presos nas interfaces ou dipolos induzidos na matriz polimérica (SILVA, Michael J. et al, 2021).

Já para as amostras com concentração igual ou superior a 1% de MWCNT, o comportamento da  $\sigma'(f)$  apresenta duas regiões bem definidas, isto é, uma região no qual a  $\sigma'(f)$  é independente da frequência do campo elétrico e outra no qual ela é dependente. Para as amostras acima do limiar percolação, uma rede condutora de MWCNT é formada no interior do nanocompósitos e, em baixas frequência os portadores de cargas conseguem se deslocar longas distâncias (ordem de nanômetro) antes do campo elétrico inverter sua direção, além disso a seu tempo de relaxação em relação ao campo é alta. Por outro lado, em altas frequências os portadores de cargas se deslocam ou saltam em regiões cada vez menores e, além disso, seu tempo de relaxação é próximo ou igual ao tempo de

inversão do campo elétrico. Esses comportamentos observados para os nanocompósitos RE/MWCNT são característicos de sólidos desordenados, tanto para as amostras que estão abaixo quanto acima do limiar de percolação (SCHRØDER; DYRE, 2000; COUTO, 2011).

Figura 6: Gráficos da condutividade real (a) e imaginária (b) em função da frequência das amostras do nanocompósito RE/MWCNT.



Fonte: Próprio autor.

Outro comportamento observado na Figura 6 para  $\sigma'(f)$  é a influência do aumento da concentração de MWCNT no interior do nanocompósitos, tal fato corrobora com a análise da condutividade *dc*.

Diferente de  $\sigma'(f)$ , a parte imaginária da condutividade elétrica *ac* ( $\sigma''(f)$ ) apresenta comportamento dependente da frequência para todo regime de frequência do campo elétrico estudado. A grandeza  $\sigma''(f)$  está relacionada com perda de condutividade elétrica do material, devido ao forte atrito dos portadores de cargas em relação microestrutura do nanocompósito, ou seja, ela representa os portadores de cargas que deixam de contribuir para  $\sigma'(f)$  à medida que campo elétrico inverte sua direção e aumenta a sua frequência (REBEQUE, 2019).

## 5.2. Análises de Impedância

A técnica de espectroscopia de impedância estuda a resistência de um material a passagem de uma corrente alternada através do mesmo. Pode-se definir a impedância por um circuito elétrico básico, formado por um resistor, um capacitor e/ou um indutor. Ao aplicar uma tensão elétrica alternada, o circuito oferecerá uma resistência à passagem dessa corrente elétrica, no qual essa resistência pode ser escrita como a impedância elétrica do sistema dada pela eq. (2):

$$Z = \frac{\hat{V}}{\hat{I}}. \quad (2)$$

sendo  $Z$  a impedância,  $V$  é o fasor de tensão e  $I$  o fasor de corrente. Quando aplicado uma tensão elétrica, com amplitude  $V_m$  e frequência angular  $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ), o potencial  $V(t)$  tem um comportamento do tipo senoidal, eq. (3):

$$V(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (3)$$

A corrente elétrica no sistema pode ser obtida pela eq. (4):

$$I(t) = I_m \sin(\omega t - \theta). \quad (4)$$

onde  $I_m$  é a amplitude da corrente e,  $\theta$  o ângulo de fase entre  $I$  e  $V$ . Quando o é comportamento puramente resistivo não há diferença de fase, assim esta é igual a zero. Porém, quando este comportamento é capacitivo a diferença de fase é  $90^\circ$  e a corrente se

adiantará em relação a voltagem. E quando corrente e voltagem estão em fase, o comportamento é puramente resistivo e a impedância será considerada como resistência:

$$Z = R. \quad (5)$$

Quando corrente e tensão estão fora de fase,  $\theta = 90^\circ$ , o comportamento é puramente capacitivo, e a impedância será determinada a partir de um circuito  $RC$ , parte imaginária (eq. (6)):

$$Z = iX_c \quad (6)$$

onde  $X_c$  é a reatância capacitiva dado pela eq. (7):

$$X_c = \frac{1}{\omega C}. \quad (7)$$

A impedância complexa é definida pela eq. (8):

$$Z = Z' - jZ'' \quad (8)$$

através do diagrama de Argand pode-se definir o módulo de impedância dado pela eq. (9):

$$|Z^*| = |(Z')^2 + (Z'')^2|^{1/2} \quad (9)$$

Com a impedância complexa obtém-se várias outras grandezas elétricas complexas como: módulo elétrico, condutividade elétrica, capacitância, admitância, permissividade dielétrica e etc.

Na Figura 7 pode ser observado o comportamento  $Z'$  em função da frequência do campo elétrico  $ac$  para todas as amostras do nanocompósitos RE/MWCNT. O valor de  $Z'$  decresce à medida que ocorre aumento da frequência, bem como a concentração de MWCNT. Esse comportamento era esperado uma vez que a  $Z'$  é inversamente proporcional a  $\sigma'(f)$ , como apresentado pela eq. (10).

$$\sigma^* = \sigma' + i\sigma'' = \frac{l}{AZ^*} = \frac{L \cdot Z'}{A \cdot (Z'^2 + Z''^2)} + i \frac{L \cdot Z''}{A \cdot (Z'^2 + Z''^2)} \quad (10);$$

onde as partes real e imaginária da condutividade é dado pelas equações (11) e (12)

$$\sigma' = \frac{L \cdot Z'}{A \cdot (Z'^2 + Z''^2)} \quad (11)$$

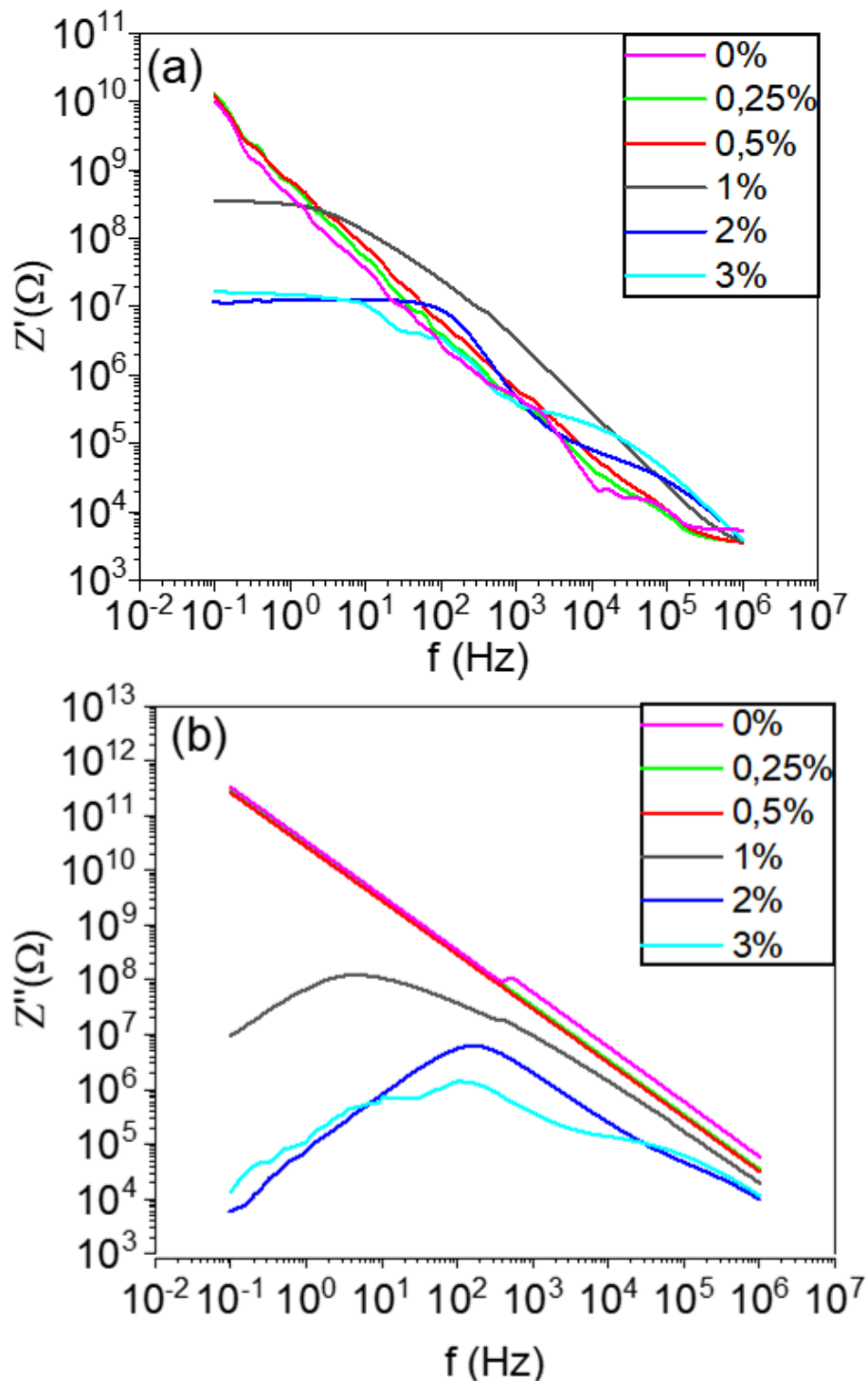
e

$$\sigma'' = \frac{L \cdot Z''}{A \cdot (Z'^2 + Z''^2)} \quad (12)$$

De acordo com a eq. (12) o  $Z''$  inversamente proporcional  $\sigma''(f)$ , logo pode se constatar que ele também está relacionado com perda de condutividade elétrica do material. Desse modo,  $Z''$  também decresce de acordo com o aumento da frequência para concentração de nanotubos de carbono inferiores a 1%. Já para as amostras com concentração igual ou superior a 1% pode ser observado um pico. Esse comportamento

para as amostras acima do limiar de percolação indica que essas amostras são condutoras, mostrando que estas apresentam picos de relaxamento, obedecendo o modelo de Debye (REBEQUE, 2019).

Figura 7: Gráficos da impedância real (a) e imaginária (b) em função da frequência das amostras do nanocompósito RE/MWCNT.



Fonte: Próprio autor.

### 5.3. Análises de Permissividade

Materiais isolantes como epóxi são classificados como materiais dielétricos devido ao fato de não possuírem elétrons livres para o processo de condução elétrica. No entanto, quando submetidos ao campo elétrico *dc* ou *ac* pode ocorrer a indução dipolos no interior das moléculas, bem como a polarização de cargas espaciais quando ficam presas nas interfaces que formam esse material. Nesse sentido, uma das grandezas elétricas que pode ser analisada em compósitos poliméricos é a permissividade dielétrica complexa, que mede a habilidade de material ser polarizado e armazenar energia devido a um campo elétrico. Essa grandeza complexa pode ser determinada por meio da sua parte real e imaginária como dado pela eq. (13):

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \frac{l}{j\omega C_0 Z^*} = \frac{L \cdot Z''}{\omega \varepsilon_0 A (Z'^2 + Z''^2)} + i \frac{L \cdot Z'}{\omega \varepsilon_0 A (Z'^2 + Z''^2)} \quad (13);$$

onde  $C_0$  é capacitância no vácuo e  $\varepsilon_0$  é permissividade dielétrica do vácuo. As partes real e imaginária são dadas pelas equações (14) e (15)

$$\varepsilon' = \frac{L \cdot Z''}{\omega \varepsilon_0 A (Z'^2 + Z''^2)} \quad (14)$$

e

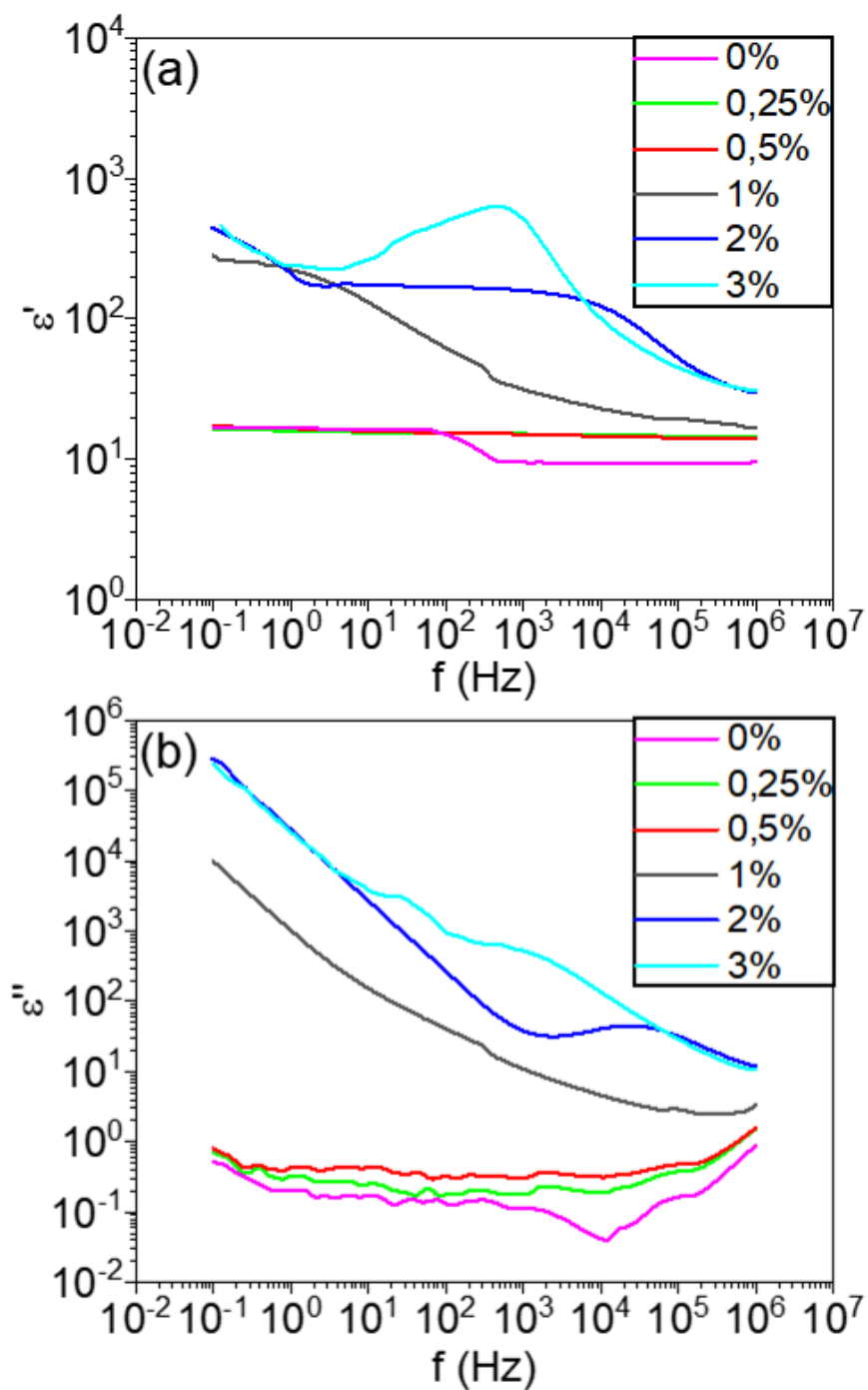
$$\varepsilon'' = \frac{L \cdot Z'}{\omega \varepsilon_0 A (Z'^2 + Z''^2)} \quad (15)$$

Como pode-se observar na Figura 8, o comportamento da  $\varepsilon'$  em função da frequência é decrescente de acordo com o aumento da frequência de oscilação do campo elétrico para as amostras com concentrações de 1, 2 e 3%. Está é uma característica dos materiais dielétricos pois as cargas e dipolos acompanham a inversão do campo elétrico, no entanto, à medida que a frequência se torna maior a condutividade elétrica do material também aumenta o que diminui a permissividade do mesmo (SILVA, 2009). Tal comportamento pode ser explicado em termos da eq. (14) que demonstra que  $\varepsilon'$  é inversamente proporcional a  $Z''$ , ou seja, quanto menor for quantidade de portadores de carga participando da condução elétrica, maiores serão os portadores de cargas participando do processo de polarização.

A permissividade apresenta baixos valores para as amostras de menor concentração de MWCNT, isso ocorre porque há pouco portadores de cargas presos nas interfaces RE-MWCNT. Já para a concentração de MWCNT acima de 1% observa-se que houve um aumento de  $\varepsilon'$ , apesar das amostras se tornarem mais condutoras, no entanto,

também é verdade que haverá maiores quantidades de portadores de cargas preso nas interfaces contribuindo para o aumento da polarização interfacial no material (Psarras, 2002).

Figura 8: Gráficos da permissividade real (a) e imaginária (b) em função da frequência das amostras do nanocompósito RE/MWCNT.



Fonte: Próprio autor.

Também pode ser observado na Figura 8 a  $\varepsilon''$  para todas as amostras do nanocompósito RE/MWCNT. Essa grandeza representa a perda dielétrica do material sobre a ação do campo elétrico  $ac$ , ou seja, ela está relacionada a condutividade elétrica do material como apresentado pela eq. (15). Pode ser observado que amostras com maiores concentrações de MWCNT, também apresentaram maiores valores de  $\varepsilon''$  e isso é devido ao fato dessas amostras terem apresentado maiores valores de condutividade elétrica. No entanto, observa-se que  $\varepsilon''$  apresenta forte dependência da frequência para todas as amostras. Para as concentrações de 2 e 3% pode-se notar que há picos de relaxação com o aumento da concentração. Esse comportamento é devido a efeitos de polarização de cargas especiais, bem como a polarização de dipolar no nanocompósito (SILVA JUNIOR, 2018; REBEQUE, 2019).

## 6. CONCLUSÃO

No presente trabalho foram obtidos nanocompósitos RE/MWCNT com diferentes concentrações de MWCNT e excelentes propriedades elétricas. As análises de condutividade  $dc$  mostraram que à medida que aumenta a concentração de MWCNT no nanocompósito o limiar de percolação é alcançado entre 0,5 e 1% de MWCNT. Nessa região de percolação é formado o primeiro caminho condutor ininterrupto MWCNT que possibilita a condução de corrente. As análises da  $\sigma'(f)$  mostraram que as amostras mais condutoras, ou seja, acima de 1% de MWCNT apresentaram duas regiões bem definidas; uma dependente e outra independente da frequência. Já as amostras com concentrações de MWCNT inferiores a 1% apresentaram comportamento totalmente dependente da frequência. Ambos os comportamentos são característicos de sólidos desordenados.

As análises de impedância mostraram que com o aumento da frequência do campo elétrico aplicado e a concentração de MWCNT há um decréscimo dos valores de  $Z'$ . A baixas frequências a amostra tende a possuir  $Z'$  com valores mais elevados devido a menor mobilidade dos portadores de cargas. Por outro, foi possível observar que as amostras com maiores a concentração de MWCNT apresentaram menor valor de  $Z'$  devido a formação de uma rede condutora no interior do material.

A permissividade apresentou baixos valores para as amostras de menor concentração de MWCNT devido a baixas quantidades portadores de cargas presos nas interfaces RE-MWCNT. Já para a concentração de MWCNT acima de 1% observa-se que houve um aumento de  $\epsilon'$  decorrente da maior quantidade de portadores de cargas preso nas interfaces contribuindo para o aumento da polarização interfacial no material.

Por fim, devido as excelentes propriedades elétricas e dielétricas do nanocompósito RE/MWCNT, esse material pode ser aplicado como dispositivos dissipadores eletrostáticos, e materiais de revestimento e pavimentos antiestáticos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, Rogério Gomes. **Compósitos pvc/nanotubos de carbono: Preparação e caracterização de propriedades elétricas, térmicas e mecânicas**. 2010.
- ALLAOUI, A et al. Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite. *Composites Science and Technology*, v. 62, n. 15, p. 1993–1998, 2002.
- ARNECKE, Lucas Lunelli et al. Caracterização das propriedades físico-químicas de nanocompósitos de resina epóxi e nanotubos de carbono. 2022.
- ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. *Ciência e engenharia dos materiais*. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 594p.
- BARDIN, L. (1977). **Análise de Conteúdo**. Tradução de Luís Antero Reto e Augusto Pinheiro. Lisboa: Edições 70, 1977.
- BACKES, Eduardo Henrique. Desenvolvimento de Nanocompósitos Híbridos de Epóxi/Ntcpm/Cargas Mineraias e avaliação das propriedades mecânicas, elétricas e térmicas. 2016.
- BOCKRATH, M. *et al.* Single-electron transport in ropes of carbon nanotubes. **Science**, v. 275, 1922-1925, 1997.
- CALLISTER JUNIOR, W. D. *Ciência e engenharia de materiais*. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.
- CALLISTER JUNIOR, William S.; RETHWISCH, David G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro - RJ: Ltc, 2016. 882 p. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares.
- CARNEIRO, Luiz Antonio Vieira; TEIXEIRA, A. M. A. J. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 25, p. 1-13, 2008.
- CHINAGLIA, D. L.; Gozzi, G.; Alfaro, R. A. M.; Hessel, A. Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. 30, 4504, 2008, 2009.
- COELHO, Paulo Henrique da Silva Leite; MORALES, Ana Rita. Modelos de percolação elétrica aplicados para compósitos poliméricos condutores. *Polímeros*, São Carlos, v. 27, n.spe, p. 1-13, 2017.
- COUTO, J. D. Generalização do modelo de barreiras de energias livres aleatórias para o estudo da condutividade ac de sistemas sólidos desordenados. Dissertação (do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT) – Universidade Federal de Ouro Preto UFOP-CETEC-UEMG, Ouro Preto-MG, 2011.
- DA SILVA, M. J.; KANDA, D. H. F.; NAGASHIMA, Haroldo Naoyuki. Mechanism of charge transport in castor oil-based polyurethane/carbon black composite (PU/CB). *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 358, n. 2, p. 270-275, 2012.
- DELLA FLORA, Diovana Patias. Estudo do comportamento de argamassas modificadas com adição de nanotubos de carbono. 2019

DURIGAN NETO, Pedro Romano et al. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de nanocompósitos a base de epóxi/nanotubos de carbono. 2018.

FERREIRA, O. P. Nanotubos de carbono: preparação e caracterização. 2003. 36f. Monografia apresentada ao Instituto de Química da Unicamp, Campinas/SP, 2003.

FISCHER *et al.* Metallic resistivity in crystalline ropes of single-wall carbon nanotubes. **Physical review B**, v. 55, 1997.

GONÇALVES, Jorge Antônio Vieira et al. Compósitos à base de resina epóxi reforçados com fibra de coco. 2010.

GONZATTO NETO, Alfredo. Nanocompósitos formados por nanotubos de carbono verticalmente alinhados e polidimetilsiloxano (desenvolvimento e caracterização elétrica). 2015.

HACK, Renata et al. Estudo das propriedades térmicas em nanocompósitos poliméricos reforçados com grafeno. 2019.

HERBST, M. H.; MACÊDO, M. I. F.; ROCCO, A. M. Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar. **Química Nova**. v. 27, n. 6, p. 986-992, 2004.

HOWARD, J. N. Impedance Spectroscopy: Emphasizing Solid Materials and Systems. *Applied Optics*, p. 346, mar. 1987.

IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, v. 354, n. 6348, p. 56–58, nov. 1991.

KENNY, J. M. et al. Epoxi-carbon nanotube composites Polymer- carbon nanotube composites: preparation, properties and application. Cambridge, UK: Woodhead, 2011. p. 230-261.

KERSTING, Daniel de Freitas. Avaliação de resinas Epóxi para fabricação de materiais compósitos pelo processo de pultrusão. 2004.

LEVY NETO, Flamínio; PARDINI, Luiz Claudio. Compósitos estruturais : ciência e tecnologia. [S.l.]: Blucher, 2018. 2a. edição revista e ampliada. ISBN 9788521210788.

LOPES, M. C. et al. Otimização do processo de dispersão de nanotubos de carbono em poliuretano termorrígido. **Polímeros**. v. 26, n. 1, p. 81-91, 2016.

MADRONA, Bianca Scaramal et al. Nanocompósitos poliméricos contituídos de epóxi e nanotubo de carbono. 2021

MEYYAPPAN, M. Carbon Nanotubes. In: GODDART III, W. A. (Ed). Nanoscience, engineering, and technology. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. (Handbook). p. 399-412.

NASSEH, J. Manual de construção de barcos. Rio de Janeiro, 2011.

OLIVEIRA, Pedro Henrique R. Fenol (CAS 108-95-2). **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 4, p. 1579-1593, 2015.

PAULA, Isabelle Catarina de. Obtenção e caracterização de compósitos via RTM com alta fração de fibras de carbono processados à temperatura ambiente. 2013.

- PAULA, Júlio César Queiroz et al. obtenção de nanocompósitos condutores baseado em poliuretano de óleo de mamona com negro de fumo e nanotubos de carbono visando sua aplicação como sensor piezoresistivo. 2022.
- PSARRAS, G. C.; MANOLAKAKI, E.; TSANGARIS, G. M. Electrical relaxations in polymeric particulate composite of epoxy resin and metal particles. *Composites: Part A*, v. 33, p. 375–384, 2002
- REBEQUE, Paulo Vinícius et al. Analysis of the electrical conduction in percolative nanocomposites based on castor-oil polyurethane with carbon black and activated carbon nanopowder. *Polymer Composites*, v. 40, n. 1, p. 7-15, 2019.
- SALES, Ricardo. **Materiais compósitos reforçados com nanotubos de carbono**. 2013. Tese de Doutorado.
- SANCHES, A. O. Obtenção e caracterização elétrica e morfológica de compósitos de borracha natural com PZT. *Aleph*, p. 133, 2012b.
- SANTOS, Ana Gabriela dos et al. Estudo e caracterização de compósitos de resina epóxi em gel coat com diferentes teores de cargas inorgânicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2018.
- SANTOS, Danielle Ferreira. Nanocompósitos de resina epoxídica com nanotubos de carbono: efeito de líquido iônico à base de fosfônio. 2019.
- SCHRØDER, T. B.; DYRE, J. C. Scaling and universality of ac conduction in disordered solids. *Physical Review Letters*, v. 84, n. 2, p. 310–313, 2000.
- SHEIKH-AHMAD, Jamal Y. **Machining of Polymer Composites**. New York: Springer, 2009.
- SILVA, Michael J. et al. Study of the electrical conduction process in natural rubber based conductive nanocomposites filled with cellulose nanowhiskers coated by polyaniline. *Polymer Composites*, v. 42, n. 3, p. 1519-1529, 2021.
- SILVA, Michael Jones da. Preparação e caracterização elétrica do compósito de poliuretano/negro de fumo. 2009.
- SILVA, Wellington Marcos. Compósitos resina epóxi/nanotubos de carbono de paredes múltiplas: Caracterização dos Materiais de Partida e Avaliação das Condutividades Elétrica e Térmica. 2009.
- SILVA JUNIOR, Romualdo Santos. Propriedades estruturais, elétricas e ópticas do composto LaCrO<sub>3</sub> dopado com Al produzido pelo método da combustão. 2018.
- SUSIN, Samuel Brando. Avaliação das técnicas de dispersão mecânica e ultrassônica de nanotubos de carbono de paredes múltiplas em resina epóxi. 2014.
- TITA, Volnei et al. Projeto e fabricação de estruturas em material compósito polimérico. 2007.
- XAVIER JARGENBOSKI, Adilson William et al. Avaliação da adição de hidróxidos duplo lamelares em resina epóxi. 2016.
- YANG, L. et al. Enhanced dielectric and ferroelectric properties induced by TiO<sub>2</sub> @ MWCNTs nanoparticles in flexible poly (vinylidene fluoride) composites. *COMPOSITES PART A*, v. 65, p. 125–134, 2014.

ZACHARUK, Mario et al. Estudo da reação entre polietileno glicol e resina epoxídica na presença de N,N-dimetilbenzilamina. **Polímeros**, São Carlos, v. 21, n. 1, p. 73-77, 2011. Disponível em: < <https://bit.ly/2zzbJAu>>. Acesso em: 27 jun. 2022.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. NANOESTRUTURAS DE CARBONO (NANOTUBOS, GRAFENO): QUO VADIS? *Quim. Nova*, v. 36, n. 10, p. 1533–1539, 2013.

ZARBIN, A. J. G. Química de (nano)materiais. *Química Nova*, v. 30, n. 6, p. 1469-1479, 2007.