



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA E QUÍMICA
CURSO DE PÓS – GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DOS MATERIAIS

FERNANDO CÉLIO MONTE FREIRE FILHO

**Compósito piezoelétrico trifásico baseado em poliuretano de óleo
de mamona com partículas de PZT e nanotubos de carbono de
paredes múltiplas**

Ilha Solteira

2021

FERNANDO CÉLIO MONTE FREIRE FILHO

Compósito piezoelétrico trifásico baseado em poliuretano de óleo de mamona com partículas de PZT e nanotubos de carbono de paredes múltiplas

Dissertação apresentada Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.

Michael Jones da Silva
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

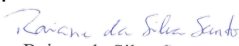
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F866c Freire Filho, Fernando Célio.
Compósito piezoelétrico trifásico baseado em poliuretano de óleo de mamona com partículas de PZT e nanotubos de carbono de paredes múltiplas / Fernando Célio Freire Filho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
98 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciência e Engenharia dos Materiais, 2021

Orientador: Michael Jones da Silva
Inclui bibliografia

1. Poliuretano. 2. Nanotubo de carbono. 3. PZT. 4. Compósito.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

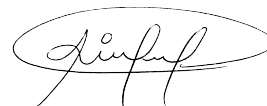
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Compósito piezoeétrico trifásico baseado em poliuretano de óleo de mamona com nanotubos de carbono de paredes múltiplas e partículas de PZT

AUTOR: FERNANDO CELIO MONTE FREIRE FILHO

ORIENTADOR: MICHAEL JONES DA SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIA DOS MATERIAIS, área: Ciência e Engenharia dos Materiais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MICHAEL JONES DA SILVA (Participação Virtual)
Curso de Engenharia de Energia / Câmpus Experimental de Rosana - UNESP

A handwritten signature in black ink, enclosed within an oval-shaped line. The signature appears to be "Michael Jones da Silva".

Prof. Dr. JOSE ANTONIO MALMONGE (Participação Virtual)
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. LEONARDO LATARO PAIM (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Energia / Campus Experimental de Rosana - UNESP

Ilha Solteira, 04 de agosto de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade da vida, além de ter me conduzido por este caminho, sempre me direcionando para as melhores escolhas. Aos meus pais, Maria e Fernando, que sempre me motivaram a lutar pelos meus sonhos, não medindo esforços para me ajudar a realizá-los.

Sou grato também às minhas irmãs Vanessa e Luciana que desde sempre estiveram ao meu lado apoiando minhas decisões. Aos meus sobrinhos João Vitor e Marianne que alegam minhas férias com suas energias de crianças.

À minha noiva Aruani Tomoto, que sempre foi um porto seguro para minha vida, me dando suporte nos momentos mais difíceis, sempre disposta a me ajudar e preocupada com meu bem-estar. Ela é uma das responsáveis por essa conquista, pois sempre me motivou e nunca me deixou desistir.

Ao meu orientador Prof. Dr. Michael Jones da Silva agradeço pela orientação, apoio no desenvolvimento do trabalho, exemplo de profissionalismo e dedicação e enorme contribuição com o meu aprendizado dentro da universidade.

Aos professores do programa de pós-graduação em ciência dos materiais, em especial ao Prof. Dr. José Antônio Malmonge, pelos ensinamentos transmitidos que edificaram a minha formação acadêmica e profissional.

Ao Grupo de polímeros, em especial às amigas construídas – Josi, Diego, Pedro, João, Vilches, Guilherme, Maykon, Alex, Thiago, etc., que sempre demonstraram disposição em colaborar em todas as etapas de realização da pesquisa.

Finalmente, aos técnicos de laboratórios e funcionários, pela confiança, ajuda e pela enorme paciência, meus sinceros agradecimentos.

“As respostas serão sempre importantes, porém não superam as perguntas em importância e poder. Pois as respostas costumam ser limitadas e temporais e as perguntas são ilimitadas e atemporais”.
Paulo Vieira

RESUMO

Materiais capazes de modificar ou alterar suas propriedades sobre a ação de um estímulo externo são classificados como inteligentes. Dentre esses materiais, confeccionados para atender exigências específicas para a finalidade que foi projetado, destacam-se os compósitos. O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo das propriedades dielétricas, elétricas e piezoelétricas do compósito piezoelétrico trifásico, formado por uma matriz polimérica de poliuretano à base do óleo mamona (PUR), com partículas da cerâmica ferroelétrica de titanato zirconato de chumbo (PZT) e nanotubo de carbono de múltiplas camadas (MWCNT). Para isso, as amostras foram preparadas por meio da mistura mecânica de PUR com os materiais dispersantes e obtidas pelo método de *casting*. Três diferentes grupos de amostras foram obtidas e analisadas a fim de avaliar a sinergia de cada componente. Compõem o primeiro grupo as amostras do nanocompósito bifásico de PUR/MWCNT, variando a proporção mássica de MWCNT de 0 a 9%. O segundo grupo corresponde a amostras do compósito piezoelétrico bifásico de PUR/PZT com variação de PZT de 10 a 50% e por último, formam o terceiro grupo as amostras sintetizadas do compósito trifásico PUR-MWCNT1/PZT (1% de MWCNT) e PUR-MWCNT3/PZT (3% de MWCNT) variando proporção volumétrica de PZT de 10% a 50%. As respostas elétricas e dielétricas de todas as amostras dos compósitos piezoelétricos mostraram dependência a três fatores principais: (i) variação da frequência; (ii) variação da temperatura; (iii) concentração dos materiais dispersantes. Quanto à avaliação da propriedade piezoelétrica por meio do coeficiente d_{33} , os resultados demonstraram que as amostras do compósito piezoelétrico trifásico PUR-MWCNT/PZT apresentaram maiores valores quando comparados com as amostras bifásicas PUR/PZT. Esse resultado é destacado, principalmente, quando se analisa a amostra com 30% de PZT, em que o compósito trifásico com 3% de MWCNT teve como resultado um d_{33} de 68% superior em relação ao compósito bifásico. Esses resultados demonstram que dispersão de nanopartículas de MWCNT exercem boa sinergia nos compósitos, atuando de forma a proporcionar maior efetividade da polarização das partículas cerâmica, melhorando o coeficiente d_{33} .

Palavras-chaves: Poliuretano. Nanotubo carbono. PZT. Compósito

ABSTRACT

Materials capable of modifying or changing their properties upon the action of an external stimulus are classified as intelligent. These materials are made to meet the requirements during their use and for what they were designed for, among these materials, composites stand out. The present work aims to perform a study of the dielectric, electrical and piezoelectric properties of the three-phase piezoelectric composite, formed by a polymeric matrix of castor oil-based polyurethane (PU), with particles of the ferroelectric ceramic of lead zirconate titanate (PZT) and multi-walled carbon nanotube (MWCNT). For this, the samples were prepared by mechanically mixing PU with dispersing materials; and the samples in film form were obtained by casting. Three groups of samples were obtained to assess the synergy of each component. In the first group, the samples of the PU/MWCNT biphasic nanocomposite were obtained, varying the MWCNT mass proportion from 0 to 9%. In addition, samples of the two-phase PU/PZT piezoelectric composite were obtained with PZT variation from 10 to 50%, and finally samples of the three-phase composite PU-MWCNT1/PZT (1% MWCNT) and PU-MWCNT3/PZT (3% MWCNT) varying the volumetric proportion of PZT from 10% to 50% were made. The electrical and dielectric responses of all samples of piezoelectric composites were shown to be dependent on three main factors: (i) frequency variation; (ii) temperature variation; (iii) concentration of the dispersant materials. As for the evaluation of the piezoelectric property through the d_{33} coefficient, the results showed that the samples of the three-phase piezoelectric composite PU-MWCNT/PZT presented higher values of d_{33} when compared with the two-phase PU/PZT samples. especially when analyzing the sample with 30% of PZT, in which the three-phase composite with 3% MWCNT resulted in a d_{33} of 68% higher than the two-phase composite. These results demonstrate that dispersion of MWCNT nanoparticles exerts good synergy in the composites acting in a higher polarization effectiveness of the ceramic particles, improving the d_{33} coefficient. These results demonstrate that dispersion of MWCNT nanoparticles exerts good synergy in the composites acting in a higher polarization effectiveness of the ceramic particles, improving the d_{33} coefficient.

Keywords: Polyurethane. Carbon nanotube. PZT. Composite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Formação do monômero uretano	12
Figura 2: Representação do NTC (a) camada única (SWCNT) e b) multicamadas (MWCNT)	14
Figura 3: Vetor quiral para $n=5$ e $m=2$	15
Figura 4: Modo de enrolamentos do plano de grafeno para obtenção de NTC	16
Figura 5: Estrutura geométrica do NTC tipo (a) Armchair, (b) Zig-Zag, e (c) Quiral ..	17
Figura 6: Mecanismo de polarização sem e com campo E aplicado	20
Figura 7: Faixa de polarização em função da frequência	21
Figura 8: Laço de histerese de um ferroelétrico.	22
Figura 9: Estrutura $BaTiO_3$ tetragonal e perovskita (a) abaixo da T_c e (b) acima de T_c	23
Figura 10: Estrutura perovskita para o PZT	25
Figura 11: Representação das formas de conectividades dos compósitos	25
Figura 12: Rede bidimensional (a) sem grão/ligação condutor, (b) percolação em sitio e (c) percolação por ligação	27
Figura 13: Processo de obtenção das amostras PUR/MWCNT	33
Figura 14: Processo de obtenção das amostras PUR/PZT	34
Figura 15: Diagrama esquemático para preparação das amostras PUR-MWCNT/PZT	36
Figura 16: Análise de MEV da superfície fratura (a) PUR e (b) PUR/MWCNT de proporção mássica de 91/9	41
Figura 17: Condutividade elétrica dc do nanocompósito PUR/MWCNT em função concentração mássica de MWCNT.	42
Figura 18: Expoente crítico do compósito PUR/MWCNT	43
Figura 19: Análise MEV da superfície fratura (a) PUR/PZT 10 vol.% (b) PUR/PTZ 50 vol.%	44
Figura 20: Condutividade elétrica dc para as amostras do compósito PUR/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT	45
Figura 21: Permissividade real e perda dielétrica em função da frequência para o compósito PUR/PZT em temperatura ambiente	46
Figura 22: Constante dielétrica real em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR/PZT nas proporções volumétrica de PZT: (a) 10% e (b) 50%	48
Figura 23: Constante dielétrica imaginária em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR/PZT nas proporções volumétrica de PZT: (a) 10% e (b) 50%	49
Figura 24: Condutividade real em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR/PZT nas proporções volumétrica de PZT: (a) 10% e (e) 50%	51
Figura 25: coeficiente piezoelétrico (d_{33}) variando a proporção volumétrica de PZT em 10, 20, 30, 40 e 50%	53
Figura 26: Análise de MEV da superfície fratura (a) PUR-MWCNT1/PZT 10 vol%, (b) PUR-MWCNT1/PTZ, 50 vol% (c) PUR-MWCNT3/PZT e 10 vol% (d) PUR-MWCNT3/PZT 50vol%	54
Figura 27: Condutividade no modo dc em função da concentração de PZT para os compósitos PUR-MWCNT1/PZT e PUR-MWCNT3/PZT	55

Figura 28: Permissividade real e fator de perda dielétrica em função da frequência para os compósitos (A) e (B) PUR-MWCNT1/PZT; (C) e (D)PUR-MWCNT3/PZT em temperatura ambiente	57
Figura 29: Permissividade dielétrica real função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT1/PZT em proporções volumétrica de PZT: (a) 10% e (e) 50%	58
Figura 30: Permissividade real dielétrica em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT3/PZT nas proporções volumétrica de PZT: (a) 10% e (e) 50%	59
Figura 31: Permissividade dielétrica imaginária em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT1/PZT com proporção volumétrica de PZT: (a) 10% e (e) 50%	61
Figura 32: Permissividade dielétrica imaginária em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT3/PZT com proporção volumétrica de PZT: (a) 10% e (e) 50%	62
Figura 33: Condutividade elétrica real em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT1/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10% e (e) 50%	64
Figura 34: Condutividade elétrica real em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT3/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10% e (e) 50%	65
Figura 35: coeficiente piezoelétrico (d_{33}) dos compósitos PUR/PZT, PUR-MWCNT1/PZT e PUR-MWCNT3/PZT variando a proporção volumétrica de PZT em 10, 20,30, 40 e 50%	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Amostras PUR/MWCNT	32
Tabela 2: Amostras PUR/PZT	34
Tabela 3: Proporção PUR-MWCNT/PZT	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1. Polímeros	11
2.1.1 Poliuretano	12
2.1.2 Poliuretano a base de óleo de mamona	13
2.2. Nanotubo de carbono	14
2.3 Materiais Dielétricos	18
2.4 Materiais Ferroelétricos	21
2.4.1. Piezoeletricidade	23
2.4.2. PZT.....	24
2.5. Compósitos	25
2.5.1. Teoria da percolação.....	26
2.5.2. Compósitos piezoelétrico e suas aplicações	28
3. OBJETIVOS.....	30
3.1. Objetivo Geral	30
3.2. Objetivos Específicos	30
4.MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Materiais.....	31
4.2. Obtenção das amostras	31
4.2.1. Nanocompósito de PUR/MWCNT	31
4.2.2 Compósito piezoelétrico bifásico PUR/PZT	33
4.2.3 PUR/MWCNT/PZT	35
4.3. Caracterização	36
4.3.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	37
4.3.2. Condutividade elétrica dc	37
4.3.3. Espectroscopia de impedância.....	37
4.3.4. Coeficiente Piezoelétrico (d_{33}).....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 Nanocompósito PUR/MWCNT	40
5.1.1. Análise Morfológica	40
5.1.2. Análise elétrica dc	41
5.2 Compósito piezoelétrico bifásico PUR/PZT	44
5.2.1. Análise Morfológica	44

5.2.2. Análise elétrica <i>dc</i>	45
5.2.3. Análise de espectroscopia de impedância	46
5.2.3.1. Permissividade e perda dielétrica.....	46
5.2.3.2 Condutividade elétrica <i>ac</i>	50
5.2.4 Coeficiente Piezoelétrico longitudinal (<i>d</i> ₃₃)	53
5.3. Compósito piezoelétrico trifásico PUR-MWCNT/PZT	54
5.3.1 Análise Morfológica	54
5.3.2 Análise elétrica <i>dc</i>	55
5.3.3 Espectroscopia de impedância.....	56
5.3.3.1. Permissividade e fator de perda dielétrica.....	56
5.3.3.2 Condutividade elétrica <i>ac</i>	63
5.3.4. Coeficiente Piezoelétrico longitudinal (<i>d</i> ₃₃)	69
6. CONCLUSÃO	71
7. AGRADECIMENTOS.....	73
8. IMPACTOS SOCIAIS.....	73
9. REFERÊNCIAS.....	74
APÊNDICE A – Figuras da constante dielétrica real e imaginária, condutividade elétrica real e imaginária em função da frequência e em diferentes temperaturas para o compósito PUR/PZT.....	83
APÊNDICE B - Figuras da constante dielétrica real e imaginária, condutividade elétrica real e imaginária em função da frequência e em diferentes temperaturas para os compósitos PUR-MWCNT1/PZT e PUR-MWCNT3/PZT	87

1. INTRODUÇÃO

Por definição, compósitos são materiais multifásicos formados por, no mínimo, dois componentes com propriedades distintas e, sua obtenção tem como finalidade de herdar as propriedades inerentes de cada material individual [1-8]. Desse modo, os compósitos têm se destacado como alternativa viável para substituir materiais convencionais ou monofásicos, devido à maior gama de aplicações em que podem ser empregados, tais como: automobilística, aeronáutica, eletroeletrônicos, biomédicas etc. [6-8].

Nos estudos sobre compósitos destacam-se aqueles formados por uma matriz polimérica e por partículas orgânicas ou inorgânicas como segunda fase. Entre as partículas que podem ser citadas como segunda fase, estão: partículas e nanopartículas baseadas em carbono (negro de fumo - NF, nanotubo de carbono - NTC, grafeno etc.), e também baseadas em fibras naturais, partículas metálicas, e, partículas ferroelétricas, como o titanato zirconato de chumbo - PZT, o titanato de bário - BaTiO_3 , entre outros [9-13].

Compósitos poliméricos com nanopartículas ou partículas orgânicas e/ou inorgânicas tem atraído a atenção das indústrias eletro e eletrônico devido à capacidade que estes materiais apresentam na aquisição de características de armazenamento como capacitores, sensores, conversão e dispersão de energia como atuadores e transdutores [14-16]. Para tais finalidades, os compósitos piezoelétricos polímeros/cerâmicas ferroelétricas são amplamente estudados.

Contudo, um problema comum enfrentado na avaliação das propriedades piezoelétricas desses materiais é a polarização das partículas de cerâmicas ferroelétricas incorporadas na matriz polimérica [17-20]. Dessa forma, uma alternativa para solucionar esse problema e aumentar o campo elétrico sobre as partículas cerâmicas incorporadas no compósito, é a dispersão de uma terceira fase condutora, como partículas baseadas em carbono e polímeros condutores. O efeito que a dispersão de uma fase condutora provoca em um compósito piezoelétrico trifásico foi avaliado por Sudan e colaboradores [21]. Neste estudo, uma carga condutora de alumínio (Al) foi adicionada no compósito formado por matriz epóxi e PZT e a propriedade piezoelétrica foi analisada por meio do coeficiente d_{33} . Como resultado os autores constataram um crescente aumento do coeficiente em função

do aumento da quantidade volumétrica de PZT. A mesma tendência foi observada para o aumento da concentração de Al até o limiar de 0,13%, onde, acima dessa concentração houve uma maior dificuldade de polarização do compósito resultado na diminuição do d_{33} .

Li e colaboradores^[22] analisaram as propriedades dielétricas e piezoelétricas do compósito piezoelétrico trifásico de matriz polimérica de fluoreto de polivinilideno (PVDF) e PZT dopado com NF. Os autores constataram que a dispersão de NF possui pouca influência na característica dielétrica do compósito por possuir uma constante dielétrica inferior ao do PZT. As propriedades piezoelétricas foram avaliadas pelos valores do d_{33} verificando que houve um aumento do seu valor com o aumento da concentração de NF até 0,4%.

Resultado semelhante a este foi obtido por Sanches e colaboradores^[23], no qual investigou-se as propriedades piezoelétricas do compósito e avaliou-se sua potencialidade como sensor de saúde estrutural. Por meio dos resultados obtidos, o novo material demonstrou que o uso das nanopartículas de NF melhorou a dispersão das partículas de PZT na matriz realçando as características piezoelétricas do compósito. Nesse estudo, também foi determinado a contribuição nas características dielétricas e condutivas resultando em uma alta sensibilidade para o sensor por meio de detecção de emissão acústica através da estrutura.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo a síntese e caracterização de compósitos piezoelétrico a base de poliuretano derivado do óleo de mamona com partículas de PZT e também incorporado nanotubo de carbono de paredes múltiplas (MWCNT - *Multi-Walled Carbon Nanotubes*). Avaliou-se a sinergia das fases dispersas nas propriedades elétricas, dielétricas e piezoelétricas finais dos compósitos trifásicos visando avaliar sua potencialidade como sensor piezoelétrico.

6. CONCLUSÃO

Compósitos piezoelétrico trifásico a base de PUR foram obtidos utilizando como materiais dispersante partículas cerâmicas de PZT e partículas condutoras de MWCNT. O estudo analisou a sinergia dos materiais, no qual, foi avaliado a influência de cada material dispersante. Ou seja, foi avaliado o efeito do MWCNT e o PZT nas propriedades elétricas, dielétricas e piezoelétrico do compósito piezoelétrico baseado em matriz polimérica de PUR.

A adição de MWCNT em diferentes frações mássica em relação à matriz polimérica de PUR resultou em um aumento considerável da σ_{dc} , cerca de 8 ordens de magnitude do nanocompósito PUR/MWCNT em relação ao PUR puro. Por meio da análise da σ_{dc} foi possível calcular o limiar de percolação do nanocompósito PUR/MWCNT. O valor obtido foi de 1,57% em massa de MWCNT, que pode ser descrito como valor mínimo necessário para a formação de um caminho condutor no interior do nanocompósito.

Também foram obtidas amostras do compósito piezoelétrico bifásico PUR/PZT (com diferentes concentrações volumétricas de PZT entre 10-50%). Foi observada grande influência das partículas de PZT nas propriedades dielétricas e elétrica do compósito PUR/PZT, que está diretamente relacionado a fatores como: (i) temperatura, (ii) frequência do campo $\vec{E}$, e, (iii) concentração de PZT. Quanto à propriedade elétrica do compósito PUR/PZT, notou-se que as partículas de PZT não contribuem significativamente na sua condutividade elétrica, tendo em vista que se trata de um material dielétrico. Também foi observado que a adição de partículas de PZT impactou positivamente nas propriedades piezoelétricas do compósito PUR/PZT, alcançado valores de d_{33} de aproximadamente de 10 pC/N para amostra com 50% em volume de PZT.

Por último foi analisada a inserção das nanopartículas de MWCNT para a obtenção do compósito piezoelétrico trifásico nas propriedades dielétricas, elétricas e piezoelétricas. Os MWCNT's contribuíram para o aumento da σ_{dc} , onde foi observado que, para concentração acima do limiar de percolação, a σ_{dc} pode chegar à ordem de 10^{-6} S/m para amostra com 10% em volume de PZT.

Quanto às caracterizações dielétricas e elétricas, foram avaliadas ε'_r , ε''_r , $\tan\delta$ e $\sigma'(f)$ em função da frequência do campo $\vec{E}$. Observou-se que a temperatura

tem forte influência nas propriedades dielétricas e elétricas do compósito, o que caracteriza o processo como sendo termicamente ativado. Além disso, verificou-se que as características dielétricas dos compósitos possuem maior influência da concentração volumétrica de PZT do que MWCNT por apresentar maior valores de ε'_r .

Por fim, quanto às propriedades piezoelétricas das amostras do compósito piezoelétrico trifásico PUR-MWCNT/PZT, verificou-se que tanto a dispersão de partículas de PZT quanto de MWCNT tiveram impacto positivo no d_{33} do compósito. Os valores de d_{33} obtidos para amostras com 50% em volume de PZT com 1% e 3% em massa de MWCNT foram de aproximadamente 18 e 20 pC/N para amostras as PUR-MWCNT1/PZT e PUR-MWCNT3/PZT, respectivamente. Esse comportamento é atribuído a formação de microcapacitores, no qual as partículas de PZT estão parcialmente cobertas pelas partículas de MWCNT, tornando mais eficiente a polarização dos grãos de PZT no interior dos compósitos.

7. AGRADECIMENTOS

À instituição de ensino, Universidade Estadual Paulista – UNESP FEIS, pela oportunidade de aprendizado gratuito e de qualidade. Ao CNPq pela bolsa de estudo concedida. À CAPES pelas disponibilidades dos artigos científicos e ao processo FAPESP 2017/19809-5 ao imensurável apoio a minha pesquisa, meu muito obrigado.

8. IMPACTOS SOCIAIS

Este trabalho agrega valor social diante da utilização do PUR tendo em vista ser um polímero considerado verde, ou seja, que não agride o meio ambiente. Além disso, sua utilização gera economia financeira ao trabalho pois a matéria prima utilizado no poliol (óleo de mamona) é abundante no território brasileiro por ser típico de região tropical.

9. REFERÊNCIAS

- [1] CHEN, Chun-Teh; GU, Grace X. Machine learning for composite materials. **MRS Communications**, v. 9, n. 2, p. 556-566, 2019.
- [2] RAJAK, Dipen Kumar et al. Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. **Polymers**, v. 11, n. 10, p. 1667, 2019.
- [3] COSTA, P. et al. Piezoresistive polymer blends for electromechanical sensor applications. **Composites Science and Technology**, v. 168, p. 353-362, 2018.
- [4] PALNEEDI, Haribabu et al. Status and perspectives of multiferroic magnetoelectric composite materials and applications. In: **Actuators**. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2016. p. 9.
- [5] CHAMANKAR, Negar et al. A flexible piezoelectric pressure sensor based on PVDF nanocomposite fibers doped with PZT particles for energy harvesting applications. **Ceramics International**, v. 46, n. 12, p. 19669-19681, 2020.
- [6] CANEVAROLO JR, Sebastião V. Ciência dos polímeros. **Artiliber editora, São Paulo**, p. 110-115, 2002.
- [7] MANO, Eloisa Biasotto. Polímeros como materiais de engenharia. **Editora Blucher**, 1991.
- [8] CALLISTER RETHWISCH. DG, WD Ciência e engenharia dos materiais—uma introdução. 9. Ed. **Rio de Janeiro: LTC**, 2002.
- [9] CHOI, Hyun-Jung et al. Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix and its application to antistatic fibre. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2019.
- [10] DONG, Jidong et al. Improved mechanical properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites by growing carbon black on carbon fiber surface. **Composites Science and Technology**, v. 149, p. 75-80, 2017.
- [11] LI, Yichao et al. A review of the electrical and mechanical properties of carbon nanofiller-reinforced polymer composites. **Journal of Materials Science**, v. 54, n. 2, p. 1036-1076, 2019.
- [12] PEI, Jianzhong et al. Effect of preparation techniques on structural and electrical properties of PZT/PVDF composites. **Materials Express**, v. 7, n. 3, p. 180-188, 2017.

- [13] LI, Rui et al. Effect of polymer matrix on the structure and electric properties of piezoelectric lead zirconatetitanate/polymer composites. **Materials**, v. 10, n. 8, p. 945, 2017.
- [14] MISHRA, Suvrajyoti et al. Advances in piezoelectric polymer composites for energy harvesting applications: a systematic review. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 304, n. 1, p. 1800463, 2019.
- [15] ZHANG, Yong et al. Flexible energy harvesting polymer composites based on biofibril-templated 3-dimensional interconnected piezoceramics. **Nano Energy**, v. 50, p. 35-42, 2018.
- [16] SUNDAR, Udhay et al. Dielectric and piezoelectric properties of percolative three-phase piezoelectric polymer composites. **Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena**, v. 34, n. 4, p. 041232, 2016.
- [17] DENIZ, Wellerson Davi Santos et al. Prevulcanized natural rubber and carbon black: High-deformation piezoresistive composites. **Materials Letters**, v. 253, p. 427-429, 2019.
- [18] PILGRIM, S. M.; NEWNHAM, R. E. 3: 0: A new composite connectivity. **Materials research bulletin**, v. 21, n. 12, p. 1447-1454, 1986.
- [19] SEBASTIAN, Mailadil T.; JANTUNEN, Heli. Polymer–ceramic composites of 0–3 connectivity for circuits in electronics: a review. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 7, n. 4, p. 415-434, 2010.
- [20] Liu, X.-f.; Xiong, C.-x.; Sun, H.-j.; Dong, L.-j.; Liu, Y., Piezoelectric and dielectric properties of PZT/PVC and graphite doped with PZT/PVC composites. **Materials Science and Engineering: B**, v. 127, n. 2-3, p. 261-266, 2006
- [21] SUNDAR, Udhay et al. Dielectric and piezoelectric properties of percolative three-phase piezoelectric polymer composites. **Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena**, v. 34, n. 4, p. 041232, 2016.
- [22] LI, Rui et al. Effects of conductive carbon black on PZT/PVDF composites. **Ferroelectrics**, v. 526, n. 1, p. 176-186, 2018.
- [23] SANCHES, A. O. et al. Influence of polymer insertion on the dielectric, piezoelectric and acoustic properties of 1-0-3 polyurethane/cement-based piezo composite. **Materials Research Bulletin**, v. 119, p. 110541, 2019.

- [24] MANO, Eloisa Biasotto. Introdução a polímeros. **Editora Edgar Blücher**, 2001.
- [25] NEWNHAM, R. E. et al. Composite piezoelectric sensors and actuators. **MRS Online Proceedings Library Archive**, v. 360, 1994.
- [26] VILAR, W. Química e tecnologia dos poliuretanos. 3.ed. Rio de Janeiro: **Vilar Consultoria**, 2004. 400p. Disponível em: <www.poliuretanos.com.br>. Acesso em: 15 jun.2020.
- [27] PETROVIĆ, Zoran S.; FERGUSON, James. Polyurethane elastomers. **Progress in Polymer Science**, v. 16, n. 5, p. 695-836, 1991.
- [28] HEPBURN, Claude. **Polyurethane elastomers**. Springer Science & Business Media, 2012.
- [29] SOMARATHNA, H. M. C. C. et al. The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 995-1014, 2018.
- [30] GAMA, Nuno V.; FERREIRA, Artur; BARROS-TIMMONS, Ana. Polyurethane foams: Past, present, and future. **Materials**, v. 11, n. 10, p. 1841, 2018.
- [31] FIORIO, Rudinei. Síntese e caracterização de poliuretano termoplástico contendo POSS via extrusão reativa. 2011.
- [32] JOSHI, Mangala; ADAK, Bapan; BUTOLA, B. S. Polyurethane nanocomposite based gas barrier films, membranes and coatings: A review on synthesis, characterization and potential applications. **Progress in Materials Science**, v. 97, p. 230-282, 2018.
- [33] TROVATI, Graziella et al. Production and characterization of polyurethane castor oil (*Ricinus communis*) foam for nautical fender. **Polymer Testing**, v. 73, p. 87-93, 2019
- [34] KASHIF, Mohammad et al. Synthesis and characterization of ricinoleamide-based polyurethane. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 88, n. 12, p. 1989-1996, 2011.
- [35] KE, Kai et al. Effects of branched carbon nanotubes and graphene nanoplatelets on dielectric properties of thermoplastic polyurethane at different temperatures. **Composites Part B: Engineering**, v. 166, p. 673-680, 2019;
- [36] SANTHOSH, Chella et al. Role of nanomaterials in water treatment applications: a review. **Chemical Engineering Journal**, v. 306, p. 1116-1137, 2016.

- [37] FENG, Lei et al. Effect of growth temperature on carbon nanotube grafting morphology and mechanical behavior of carbon fibers and carbon/carbon composites. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 33, n. 1, p. 65-70, 2017.
- [38] KURBANOGU, Sevinc; OZKAN, Sibel A. Electrochemical carbon based nanosensors: A promising tool in pharmaceutical and biomedical analysis. **Journal of pharmaceutical and biomedical analysis**, v. 147, p. 439-457, 2018.
- [39] SHUKLA, Sudheesh K. et al. The effect of loading carbon nanotubes onto chitosan films on electrochemical dopamine sensing in the presence of biological interference. **Talanta**, v. 181, p. 57-64, 2018.
- [40] Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature** 354, 56–58 1991.
- [41] O'CONNELL, Michael J. Carbon nanotubes: properties and applications. **CRC press**, 2018.
- [42] DRESSELHAUS, M. S., et al. Topics in Applied Physics: Introduction to Carbon Materials Research. Springer, 2001.
- [43] POPOV, Valentin N. Carbon nanotubes: properties and application. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 43, n. 3, p. 61-102, 2004
- [44] BARROS, Eduardo B. et al. Review on the symmetry-related properties of carbon nanotubes. **Physics reports**, v. 431, n. 6, p. 261-302, 2006.
- [45] Carbon Nanotubes: Graphene on a Roll. Prince George's Community College. Disponível em: < <http://academic.pgcc.edu/~ssinex/nanotubes/> >. Acesso em: 30/03/2021.
- [46] MOSSO, Marbely Manhães. **Dispositivos de microondas utilizando nanotubos de carbono e grafeno**. 2014. Tese de Doutorado. PUC-Rio
- [47] TRINDADE, Jorge Fonseca. Nanotubos de carbono: Propriedades e funcionalização. 2011.
- [48] JOSELEVICH, Ernesto et al. Carbon nanotube synthesis and organization. **Carbon nanotubes**, p. 101-165, 2007.
- [49] ANDREWS, Rodney et al. Multiwall carbon nanotubes: synthesis and application. **Accounts of chemical research**, v. 35, n. 12, p. 1008-1017, 2002.

- [50] LI, Haipeng et al. Preparation and properties of carbon nanotube (Fe)/hydroxyapatite composite as magnetic targeted drug delivery carrier. **Materials Science and Engineering: C**, v. 97, p. 222-229, 2019.
- [51] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física. Vol. III**. Grupo Gen-LTC, 2016.
- [52] H. D. **Young** & R. A. Freedman, "**Física III: Eletromagnetismo** 12a. ed. Pearson, São Paulo, Brasil, 2009.
- [53] ROBERT, R.; KOWALSKI, E. L.; GOMES, D. M. Corrente de absorção e reabsorção em dielétricos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 3307- 3307-9, 2008
- [54] DAMJANOVIC, Dragan. **Hysteresis in piezoelectric and ferroelectric materials**. Academic Press, 2006.
- [55] NEWNHAM, R. E. et al. Composite piezoelectric sensors and actuators. **MRS Online Proceedings Library Archive**, v. 360, 1994.
- [56] KITTEL, C. Introdução à física do estado sólido. 8. ed. Rio de Janeiro: **LTC**, 2006. 578 p.
- [57] KAO, K. C. Dielectric phenomena in solids. **Academic press**, 2004.
- [58] XU, Yuhuan. **Ferroelectric materials and their applications**. Elsevier, 2013.
- [59] YU, an Xiong et al. Recent progress in molecular ferroelectrics with perovskite structure. **Chinese Science Bulletin**, v. 65, n. 10, p. 916-930, 2020.
- [60] ACOSTA, Matias et al. BaTiO₃-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives. **Applied Physics Reviews**, v. 4, n. 4, p. 041305, 2017.
- [61] YOON, D. Tetragonality of barium titanate powder for a ceramic capacitor application. **Journal of Ceramic Processing Research**, v. 7, n. 4, p. 343, 2006.
- [62] YANG, Jiashi. **An introduction to the theory of piezoelectricity**. New York: Springer, 2005.
- [63] HEYWANG, W.; LUBITZ, K.; WERSING, W. Piezoelectricity: evolution and future of a technology. **Berlim: Springer Editora**, 2008. 493 p.
- [64] ERTURK, Alper; INMAN, Daniel J. **Piezoelectric energy harvesting**. John Wiley & Sons, 2011.
- [65] LIU, Huicong et al. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. **Applied Physics Reviews**, v. 5, n. 4, p. 041306, 2018.

- [66] RAM, Ranvijai, et al. Determination of percolation threshold and electrical conductivity of polyvinylidene fluoride (PVDF)/short carbon fiber (SCF) composites: effect of SCF aspect ratio. *Polymer International*, 2017, 66.4: 573-582.
- [67] KIM, Sangwoo et al. Revisit to three-dimensional percolation theory: Accurate analysis for highly stretchable conductive composite materials. **Scientific reports**, v. 6, p. 34632, 2016.
- [68] SUN, Yun-Lu et al. Conductive Composite Materials Fabricated from Microbially Produced Protein Nanowires. **Small**, v. 14, n. 44, p. 1802624, 2018.
- [69] SHI, Bo et al. Thermal percolation in composite materials with electrically conductive fillers. **Applied Physics Letters**, v. 113, n. 4, p. 041902, 2018.
- [70] STAUFFER, Dietrich; AHARONY, Ammon. **Introduction to percolation theory**. Taylor & Francis, 2018.
- [71] MOLLAAMIN, Fatemeh; MONAJJEMI, Majid. Fractal dimension on carbon nanotube-polymer composite materials using percolation theory. **Journal of Computational and Theoretical Nanoscience**, v. 9, n. 4, p. 597-601, 2012.
- [72] SANDLER, JKWea et al. Ultra-low electrical percolation threshold in carbon-nanotube-epoxy composites. **Polymer**, v. 44, n. 19, p. 5893-5899, 2003.
- [73] ZHANG, Kai et al. Ultralow percolation threshold and enhanced electromagnetic interference shielding in poly (L-lactide)/multi-walled carbon nanotube nanocomposites with electrically conductive segregated networks. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 5, n. 36, p. 9359-9369, 2017.
- [74] ELAHI, Hassan et al. A review on applications of piezoelectric materials in aerospace industry. **Integrated Ferroelectrics**, v. 211, n. 1, p. 25-44, 2020.
- [75] SAPPATI, Kiran Kumar; BHADRA, Sharmistha. Piezoelectric polymer and paper substrates: a review. **Sensors**, v. 18, n. 11, p. 3605, 2018.
- [76] LI, Rui et al. Effects of conductive carbon black on PZT/PVDF composites. **Ferroelectrics**, v. 526, n. 1, p. 176-186, 2018.
- [77] HAN, Jin Kyu et al. Flexible piezoelectric generators by using the bending motion method of direct-grown-PZT nanoparticles on carbon nanotubes. **Nanomaterials**, v. 7, n. 10, p. 308, 2017.
- [78] PAL, Avijit et al. Enhancement in energy storage and piezoelectric performance of three phase (PZT/MWCNT/PVDF) composite. **Materials Chemistry and Physics**, v. 244, p. 122639, 2020.

- [79] MOHARANA, Srikanta; MAHALING, Ram Naresh. Novel three phase polyvinyl alcohol (PVA)-nanographite (GNP)-Pb (ZrTi) O₃ (PZT) composites with high dielectric permittivity. **Materials research innovations**, v. 22, n. 5, p. 254-260, 2018.
- [80] Liu, X.-f.; Xiong, C.-x.; Sun, H.-j.; Dong, L.-j.; Liu, Y., Piezoelectric and dielectric properties of PZT/PVC and graphite doped with PZT/PVC composites. **Materials Science and Engineering: B**, v. 127, n. 2-3, p. 261-266, 2006.
- [81] OUNAIES, Zoubeida et al. Evidence of piezoelectricity in SWNT-polyimide and SWNT-PZT-polyimide composites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 21, n. 5, p. 393-409, 2008.
- [82] Shi, Y. D., Li, J., Tan, Y. J., Chen, Y. F., & Wang, M. Percolation behavior of electromagnetic interference shielding in polymer/multi-walled carbon nanotube nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 170, 70-76.
- [83] ALIZADEH SAHRAEI, Abolfazl et al. AC and DC electrical behavior of MWCNT/epoxy nanocomposite near percolation threshold: Equivalent circuits and percolation limits. **Journal of Applied Physics**, v. 123, n. 10, p. 105109, 2018.
- [84] BARRAU, Sophie et al. DC and AC conductivity of carbon nanotubes–polyepoxy composites. **Macromolecules**, v. 36, n. 14, p. 5187-5194, 2003
- [85] NAYAK, Suryakanta; KHASTGIR, Dipak. Polydimethylsiloxane–PbZr_{0.52}Ti_{0.48}O₃ nanocomposites with high permittivity: Effect of poling and temperature on dielectric properties. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, n. 14, p. 47307, 2019.
- [86] ARUL, K. Thanigai; RAO, MS Ramachandra. Ferroelectric properties of flexible PZT composite films. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 146, p. 109371, 2020.
- [87] BOUKAMP, Bernard A. et al. Ionic and electronic conductivity in lead–zirconate–titanate (PZT). **Solid State Ionics**, v. 170, n. 3-4, p. 239-254, 2004.
- [88] TANG, Jian; LIU, Jun; HUANG, Huanqi. Dielectric, Piezoelectric and Ferroelectric Properties of Flexible 0–3 Type PZT/PVDF Composites Doped with Graphene. **Journal of Electronic Materials**, v. 48, n. 6, p. 4033-4039, 2019.
- [89] YU, Kun et al. Dielectric and piezoelectric properties of 0.970 (0.95 (K 0.485 Na 0.515) NbO₃–0.05 LiSbO₃)–0.015 CuO–0.015 Al₂O₃/PVDF 0–3 composite

reinforced with two kinds of ZnO powder. **Optical and Quantum Electronics**, v. 51, n. 10, p. 1-20, 2019.

[90] LIU, Xiao-fang et al. Piezoelectric and dielectric properties of PZT/PVC and graphite doped with PZT/PVC composites. **Materials Science and Engineering: B**, v. 127, n. 2-3, p. 261-266, 2006.

[91] SATISH, B.; SRIDEVI, K.; VIJAYA, M. S. Study of piezoelectric and dielectric properties of ferroelectric PZT-polymer composites prepared by hot-press technique. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 35, n. 16, p. 2048, 2002.

[92] GOWDHAMAN, P.; ANNAMALAI, V.; THAKUR, O. P. Piezo, ferro and dielectric properties of ceramic-polymer composites of 0-3 connectivity. **Ferroelectrics**, v. 493, n. 1, p. 120-129, 2016.

[93] BEENA, P.; JAYANNA, H. S. Dielectric studies and AC conductivity of piezoelectric barium titanate ceramic polymer composites. **Polymers and Polymer Composites**, v. 27, n. 9, p. 619-625, 2019.

[94] PAL, Avijit et al. Enhancement in energy storage and piezoelectric performance of three phase (PZT/MWCNT/PVDF) composite. **Materials Chemistry and Physics**, v. 244, p. 122639, 2020.

[95] SANCHES, Alex Otávio et al. Synergistic effects on polyurethane/lead zirconate titanate/carbon black three-phase composites. **Polymer Testing**, v. 60, p. 253-259, 2017.

[96] KIM, Hoejin et al. Enhanced dielectric properties of three phase dielectric MWCNTs/BaTiO₃/PVDF nanocomposites for energy storage using fused deposition modeling 3D printing. **Ceramics International**, v. 44, n. 8, p. 9037-9044, 2018.

[97] CHOUDHURY, Arup. Dielectric and piezoelectric properties of polyetherimide/BaTiO₃ nanocomposites. **Materials Chemistry and Physics**, v. 121, n. 1-2, p. 280-285, 2010.

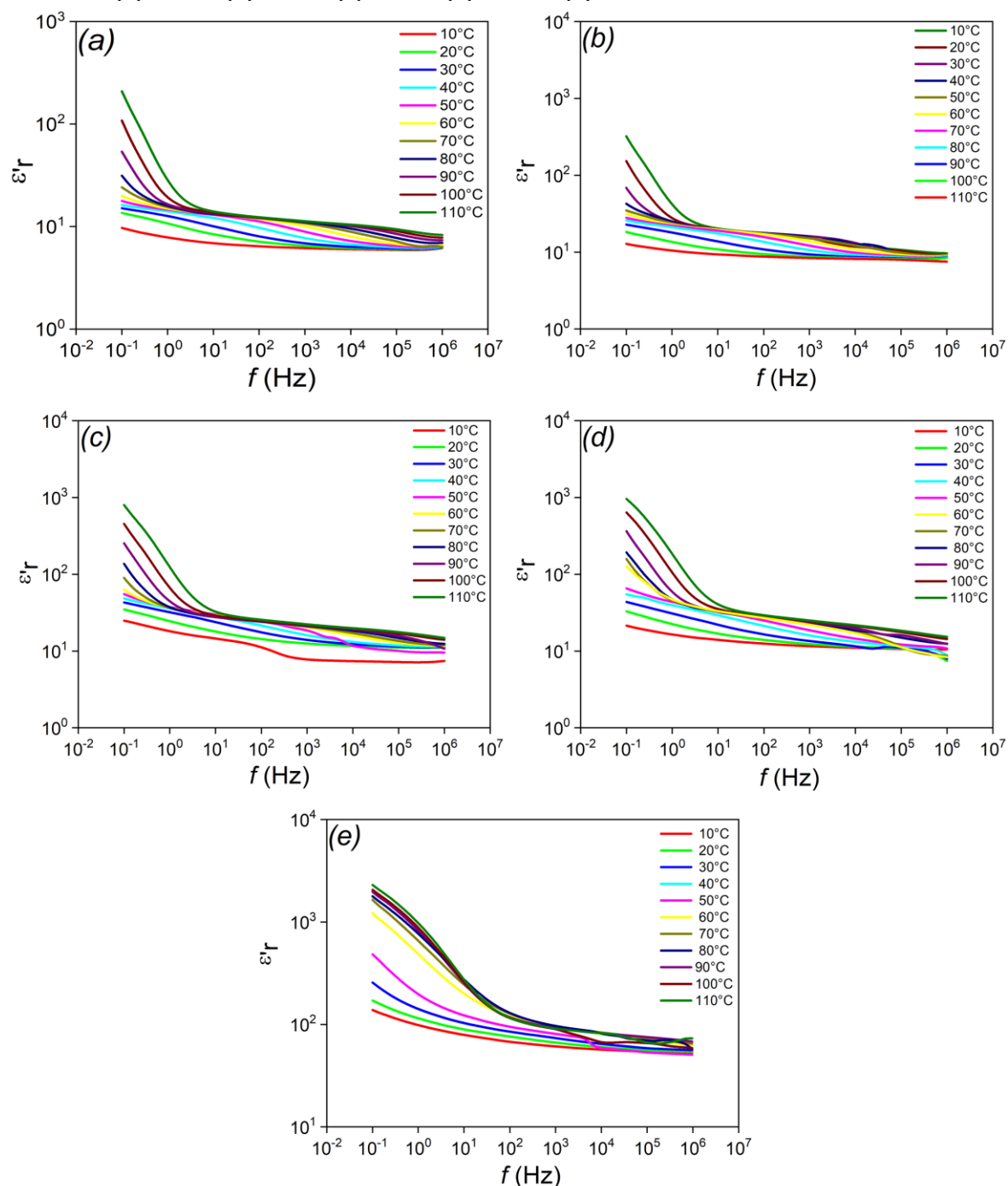
[98] CHOUDHURY, Arup. Dielectric and piezoelectric properties of polyetherimide/BaTiO₃ nanocomposites. **Materials Chemistry and Physics**, v. 121, n. 1-2, p. 280-285, 2010.

[99] HAMMAMI, H. et al. Experimental study of relaxations in unidirectional piezoelectric composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 37, n. 1, p. 1-8, 2006.

[100] ZHAO, Hang; BAI, Jinbo. Highly sensitive piezo-resistive graphite nanoplatelet–carbon nanotube hybrids/polydimethylsilicone composites with improved conductive network construction. **ACS applied materials & interfaces**, v. 7, n. 18, p. 9652-9659, 2015.

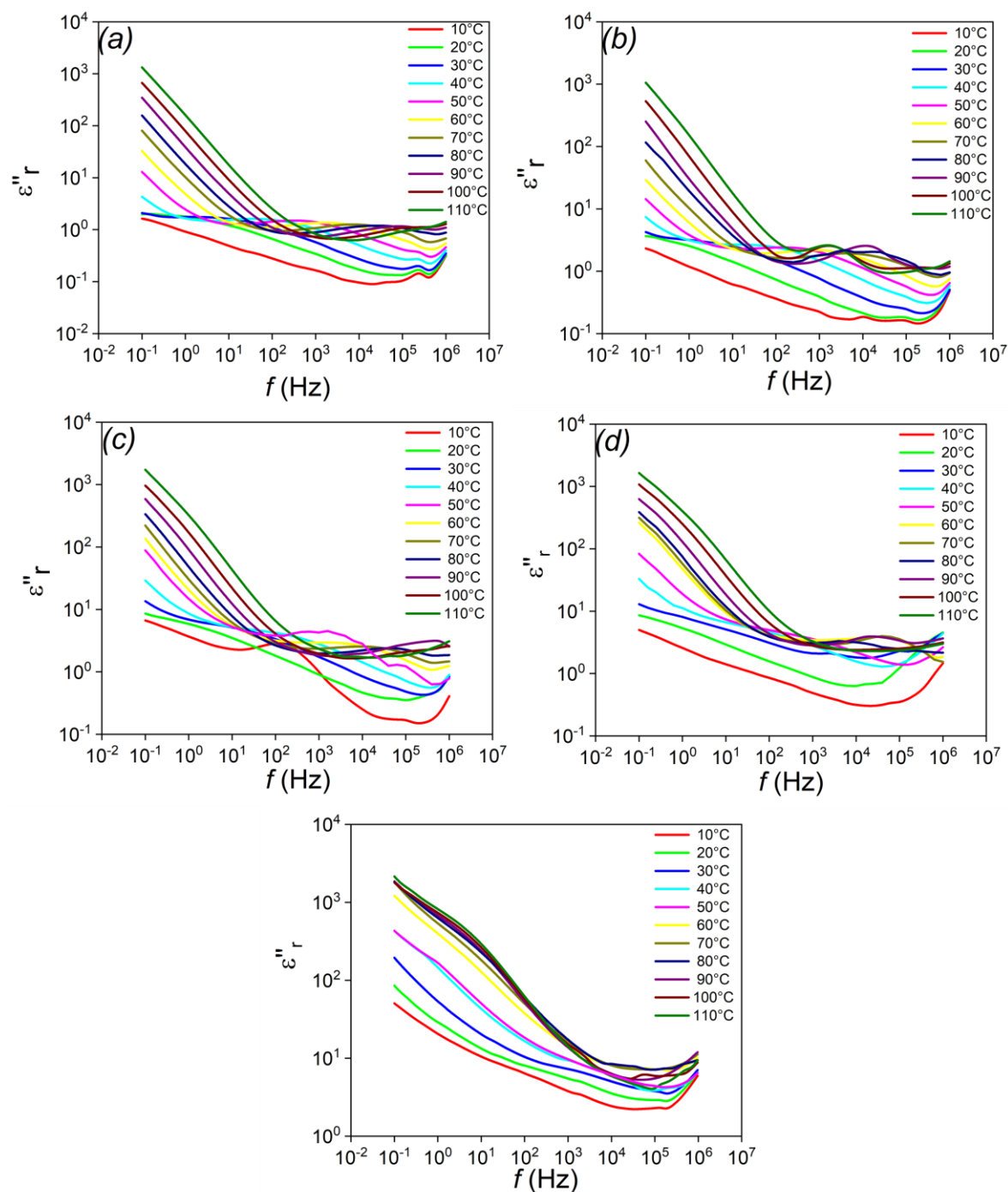
APÊNDICE A – Figuras da constante dielétrica real e imaginária, condutividade elétrica real e imaginária em função da frequência e em diferentes temperaturas para o compósito PUR/PZT.

Figura A 1: Constante dielétrica real em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50%



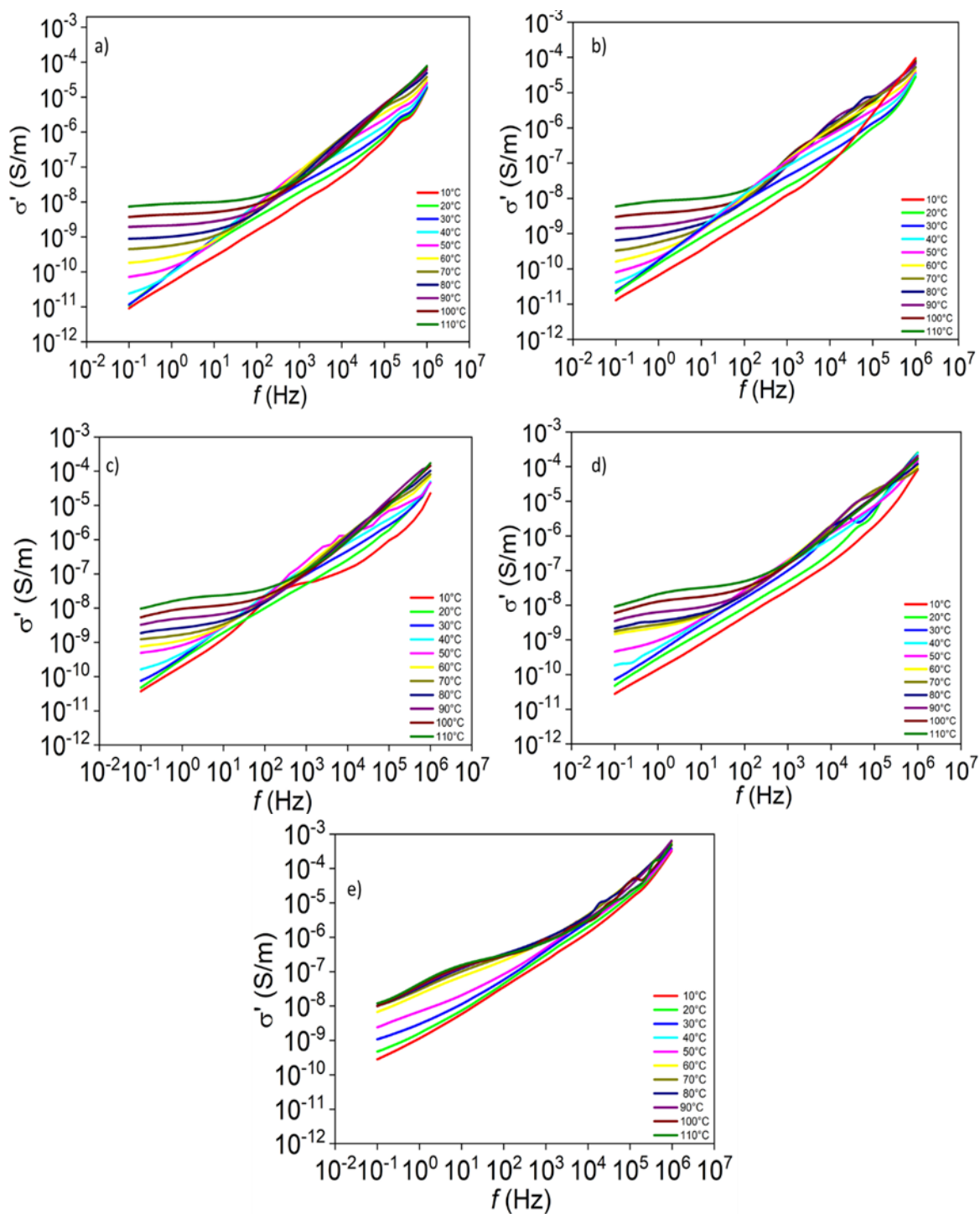
Fonte: Próprio autor.

Figura A 2: Constante dielétrica real em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50%



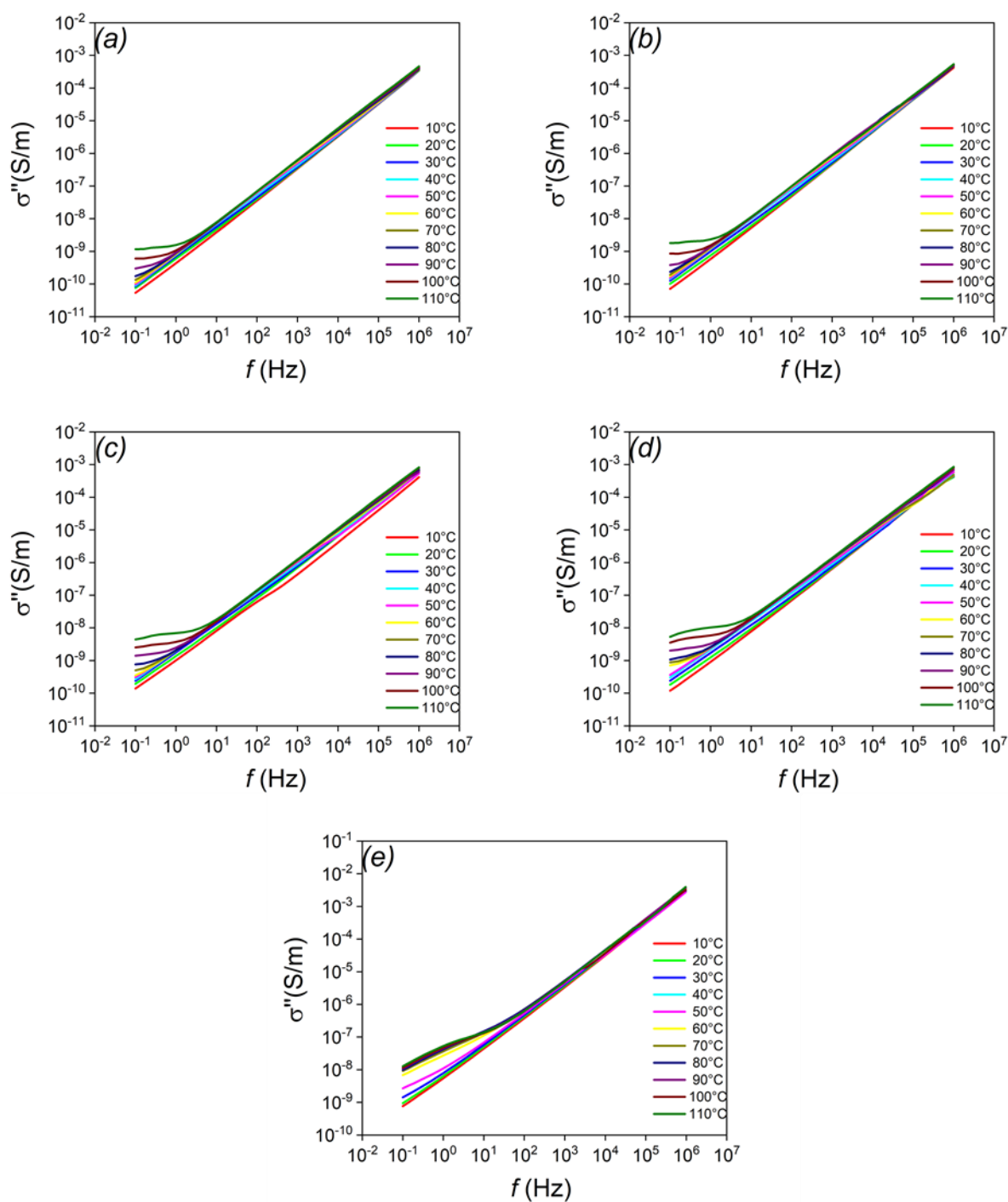
Fonte: Próprio autor.

Figura A 3: Condutividade elétrica real em função da frequência em diferentes temperaturas para o composto PUR/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50%



Fonte: próprio autor.

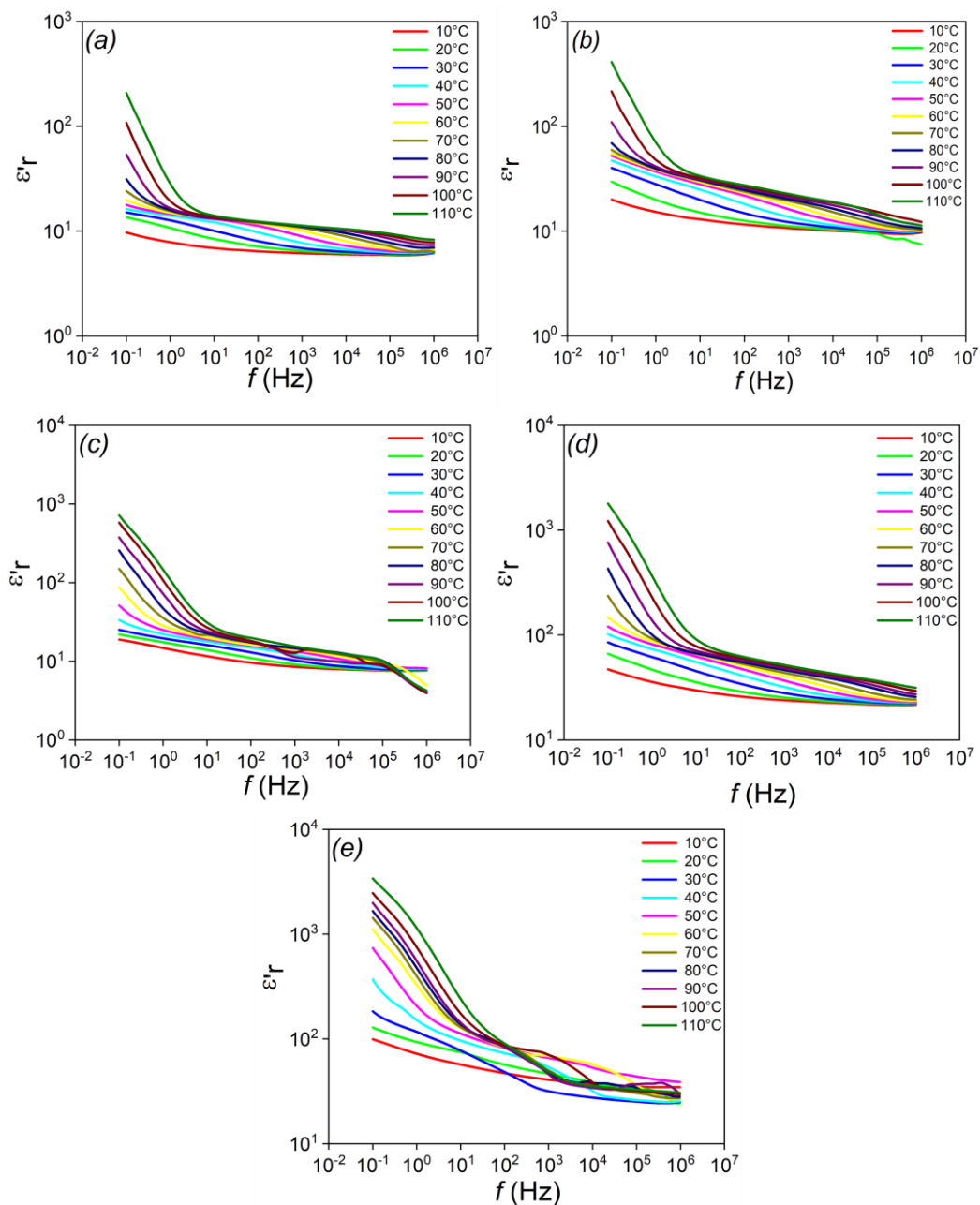
Figura A 4: Condutividade elétrica imaginária em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50%



Fonte: Próprio autor

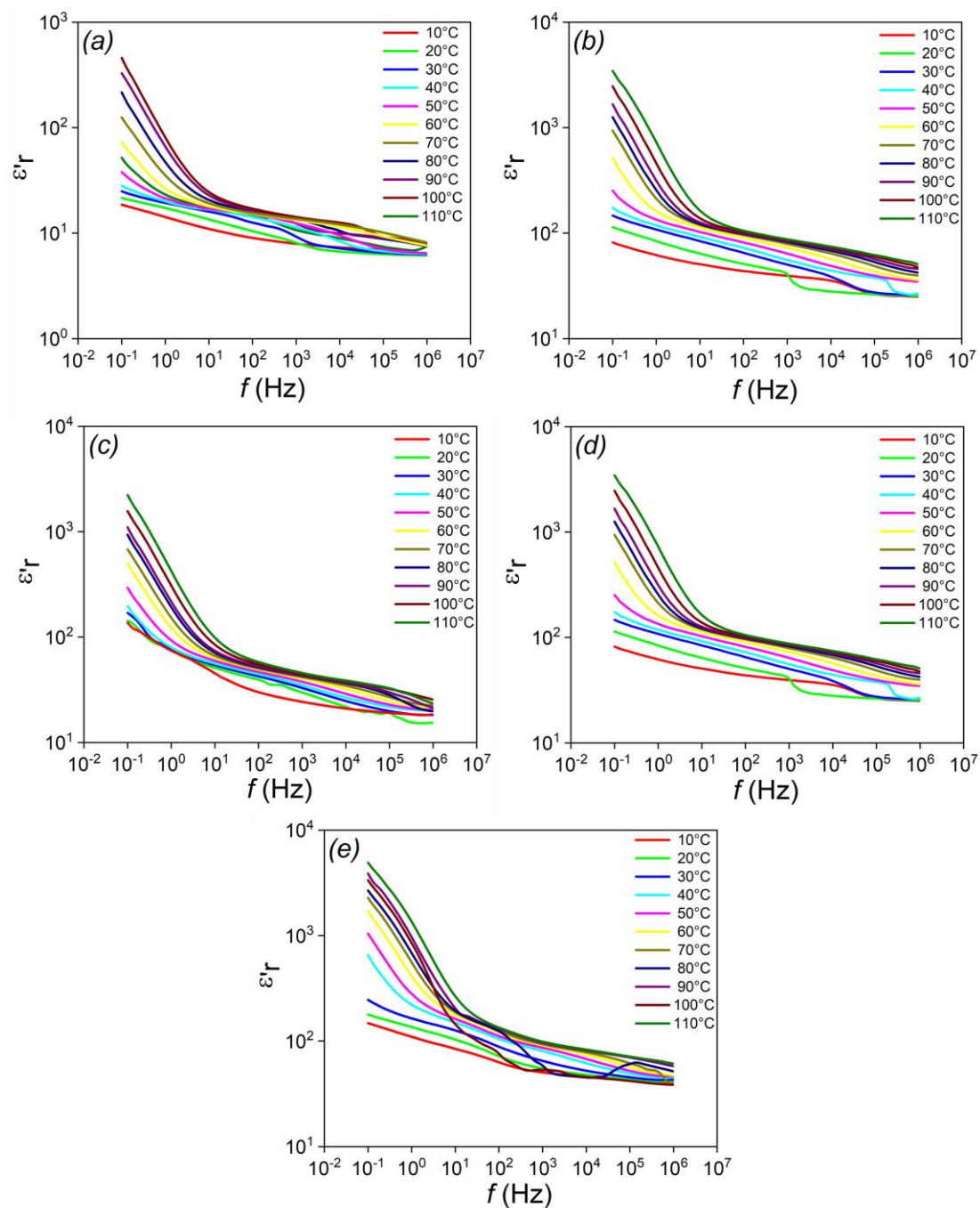
APÊNDICE B - Figuras da constante dielétrica real e imaginária, condutividade elétrica real e imaginária em função da frequência e em diferentes temperaturas para os compósitos PUR-MWCNT1/PZT e PUR-MWCNT3/PZT

Figura B 1: Permissividade dielétrica real função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT1/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d)40% e (e) 50%



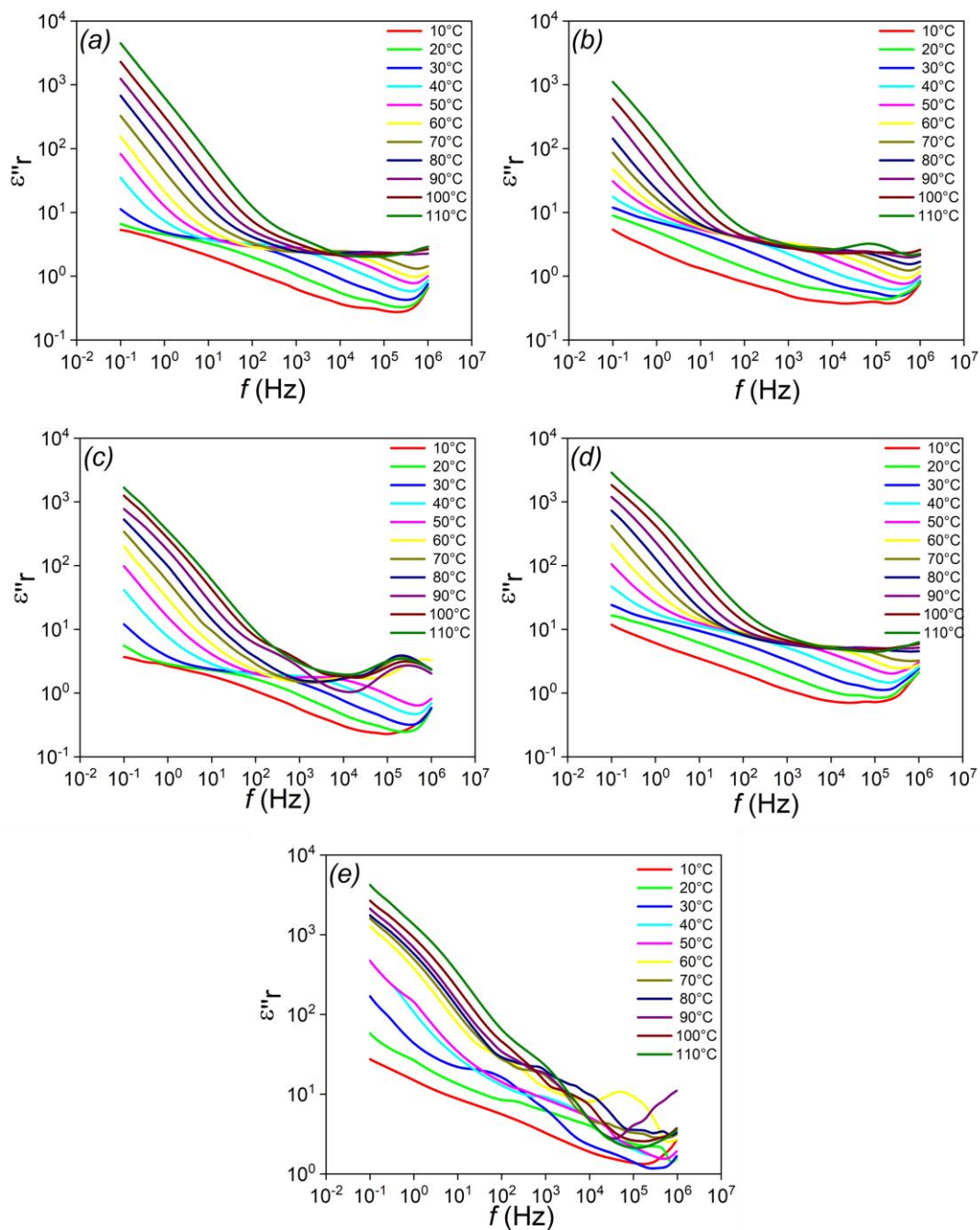
Fonte: Próprio autor.

Figura B 2: Permissividade real dielétrica em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT3/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d)40% e (e) 50%



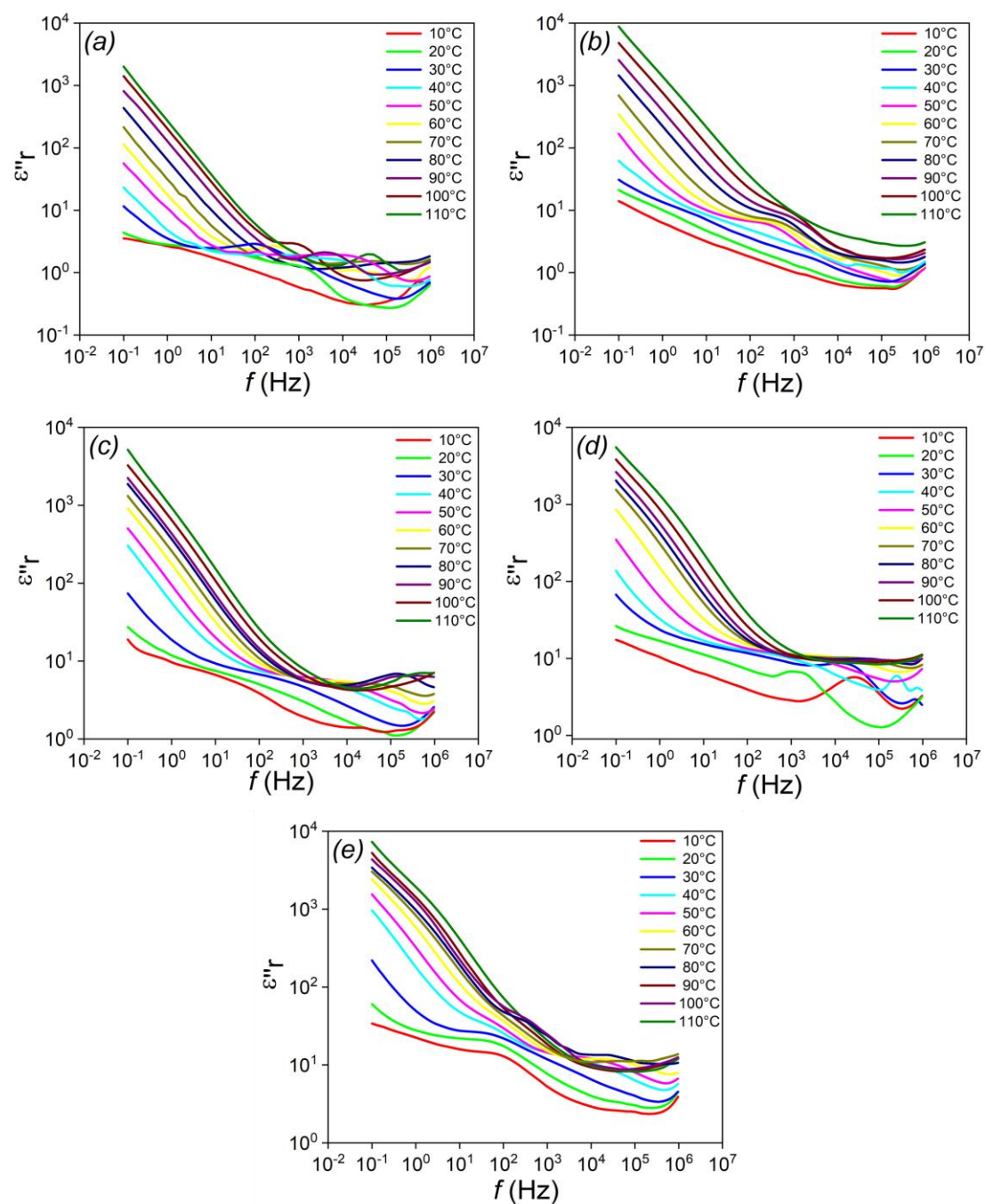
Fonte: Próprio autor.

Figura B 3: Permissividade dielétrica imaginária em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT1/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d)40% e (e) 50%



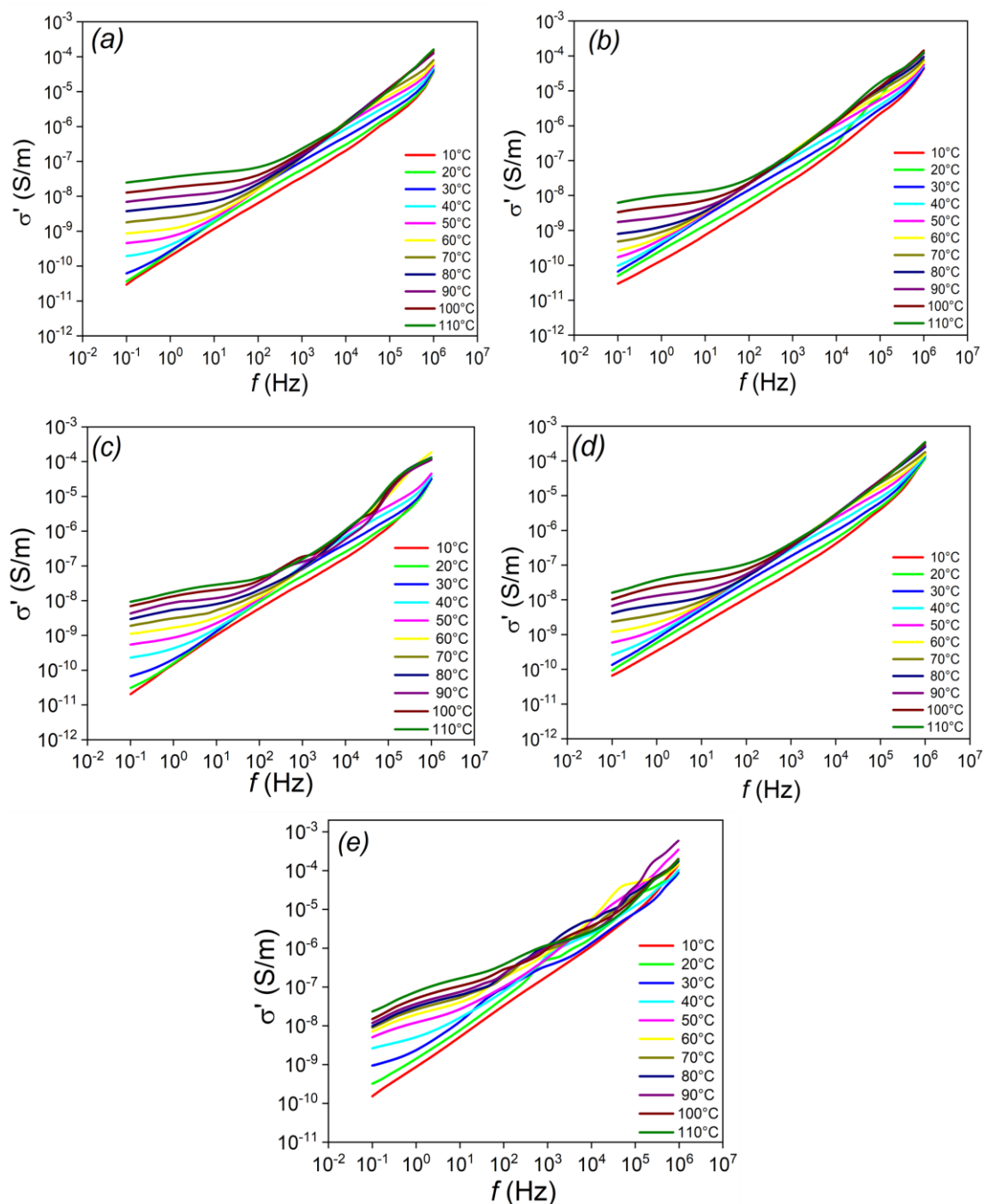
Fonte: Próprio autor.

Figura B 4: Permissividade dielétrica imaginária em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT3/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d)40% e (e) 50%



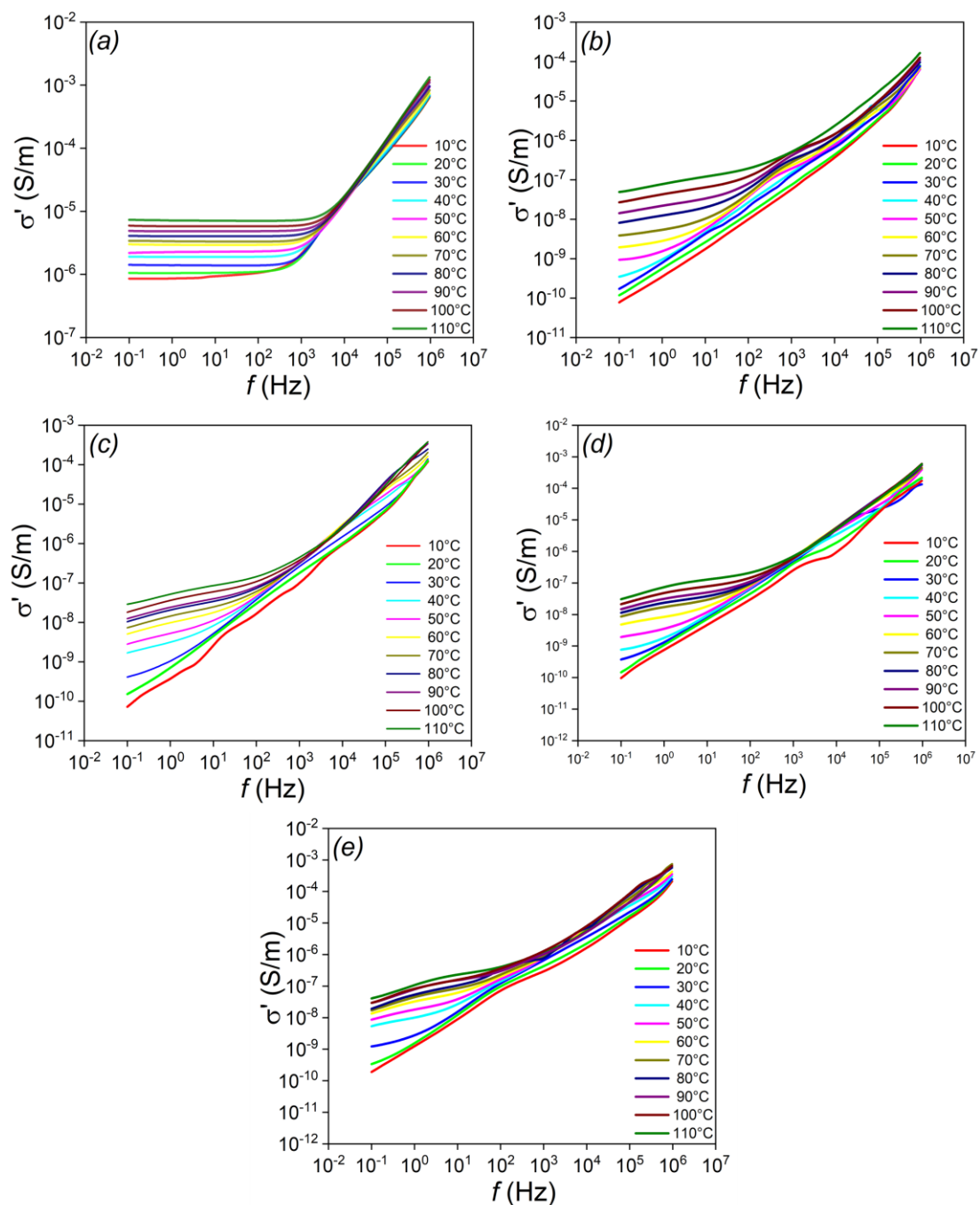
Fonte: Próprio autor.

Figura B 5: Condutividade elétrica real em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT1/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d)40% e (e) 50%



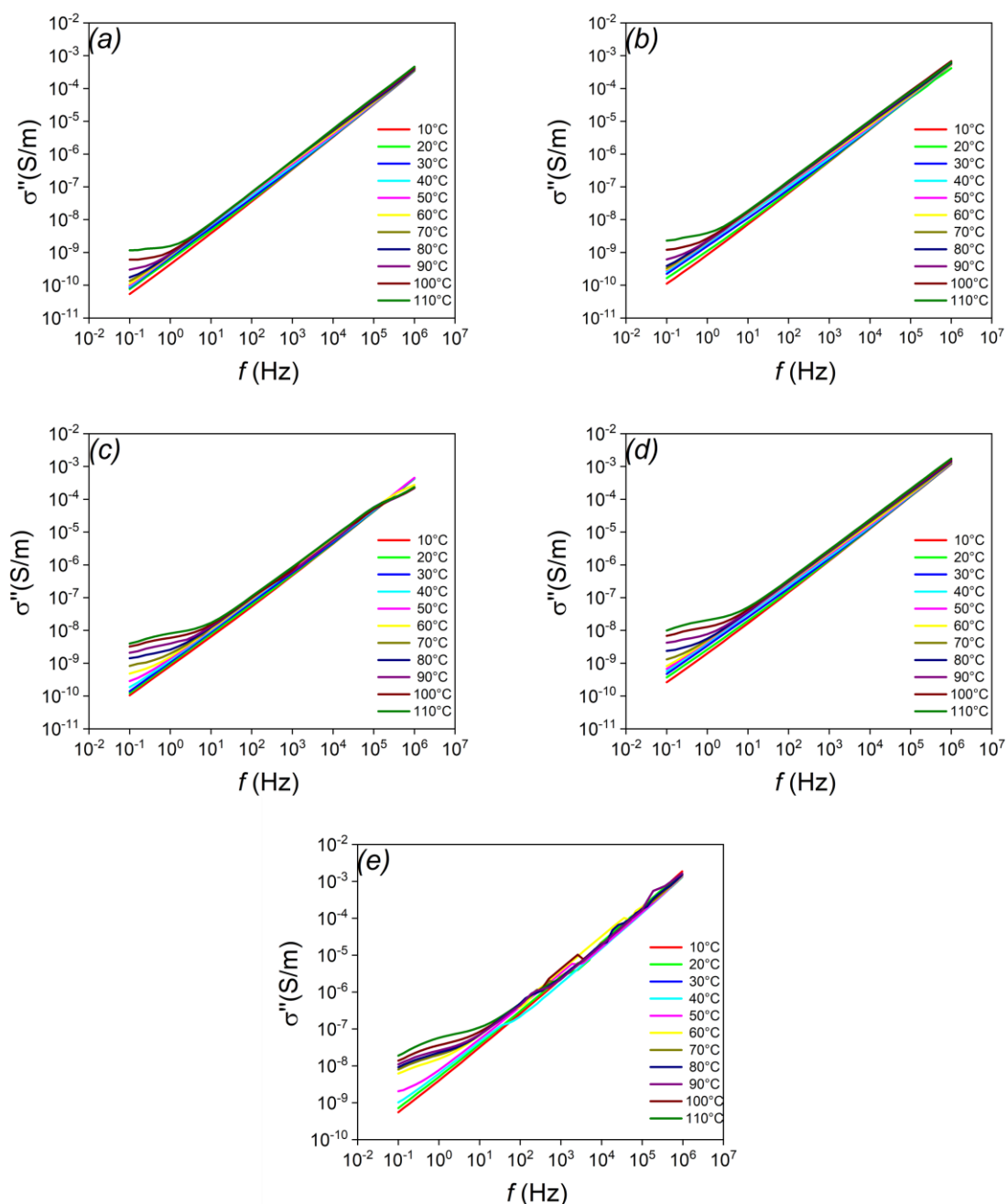
Fonte: Próprio autor.

Figura A 6: Condutividade elétrica real em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT3/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50%



Fonte: Próprio autor.

Figura A 7: Condutividade elétrica imaginária em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT1/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50%



Fonte: Próprio autor

Figura A 8: Condutividade elétrica imaginária em função da frequência em diferentes temperaturas para o compósito PUR-MWCNT3/PZT em diferentes concentrações volumétrica de PZT: (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40% e (e) 50%

