CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇAO TECNOLÓGIA DE MINAS GERAIS



*

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RÔMULO PEREIRA XAVIER

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CERÂMICAS SEMICONDUTORAS À BASE DE TITANATO DE BÁRIO COM INSERÇÃO DE GRAFENO

BELO HORIZONTE
ABRIL 2025

RÔMULO PEREIRA XAVIER

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CERÂMICAS SEMICONDUTORAS À BASE DE TITANATO DE BÁRIO COM INSERÇÃO DE GRAFENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

Coorientador: Dr. Bruno Cordeiro Silva

BELO HORIZONTE

ABRIL 2025

Xavier, Rômulo Pereira.
X3o Obtenção e caracterização de cerâmicas semicondutoras à base de titanato de bário com inserção de grafeno / Rômulo Pereira Xavier. – 2025.
93 f. : il.
Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva.
Coorientador: Bruno Cordeiro Silva.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2025.
Bibliografia.

1. Semicondutores. 2. Titanato de bário. 3. Grafeno. I. Paiva, Paulo Renato Perdigão de. II. Silva, Bruno Cordeiro. III. Título.

CDD: 620.112972

Ficha elaborada pela Biblioteca - *campus* Nova Suíça - CEFET-MG
Bibliotecária: Rosiane Maria Oliveira Gonçalves - CRB6-2660

RÔMULO PEREIRA XAVIER

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CERÂMICAS SEMICONDUTORAS À BASE DE TITANATO DE BÁRIO COM INSERÇÂO DE GRAFENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Belo Horizonte, 28 de abril de 2025

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva - orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET- MG

Dr. Bruno Cordeiro Silva - coorientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET- MG

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET- MG

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET- MG

Prof. Dr. Eduardo Henrique Martins Nunes
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

BELO HORIZONTE

ABRIL 2025

AGRADECIMENTOS

- Ao CEFET-MG pelo crescimento acadêmico que obtive ao longo desse tempo e pela oportunidade de cursar essa pós-graduação.

- Minha sincera gratidão ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva e ao meu coorientador Dr. Bruno Cordeiro Silva pela oportunidade, suporte e disposição neste desafio.

- O meu muito obrigado ao Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva e ao Prof. Dr. André Guimarães Ferreira membros da banca de qualificação e defesa pelos conselhos, sugestões e interesse em contribuir com este projeto.

- Meu agradecimento ao Prof. Dr. Eduardo Henrique Martins Nunes por aceitar fazer parte da banca de defesa.

- À minha esposa Letícia e ao meu filho Arthur pelo grande incentivo e apoio.

- A todos os colegas do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET-MG, deixo meu abraço.

- Ao Prof. Dr. Rubens Marcos dos Santos Filho, chefe do Departamento de Engenharia Eletrônica e Biomédicas (DEEB) do CEFET-MG.

- Ao CDTN, na pessoa da Dra. Denise das Mercês Camarano, pelos ensaios e pesquisas nesta instituição.

"*O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem.*" (Guimarães Rosa)

RESUMO

Atualmente, os materiais cerâmicos semicondutores são amplamente utilizados em componentes microeletrônicos e termoelétricos, devido às suas propriedades elétricas, térmicas e mecânicas. Exemplos incluem células a combustível, termistores, capacitores, varistores, transdutores, sensores piezoelétricos e dispositivos óptico-eletrônicos. Pesquisas para melhorar compósitos nanoestruturados de matrizes cerâmicas com alta permissividade dielétrica tem ganhado destaque, especialmente com a adição de grafeno, devido às suas características inovadoras, como alta condutividade elétrica, térmica e resistência mecânica. Portanto, esta pesquisa teve como meta produzir e caracterizar cerâmicas semicondutoras à base titanato de bário com variação da concentração de grafeno (0,50, 0,75 e 1,00 mol %) com e sem adição de dióxido de silício (0,50 mol %). Para isso foi desenvolvido um sistema de medição das propriedades elétricas e dielétricas em função da temperatura (resistividade, capacitância e constante dielétrica), com medições em 100 Hz, 1 kHz e 10 kHz, além disso, foram determinadas a condutividade térmica, *Band Gap* e resistência à flexão. Os resultados obtidos foram comparados com uma amostra de referência, produzidas com titanato de bário ($BaTiO_3$), pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) e dióxido de silício (SiO_2). A análise indicou que a cerâmica mais promissora foi a obtida com 98,75 mol % de $BaTiO_3$, 0,5 mol % de SiO_2 e 0,75 mol % de grafeno, por apresentar uma ampla gama de vantagens comparativas com a cerâmica de referência. Essa composição mostrou-se adequada para aplicação como cerâmica dielétrica e sensores térmicos em componentes microeletrônicos ou para armazenamento de energia, já que apresentou resistividade elétrica com valores de 100 a 300 % menores em relação à amostra de referência em todas as temperaturas medidas (25° C até 425° C) e elevados valores de constante dielétrica na ordem de 10^7 a 10^9.

Palavras-chave: Semicondutores, titanato de bário, grafeno.

ABSTRACT

Currently, semiconductors ceramics materials are widely used in microelectronic and thermoelectric components due to their electrical, thermal, and mechanical properties. Examples include fuel cells, thermistors, capacitors, varistors, transducers, piezoelectric sensors, and optoelectronic devices. Research aimed at improving nanostructured ceramic matrix composites with high dielectric permittivity has gained prominence, especially with the addition of graphene, due to its innovative characteristics such as high electrical and thermal conductivity and mechanical strength. Therefore, this study aimed to produce and characterize semiconductor ceramics based on barium titanate by varying the graphene concentration (0.50, 0.75, and 1.00 mol %) with and without the addition of silicon dioxide (0.50 mol %). A measurement system was developed to analyze dielectric properties as a function of temperature (resistivity, capacitance, and dielectric constant), with measurements at 100 Hz, 1 kHz and 10 kHz, furthermore, it was determined thermal conductivity, *Band Gap*, and flexural strength. The results were compared with a reference sample produced with barium titanate ($BaTiO_3$), niobium pentoxide (Nb_2O_5), and silicon dioxide (SiO_2). The analysis indicated that the most promising ceramic composition was obtained with 98.75 mol % $BaTiO_3$, 0.5 mol % SiO_2, and 0.75 mol % graphene, as it presented a wide range of comparative advantages over the reference ceramic. This composition proved to be suitable for application as dielectric ceramics and thermal sensors in microelectronic components or for energy storage, since it showed resistivity values 100 to 300 % lower than the reference sample at all measured temperatures (25° C to 425° C) and high dielectric constant values in the order of 10^7 to 10^9.

Keywords: Semiconductors, barium titanate, graphene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de bandas de energia dos materiais.....18
Figura 2 - Semicondutor intrínseco de silício - cristal puro.....19
Figura 3 - Semicondutor extrínseco dopado (tipo p) com boro (a) e semicondutor extrínseco dopado (tipo n) com fósforo (b). 20
Figura 4 - Junção PN com polarização direta.....21
Figura 5 - Estrutura cristalina tetragonal (a) e Estrutura cristalina cúbica (b)...22
Figura 6 - Alótropos do carbono: a) 2-D grafeno, b) 0-D fulereno, c) 1-D carbono nanotubo, d) 3-D grafite. 24
Figura 7 - Comparação entre o gap de energia de um isolante e semicondutor com o grafeno.....25
Figura 8 - Esquema do processo de esfoliação mecânica: (a) o grafite é colocado sobre a fita adesiva; (b) ocorre o processo de esfoliação: a fita é dobrada várias vezes até que camada de grafita ficar fina; (c) a camada é transferida para o substrato de SiO_2/Si; (d) amostra ultrafina de grafite 26
Figura 9 - Esquema geral de esfoliação química para a obtenção do grafeno 27
Figura 10 - Esquema processo CVD.....27
Figura 11 - Esquema de crescimento de grafeno epitaxial: (a) deixando a superfície rica em carbono (C), que pode se religar formando o grafeno (b) sobre o cristal de SiC, o crescimento da fase grafeno inicia-se pelas bordas dos degraus.....28
Figura 12 - Fluxograma da metodologia adotada.....38
Figura 13 - Molde utilizado para confecção dos corpos de prova.....41
Figura 14 - Modelo implementado para as medições das propriedades elétricas. 44
Figura 15 - Conectores metálicos para medições de resistência elétrica.....44
Figura 16 - Dispositivo com amostra para medições de capacitância elétrica 44
Figura 17 - Distribuição granulométrica do titanato de bário (paralelo). 48
Figura 18 - Distribuição granulométrica do pentóxido de nióbio (V). 49
Figura 19 - Distribuição granulométrica do dióxido de silício. 49

Figura 20 - Distribuição granulométrica do grafeno. 50
Figura 21 - Corpos de prova CP1, CP2 e CP3 sinterizados.....51
Figura 22 – Difratograma para as composições utilizadas na produção dos corpos de prova 52
Figura 23 - Resultados de tamanho de cristalitos para os copos de prova, obtidos pela Equação de Scherrer.....53
Figura 24 - Resultado de densidade Bulk.....54
Figura 25 - Resultado de porosidade total.....55
Figura 26 - Resultados do ensaio mecânico de resistência à flexão dos corpos de prova.....55
Figura 27 - Valores da Resistividade em função da Temperatura das amostras para frequências de 1kHz.....58
Figura 28 - Ajuste estatístico de regressão polinomial da resistividade CP1.....59
Figura 29 - Ajuste estatístico de regressão polinomial da resistividade - CP3.....60
Figura 30 - Valores da Constante dielétrica em função da Temperatura para frequências de 1 kHz.....61
Figura 31 - Valores da Constante dielétrica em função da Temperatura para frequências de 10 kHz.....62
Figura 32 - Valores da Constante dielétrica em função da Temperatura para frequências de 100 Hz.....63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ficha técnica do HP-50 (grafeno).....39
Tabela 2 - Composições utilizadas na produção dos corpos de prova. 40
Tabela 3 - Valores dos ensaios térmicos dos corpos de prova realizados a 25 °C. 65
Tabela 4 - Valores de Band Gap encontrados dos materiais sinterizados.....66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ABX_3	Fórmula de célula unitária tipo perovskita
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ASTM	American Society for testing and Materials
$BACO_3$	Carbonato de bário
$BaTiO_3$	Titanato de bário
$BaZrO_3$	Zirconato de bário
BET	Analizador de área e porosidade (Brunauer, Emmett e taller)
Bi_2O_3	Óxido de bismuto (III)
CDTN	Centro de desenvolvimento de tecnologia nuclear
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CILAS	Analisador de partículas a laser
CoO	Óxido de cobalto
CP	Composição
Cr_2O_3	Óxido de cromo (III)
CVD	Deposição química a vapor
DDP	Diferença de potencial elétrico
DEMAT	Departamento de Engenharia de Materiais
DRS	Espectroscopia de reflectância difusa
Eg	Energia de bandgap
GRA	Grafeno
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
H-SiC	Monocristal tipo hidrogênio e carbeto de silício
ICDD	Internacional Centre for Diffraction Data
$KMnO_4$	Permanganato de potássio
La_2O_3	Óxido de lantânio
LCR	Medidor de indutância, capacitância e resistência elétrica
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MnO_2	Dióxido de manganês
$NaNO_3$	Nitrato de sódio
Nb_2O_5	Pentóxido de nióbio (V)

NiO	Óxido de níquel
NTCR	Negative temperature coeffcient resistor
PbO	Óxido de chumbo
PMFC	Protón membrane fuel cell
PTCR	Positive temperature coeffcient resistor
PVA	Álcool polivinílico
Sb_2O_3	Trióxido de antimônio
SiC	Carbeto de silício
SiO_2	Dióxido de silício
SOFC	Solic oxide fuel cell
Ta_2O_5	Pentóxido de tântalo
Tc	Temperatura de Curié
TiO_2	Dióxido de titânio
TPa	Tera Pascal
UV-vis	Espectroscopia de absorção na região do ultra violeta visível
VDR	Voltage depend of resistance
WO_3	Trióxido de tungstênio
ZnO	Óxido de zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
2 OBJETIVOS 17
2.1 Objetivo Principal 17
2.2 Objetivos Específicos 17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
3.1 Semicondutores 18
3.2 Titanato de Bário 21
***3.2.1 Características gerais* 21**
***3.2.2 Métodos de síntese do titanato de bário* 22**
3.3 Grafeno 24
***3.3.1 Características gerais* 24**
***3.3.2 Métodos de síntese do grafeno* 26**
***3.3.3 Aplicação do grafeno* 28**
3.4 Aplicações de Cerâmicas Semicondutoras 29
3.5 Estudos Relevantes Sobre Cerâmicas Semicondutoras 31
3.6 Métodos de Medidas de Propriedades das Cerâmicas Semicondutoras e Condutoras 33
***3.6.1 Resistência e resistividade elétrica* 33**
***3.6.2 Constante dielétrica relativa ou permissividade relativa* 35**
***3.6.3 Condutividade térmica* 36**
4 METODOLOGIA 38
4.1 Matérias-Primas 38
4.2 Distribuição do Tamanho de Partículas por Difração a Laser 40
4.3 Composição e Produção dos Corpos de Prova 40
4.4 Difração de Raios X e Tamanho de Cristalitos 41
4.5 Densidade bulk e Porosidade Total 42
4.6 Resistência Mecânica à Flexão 43
4.7 Medições Elétricas 43
4.8 Condutividade Térmica 46
4.9 Determinação do *Band Gap* 47
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 48
5.1 Análise Granulométrica por Difração a Laser das Matérias-Primas 48

5.2 Análise Visual das Peças Sinterizadas 50
5.3 Caracterização das Peças por Difração de Raios X e Tamanho de Cristalitos 51
5.4 Densidade bulk e Porosidade Total 53
5.5 Resistência Mecânica à Flexão 56
5.6 Resistividade Elétrica 57
5.7 Constante Dielétrica (Permissividade relativa) 60
5.8 Condutividade Térmica 63
5.9 Determinação do *Band Gap* por espectroscopia UV-Vis 65
6 CONCLUSÕES 67
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS 68
REFERÊNCIAS 69
APÊNDICE A – Tamanho de cristalito, largura a meia altura e posições dos picos do difratograma para os corpos de prova CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6 e CP7 80
APÊNDICE B - Valores da temperatura x resistividade e temperatura x constante dielétrica 82
APÊNDICE C – Valores dos ensaios térmicos dos corpos de prova. 92
APÊNDICE D – Análise DRS Uv – Vis dos materiais. 93

1 INTRODUÇÃO

O crescente avanço tecnológico ao longo dos últimos séculos está intimamente ligado ao aumento da pesquisa sobre materiais cerâmicos, impulsionado pela sua ampla utilização. Estes materiais desempenham papéis cruciais tanto nas aplicações tradicionais, como tijolos, telhas e utensílios domésticos, quanto nas avançadas, como na indústria automotiva, médicas, telecomunicações, eletroeletrônica (Segal, 1997; Guan, 2024 e França Júnior, 2022) e aeroespacial (Cerrillo *et al.*, 2024).

As pesquisas sobre cerâmicas avançadas tiveram seu início em torno de 1940, marcado pelo desenvolvimento de cerâmicas à base de alumina (Al_2O_3) para uso em componentes de motores automotivos, e também pelo avanço dos capacitores baseados em titanato de bário - $BaTiO_3$ (Santos *et al*., 2003). Devido às suas propriedades dielétricas significativas, o titanato de bário tem sido amplamente empregado na produção de capacitores multicamadas, termistores de coeficientes de temperatura positiva, transdutores piezoelétricos, dispositivos ópticos e sensores eletroquímicos utilizados em fármacos e sensores eletroquímicos utilizados em fármacos (Wang *et al*., 2015; Sales; Acchar; Costa, 2011; Fróz, 2024).

O desenvolvimento de materiais semicondutores com boa permissividade dielétrica através do processo de dopagem do $BaTiO_3$ com óxidos tem sido objeto de vários estudos, pois esses materiais demonstram maior eficiência quando comparados com sólidos dielétricos convencionais, por apresentarem uma menor perda dielétrica, e também, menor dependência da frequência e temperatura (Yan *et al*., 2019). Entre os óxidos mais estudados estão óxido de níquel (NiO), óxido de zinco (ZnO), dióxido de titânio (TiO_3), pentóxido de nióbio (V) (Nb_2O_5) e dióxido de silício (SiO_2) (Sales, 2019; Wu *et al*., 2002; Sousa *et al*., 2019; Wang *et al*., 2019).

Entre os novos materiais utilizados no desenvolvimento de cerâmicas semicondutoras pode-se citar o grafeno. Pesquisadores do Instituto de Tecnologia da Georgia produziram o primeiro semicondutor funcional de grafeno. Neste estudo, os pesquisadores otimizaram as propriedades semicondutoras de uma forma de grafeno denominada de "grafeno epitaxial" (epigrafeno). Esta forma do grafeno se caracterizada por uma única camada de grafeno que cresce sobre face cristalina do carbeto de silício (SiC). Este estudo permite novas formas de produzir dispositivos

eletrônicos com grafeno, compatível com os métodos convencionais de sinterização no processamento microeletrônico (Zhao *et al.*, 2024).

Dispositivos eletrônicos, como GFET (transistores de efeito de campo de grafeno) têm uma ampla gama de usos no desenvolvimento de aplicações industriais, médicas e de testes químicos. O processo de crescimento de grafeno permite a produção de GFET com vantagens sobre produtos de grafeno de transferência devido à sua alta pureza de grafeno, ausência de contaminantes de polímeros ou metais e conformidade com a espessura da camada de um único átomo (New Science Ventures, 2024). Sensores magnéticos baseados em grafeno são produzidos em massa em processos tradicionais de produção de semicondutores, mapeiam campos magnéticos altos e baixos, com alta precisão, em ambientes com temperaturas extremas, são usados em uma variedade de aplicações, incluindo automotiva, computação quântica (Leading the Way in Graphene Electronics, 2024).

A motivação para a realização deste trabalho é o desenvolvimento de novos compostos cerâmicos com baixa resistividade elétrica e elevada condutividade térmica e capacidade dielétrica. A possibilidade de produzir semicondutores de grafeno abre uma grande possibilidade nos estudos sobre sua utilização, portanto este trabalho pesquisou o comportamento elétrico e térmico de cerâmicas semicondutoras à base de titanato de bário ($BaTiO_3$) com grafeno puro com e sem densificação com dióxido de silício (SiO_2).

A justificativa do trabalho é relevante, por se tratar de estudar o comportamento da inserção de grafeno em materiais com boas propriedades dielétricas, neste caso $BaTiO_3$. Sabe-se que o grafeno possui algumas propriedades semelhantes ao silício, que como semicondutor possibilitou o grande avanço da eletrônica analógica e digital. Portanto, avaliar a possibilidade de inserir o grafeno em um material com propriedades elétricas já estabelecidas, como o titanato de bário, pode contribuir para o desenvolvimento de cerâmicas eletro-eletrônicas com uma menor perda dielétrica. Essas cerâmicas podem representar um enorme potencial para aplicações estruturais e funcionais, como dispositivos eletrônicos, dispositivos termoelétricos, aquecedores, eletrodos ou condutores para processamento de água ou diálise, além disso, elas são capazes de suportar condições ambientais agressivas (Drozdova, 2017).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal

O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades das cerâmicas semicondutoras produzidas à base de titanato de bário com variação da concentração de grafeno (0,50, 0,75 e 1,00 mol %) com e sem adição de dióxido de silício (0,50 mol %), além de desenvolver um sistema para medidas de capacitância, resistividade elétrica, condutividade térmica e constante dielétrica.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar caracterização físico-química das matérias-primas;
- Desenvolver de uma rota para produção de cerâmicas semicondutoras com inserção de grafeno;
- Determinar as propriedades físicas e os tamanhos de cristalitos das cerâmicas produzidas;
- Desenvolver um sistema para fazer medições elétricas em cerâmicas utilizando um medidor LCR com e sem aquecimento;
- Realizar as medidas de capacitância elétrica, resistividade elétrica e constante dielétrica, variando a temperatura (25 °C, 75 °C, 125 °C, 175 °C, 225 °C, 275 °C, 325 °C, 375 °C e 425 °C);
- Determinar a condutividade térmica, resistência à flexão e o *Band Gap* das cerâmicas produzidas;
- Comparar os resultados obtidos com a cerâmica de referência produzida com 98,75 mol % de titanato de bário, 0,75 mol % de pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) e 0,5 mol % de dióxido de silício.

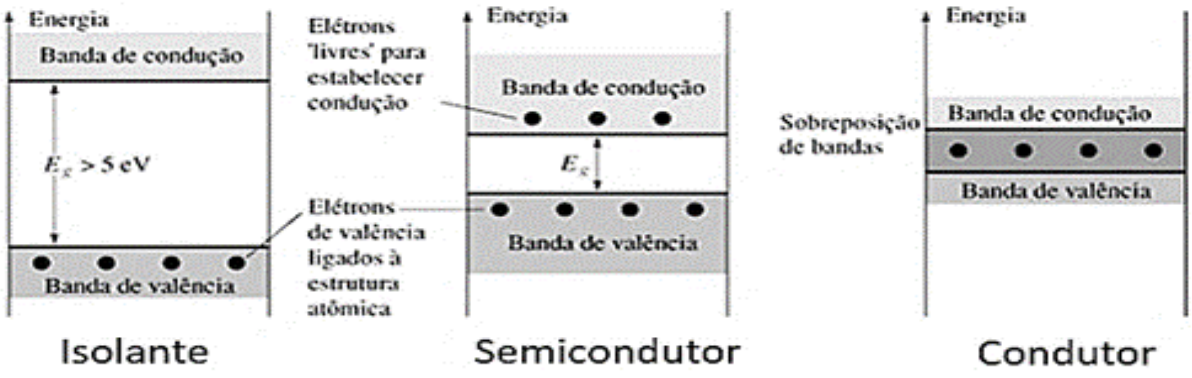
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Semicondutores

Semicondutores são materiais que possuem uma condutividade elétrica intermediária e mensurável que podem aumentar com a temperatura, ou seja, eles podem atuar como um isolante ou como condutor. Para compreender melhor os seus mecanismos de condução, é importante conhecer as suas características físicas e alguns dos princípios da teoria do orbital molecular (Baccaro e Gutz, 2018).

Os sólidos podem ser visualizados como uma união de um grande número de átomos, onde a disposição sucessiva dos átomos resulta na sobreposição dos orbitais adjacentes, formando ligações. Quando muitos átomos se unem para formar um sólido, as energias dos orbitais ficam muito próximas umas das outras, dando origem às bandas de energia (Baccaro e Gutz, 2018). Bandas de energia nos sólidos consistem em níveis de energia com um espaçamento quase contínuo, onde os elétrons podem ocupar. Entre duas bandas de energia consecutivas existe uma região onde não é possível encontrar elétrons, conhecida como *bandgap* ou intervalo de energia entre bandas. O tamanho do *bandgap* é determinante para as propriedades do material, tanto em relação à sua classificação em termos de condutividade elétrica, quanto à ocupação das bandas de energia, conforme ilustrado na Figura 1 (Boylestad e Nashelsky, 2004).

Figura 1 - Diagrama de bandas de energia dos materiais

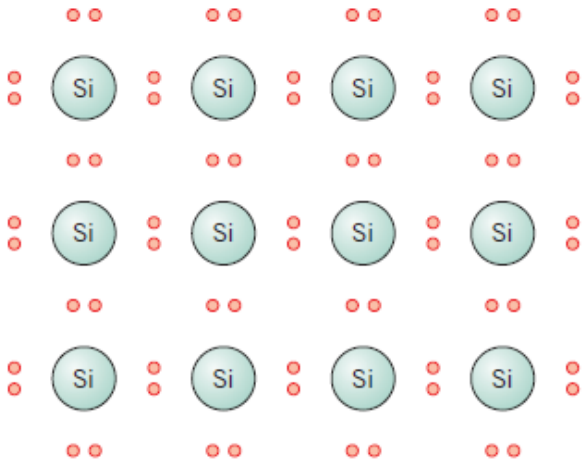


Fonte: Boylestad e Nashelsky (2004).

Na Figura 1, observa-se que para os isolantes, as estruturas de bandas são semelhantes: a banda de condução está vazia e a banda de valência está completamente preenchida com elétrons. Para que esses elétrons se tornem livres, ou seja, passem da banda de valência para a banda de condução, é necessário fornecer uma grande energia (Eg > 5 eV) para superar o "gap" de energia, o espaço entre as duas bandas (Boylestad e Nashelsky, 2004). Nos materiais condutores, as bandas se sobrepõem, não havendo espaço entre elas, permitindo que os elétrons transitem livremente por essas bandas. Para os semicondutores, para que elétrons saltem da banda de valência para a banda de condução, é necessário fornecer energia suficiente para vencer a lacuna de energia (*bandgap*), esta energia é proveniente de uma fonte não elétrica, como luz ou calor, e é proporcionalmente maior do que nos materiais condutores.

Os semicondutores podem ser classificados em intrínsecos e extrínsecos. Os intrínsecos são os semicondutores puros, como ilustrado na Figura 2. Um exemplo é o cristal puro de silício, que é tetravalente, ou seja, possui quatro elétrons no último nível de energia. Devido às ligações covalentes fortemente interligadas entre os átomos, o silício puro é considerado um material isolante (Callister, 2016).

Figura 2 - Semicondutor intrínseco de silício - cristal puro

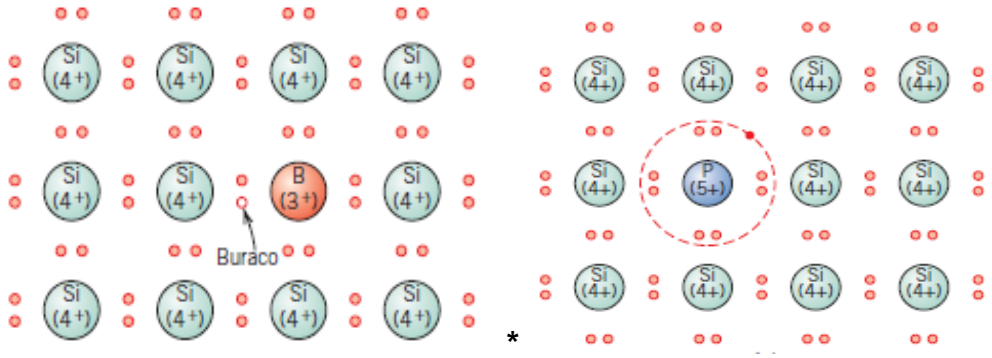


Fonte: Callister (2016).

Os semicondutores extrínsecos são os dopados, que podem ser do Tipo P (semicondutor dopado positivamente) ou do Tipo N (semicondutor dopado negativamente). No Tipo P, o dopante mais comum é o boro, uma impureza trivalente da coluna III-A da tabela periódica, que possui três elétrons no último nível de energia.

Na Figura 3(a), é possível observar a formação de lacunas, que representam a ausência do elétron esperado na ligação covalente. Por outro lado, no semicondutor Tipo N, utiliza-se, por exemplo, o fósforo como dopante, uma impureza pentavalente da coluna V-A da tabela periódica, que possui cinco elétrons no último nível de energia. Na Figura 3(b), nota-se a presença de um elétron livre adicional para completar a ligação covalente, gerando um excesso de carga negativa (Callister, 2016).

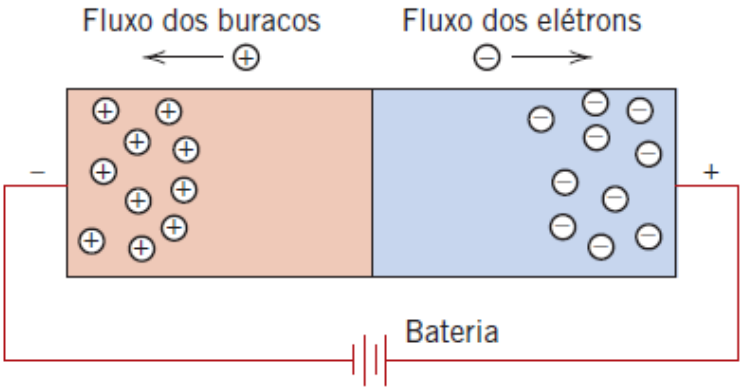
Figura 3 - Semicondutor extrínseco dopado (tipo p) com boro (a) e semicondutor extrínseco dopado (tipo n) com fósforo (b)



Fonte: Callister (2016).

Ao unir um semicondutor do Tipo P (receptores de elétrons) com um semicondutor do Tipo N (doadores de elétrons), utilizando uma bateria na qual o polo positivo é conectado ao semicondutor Tipo P e o polo negativo ao semicondutor Tipo N, resulta na formação da junção P-N, conforme ilustrado na Figura 4. Essa junção está polarizada diretamente, criando uma pequena barreira de potencial conhecida como camada de depleção. Essa camada de depleção é a região em torno da junção P-N, entre o semicondutor P e o semicondutor N, onde existem poucos portadores de carga (lacunas ou elétrons). Essa estrutura marca o início da eletrônica analógica com diodos semicondutores e transistores. A junção P-N descrita é um exemplo de homojunção, que é a interface entre dois semicondutores do mesmo material. Uma característica importante da homojunção é o controle de precisão eletroeletrônica nos dispositivos tecnológicos. Por outro lado, as heterojunções são interfaces entre semicondutores do Tipo N e do Tipo P, mas com materiais diferentes (Gonçalves, 2022).

Figura 4 - Junção PN com polarização direta



Fonte: Callister (2016).

3.2 Titanato de Bário

3.2.1 Características gerais

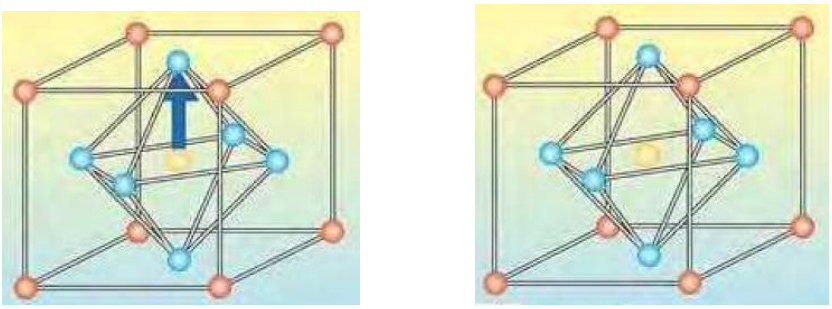
O titanato de bário possui uma célula unitária do tipo perovskita, com uma característica cristalina de fórmula ABX_3. Este material é amplamente utilizado na indústria eletroeletrônica devido a várias propriedades de interesse nesta área. Ele é dielétrico, exibindo ferroeletricidade e apresentando polarização espontânea resultante do momento dipolo até aproximadamente 120 °C - temperatura de Curie (Deng *et al*., 2024).

Acima da temperatura de Curie (Tc), o titanato de bário se comporta como um material paraelétrico, que pode ser polarizado com a aplicação de um campo elétrico externo, mantendo uma estrutura tetragonal até essa temperatura. Além disso, o titanato de bário possui boa piezoeletricidade e alta constante dielétrica (Callister, 2016). Sendo um material ferroelétrico com elevada constante dielétrica em temperatura ambiente, o titanato de bário é amplamente utilizado na fabricação de capacitores multicamadas, termistores com coeficientes de temperatura positiva (PTC), transdutores piezoelétricos e uma variedade de dispositivos ópticos (Sea-fue *et al*., 2015; Mancini; Paulin Filho, 2007).

O titanato de bário pode ter as estruturas cristalinas tetragonal e cúbica, dependendo da temperatura que é submetido. A transição da estrutura tetragonal para

a estrutura cúbica ocorre em torno de 125 °C, aproximadamente. Na Figura 5, essas duas estruturas cristalinas são evidenciadas.

Figura 5 - Estrutura cristalina tetragonal (a) e estrutura cristalina cúbica (b)



(a) **(b)**

Fonte: Ertug (2012).

O $BaTiO_3$ pode ser considerado um semicondutor do tipo extrínseco, cuja resistividade varia em função da temperatura. Geralmente, utiliza-se dopantes como La_2O_3, Sb_2O_3, Nb_2O_5 e óxidos de terras raras. Quando dopado com esses óxidos metálicos, o $BaTiO_3$ tende a aumentar sua constante dielétrica em ordens de grandeza de 10^3 a 10^4, e a resistividade tende a diminuir, para valores entre 10 e 10^4 Ω cm, assumindo assim características de material semicondutor (Hsiu-fung, 1989; Pu *et al*., 2005).

Pesquisas demonstraram que a constante dielétrica das cerâmicas produzidas com $BaTiO_3$ puro está fortemente relacionada ao tamanho de grão (Mendes *et al*., 2002). O titanato de bário, com grãos de aproximadamente 1 μm, pode exibir uma constante dielétrica entre 3.500 e 4.000 em temperatura ambiente. É importante ressaltar que o tamanho dos grãos depende do método de síntese utilizado, (Arlt *et al*., 1985), e possui densidade teórica no valor de 6,004 g/cm^3 (Sena *et al*., 2021).

3.2.2 Métodos de síntese do titanato de bário

Segundo Bacci (2011), os métodos de obtenção do titanato de bário ($BaTiO_3$) encontradas na literatura são bastante diversos, e o sucesso das sínteses depende da pureza dos pós utilizados e da morfologia da estrutura cristalina das fases formadas, o que influencia nas propriedades do material. Entre os métodos pode-se

citar o método convencional de reação no estado sólido, métodos químicos e o método Pechini (Bacci, 2011).

No método convencional de reação no estado sólido, ocorre a moagem da mistura de dois óxidos precursores: carbonato de bário ($BaCO_3$) e dióxido de titânio (TiO_2). Esses materiais são então submetidos a tratamento térmico de calcinação em temperaturas elevadas, geralmente entre 900 °C e 1300 °C (Manzoor e Kim, 2007). Como resultado, são obtidos os pós de $BaTiO_3$, com tamanhos médios de grãos de aproximadamente 1 a 2 μm.

Os métodos químicos para síntese do titanato de bário incluem o sol-gel, hidrotermal, coprecipitação e mecanoquímica. No método sol-gel (Hench e West, 1990) os precursores de óxidos à base de bário e titânio são dispersos em solução, submetidos a agitação e reações de hidrólise que levam à formação de uma dispersão coloidal por reações de condensação, resultando na formação de um gel. Posteriormente, o gel é calcinado a baixas temperaturas, em torno de 80°C, para produzir o $BaTiO_3$ (Guangneng *et al*., 2005).

O método hidrotermal envolve a síntese sob temperatura entre 100°C e 350°C e pressão acima de 100 MPa. Os pós de titanato de bário são produzidos a partir de substâncias iniciais como TiO_2, $TiCl_3$ e $BaCl_2.2H_2O$. Esses pós apresentam alta cristalinidade, com tamanho médio de partícula entre 80 nm e 120 nm para o titanato de bário produzido a partir de $TiCl_3$, e entre 40 nm e 70 nm para o titanato de bário produzido a partir de TiO_2 (Dawson, 1988).

No método de coprecipitação, a precipitação de íons de bário e titânio a partir de seus carbonatos é conduzida para obter homogeneidade química. O filtrado é então tratado termicamente, geralmente até 100 °C, para produzir o titanato de bário (Cheung, 2001). Por fim, o método de síntese mecanoquímica utiliza óxidos de titânio e bário como precursores. Após agitação mecânica com moinho de bolas planetário por cerca de 4 h, o produto final de $BaTiO_3$ é obtido com tamanhos nanométricos (Stojanovic *et al*., 2005).

Cerconi *et al*. (2013) estudaram o método de síntese Pechini para a produção de pós de $BaTiO_3$. Eles concluíram que precursores como isopropdióxido de titânio e cloreto de bário, na presença de quelantes como ácido cítrico e esterificantes com polietilenoglicol, reagem e formam poliésteres de bário e titânio. Com o aquecimento a 120 °C, forma-se um "puff", que é um retículo escuro poroso. Esse retículo é então

submetido a tratamento térmico, calcinação entre 400 °C e 800 °C por 10 h, seguido de moagem. Como resultado, são obtidos os pós de $BaTiO_3$. Foram realizadas caracterizações por difração de raios-X (DRX), que constataram a formação da fase cúbica de $BaTiO_3$, com tamanhos de grãos da ordem de 20 nm.

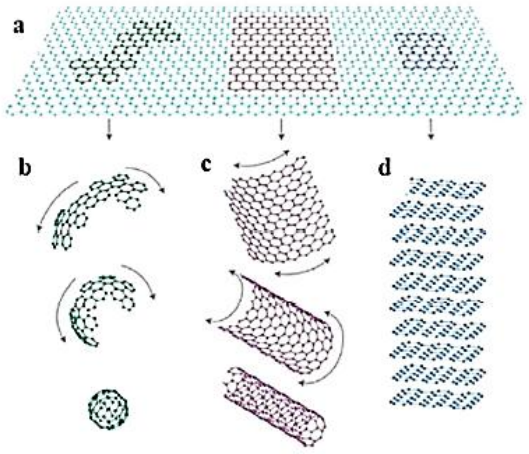
3.3 Grafeno

3.3.1 Características gerais

O grafeno foi isolado, pela primeira vez, em 2004, por pesquisadores da Universidade de Manchester (Novoselov *et al.*,2004). É conhecido por sua estrutura com folhas planas de átomos de carbono, formando uma camada monoatômica, organizada em células hexagonais com átomos de carbono hibridizados na configuração sp^2. Esse tipo de configuração confere ao grafeno propriedades essenciais para diversas aplicações no desenvolvimento de novos materiais (Kuilla *et al.*, 2010; Vieira; Vilar, 2016).

O grafeno, assim como o fulereno, nanotubos e grafite são formas alotrópicas do carbono, como a mesma configuração sp2. Essas formas são visualizadas na Figura 6, pode-se observar que os fulerenos e nanotubos são uma camada de grafeno envolvida numa forma esférica e cilíndrica, respectivamente, e o grafite é uma pilha de folhas alternadas (Phiri *et al*., 2017).

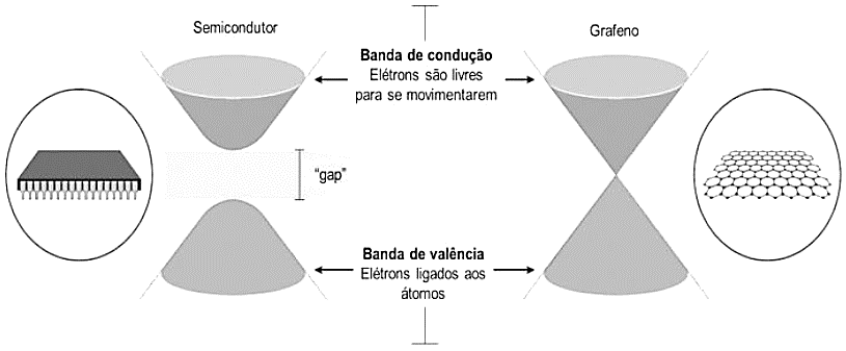
Figura 6 - Alótropos do carbono: a) 2-D grafeno, b) 0-D fulereno, c) 1-D carbono nanotubo, d) 3-D grafite



Fonte: Phiri *et al*. (2017).

O grafeno é considerado hoje o material mais resistente que se tenha conhecimento. Ele apresenta um altíssimo módulo de Young e resistência mecânica, em torno de 1TPa e 130 GPa, respectivamente. Outras propriedades notáveis e vantajosas para diversas indústrias é a alta condutividade térmica do grafeno, que pode atingir 5000 (W/m K) a temperatura ambiente e a alta condutividade elétrica (até 2.10^4 S/cm) e mobilidade eletrônica (2.10^5 cm^2/V s) na monocamada de grafeno se devem à baixa massa efetiva. A principal razão pela qual os elétrons do grafeno podem se movem com facilidade e rapidez é o que *gap* de energia do grafeno é infinitesimal, quando comparado com os isolantes e os semicondutores, conforme Figura 7 (Xu *et al*. 2013).

Figura 7 - Comparação entre o gap de energia de um isolante e semicondutor com o grafeno



Fonte: Xu *et al*. (2013).

O grafeno apresenta alta área superficial, em torno de 2600 (m^2/g), enquanto que grafite e os nanotubos de carbono tem área superficial de, aproximadamente, de 10 m^2/g e 1300 m^2/g, respectivamente. E em termos de propriedades ópticas o grafeno pode absorver parcialmente a luz (2,3 %). Essas características estão intimamente relacionadas às suas propriedades eletrônicas, bem como sua estrutura eletrônica de baixa energia (Vieira; Vilar, 2016).

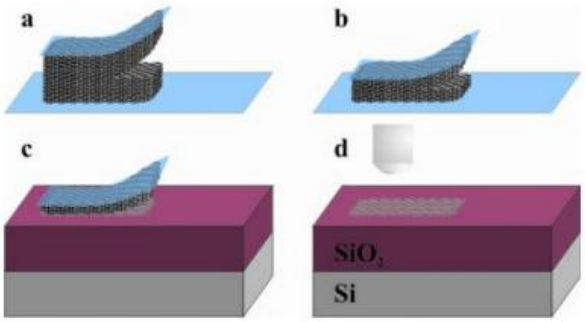
As propriedades do grafeno o tornam promissor em aplicações em circuitos eletrônicos integrados, eletrônica de alta frequência, compósitos poliméricos, optoeletrônica, transistores de efeito de campo, sistemas eletromecânicos, sensores e transdutores, armazenamento de hidrogênio e sistemas de energia eletroquímica (Vieira; Vilar, 2016).

3.3.2 Métodos de síntese do grafeno

Os processos para obtenção do grafeno desenvolvidos e mais utilizados são a esfoliação mecânica, esfoliação química, deposição química em fase vapor e método de crescimento epitaxial sobre SiC (carbeto de silício).

O método por esfoliação mecânica (clivagem micromecânica) como visto na Figura 8, consiste na quebra das forças de Van der Waals responsáveis pelas ligações entre as camadas de grafite. Essa quebra é realizada com uma fita adesiva, a fita é utilizada porque atinge uma força necessária (300 nN/μm²) para esfoliar o grafite (Soldano *et al*., 2010; Novoselov, 2011). Para realizar a esfoliação necessita de um substrato de silício oxidado (Si/SiO_2), fita adesiva, pinças e *flakes* de grafite. Os *flakes* são fixados na fita adesiva com o auxílio da pinça. A fita deve ser puxada cuidadosamente até que a esfoliação do grafite seja visível. Em seguida, a amostra presa na fita é transferida para o Si/SiO_2 e pressionada com suporte da pinça, para eliminar o ar presente entre o substrato e a amostra (Castro, 2011).

Figura 8 - Esquema do processo de esfoliação mecânica: (a) o grafite é colocado sobre a fita adesiva; (b) ocorre o processo de esfoliação: a fita é dobrada várias vezes até que camada de grafita ficar fina; (c) a camada é transferida para o substrato de SiO_2/Si; (d) amostra ultrafina de grafite

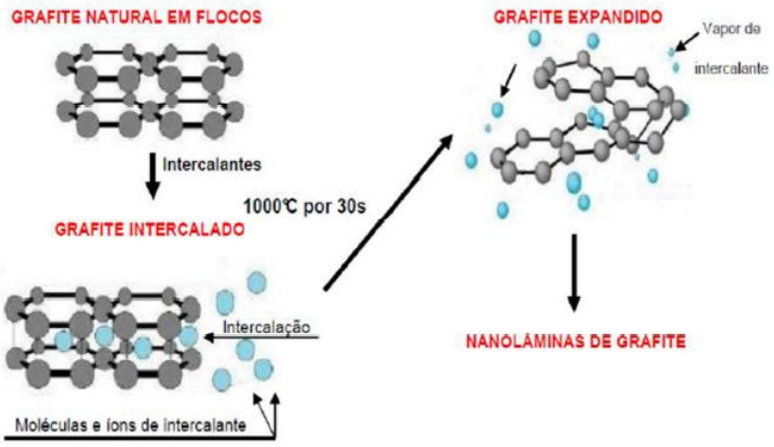


Fonte: Elias (2009).

O método de esfoliação química (Figura 9) utiliza o grafite para obter o óxido de grafeno a partir da diminuição das forças de Van der Waals entre os planos do grafite, existem alguns métodos, o mais usual é o método de Hummers, que por meio da adição de uma solução contendo ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), nitrato de sódio ($NaNO_3$) e permanganato de potássio ($KmnO_4$) à 45 ºC, por 2 h. Após esse tempo, obtêm-se um óxido de grafite com hidroxilas e carboxilas que aumentam sua

hidrofilicidade, desse modo as moléculas de água penetram pelas camadas dispersando o grafite. Em seguida, o processo segue por um tratamento térmico, para eliminar os radicais anexados e reestabelecer a rede característica do grafeno (Stankovich *et al.*, 2007).

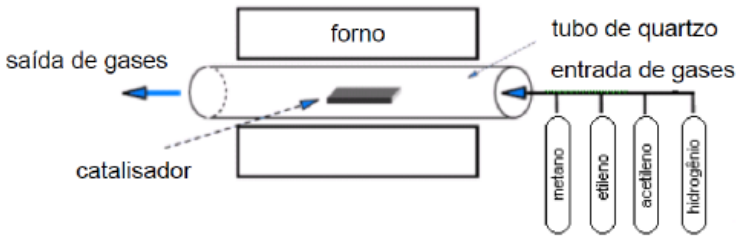
Figura 9 - Esquema geral de esfoliação química para a obtenção do grafeno



Fonte: Castro (2011).

O método de deposição química a vapor (CVD) (Figura 10) consiste na exposição de metais de transição (níquel ou cobre) a um fluxo de gás precursor (metano, etano e propano) em altas temperaturas. As moléculas de gás depositam sobre um substrato de metal ou vidro, em ambiente controlado, formando um filme fino de metal de transição, que age como catalisador, decompondo as moléculas e fornecendo as condições para formação das estruturas de grafeno (Gonçalves, 2013).

Figura 10 - Esquema processo CVD

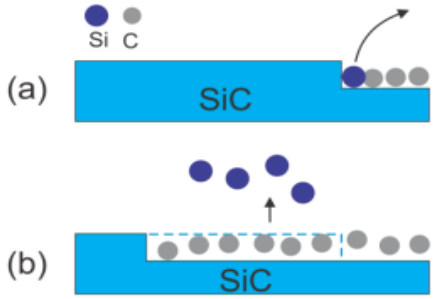


Fonte: Gonçalves (2012).

O método de crescimento epitaxial, mostrado na Figura 11, o grafeno é produzido na terminação de silício (Si) de um monocristal de carbeto de silício (SiC)

por meio da dessorção térmica de silício. Nesse processo, a preparação da superfície do carbeto de silício é realizada por oxidação ou por ataque com hidrogênio (H_2). As amostras são aquecidas utilizando bombardeamento de elétrons em ultra vácuo (pressão de 1 × 10^{-10} Torr) até 1000 °C. Depois, elas são aquecidas a temperaturas que entre 1250 a 1450 °C, por 20 min, nestas condições são formadas finas camadas finas de grafeno (Berger *et al*., 2004).

Figura 11 - Esquema de crescimento de grafeno epitaxial: (a) deixando a superfície rica em carbono (C), que pode se religar formando o grafeno (b) sobre o cristal de SiC, o crescimento da fase grafeno inicia-se pelas bordas dos degraus



Fonte: Antoniazze (2016).

3.3.3 Aplicação do grafeno

Na eletrônica, o grafeno tem sido estudado como um possível substituto do silício nos transistores, devido à sua alta condutividade elétrica e alta mobilidade dos elétrons. Além disso, o grafeno pode ser utilizado na fabricação de telas transparentes e flexíveis, que podem ser aplicadas em dispositivos eletrônicos como smartphones e tablets (Bueno, 2011).

Na área de energia, o grafeno é alvo de estudo como um possível material para armazenamento de energia em baterias e supercapacitores, devido à sua alta capacidade de armazenamento de íons e elétrons. Além disso, o grafeno pode ser utilizado na fabricação de células solares, devido à sua alta eficiência na conversão de luz solar em energia elétrica (Shaker *et al*., 2025).

Na biomedicina, há pesquisas com o grafeno, como material para a fabricação de sensores e biossensores, que podem ser utilizados na detecção de biomoléculas

e células. Além disso, o grafeno pode ser utilizado na fabricação de implantes e próteses médicas, devido à sua alta biocompatibilidade (Maio *et al*., 2021).

Na área de catálise, o grafeno tem sido estudado como um possível material para catalisadores em reações químicas, devido à sua alta área superficial e alta atividade catalítica. Além disso, o grafeno pode ser utilizado na remoção de poluentes em águas e solos, devido à sua alta capacidade de adsorção (Ferreira, 2009).

Na área da construção civil, existem trabalhos com o grafeno, como um possível material para melhorar a durabilidade e as propriedades mecânicas do concreto e de outros materiais de construção. Adicionar grafeno em pequenas quantidades aos materiais de construção pode aumentar sua resistência à compressão e à tração, além de reduzir a permeabilidade e melhorar a durabilidade, resistência a intempéries e resistência ao fogo (Marcondes, 2012).

O grafeno também pode ser utilizado na fabricação de sensores de deformação, que podem ser utilizados para monitorar a integridade estrutural de edifícios e outras estruturas. Além disso, o grafeno pode ser utilizado na fabricação de revestimentos anticorrosivos, que podem ser aplicados em superfícies metálicas para protegê-las contra a corrosão (Gharbi *et al*., 2024).

A aplicação mais recente do grafeno foi desenvolvida por pesquisadores do Instituto de Tecnologia da Georgia, que conseguiram produzir o primeiro semicondutor funcional de grafeno. Essa descoberta pode revolucionar o setor de chips, uma vez que os resultados mostraram que o semicondutor de grafeno tem uma mobilidade eletrônica 10 vezes maior do que a produzida com silício, possibilitando um avanço tecnológico em relação aos outros chips. Nessa pesquisa, foi utilizada uma forma de grafeno denominada "grafeno epitaxial" (epigrafeno). Segundo os pesquisadores, o grafeno epitaxial poderá provocar uma grande mudança no campo da eletrônica, permitindo a criação de novas tecnologias (The Wall Street Journal, 2024).

3.4 Aplicações de Cerâmicas Semicondutoras

Os estudos sobre materiais cerâmicos tradicionais e avançados tem contribuido para o aumento da sua utilização em diversas áreas, além de proporcionar a melhoria das propriedades dos produtos já desenvolvidos. Apesar das cerâmicas serem tradicionalmente consideradas materiais isolantes, as pesquisas nesta área

buscaram o desenvolvimentos de novos materiais cerâmicos que exibem propriedades semicondutoras, supercondutoras, piezoelétricas e magnéticas. Dentre as aplicações mais comuns de cerâmicas semicondutoras pode-se citar: varistores e termistores (Boylestad; Nashelsky, 2004).

O varistor (VDR – *voltage, dependent, resistance*) é um dos materiais mais importantes na indústria eletrônica, porque quando há elevação de cargas elétricas indesejáveis em circuitos elétricos e/ou descargas atmosféricas, este aumento de corrente eletrica gerada é desviada para varistor. Como ele é um elemento não-Ôhmico e tem propriedades que não segue a lei de Ohm (Callister, 2007) e apresenta uma resistência muito elevada em seus terminais, que varia conforme a tensão que é aplicada, isto implica que, quando essa tensão atinge o valor específico, a resistência diminui drasticamente, sendo fundamental para proteção de circuitos de entrada de alimentação.

Termistores são resistores de eletrocerâmicas sensíveis a temperaturas, que provoca uma variação da resistência elétrica e baixa condutividade de térmica. Podem ser classificados em dois tipos: PTCR e NTCR. Os NTCR (*negative temperature coefficient resistor*) são aqueles que quando aumenta a temperatura sua resistividade elétrica diminue e os PTCR (*positive temperature coefficient resistor*) são aqueles que quando aumenta a temperatura, a resistividade elétrica também aumenta. A resistência ôhmica do termistor diminui nas cerâmicas NTCR, quando elas são submetidas a elevação da temperatura, ou seja, elas dissipam mais potência, assim aumentará a circulação de corrente elétrica, sendo que o contrário acontece com o PTCR. Ambos dispositivos tem aplicações em termostatos, alarmes, ar-condicionado e medições da temperatura de líquidos refrigerantes de motores. Além de importantes aplicações em eletrodos (anodo e catodo) de cêlulas de combustíveis (Gralik; Biava, 2019).

A aplicações das cerãmicas condutoras podem ser verificadas em transductores piezoelétricos, que são materiais que convertem uma energia mecânica em energia elétrica pela vibração dos cristais. Como exemplo pode-se citar os transductores ultrassônicos de contato que são usados na indústria metalúrgica, para detecção de falhas em diversos materiais e os de emersão usados em testes submersos (Carmo, 2011).

3.5 Estudos Relevantes Sobre Cerâmicas Semicondutoras

Os primeiros varistores desenvolvidos foram à base de carbeto de silício (SiC). Eles consistiam em SiC compacto e parcialmente sinterizado, porém, eram de baixa qualidade. Esses varistores foram produzidos nos anos 30 e utilizados em retificadores de selênio para proteção de sistemas telefônicos (Clarke, 1999).

Em 1969, Matsuoka desenvolveu varistores à base de ZnO (óxido de zinco) com propriedades superiores aos de carbeto de silício. Essas cerâmicas tinham em sua composição 97 % ZnO + 0,5 % Bi_2O_3 (óxido de bismuto (III)) + 1,0 % Sb_2O_3 (trióxido de antimônio) +0,5 % CoO (óxido de cobalto) + 0,5 % MnO_2 (dióxido de manganês) + 0,5 % Cr_2O_3 (óxido de cromo (III) (% mol) e possuíam uma complexa microestrutura, com fases o ZnO, espinélio ($Zn_7Sb_2O_{12}$) e pirocloro ($Zn_2Bi_3Sb_3O_{14}$) sendo predominantes (Matsuoka, 1971).

Varistores com alto grau de não linearidade (α) entre corrente e tensão foram desenvolvidos com matrizes cerâmicas à base de SnO_2 (dióxido de estanho), TiO_2 (dióxido de titânio) e WO_3 (trióxido de tungstênio), dopadas com diferentes óxidos metálicos (Antunes *et al*., 2000; Pianaro *et al*., 1995). Os varistores de WO_3 foram produzidos utilizando os dopantes Na_2CO_3 (carbonato de sódio) e MnO_2 (dióxido de manganês) e apresentaram um valor de coeficiente de não linearidade (α) de 7 (Makarov e Trontelj, 1994). Entretanto, os varistores de SnO_2, utilizando como dopantes o CoO (óxido de cobalto), Nb_2O_5 (pentóxido de nióbio (V)), Cr_2O_3 (óxido de cromo (III)) e Ta_2O_5 (pentóxido de tântalo), obtiveram um valor de coeficiente de não linearidade de 40 (Semancik e Fryberger, 1990; Antunes *et al*., 1998; Pianaro *et al*., 1995).

Em 1982, os pesquisadores Yan and Rhodes desenvolveram um varistor tendo como matriz de base o TiO_2 e dopadas com óxidos de nióbio e bário. Obtendo-se um varistor de baixa tensão (1 a 20 V) como coeficiente de não linearidade entre 3 e 7. Em 1993, Yang desenvolveu varistores de TiO_2 dopados com óxidos de bário e bismuto com melhores propriedades elétricas. Wu e Lai (1991) avaliaram o efeito do PbO (óxido de chumbo) sobre o sistema TiO_2.Nb_2O_5, observando que as melhores propriedades elétricas foram obtidas utilizando entre 0,25 a 1 % de PbO, com valores de α de 7,6.

No estudo conduzido por Pereira *et al*. (2006), foram dopadas matrizes cerâmicas à base de titanato de bário com lantânio, que utilizam concentrações de 0,2 mol %, 0,4 mol %, 0,6 mol %, 0,8 mol %, e 1,0 mol %. Observou-se um aumento no tamanho de grão à medida que a concentração de lantânio aumentava. Além disso, o maior coeficiente de temperatura (αm) foi obtido com uma concentração de 0,8 mol %.

Andrade e Muccillo (2011) avaliaram os efeitos de uma matriz cerâmica à base de zirconato de bário ($BaZrO_3$) dopada com ítrio, na qual ainda foram adicionados óxido de boro e óxido de zinco. O objetivo do estudo era desenvolver uma cerâmica para aplicação em eletrólitos sólidos de células de combustível de óxido sólido (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC), que opera em temperaturas intermediárias (600-800 °C) e elevadas (> 800 °C). A cerâmica dopada com 5 % em peso de óxido de zinco (ZnO) apresentou a menor resistividade elétrica, de 30 kΩ cm, enquanto dopada com 1% em peso de óxido de boro (B_2O_3) apresentou resistividade elétrica de 38 kΩ cm. Ambas as cerâmicas foram sinterizadas a 1500 °C, e as medições foram realizadas a 600 °C. Os resultados mostraram que tanto o óxido de zinco quanto o óxido de boro foram eficientes para obter compostos com menores valores de resistividade elétrica.

Carvalho e Sales (2019) avaliou matrizes cerâmicas à base e titanato de bário ($BaTiO_3$) dopados com pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) e dióxido de silício (SiO_2), com compactação dos pós à pressão de 200 MPa e temperatura de sinterização de 1350° C, com finalidade de investigar medidas de resistividade e constante dielétrica em função da temperatura (de 30 a 200 ºC). Verificou-se que, para concentrações de 0,5 mol % de SiO_2 e 0,75 mol % de Nb_2O_5 e temperaturas entre 130 ºC e 200 ºC, obteve valores com alta magnitude de constante dielétrica na ordem de 10^5, e boa resistividade elétrica com valores de aproximadamente 10^3 Ω.m, em todo o intervalo de temperatura, com evidências de características de um bom semicondutor. O Nb_2O_5 atuou na microestrutura do $BaTiO_3$ e promoveu a inibição no crescimento dos grãos, com elevação da constante dielétrica do material, o que é desejável na indústria eletrônica.

No estudo conduzido por Carvalho *et al*. (2022), foi investigada a dopagem de matrizes cerâmicas à base de $BaTiO_3$ dopadas com dióxido de silício (SiO_2) e óxido de bismuto (Bi_2O_5) para aplicação em dispositivos de armazenamento de energia com alta constante dielétrica, como termistores, que possuem resistência elétrica variável.

Foram utilizadas três concentrações diferentes: $BaTiO_3$ + 1 mol % SiO_2 + 0,75 mol % Bi_2O_3; $BaTiO_3$ + 0,5 mol % SiO_2 + 0,75 mol % Bi_2O_3; e $BaTiO_3$ + 1 mol % SiO_2 + 0,75 mol% Bi_2O_3. O objetivo era avaliar a constante dielétrica e a resistividade elétrica em altas temperaturas, variando de 20 ºC a 200 ºC. Os resultados mostraram que, em temperaturas de 30 ºC a 200 ºC, a resistividade elétrica permaneceu praticamente constante, com um valor aproximado de 1000 Ω m, sendo essa a menor resistividade entre as três dopagens. Quando aumentou a concentração de dióxido de silício de 0,5 mol % para 1 mol % em 0,75 mol % de Bi_2O_3 no $BaTiO_3$, a resistividade aumentou, aproximadamente, 20 vezes de forma constante em todas as medições de temperatura. Além disso, foi observado que ao dobrar a concentração de SiO_2 e manter a concentração de Bi_2O_3, os grãos diminuíram de 12 μm para 10 μm, o que resultou em aumento da resistividade elétrica.

Nogueira (2023) avaliou processos de fabricação de varistores e constatou que existem algumas técnicas na literatura para produção, entre elas pode-se citar: método sol-gel (Chu, 2000), técnica de impressão 3D (Thver, 2002) e método padrão de sinterização em estado sólido (Eda, 1989), que foi o método que apresentou melhores resultados.

O surgimento de cerâmicas à base de titanato de bário, com altas constantes dielétricas (Er ≈ 2000-10000) e pequena espessura na ordem de 10^{-3} m, possibilitou inúmeras aplicações. Com essas características os capacitores poderiam ser usados em uma grande variedade de circuitos integrados, que incluem elementos de circuito de armazenamento e em entrada e saída de circuitos acoplamento (Deng, 2024).

3.6 Métodos de Medidas de Propriedades das Cerâmicas Semicondutoras e Condutoras

3.6.1 Resistência e resistividade elétrica

A resistividade é uma propriedade dos materiais em que quantifica a resistência da passagem da corrente elétrica e é representada pelo símbolo grego ρ, tem unidade de medida Ω m (Sistema Internacional). Essa propriedade é muito importante na seleção e no projeto de materiais para aplicações elétricas e

eletrônicas, pois permite determinar a eficiência de um material na condução da corrente elétrica e no controle de perdas energéticas (Callister, 2007).

A resistividade pode ser calculada em função da resistência elétrica do material (Callister, 2007), neste caso, utiliza-se a Equação 1:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (1)$$

Onde A é a área da seção transversal para amostra retangular (m^2), L é o comprimento da peça (m), e R é a resistência elétrica (Ω).

Existem outros métodos para calcular a resistividade, entre eles, pode-se citar os métodos diretos e métodos comparativos, estes dois normalmente utilizados para a medição de altas resistividades. No método direto, são realizadas medidas simultâneas da tensão aplicada a um material com resistividade desconhecida e da corrente que passa por ele, utilizando um voltímetro e um amperímetro. Esse método pode ser empregado com corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), utilizam configurações de dois, três ou quatro pontos de contato. Por outro lado, no método comparativo, estabelece-se uma relação entre a resistividade de um material conhecido e a do material desconhecido, comparando as medidas de corrente quando ambos são submetidos à mesma tensão (NBR-5403, 1983; Blumental; Seitz, 1974).

No método DC de duas pontas, uma voltagem constante ou uma corrente constante é aplicada sobre o material, a tensão elétrica (V) e a corrente (I) são medidas e a condutividade σ é calculada (Equação 2). Este método é utilizado para materiais homogêneos e altíssima resistividade ($\rho > 10^8$ Ω cm):

$$\sigma = \frac{eI}{AV} \quad (2)$$

Onde: *e* é a espessura da amostra (m); *A* é a área da secção perpendicular à direção da corrente (m^2).

O método AC das duas pontas método é utilizado quando existem resistências de contato ou quando existe valores considerados de condutividade iônica. Neste método a variação da frequência permite eliminar os efeitos de contato e diferenciar o fluxo eletrônico do iônico. O método *AC* e *DC* das três pontas é utilizado para diferenciar o processo de condutividade superficial do volumétrico. E o método das quatro pontas é o mais para medidas em condutores metálicos e

semicondutores, pois elimina efeito ôhmico dos contatos ou camadas de resistência entre o eletrodo e a amostra.

Girotto (2002) relatou a utilização de medições de resistividade elétrica em correntes contínuas (DC) de materiais, o estudo demonstrou alguns métodos. O método de 2 pontas, sabendo as dimensões de um material retangular, é utilizado uma fonte DC, um amperímetro em série e um voltímetro em paralelo, e realizado as medidas de resistência e resistividade elétrica, pela lei de ohm (Callister, 2016):

$$R = \frac{V}{I} \tag{3}$$

$$\rho = \frac{RA}{L} \tag{4}$$

Outro Método, é do eletrômetro que é o mesmo processo do método de 2 pontas, mas é recomendado o uso de “gaiola de Faraday” em materiais de altas resistências, com finalidade de diminuir as interferências com ruídos, etc. No método de 4 pontas onde é disposto na peça quatro pontas de prova separadas por distâncias iguais, é utilizado no circuito um amperímetro, um voltímetro, uma fonte DC, e faz os cálculos da resistência e resistividade. O autor informa a usabilidade em metais e semicondutores, mas não é citado a utilização desse método para medições em altas temperaturas de cerâmicas, em que exige um complexo arranjo no interior dos fornos, conexão das pontas de prova nas cerâmicas e fiações. E informa, também, que a escolha do método é do pesquisador e depende de cada perfil específico do experimento (Girotto, 2002).

3.6.2 Constante dielétrica relativa ou permissividade relativa

A constante dielétrica ou permissividade relativa evidencia a capacidade de um material armazenar carga elétrica, quando submetido a um campo elétrico, em relação ao vácuo. Além disso, é muito importante na em outras propriedades elétricas dos materiais, como velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas, constante de tempo de carga e descarga, e em resistência elétrica de materiais dielétricos.

Para determinar a constante dielétrica é necessário determinar sua capacitância elétrica (Callister, 2007), após a medida da capacitância calcula-se o valor da constante dielétrica relativa (E_r) utilizando a Equação 5:

$$E_r = \frac{CL}{EoA} \quad (5)$$

Onde *C* é a capacitância elétrica (F), *L* é o comprimento da amostra (m), *A* é área seção transversal da amostra (m^2) e Eo é a constante dielétrica absoluta no vácuo igual a 8,85 x 10^{-12} c^2 N^{-1} m^{-2} no SI.

3.6.3 Condutividade térmica

Condutividade térmica é a propriedade de um material transferir calor de um local de maior temperatura para outro de menor temperatura. Em materiais cerâmicos, a condução térmica ocorre de três formas: por sincronismo de vibração dos átomos que são energias vibracionais atômicas chamada de fónons, funcionam como ondas que propagam pelo material na condução do calor; por radiação; e por elétrons livres, este último ocorre somente em cerâmicas dopadas. Segundo Shackelford (2008), materiais com elevadas condutividades térmica como grafeno, com 5000 W/m K apresentam valor elevado, comparado com metais como o cobre e a prata, estes possuem condutividade térmica de 398 e 428 W/m K, respectivamente (Callister, 2016). A porosidade dos materiais tem grande interferência na condutividade térmica, materiais com finalidade de aplicação em isolamento térmico normalmente são porosos.

De acordo com Santos (2002) pode-se dividir os métodos para a medição da condutividade térmica de um material em diretos e indiretos. Os métodos diretos são aqueles que medem diretamente a condutividade térmica, por exemplo o método calorimétrico de placa quente - placa fria. Os métodos indiretos medem experimentalmente uma determinada propriedade do material, por exemplo a difusividade térmica, e obtém-se o valor da condutividade térmica a partir dessa propriedade. Outro método de medida de condutividade térmica que depende da difusividade térmica é o método Flash (Parker, 1961). Este método consiste na incidência de um pulso de energia radiante e de curta duração sobre uma das faces da amostra, sendo medida a variação de temperatura na face oposta. Neste caso, o pulso de energia provoca um pequeno aumento de temperatura no interior do material, suficiente para considerar as propriedades físicas constantes (Parker, 1961).

Incropera *et al*. (2008) demonstrou que para obter valores de propriedades térmicas, pode-se utilizar amostras em formato cilíndrico, com diâmetro de 12mm e espessura de 3 mm. As medidas necessárias para determinação da condutividade térmica são a difusividade térmica do material (α) em m^2/s e o calor específico (Cp) em J/kg K, e desta forma, sabendo-se a densidade relativa (ρ) do material, pode-se calcular a condutividade térmica (k) em W/m °C, utilizando a Equação 6:

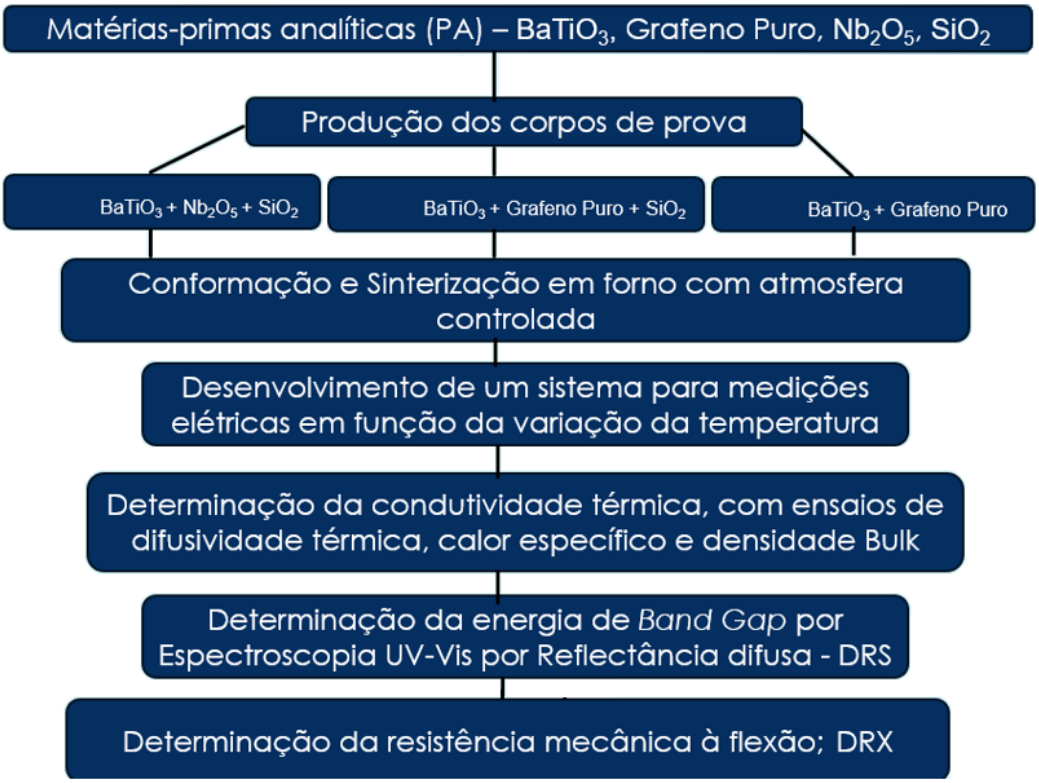
$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \tag{6}$$

Quanto maior for a difusividade térmica, mais rápida será a propagação de calor no material, assim um pequeno valor de difusividade indica que a maior parte do calor foi absorvido e uma pequena parte foi dissipada, enquanto materiais condutores possuem elevadas difusividades e condutividades térmicas.

4 METODOLOGIA

A meta deste estudo foi analisar o comportamento elétrico, térmico e mecânico (ensaio à flexão) de cerâmicas semicondutoras à base de $BaTiO_3$ com inserção de grafeno, em relação à variação de temperatura. Para isso, foi realizado um processo de fabricação de corpos de prova utilizando $BaTiO_3$, grafeno (GRA), pentóxido de nióbio (V) (Nb_2O_5) e dióxido de silício (SiO_2). O fluxograma (Figura 12) detalha a metodologia que foi adotada nesta pesquisa.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: próprio autor.

4.1 Matérias-Primas

As matérias-primas utilizadas são puras analíticas (PA), isso se faz necessário pelo fato deste trabalho estar relacionado com o desenvolvimento de cerâmicas tecnológicas (cerâmicas avançadas), onde a pureza das matérias-primas e granulometria são propriedades essenciais. A seguir são descritas as características de cada uma das matérias-primas:

1- Titanato de bário ($BaTiO_2$): fornecido pela Sigma-Aldrich Brasil Ltda, com 99% de pureza, densidade de 6,02 g/cm^3 e granulometria menor que 3 micrometros. Foi realizada uma análise de tamanho de partículas por difração a laser para verificar a sua distribuição granulométrica;

2- Pentóxido de nióbio (Nb_2O_5): fornecido pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, com 99,1 % de pureza. Como não foi fornecida a granulometria, foi necessário realizar uma análise de tamanho de partículas por difração a laser;

3- Dióxido de silício (SiO_2): fornecido pela Êxodo Cientifica, com 96 % de pureza. Como não foi fornecida a granulometria, foi realizada uma análise de tamanho de partículas por difração a laser para verificar a sua distribuição granulométrica;

4- Grafeno (HP-50) (GRA): Fornecido pela Hexo Graphene Indústria Química LTDA. Na Tabela 1, é mostrada a ficha técnica, mas pode-se observar que não foi fornecida a granulometria, portanto, também foi realizada uma análise de tamanho de partículas por difração a laser para verificar a sua distribuição granulométrica.

Tabela 1 - Ficha técnica do HP-50 (grafeno)

	Parâmetros	**Resultados**
Espectroscopia Raman	Razão (I2d/Ig)	0,42
	La (nm)	41,5
Análise termogravimétrica	C (% m/m)	99,53
	Resíduo (% m/m)	0,47
	Temperatura de Combustão (ºC)	659,01
Análise Elementar	% C	98,56
	% H	0,05
	% N	0,04
Aparência (cor)	-	Preto

Fonte: Hexo Graphene Indústria Química LTDA (2023).

4.2 Distribuição do Tamanho de Partículas por Difração a Laser

A análise granulométrica por difração a laser das matérias-primas foi realizada com utilização de analisador de partículas a laser CILAS® modelo 1090 de alta precisão. O equipamento apresenta faixa analítica de 0,04 a 500 micrômetros, 64 detectores e 100 classificações de tamanhos de partículas e dois emissores de laser para cobrir uma grande faixa analítica. Foi aplicado, como modelo de difração, a teoria de Fraunhofer conforme Norma ISO-13320-1.

4.3 Composição e Produção dos Corpos de Prova

Foram produzidos corpos de prova produzidos à base titanato de bário ($BaTiO_3$) variando a concentração de grafeno (GRA) com e sem adição de dióxido de silício (SiO_2) e também foi confeccionado o corpo de prova de referência para realizar as comparações dos resultados. As composições utilizadas podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composições utilizadas na produção dos corpos de prova

Corpos de Prova	$BaTiO_3$ (mol%)	Nb_2O_5 (mol%)	SiO_2 (mol%)	GRA (mol%)
CP1 (Referência)	98,75	0,75	0,50	--
CP2	98,50	--	0,50	1,00
CP3	98,75	--	0,50	0,75
CP4	99,00	--	0,50	0,50
CP5	99,00	--	--	1,00
CP6	99,25	--	--	0,75
CP7	99,50	--	--	0,50

Obs.: Em todas as composições foi adicionado 1 % m/m do ligante álcool polivinílico (PVA).

Fonte: próprio autor.

A composição de referência (CP1) foi baseada nos estudos realizados por Carvalho e Sales (2019), que avaliaram as propriedades elétricas de cerâmicas à base ($BaTiO_3$) com dopagem de diferentes concentrações de SiO_2 e pentóxido de nióbio

(Nb_2O_5). As demais composições foram definidas de forma que se possa verificar a influência da dopagem do titanato de bário com várias concentrações de grafeno.

Para produzir os corpos de prova, inicialmente as matérias-primas foram homogeneizadas de acordo com as composições estabelecidas na Tabela 2. O processo de produção dos corpos de prova ocorreu com o auxílio de uma prensa hidráulica SL12, MARCA SOLAB, com controle manual e um molde de aço (Figura 13). As dimensões dos corpos de prova retangulares foram de 60 mm de comprimento, 18 mm de largura e 10 mm de espessura. A carga de prensagem utilizada foi de aproximadamente 16 toneladas (12 MPa) e a velocidade de prensagem controlada manualmente. Após a prensagem, os corpos de prova foram secos, em estufa, a 200 ºC por 24 h e sinterizados.

A sinterização foi realizada em forno elétrico a 1200 ˚C, conforme realizado por Carvalho e Sales (2019), sob taxas de aquecimento e resfriamento de 5˚C por minuto, sendo que a temperatura foi mantida a 1200˚C por 3 h. A sinterização foi realizada em atmosfera redutora e controlada com argônio, para evitar a queima oxidativa do grafeno puro na presença de oxigênio, em torno de 650 ˚C (Tabela 1).

Figura 13 - Molde utilizado para confecção dos corpos de prova



Fonte: próprio autor.

4.4 Difração de Raios X e Tamanho de Cristalitos

A análise por difração de raios X (DRX) dos corpos de prova foi conduzida com um espectrômetro Shimadzu XRD-7000, com uma fonte de radiação de cobre Kα, uma

tensão elétrica de 40 kV e uma corrente de 30 mA. As amostras foram analisadas sem a necessidade de qualquer preparação adicional. Os dados resultantes foram processados através do software XPowder, o qual utilizou o banco de dados "PDF2.DAT" do Centro Internacional de Dados de Difração (ICDD) para identificar as fases presentes nas amostras.

O tamanho dos cristalitos, formados durante o processo de inserção, foram avaliados pela equação de Scherrer (Equação 7). Com esta análise foi possível avaliar a ocorrência de microdeformação na rede, pode-se dessa forma, saber se ocorreu a dopagem da cerâmica, à base de $BaTiO_3$ com SiO_2, grafeno e Nb_2O_5 (Paunovic *et al.*, 2020; Muniz, 2017; Patterson, 1939):

$$t = \frac{0,9\lambda}{B\cos\theta} \tag{7}$$

Onde t é o tamanho do cristalito, λ é o comprimento de onda da radiação (1,5406 Å), B é a largura a meia altura do pico (em radianos) e θ é o ângulo (em radianos) onde a intensidade é máxima.

4.5 Densidade bulk e Porosidade Total

A densidade teórica e a densidade bulk (densidade de massa) são essenciais para estimar a porosidade total. E essa determinação é fundamental, pois as condutividades térmicas e elétricas dos materiais estão intimamente ligadas a essa propriedade. Além disso, a densidade bulk é uma propriedade importante para determinar a condutividade térmica.

A densidade teórica foi definia pela regra das misturas, conforme Callister (2016) que é uma média ponderada que prevê propriedades de materiais compósitos. Para realizar a média da densidade teórica foi considerada a composição de cada corpo de prova (Tabela 2) e também foi considerado a densidade teórica do grafeno de 2,267 g/cm^3 (American Elements, 2025), densidade do $BaTiO_3$ de 6,08 g/cm^3, densidade do SiO_2 de 2,6 g/cm^3 e densidade do Nb_2O_5 de 4,47 g/cm^3 (Sigma-Aldrich Brasil Ltda, 2025).

A densidade bulk (densidade de massa) foi determinada pela norma ASTM C373-88, utilizando a Equação 9. A norma ASTM descreve o método de Arquimedes e sua adequação matemática. De acordo com a norma ASTM C373-88, para cada

corpo de prova foi obtido os pesos secos, depois foram fervidos por 2h a 100 ºC em água, permanecendo após esse tempo, imersos em água por 24h**.** Posteriormente, cada corpo de prova é pesado utilizando-se o aparato de Arquimedes acoplado a uma balança de precisão com incerteza de medição de ± 0,5 %.

A partir dos dados obtidos da densidade teórica e densidade bulk (Equação 8), determinou a porosidade total (Equação 9):

$$\boldsymbol{DB = \frac{ms}{(mu - mi)}\, x\ \text{págua}} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{PT = (1 - \frac{DB}{DT})\, x\ 100} \tag{9}$$

Onde: DB é Densidade bulk (g/cm^3); ms é massa seca (g); mu é a massa úmida (g); mi é a massa imersa (g). PT é a porosidade total (%) e DT é densidade teórica(g/cm^3).

4.6 Resistência Mecânica à Flexão

O ensaio de flexão foi realizado em uma máquina universal de ensaios Autograph AG-X 10kN da marca Shimadzu, a qual possui incerteza de medição de ± 1 %. Este ensaio foi feito conforme norma ASTM D790-17, com três pontos de apoio e com velocidade de 1 mm/min, com 3 corpos de prova, para cada composição. Para determinar o limite de resistência à flexão (σ_b), em MPa, foi utilizada a Equação 10 (Callister, 2016):

$$\sigma_b = \frac{3\, f' L}{2\, b\, d^2} \tag{10}$$

Onde*:* f' é a força atingida no ensaio, em Newton (N), *L* é a distância entre os apoios, em milímetros (mm); *b* é a largura do corpo de prova em milímetros (mm) e *d* é a espessura do corpo de prova em milímetros (mm).

4.7 Medições Elétricas

Com a finalidade de fazer as medições elétricas nos corpos de prova, foi desenvolvido um sistema, observado na figura 14, em conjunto com um forno, utilizou-se um protoboard (para interligação entre os periféricos), termopar (tipo k), termômetro e medidor LCR (medidor de indutância, capacitância e resistência elétricas), com princípio de funcionamento baseado em pontes de Wheatstone. Este medidor LCR

(modelo C1733 – Agilent), conforme fabricante, possui incerteza de medição no valor de ± 0,2 %, gera um sinal AC, em que a frequência pode ser selecionada em diferentes valores. Portanto, o medidor foi ligado aos corpos de prova utilizando dois conectores metálicos diferentes, como mostrado nas Figuras 15 e 16. Assim, com auxilio desse sistema foram realizadas as medições de resistência e capacitâncias elétricas com utilização do método de 2 pontas (Kelvin), conforme norma ASTM D257-14.

Figura 14 - Modelo implementado para as medições das propriedades elétricas



Fonte: próprio autor.

Figura 15 - Conectores metálicos para medições de resistência elétrica



Fonte: próprio autor.

Figura 16 - Dispositivo com amostra para medições de capacitância elétrica



Fonte: próprio autor.

Primeiramente, foi feita uma medição do circuito elétrico (sem amostra), em temperatura ambiente, para obter o valor da resistência elétrica. Essa medição foi deduzida dos valores de resistência elétrica obtido nos copos de prova e teve a finalidade de minimizar a interferência do circuito elétrico.

Após realizadas as medidas nos corpos de prova, efetuaram-se os cálculos, para determinação da resistividade elétrica (***ρ*** em Ω m), constante dielétrica (adimensional) e condutividade elétrica (***σ*** em $(\Omega\ m)^{-1}$).

A resistividade foi calculada através da Equação 11; constante dielétrica (Er), da Equação 12 e a condutividade elétrica, da Equação 13; respectivamente (Callister, 2007):

$$\rho = \frac{RA}{L} \tag{11}$$

Onde: *A* é a área da seção transversal, *L* é o comprimento do corpo de prova subtraindo a distância entre os dois conectores metálicos (Figura 15), *R* é a resistência elétrica obtida pelo medidor LCR (modelo C1733 – Agilement):

$$E_r = \frac{CX}{EoA} \tag{12}$$

Onde: *C* é a capacitância elétrica obtida pelo medidor LCR (modelo C1733 – Agilent), *X* é a distância entre as duas placas metálicas (Figura 16), *A* é área da base da amostra e Eo é a constante dielétrica relativa no vácuo igual a 8,85 x 10^{-12} c^2 N^{-1} m^{-2}:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{13}$$

Onde: ρ é a resistividade elétrica.

Os ensaios de resistência e capacitância elétrica foram nas seguintes temperaturas 25 ºC, 75 ºC, 125 ºC, 175 ºC, 225 ºC, 275 ºC, 325 ºC, 375 ºC e 425 ºC e foi feita a média aritmética de 10 medidas, em duplicidade, em cada valor de temperatura. Posteriormente, calculou-se a resistividade elétrica e a constante dielétrica dos corpos de prova em cada uma dessas temperaturas.

4.8 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma característica vital para o design e operação de dispositivos eletrônicos. A gestão eficaz do calor garante que esses dispositivos funcionem de maneira eficiente e duradoura, como a tecnologia continua a avançar, o desenvolvimento de novos materiais com melhores propriedades térmicas e novas técnicas de dissipação de calor continuará sendo um foco importante na engenharia térmica.

Neste trabalho, a condutividade térmica foi determinada pelo método quadrupolo (Degiovanni *et al*., 2000), através das medições das difusividades térmicas das 7 amostras em duplicidade, com repetidas medições (ver apêndice C) com o uso do difusiômetro, modelo – Quadruflash 1200, com incerteza de medições de ± 7,5 %, do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN) – Belo Horizonte/MG. E as medições dos calores específicos das amostras foram determinadas por calorimetria, no laboratório do Departamento de Física do CEFET-MG.

Para os cálculos, foram usadas as definições de capacidade térmica e calor específico, utilizando as Equações 14 e 15 (Tipler e Mosca, 2009):

$$Q = C\Delta t = mc_p\Delta t \tag{14}$$

$$c_p = \frac{C}{m} \tag{15}$$

Onde: *Q* é a quantidade térmica (J), *C* é a capacidade térmica (J/K), Δt é variação de temperatura (K), *m* é a massa da amostra (kg) e *Cp* é o calor específico da amostra (J/kg K).

Posteriormente, usou-se a Equação 16 para calcular a condutividade térmica (k) (Incropera *et al*., 2008):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \tag{16}$$

Onde: *k* é a condutividade térmica (W/m K); *α* é a difusividade térmica (m^2/s) e *ρ* é a densidade (kg/m^3).

4.9 Determinação do *Band Gap*

Com finalidade de saber a potencialidade da condução eletrônica das amostras, foi feita a determinação do *Band Gap* com uso da técnica de Espectroscopia por reflectância difusa (DRS UV-Vis), utilizou-se um espectrômetro Shimadzu UV - 2550, com incerteza de medições de ± 0,2 %, que opera na faixa de comprimento de onda de 200 a 700 nm, do Multicêntrico de Pós – Graduação em Química no Campus 6 do CEFET - MG.

Esta técnica fornece a absorbância (adimensional) e o comprimento de onda (nm) do espectro eletromagnético entre 200-700 nm, que são as faixas de valores do ultravioleta até o visível. Os cálculos de *Band Gap* foram realizados a partir da aplicação da função de Kubelka-Munk e do modelo de Tauc, conforme Equação 17 (Fonseca, 2020):

$$(\alpha' h\nu)^{1/r} = K_o h\nu - K_o E_g \quad (17)$$

$$C = \lambda \nu \quad (18)$$

$$E = h\nu \quad (19)$$

Onde: K_o = coeficiente de absorção da amostra; h é 6,63 x 10^{-34} constante de Planck (J s);

v = frequência; E_g = energia de *Band gap (eV)*; E = energia (eV) = ½ ou 2;

α’ = F(R) = Função de Kubelka – Munck.

1 J = 6,24 x 10^{18} eV.

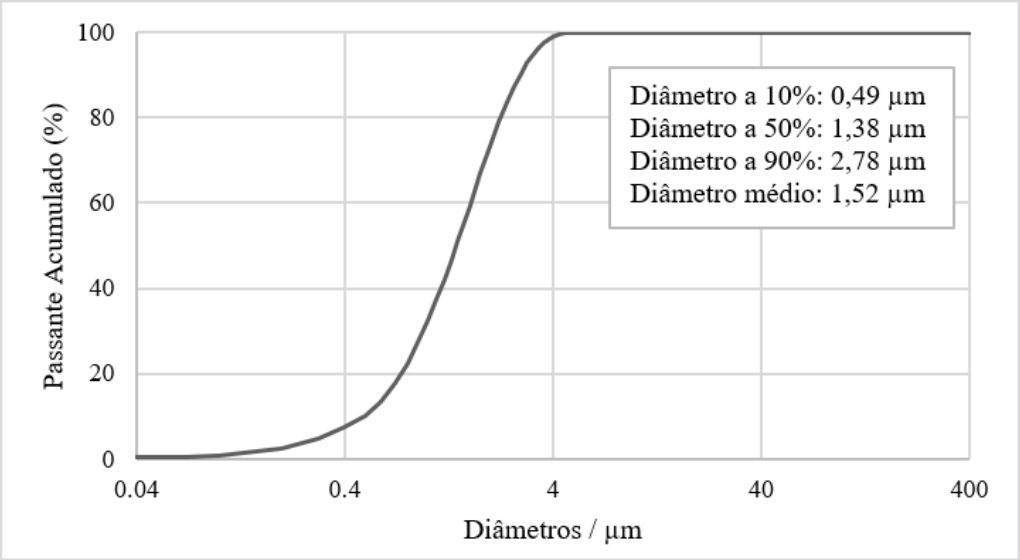
Os valores numéricos de r podem variar em 2 para semicondutores indiretos e ½ pra semicondutores diretos. Assim, a partir do gráfico de $(\alpha' h\nu)^{1/r}$ versus hv, foram obtidos os valores de *Band Gap* através da interpolação da curva obtida no gráfico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise Granulométrica por Difração a Laser das Matérias-Primas

Na Figura 17 vê-se a distribuição granulométrica para o titanato de bário. Pode-se observar que 90 % das partículas tem diâmetros menores que 3 μm e este valor está de acordo com a ficha técnica fornecida pela Sigma-Aldrich Brasil Ltda. Essa distribuição pode influenciar no valor da constante dielétrica em cerâmicas semicondutoras produzidas com $BaTiO_3$ puro (Filho *et al*., 2002; Sales *et al*., 2011). Para partículas em torno de 1 μm, essas cerâmicas podem apresentar constante dielétrica variando de 3.500 a 4.000 em temperatura ambiente (Arlt *et al*., 1985).

Figura 17 - Distribuição granulométrica do titanato de bário

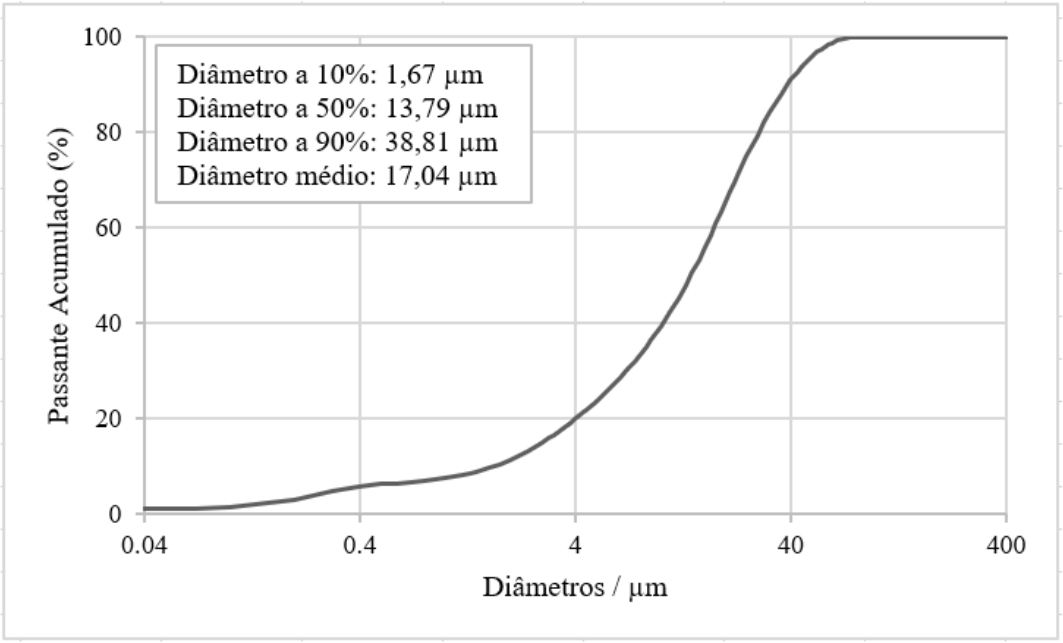


Fonte: próprio autor.

As distribuições granulométricas para os dopantes pentóxido de nióbio (V) (Nb_2O_5), dióxido de silício (SiO_2) e grafeno (GRA) estão demostradas nas Figuras 18, 19 e 20, respectivamente. Observa-se que o tamanho médio das partículas de Nb_2O_5 é de 17,04 μm, SiO_2 é de 16,96 μm e GRA de 5,75 μm. A diferença entre os tamanhos de partículas do $BaTiO_3$ em relação aos dopantes (Nb_2O_5, SiO_2) utilizados, podem aumentar o valor da constante dielétrica, em temperatura ambiente, das cerâmicas semicondutoras. Tal comportamento é relatado nos estudos de Cao *et al*. (2016) e Dong *et al*. (2017), quando foi adicionado 0,75 mol % de pentóxido de nióbio e 0,5

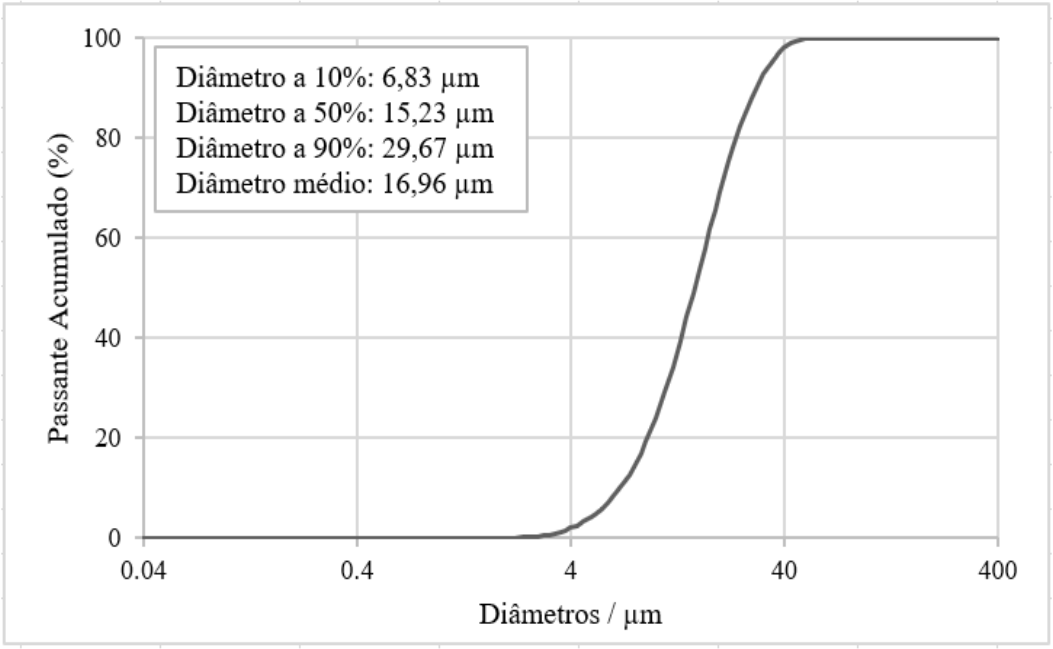
mol % de sílica no $BaTiO_3$.

Figura 18 - Distribuição granulométrica do pentóxido de nióbio (V)



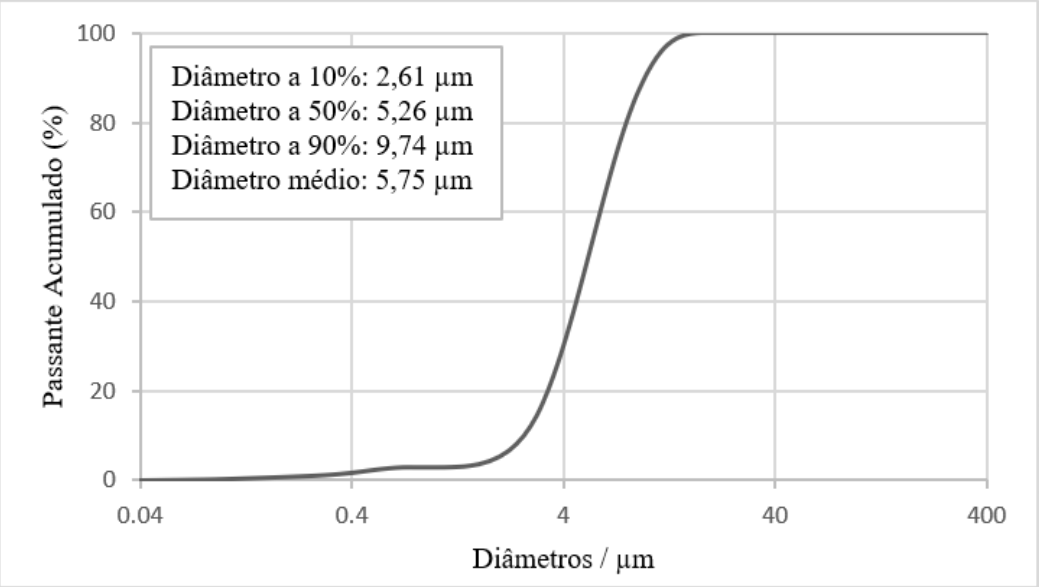
Fonte: próprio autor.

Figura 19 - Distribuição granulométrica do dióxido de silício



Fonte: próprio autor.

Figura 20 - Distribuição granulométrica do grafeno



Fonte: próprio autor.

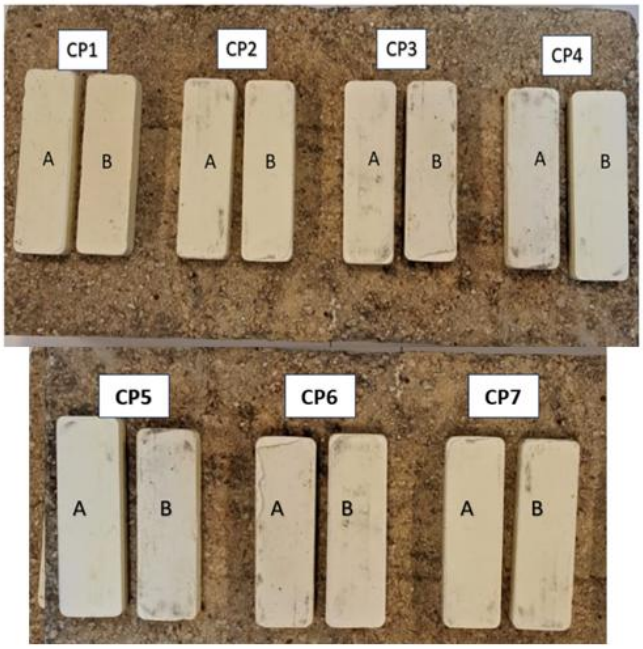
É importante salientar que a distribuição granulométrica irá influenciar na densificação dos corpos de prova durante o processo de sinterização, quanto maior o tamanho de grão melhor densificação e, consequentemente, menor a porosidade. Ademais, a porosidade pode ter uma influência nos valores de resistência elétrica das cerâmicas semicondutoras, ou seja, quanto menos porosa for a cerâmica maior deve ser a condutividade elétrica (Carvalho; Sales, 2019). Por outro lado, partículas muito pequenas dificultam a homogeneização do dopante no $BaTiO_3$, principalmente, porque a concentração utilizada é pequena. Além disso, as microestruturas das cerâmicas semicondutoras são influenciadas pela forma, tamanho, distribuição e orientação dos grãos, de cada fase presente. Portanto, as propriedades físicas, elétricas, mecânicas e químicas dessas cerâmicas estão associadas à microestrutura formada, condicionando dessa forma o seu desempenho.

5.2 Análise Visual das Peças Sinterizadas

Pode-se observar, na Figura 21, os corpos de prova com respectivas duplicidades, sinterizados a 1200 ºC em forno elétrico com atmosfera redutora e controlada com argônio (Ar). As superfícies dos copos de provas são homogêneas, ou seja, não se observa nenhuma trinca e nenhuma alteração de cor. A presença de

uma superfície sem defeitos aparentes pode ser um indício que a temperatura de sinterização foi coerente com o processo de produção.

Figura 21 - Corpos de prova CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6 e CP7 sinterizados



Fonte: próprio autor.

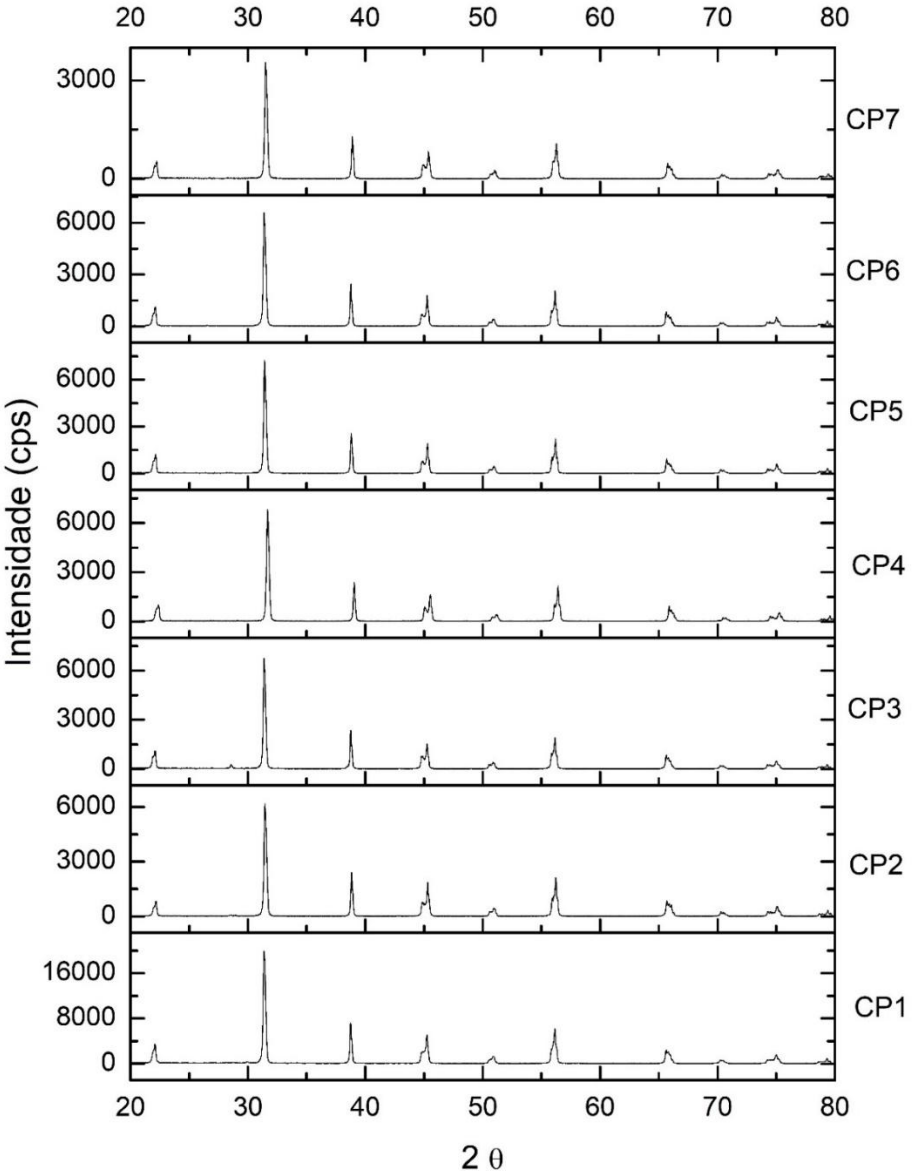
5.3 Caracterização das Peças por Difração de Raios X e Tamanho de Cristalitos

Com o objetivo de verificar a formação de novas fases durante o processo de dopagem, foi realizada a caracterização por Difração de Raios X (DRX) nos corpos de prova produzidos, conforme ilustrado na Figura 22. Os resultados mostraram a presença predominante de uma única fase, identificada como $BaTiO_3$ (card: 750211), sem alterações nas posições dos picos. Tal comportamento era esperado, uma vez que as quantidades de Nb_2O_5, SiO_2 e grafeno adicionadas foram mínimas (conforme apresentado na Tabela 2), ficando abaixo do limite de detecção do equipamento de DRX. Isso confirma que a dopagem não resultou na formação de fases adicionais detectáveis pelo método empregado.

Entretanto, foi observado na Figura 22 uma alteração na intensidade dos picos, especialmente no ângulo de primeira ordem de difração (31,46°), que diminuiu de aproximadamente 20.000 cps para 7.500 cps, ao comparar as amostras de referência (CP1) com a amostra contendo 1 mol % de grafeno (CP5). Essa mudança

na intensidade pode indicar alterações no fator de estrutura (posições atômicas, fatores de temperatura isotrópicos ou anisotrópicos e o número de ocupação) ou na direção preferencial de crescimento do cristalito, conforme Gonçalves (2016), sugerindo, assim, que ocorreu a dopagem do $BaTiO_3$ com grafeno.

Figura 22 - Difratograma para as composições utilizadas na produção dos corpos de prova



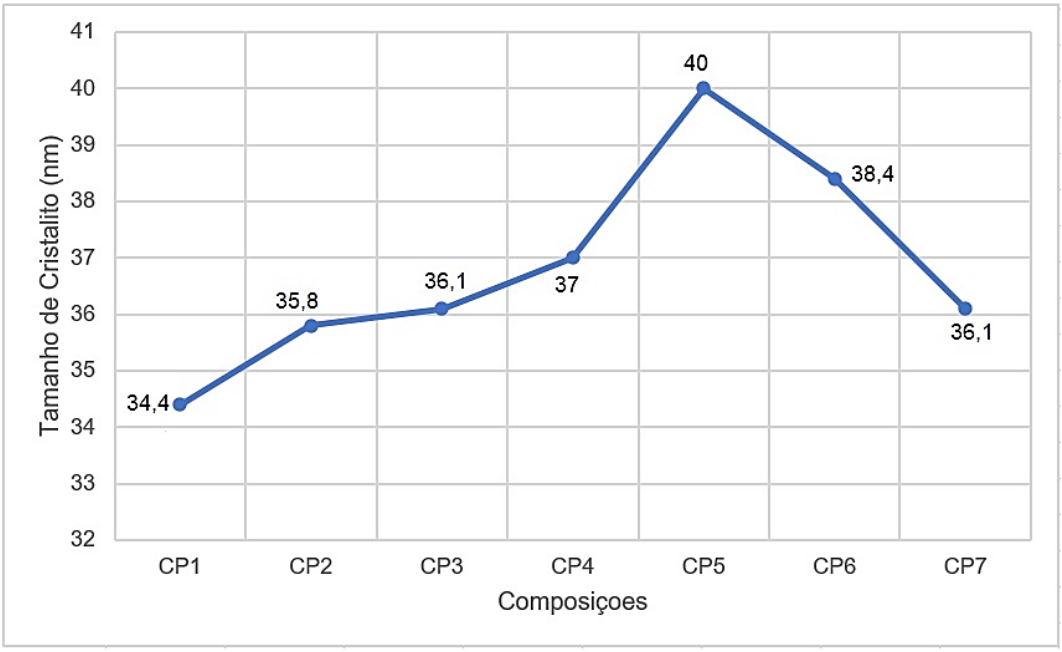
Fonte: próprio autor.

Outra hipótese que corrobora a dopagem do $BaTiO_3$ com grafeno foi a análise do tamanho dos cristalitos, que pode ser observada na Figura 23. Os resultados de tamanho dos cristalitos foram obtidos pela Equação de Scherrer (Jenkins; Snyder,

1996), com os valores sendo calculados a partir da média dos tamanhos de cristalitos para todos os picos (Apêndice A). Observa-se um aumento no tamanho médio dos cristalitos com a adição de grafeno, que variou de 34,4 nm para a amostra sem grafeno para 40 nm (CP1) na amostra com 1 mol % de grafeno (CP5).

Essa variação no tamanho dos cristalitos indica que a adição de grafeno ao titanato de bário foi eficaz, uma vez que houve uma alteração na largura à meia altura do pico (FWHM), resultando em uma mudança no valor do tamanho dos cristalitos (Apêndice A). A alteração no tamanho do cristalito é uma consequência da dopagem de materiais (Paunovic *et al.*, 2020; Muniz, 2017; Patterson, 1939). Além disso, essas diferenças mostram que provavelmente pode ter ocorrido uma microdeformação na rede da cerâmica com inserção do grafeno.

Figura 23 - Resultados de tamanho de cristalitos para os copos de prova, obtidos pela Equação de Scherrer.



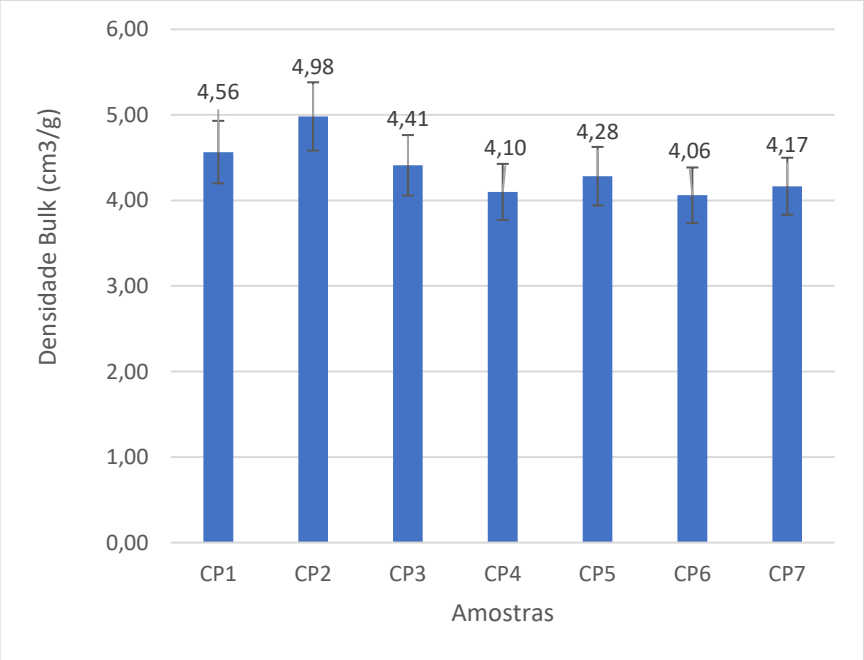
Fonte: próprio autor.

5.4 Densidade bulk e Porosidade Total

Os resultados de densidade bulk estão mostrados na Figura 24. Observa-se que para a densidade bulk não ocorreu uma variação significativa nos valores. Entretanto, a amostra referência apresentou o segundo maior valor de densidade (4,56 g/cm^3) quando comparada com as outras composições e esse decréscimo no

valor das densidades pode ser um indicio de que a inserção de grafeno alterou o empacotamento das partículas durante o processo de sinterização (Gao *et al*., 2016; Varol; Canakci, 2015).

Figura 24 - Resultados de densidade bulk

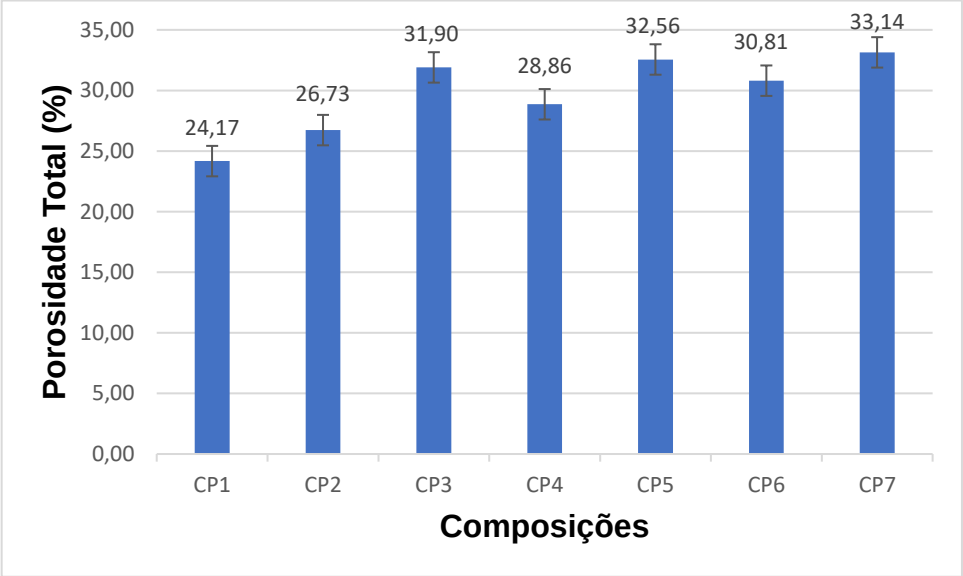


Fonte: próprio autor.

Embora a adição de grafeno possa diminuir a densidade do compósito devido à sua baixa densidade, ele pode contribui para o aumento da resistência à fratura e rigidez do material composto e pode melhorar a condutividade elétrica, o que é benéfico para aplicações eletrônicas. Um compósito mais denso, com maior fração de $BaTiO_3$, poderá ser mais eficaz para aplicações que exigem características piezoelétricas, enquanto a adição de grafeno pode otimizar a condução elétrica (Lee *et al*., 2008; Cao *et al*., 2013; Zhou *et al*., 2015).

A Figura 25 apresenta os resultados de porosidade total, que evidencia uma variação nos valores quando se compara a amostra de referência (24,17%) com as demais composições. Esse aumento na porosidade pode estar associado à adição de grafeno, uma vez que sua estrutura em camadas pode dificultar o contato direto entre as partículas da matriz. Esse efeito pode interferir na difusão atômica durante a sinterização, reduzindo a eficiência da densificação do material (Gao *et al*., 2016; Varol; Canakci, 2015; Ayyappadas *et al*., 2017).

Figura 25 - Resultados de porosidade total



Fonte: próprio autor.

A presença do grafeno pode levar à formação de aglomerados, criando zonas com menor compactação e, consequentemente, maior retenção de poros. Dessa forma, a variação na porosidade observada pode ser resultado da interação entre o grafeno e a matriz, alterando o empacotamento das partículas e influenciando diretamente a microestrutura final do material (Saboori *et al*., 2017; Chu; Jia, 2014).

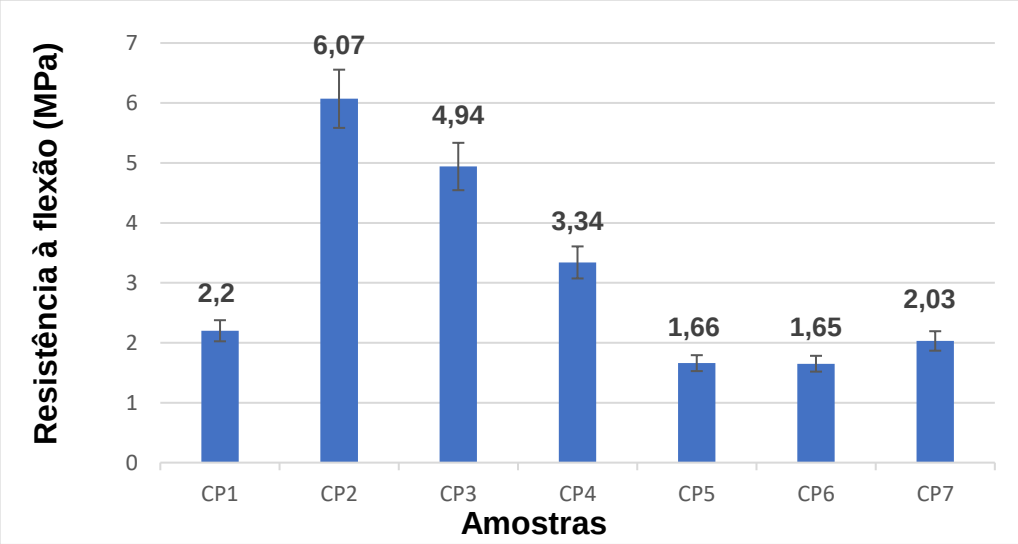
A dispersão do grafeno na matriz cerâmica é desafiadora por causa da diferença relativamente alta entre as densidades dos dois componentes (Ayyappadas *et al*., 2017) e pelas partículas de grafeno geralmente se apresentarem na forma de folhas com dimensões tendendo a aglomerar-se nos seus contornos (Gao *et al*., 2017; Varol et al., 2015). Portanto a dispersão do grafeno também pode está influenciando na porosidade do compósito $BaTiO_3$ com inserção de grafeno.

A presença de poros reduz a densidade de material semicondutor, diminuindo a quantidade de átomos que contribuem para a condução elétrica. Isso ocorre porque os poros podem interromper os caminhos condutivos, levando a um aumento na resistência elétrica do material, os poros também podem agir como barreiras para a condução elétrica, pois reduz a continuidade do fluxo de portadores de carga. Além disso, a condutividade térmica pode sofrer alterações dependendo da fração de poros, impedindo a formação de caminhos condutivos suficiente (O'dwyer, 2022; Hosseini *et al*., 2021; Brinker *et al*., 2023).

5.5 Resistência Mecânica à Flexão

Os resultados apresentados na Figura 26 indicam uma melhoria significativa na resistência à flexão das amostras com inserção de grafeno e densificadas com dióxido de silício (CP2, CP3 e CP4), em comparação com a amostra de referência (CP1). Comparando, por exemplo, as amostras CP3 e CP1 verifica-se que ocorreu um aumento significativo na resistência, passando de 2,20 MPa na amostra referência para 4,94 MPa na amostra com substituição do Nb_2O_5 por grafeno (CP3). Isto ocorre porque o grafeno melhora a resistência à flexão, enquanto o dióxido de silício contribui para a maior densidade e melhor sinterização da amostra. Essa combinação pode ter um efeito positivo na integridade estrutural do material, o que não ocorre na amostra CP1.

Figura 26 - Resultados do ensaio mecânico de resistência à flexão dos corpos de prova



Fonte: próprio autor.

O grafeno é amplamente reconhecido por suas propriedades mecânicas excepcionais, como alta resistência à tração, tenacidade e condutividade. A dopagem com grafeno pode promover uma melhoria substancial na resistência à flexão, pois o grafeno pode agir como uma fase de reforço, retardando o processo de falha por fraturas e deslizamento de grãos. Compósitos de grafeno em matriz de alumina foram encontrados com 20 % de superioridade na tenacidade à fratura com composições de até 1 % m/m de grafeno multicamadas (Liu, 2013).

Além disso, o dióxido de silício tem sido utilizado em diversas pesquisas como um agente densificador. Estudos mostram que o uso de dióxido de silício na sinterização de cerâmicas pode resultar em uma microestrutura mais densa, o que melhora as propriedades mecânicas, como resistência à flexão e dureza. A densificação promovida pelo dióxido de silício pode reduzir a porosidade do material, resultando em uma estrutura mais compacta e resistente a tensões externas (Carvalho; Sales, 2019).

Em síntese, os resultados confirmam que a combinação de grafeno e dióxido de silício oferece vantagens significativas em termos de resistência à flexão em relação à dopagem com Nb_2O_5. Logo, o uso de grafeno em materiais cerâmicos pode abrir novas perspectivas para o desenvolvimento de materiais com propriedades mecânicas superiores, com possíveis aplicações em setores que exigem alto desempenho estrutural (Porwal *et al*., 2013).

5.6 Resistividade Elétrica

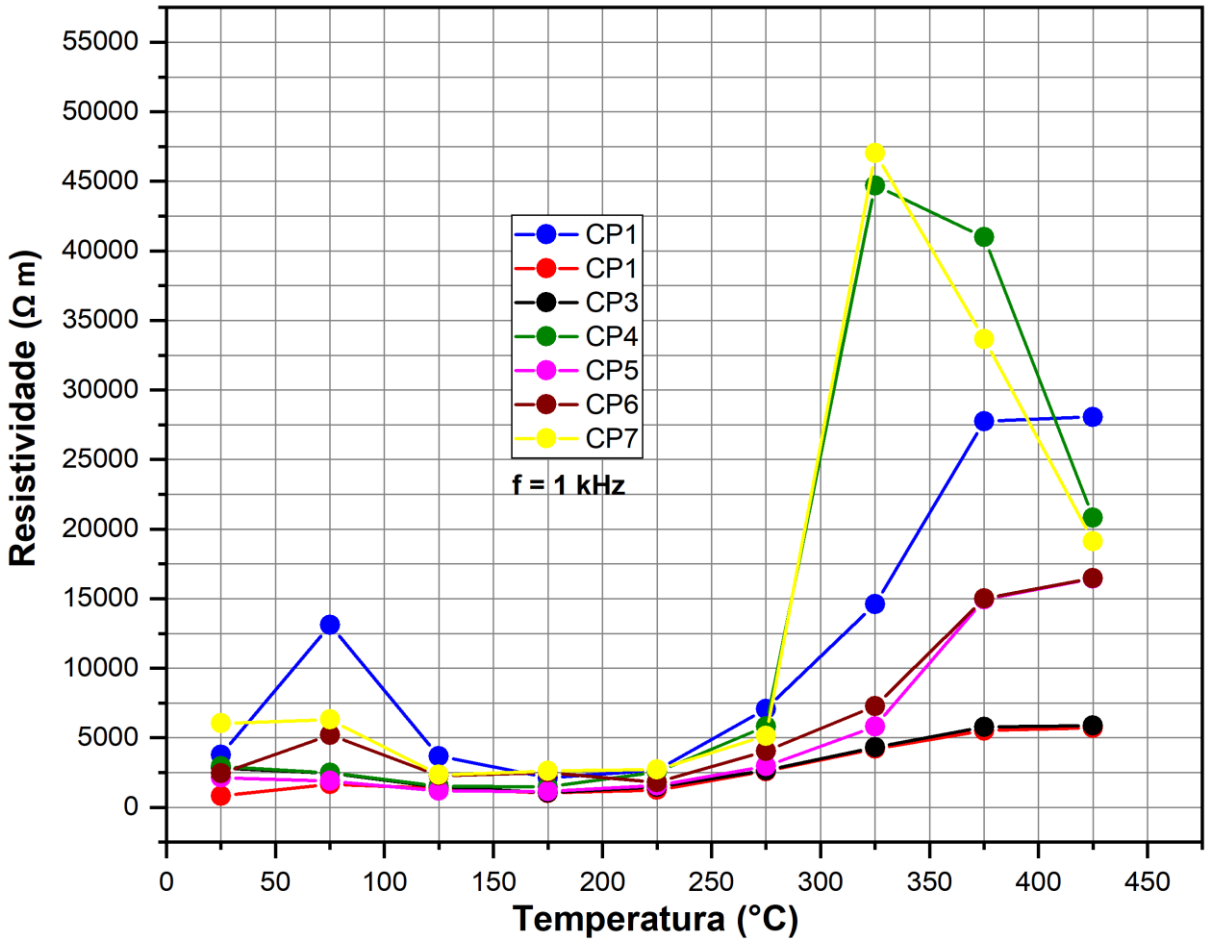
Os valores de resistividade elétrica obtidos estão ilustrados na Figura 27. Observa-se que as amostras CP2 e CP3 apresentaram resultados mais favoráveis em termos de condutividade elétrica, pois mantêm estabilidade na curva entre 25 °C e 275 °C, com valores de resistividade na faixa de 10^3 Ω m. Em contraste, a amostra CP1 (referência) apresentou picos na ordem de 10^4 Ω m a 75 °C e em todas as medições realizadas acima de 300 °C. Para temperaturas superiores a 275 °C, as concentrações sem a presença dióxido de silício mostraram um aumento na resistividade elétrica, que indicou a influência da adição deste material.

A partir de 325 °C observou-se uma redução substancial na resistividade elétrica de algumas amostras, especialmente na CP4 e CP7. Esse decréscimo pode estar relacionado à diminuição significativa da barreira resistiva entre os grãos com o aumento da temperatura, o que facilita o fluxo dos portadores de carga nos contornos dos grãos (Carvalho; Sales, 2019).

Para a temperatura de 275 °C, as amostras CP4 e CP7 apresentaram características típicas de um termistor PTCR (Carvalho *et al*., 2022), evidenciou um aumento considerável de resistividade nessa temperatura. Isto, provavelmente, ocorreu devido ao aumento das barreiras resistivas, em função da temperatura, que

se formam nos contornos de grãos, dificultando a ação dos portadores de carga entre os grãos (Mancini; Filho, 2007; Silva *et al*., 2012).

Figura 27 - Valores da Resistividade em função da temperatura das amostras para frequência de 1 kHz



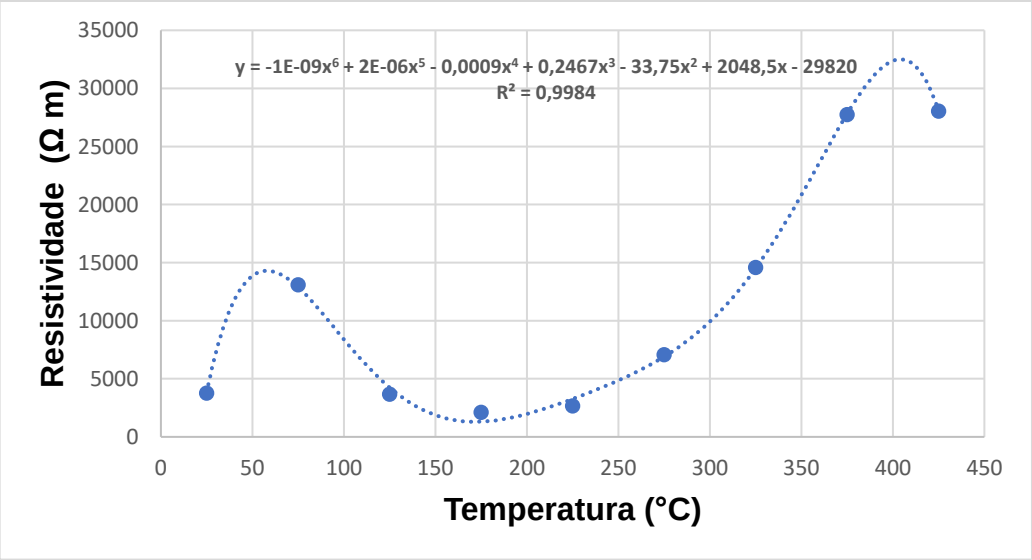
Fonte: próprio autor.

Os compósitos cerâmicos de titanato de bário como inserção de grafeno de 1,0 e 0,75 mol % (CP2 e CP3) mostraram que, provavelmente, possui condições de trabalho na indústria eletrônica, pois segundo estudos de Gralik e Biava (2019) aplicações de varistores possuem temperatura de operação máxima de 140 ºC e também Antoniassi (2017) verificou que eletrodos de células de combustíveis PEMFC (*Protón Exchange membrane fuel cell*) possuem funcionamento máximo nesta temperatura. Estes compósitos também apresentaram possibilidades de aplicações em componentes eletrônicos como IGBT (Transistor bipolar de efeito de campo), semicondutor de potência, utilizado em carros elétricos, conforme Souza (2023) e

GFET (transistor de efeito de campo de grafeno), que é um semicondutor que tem uma ampla gama de utilizações em aplicações industriais, médicas e de testes químicos.

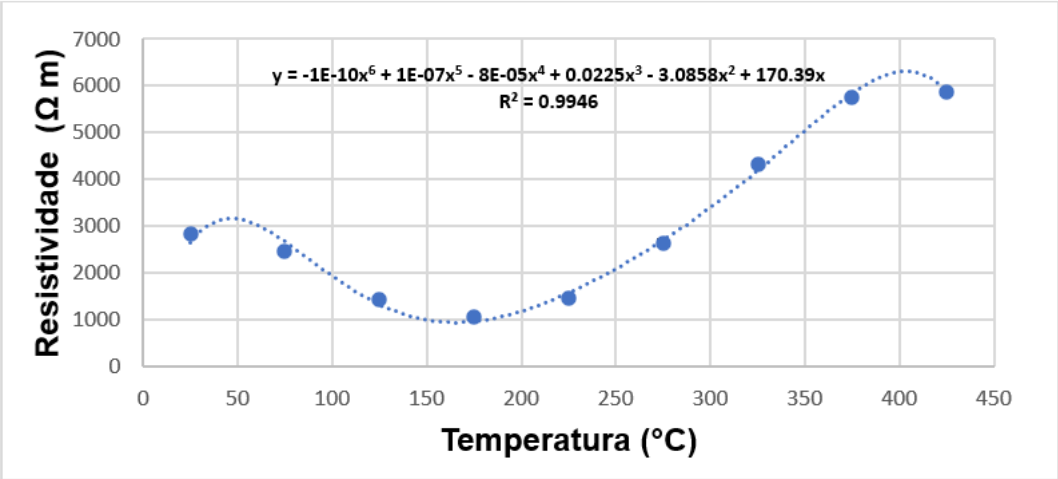
Nas Figuras 28 e 29 estão apresentadas as curvas de CP1 e CP3, ambas com mesmas concentrações, com os ajustes estatísticos de regressão polinomial. Foi obtido as equações das curvas e coeficiente de determinação (R^2) com valores próximos a 1, conforme dispostos no gráfico, este valor indica que as informações se ajustam de forma otimizada aos dados experimentais. Em 125 °C, iniciou uma tendência de elevação da resistividade, ponto de mudança do sistema cristalino da matriz de titanato de bário, ocorrido em ambas as amostras. A adição do grafeno em CP3, controlou a polarização com redução das propriedades elétricas, neste caso, a resistividade elétrica, em CP1, apartir de 125 °C a diminuição da resistividade foi menos expressiva em relação a CP3 em todas as temperaturas medidas.

Figura 28 – Ajuste estatístico de regressão polinomial da resistividade - CP1 (1kHz)



Fonte: próprio autor.

Figura 29 – Ajuste estatístico de regressão polinomial da resistividade - CP3 (1 kHz)



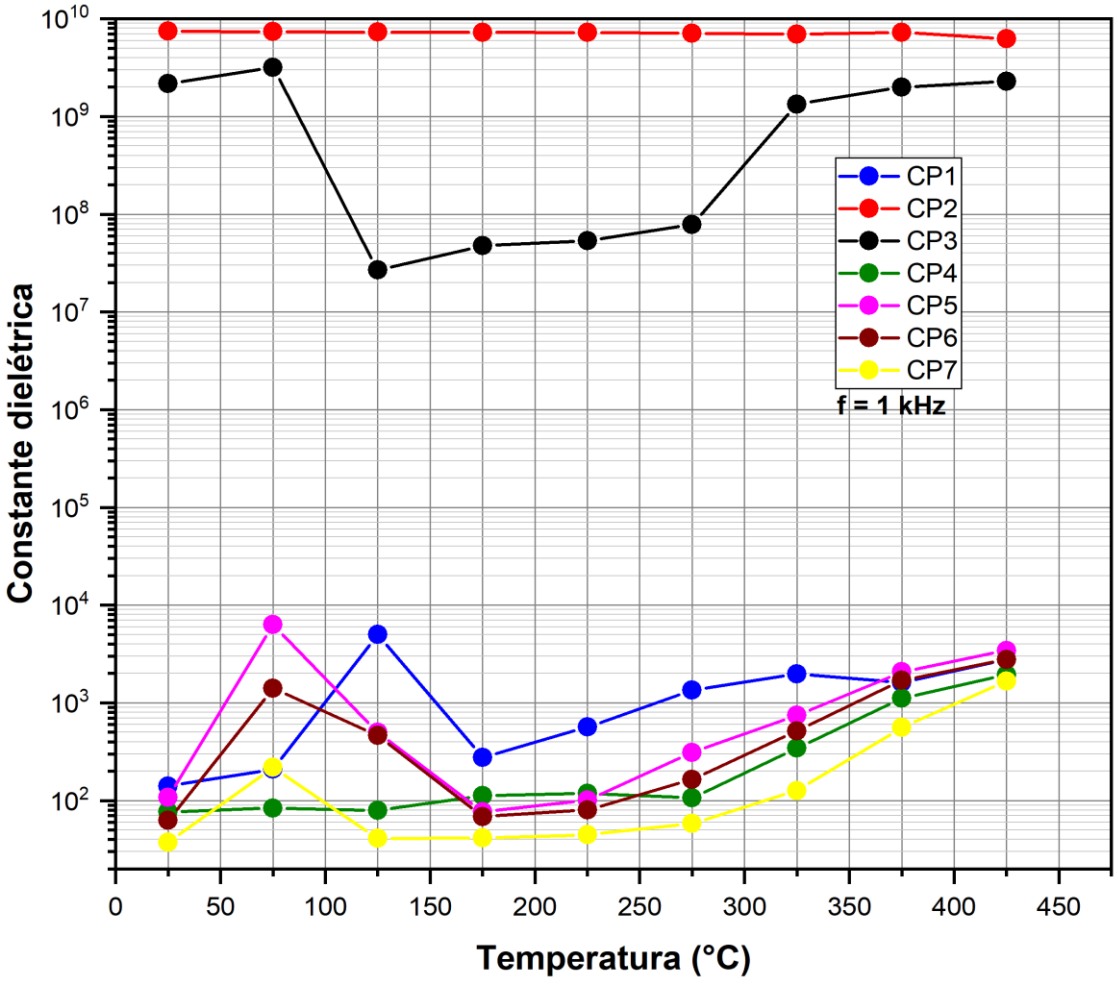
Fonte: próprio autor.

5.7 Constante Dielétrica (Permissividade relativa)

A Figura 30 apresenta os resultados da constante dielétrica obtida com uma frequência de 1 kHz (vide Apêndice A). Observa-se que as amostras CP2 e CP3 demonstram excelente potencial para aplicações em supercapacitores (Cardoso; Brush, 2023), com valores de constante dielétrica na ordem de grandeza de 10^9, valores superiores aos encontrados na literatura, na ordem de grandeza de 10^5 (Carvalho; Sales, 2019).

Além disso, observa-se que a amostra CP1 (referência) apresenta valores de constante dielétrica comparáveis aos das amostras CP4, CP5, CP6 e CP7. Isso sugere que a incorporação de grafeno e dióxido de silício nas amostras confere características adequadas para aplicações em dispositivos eletrônicos, como amplificadores operacionais, circuitos integrados e componentes de células de combustível (Sousa, 2023). Dessa forma, essas combinações podem contribuir para a otimização do armazenamento de energia, reduzindo as perdas térmicas e aumentando a capacitância elétrica (Pattipaka, 2024).

Figura 30 - Valores da Constante dielétrica em função da Temperatura das amostras para frequências de 1 kHz



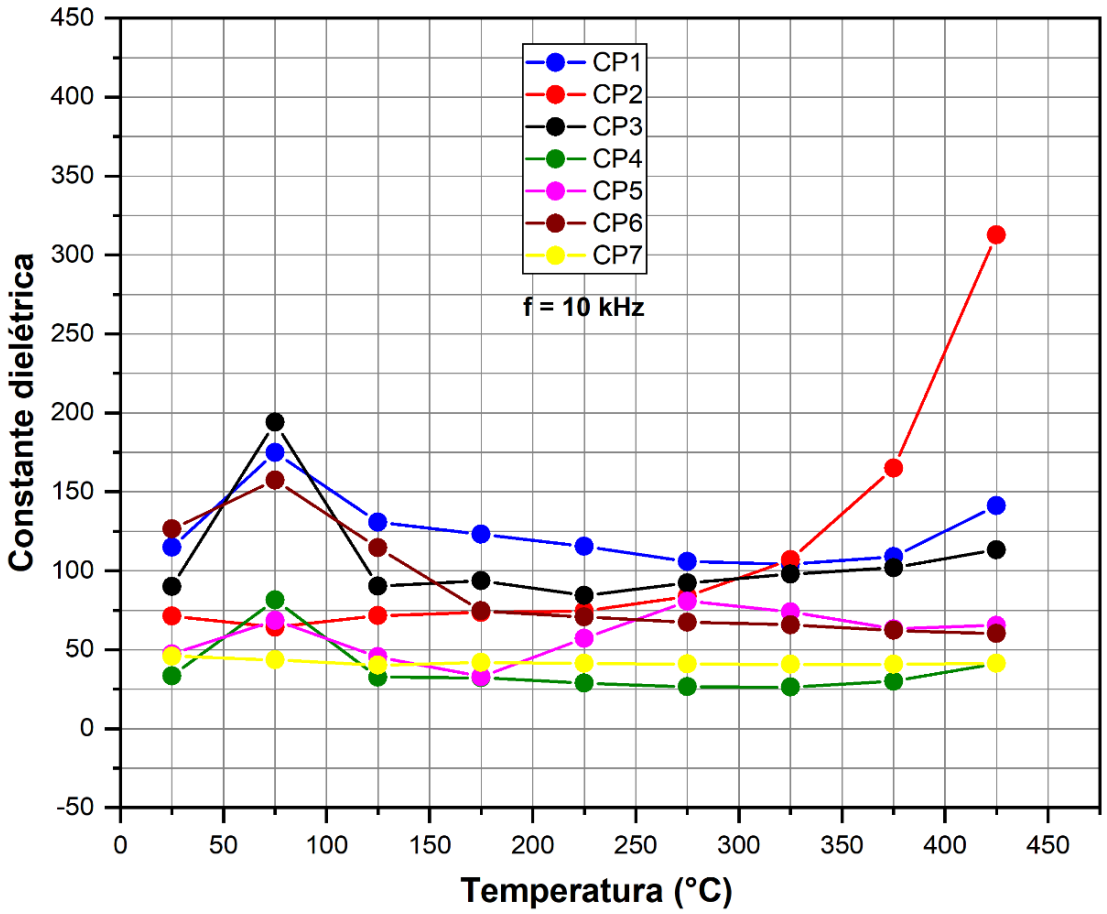
Fonte: próprio autor.

Os resultados da constante dielétrica em função da temperatura, com frequência de 10 kHz, estão apresentados na Figura 31 (vide Apêndice B). Observa-se características distintas nas curvas, o que indica que as composições possuem propriedades dielétricas variadas. As amostras CP1 (referência) e CP2 mostram um aumento acentuado na constante dielétrica a partir de 325 °C, enquanto a amostra com 1 mol % de grafeno destaca-se, evidenciando seu potencial para aplicações em componentes eletrônicos que exigem alta capacitância elétrica acima dessa temperatura. A elevação da concentração de grafeno nanoestruturado eleva a capacitância elétrica, pode-se ver no trabalho de França Júnior *et al*. (2022) em temperaturas ambientes.

As amostras CP5, CP6 e CP7, que não contêm dióxido de silício, apresentaram valores de constante dielétrica inferiores em comparação às demais amostras, o que ressalta a importância do SiO_2 na densificação e no desempenho dielétrico.

A amostra CP3 apresenta variações mais suaves na constante dielétrica apartir de 125 °C, conforme Bacci (2011), esta é a temperatura de Curie do $BaTiO_3$, assim podem ser utilizados como componentes eletrônicos, como capacitores que compõem circuitos integrados, por exemplo, amplificadores operacionais, que requerem baixa sensibilidade a variações de temperatura, em aplicações, em que a perda dielétrica precisa ser minimizada.

Figura 31 - Valores da Constante dielétrica em função da Temperatura das amostras para frequências de 10 kHz



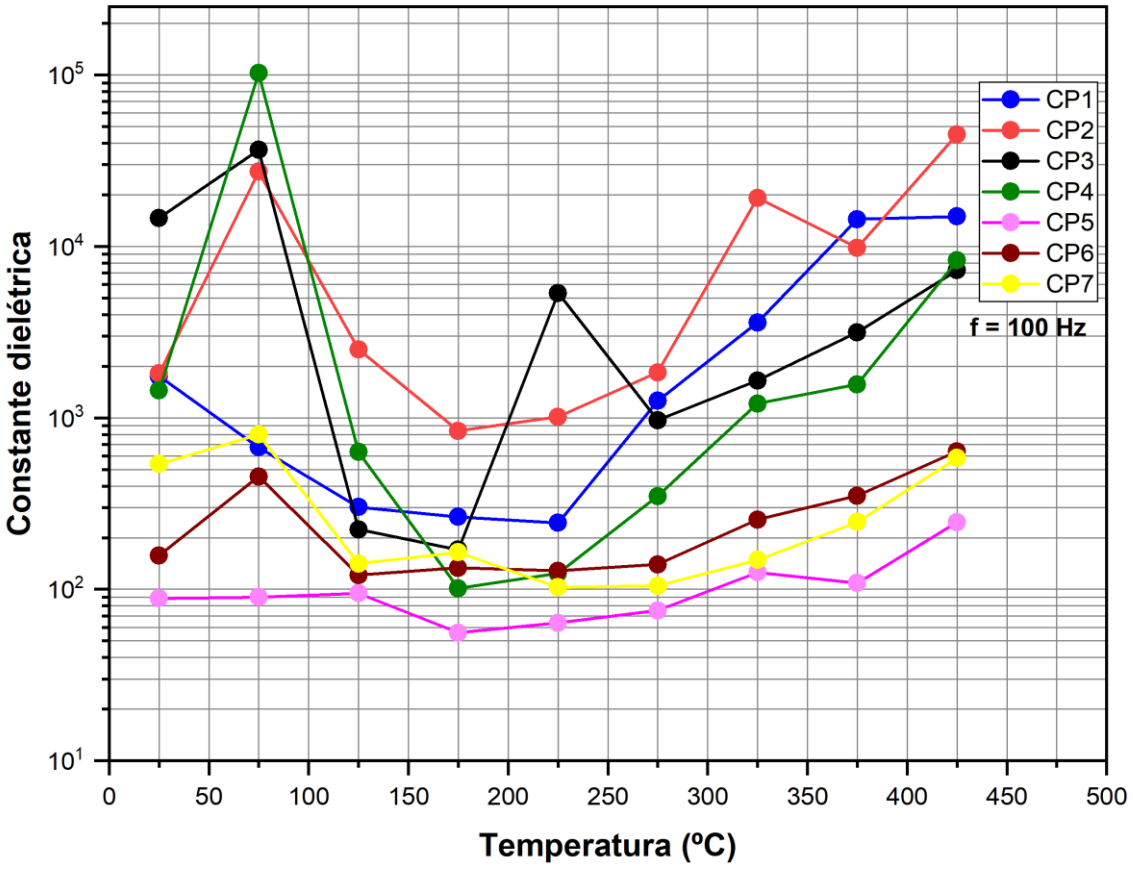
Fonte: próprio autor.

Na Figura 32, percebe-se que as concentrações CP2, CP3 e CP4 apresentam constante dielétrica com valores na ordem de 10^3 a 10^5 Ω m, valores superiores que

a amostra de referência (CP1), para temperaturas entre 75 °C e 125 °C, podendo ser aplicados em componentes eletrônicos de PEMFC, essas células tem operação nesta faixa de temperatura (Thangarassu, 2021). Estes valores obtidos fortalecem a informação desta aplicação, citada na seção 5.6.

Observa-se também que todas as amostras sem inclusão de dióxido de silício (CP5, CP6 e CP7) possuem os menores valores de constante dielétrica e as amostras CP2 e CP3, amostras com mais concentrações de grafeno, possuem maiores valores de constante dielétrica, desta forma, corrobora os valores obtidos para a constante dielétrica com frequência de 1 kHz.

Figura 32 - Valores da Constante dielétrica em função da Temperatura das amostras para frequências de 100 Hz



Fonte: próprio autor.

5.8 Condutividade Térmica

Os resultados apresentados na Tabela 3 sobre a condutividade térmica das amostras revela uma relação importante entre a adição de diferentes materiais e o

desempenho térmico das amostras. É importante salientar que a incerteza da medição da difusividade térmica é de ± 7,5 % do valor medido em laboratório.

Primeiramente, a adição de dióxido de silício foi observada não apenas no aumento da resistividade elétrica e da constante dielétrica, mas também na melhora da condutividade térmica das amostras CP2 (15,49 W/m K), CP3 (6,94 W/m K) e CP4 (5,89 W/m K), quando comparadas às amostras CP5 (4,70 W/m K),
CP6 (3,43 W/m K) e CP7 (5,56 W/m K), que não continham o dióxido de silício. Isso sugere que o dióxido de silício atua de forma positiva na densificação, um fator crucial para a condução de calor. A densificação mais alta pode permitir uma maior transferência de calor devido ao aumento da interação entre as partículas no material (Carvalho; Sales, 2019).

Além disso, as amostras que incorporaram grafeno se destacaram por apresentar uma condutividade térmica superior à da amostra de referência, CP1, que apresentou um valor de 3,35 W/m K. Isso indica que a presença de grafeno no compósito de titanato de bário melhora a eficiência térmica em comparação com a matriz contendo pentóxido de nióbio. O grafeno, conhecido por suas propriedades excepcionais de condução térmica, aparentemente potencializa a capacidade de condução de calor no material, o que resulta em sistemas mais eficientes, com menores perdas de energia e menor consumo (Deng, 2024).

Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que tanto o grafeno quanto o dióxido de silício influenciam a estrutura interna do material, promovendo uma melhor condução de calor e, consequentemente, um desempenho térmico mais eficaz. A interação entre essas partículas e a estrutura do titanato de bário possibilita a criação de caminhos mais eficientes para a transferência de calor, diminuindo as perdas e contribuindo para uma redução no desperdício de energia (Deng, 2024).

Tabela 3 – Valores dos ensaios térmicos dos corpos de prova realizados a 25 °C

Amostra	Difusividade térmica (α) (m^2/s)	Calor específico (Cp) (J/kg K)	Densidade Bulk (ρ) (kg/m^3)	Condutividade térmica (*k*) (W/m K)
CP1 (referência)	$1,21 \times 10^{-6}$	610	4560	3,35
CP2	$1,23 \times 10^{-6}$	1870	4980	11,45
CP3	$1,24 \times 10^{-6}$	1270	4410	6,94
CP4	$1,25 \times 10^{-6}$	1150	4100	5,89
CP5	$1,11 \times 10^{-6}$	990	4280	4,70
CP6	$1,19 \times 10^{-6}$	710	4060	3,43
CP7	$1,25 \times 10^{-6}$	1070	4170	5,56

Fonte: próprio autor.

5.9 Determinação do *Band Gap* por espectroscopia UV-Vis

Os resultados apresentados na Tabela 4, referente ao *Band Gap* das amostras, revela importantes implicações sobre as propriedades eletrônicas dos materiais analisados, especialmente considerando as interações entre grafeno, dióxido de silício e pentóxido de nióbio.

Primeiramente, que amostra CP3, que contém grafeno, apresenta um *Band Gap* aproximadamente 50 % menor em relação à CP1. Esse comportamento pode ser atribuído à alta mobilidade eletrônica do grafeno, que é significativamente maior que a de materiais convencionais, como o pentóxido de nióbio. De acordo com os estudos de Novoselov *et al*. (2004), a mobilidade eletrônica do grafeno pode chegar a cerca de 10.000 cm^2/V s, o que facilita o transporte de elétrons e, consequentemente, reduz a largura da banda proibida (*Band Gap*).

Além disso, a presença de dióxido de silício nas amostras CP2 (1,39 eV), CP3 (2,06 eV) e CP4 (2,79 eV) resultou em valores de *Band Gap* com menor energias quando comparados às amostras que possuem apenas grafeno (CP5 3,04 eV, CP6 3,05 eV e CP7 3,05 eV). Isso sugere que o dióxido de silício, que possui uma mobilidade eletrônica inferior à do grafeno, pode atuar de maneira a estabilizar a estrutura eletrônica do material, aumentando a largura da banda proibida. Essa diminuição da energia do *Band Gap* em amostras com grafeno e dióxido de silício

pode ser explicada pela superioridade da mobilidade eletrônica do grafeno, que é maior do que a do silício, de acordo com Segundo e Vilar (2017), a mobilidade eletrônica do grafeno é aproximadamente 100 vezes superior à do silício. Dessa forma, a combinação de grafeno com dióxido de silício parece ter um efeito sinérgico, resultando em uma estrutura eletrônica com características únicas, ao mesmo tempo que mantém a estabilidade necessária para controlar o fluxo de elétrons (Szunerits, 2024).

No entanto, a amostra de referência com pentóxido de nióbio (CP1) apresentou um *Band Gap* maior energia do que todas as amostras contendo grafeno, o que indica que, apesar das vantagens do grafeno em termos de mobilidade eletrônica, o pentóxido de nióbio, com suas propriedades intrínsecas, resulta em uma maior restrição à condução eletrônica. Isso pode ser relevante para determinadas aplicações, onde a maior largura de banda é desejada para controlar melhor o comportamento eletrônico do material (Dartora *et al*., 2015).

Tabela 4 - Valores de *Band Gap* encontrados dos materiais sinterizados

Material	*Band gap* (eV)
CP1	3,09
CP2	1,39
CP3	2,06
CP4	2,79
CP5	3,04
CP6	3,05
CP7	3,05

Fonte: próprio autor.

6 CONCLUSÕES

A pesquisa mostra que o sistema elétrico implementado foi eficaz para realizar as medições em materiais cerâmicos, pois permitiu uma análise detalhada das propriedades das amostras de $BaTiO_3$ incorporadas com grafeno. A caracterização por difração de raios X (DRX) evidenciou que a adição de grafeno não resultou na formação de novas fases, mas sim no crescimento dos cristalitos. Isso indicou que a adição, embora discreta, foi efetiva.

Percebe-se a necessidade do SiO_2 para elevar a resistência à flexão. Quando compara a amostra de referência com Nb_2O_5 com as amostras com grafeno, na mesma concentração, 0,75 mol %, ocorreu um aumento da resistência à flexão em mais de 2 vezes para a amostra com grafeno.

Ao analisar a resistividade elétrica, observou-se que o grafeno teve um impacto importante nas propriedades do material. A amostra com inserção de 0,75 mol % de grafeno (CP3) apresentou a menor resistividade a 175 ºC, e todas as amostras com grafeno mostraram uma tendência de aumento de resistividade à medida que a temperatura aproximou para 125 ºC, devido provavelmente, à mudança do sistema cristalino do $BaTiO_3$ de tetragonal para cúbico, que é em torno desta temperatura. Além disso, as amostras dopadas com grafeno mantiveram resistividade elétrica mais baixa em temperaturas superiores a 300 ºC, em comparação com as dopadas com Nb_2O_5.

O grafeno também se destacou ao influenciar a microestrutura do $BaTiO_3$, pois inibiu o crescimento dos grãos e contribuiu para o aumento da constante dielétrica, o que é vantajoso para aplicações na indústria eletroeletrônica. As amostras com grafeno apresentaram maior condutividade térmica em comparação com aquelas dopadas com Nb_2O_5, as quais, refletiram um desempenho superior para as composições com grafeno. A análise da mobilidade eletrônica também mostrou que as amostras dopadas com grafeno e SiO_2 apresentaram maior mobilidade eletrônica e menor *Band Gap*, o que potencializa suas propriedades eletrônicas.

Esses resultados demonstram o potencial das composições dopadas com grafeno para melhorar as propriedades elétricas, térmicas e mecânicas do $BaTiO_3$, abrindo novas possibilidades para o desenvolvimento de materiais com aplicações em dispositivos eletroeletrônicos de alto desempenho.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Compósitos de pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) e grafeno puro em matriz de titanato de bário ($BaTiO_3$) gera grandes possibilidades de pesquisas, assim trabalhos futuros poderiam avaliar e investigar a influência da concentração e dispersão destes materiais.
- ✓ Estudar algumas características: como elétricas (resistividade e permissividade relativa), térmicas (difusividade, calor específico e densidade) e mecânicas (ensaio à flexão) em temperaturas ambiente e elevadas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ELEMENTS**. https://www.americanelements.com/graphene-1034343-98-0.** Acesso em 27/04/2025.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C373 - 88 - **Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products.** 2006**.**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D257-14 - **Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials.** 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D790 – 17 - **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.** 2017.

ANTONIAZZI, Igor de Souza Lana. **Grafeno epitaxial sobre SiC(0001): crescimento, intercalação e efeitos de interface**. 2016. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

ANTUNES, A. C.; ANTUNES, S. R. M.; PIANARO, S. A.; LONGO, E.; VARELA, J. A. Effect of Ta_2O_5 doping on the electrical properties of 0,99 SnO_2. 0,01CoO ceramic. **J. Mat. Sci**., v. 35, p. 1-6, 2000.

ANTUNES, A. C.; ANTUNES, S. R. M.; PIANARO, S. A.; ROCHA, M. R.; LONGO, E. e VARELA, J.A. Nonlinear electrical behavior of the SnO_2 center dot CoO center dot Ta_2O_5 system. **Mat. Sci. Lett.**, v. 17, p. 577-579, 1998.

ARLT, G., HENNINGS, D. & WITH, G. de. Dielectric properties of fine-grained barium Titanate ceramics. **Journal of Applied Physics***,* v. 58, n. 1, p. 619-625. 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5403: **Materiais isolantes elétricos sólidos: determinação da resistividade volumétrica e superficial,** p. 26. 1983.

AYYAPPADAS, C.; MUTHUCHAMY, A.; ANNAMALAI, A. R.; AGRAWAL, D. K. An investigation on the effect of sintering mode on various properties of copper-graphene metal matrix composite**. Advanced Powder Technology**, v. 28, n. 7, p. 1760–1768, 2017.

BACARRO, A. L. B.; GUTZ, I. G. R.; Fotoeletrocatálise em semicondutores: dos princípios básicos até sua conformação à nonaescala. **Cerâmica Nova**, v. 41, n. 3, p. 326-339, 2018.

BACCI, G. **Obtenção e caracterização de nanopartículas de $BaTiO_3$ via processo não convencional de liofilização e sua aplicação como sensor de temperatura positiva (PTC).** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia e ciência de materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2011.

BERGER, C.; SONG, Z.; LI, T.; LI, X.; OGBAZGHI, A. Y.; FENG, R.; DAI, Z.; MARCHENKOV, A. N.; CONRAD, E. H.; FIRST, P. N.; HEER, W. A. Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 108, n. 52, p. 19912-19916, 2004.

BLUMENTAL, R. N.; SEITZ, M. A. Electrical conductivity in ceramics and glass, part A. **Experimental techniques**, p. 35. 1974.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.** 8ª ed. São Paulo: Person, 2004.

BRINKER, M., HUBER, P. "A Mott-Schottky Analysis of Mesoporous Silicon in Aqueous Electrolyte by Electrochemical Impedance Spectroscopy." **Arxiv preprint Arxiv**. 2312.04252. 2023.

BUENO, M. J. **Propriedades eletrônicas de grafenos com defeitos**. 2011. 1-84 f. Doutorado (Doutorado em Física) - Universidade federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: Uma introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: Uma introdução.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 680p.

CAMARGOS, J. S. F.; SEMMER, A. O.; SILVA, S. N. Characteristics and applications of graphene and graphene oxide and main routes for synthesis. **The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC,** v. 03, p. 1118-1130, 2017.

CAO, X.; ZHANG, H.; & WEI, Y. Graphene-based composite materials for electronic and electrochemical applications. **Journal of Materials Science. V.** 48, n. 20, p. 6983–6990. 2013.

CAO, Z.; LI, D.; WANG, Y. Bayesian perspective on geotechnical variability and site characterization. **Engineering Geology**, v. 203, p. 117-125. 2016.

CARDOSO; J. V.; BRUSCH, J. V. Grafeno e a sua relação com super e semicondutores Grafeno e a sua relação com super e semicondutores. **Environmental Science & Technology Innovation**, Bauru, v. 2, n.1, p. 78-90, agosto 2023.

CARMO, J. R. **Síntese e caracterização microestrutural e elétrica de compostos cerâmicos a base de soluções sólidas de titanato de estrôncio, titanato de cálcio e óxido de ferro.** 2011. Tese (doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011.

CARVALHO, A., N. C.; MELO, J. J. S.; SALES, F. H. Medidas elétricas e dielétricas em cerâmicas de $BaTiO_3$ dopadas com SiO_2 e Bi_2O_3. **Brazilian Journal of Development.** v.8, n.1, p. 6871-6899, 2022.

CARVALHO, A., N., C.; SALES, F. H. S. Medidas elétricas e dielétricas em cerâmicas de $BaTiO_3$ dopadas com SiO_2 e Nb_2O_5. **Holos.** v. 1. 2019.

CASTRO, M. O. **Síntese de grafeno pelo método CVD.** 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado em Física). Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2011.

CERCONI, C.; P., P.; BORRERO, G.; Preparação e caracterização de pós e filmes finos de $BaTiO_3$ sinterizados via método Pechini. **Revista Matéria,** v. 18, n. 4, p.1510-1524, 2013.

CERRILLO, R. M. N.; MARTÍNEZ, M. A. V.; SALAMANCA, A. J. A. Sensores, acceso y procesado de imágenes multiespectrales y térmicas de interés forestal. **Researchgate**, p.137-158, 2024.

CHAN, N. H.; SHARMA, R. K.; SMYTH, D. M. Structure and dielectric properties of barium titanate nanoparticles obtained by conventional process. rev. **Journal of American Society.** v. 64, p. 556. 1961.

CHEN, S. B. L. LEVENDORF, M; CAI, W; JU, Sang-Yong. EDGEWORTH, J; LI, X; MAGNUSON, C; VELAMAKANNI, A; PINER, R. R; PARK, J; RUOFF, R. Oxidation resistance of graphene-coated Cu and Cu/Ni alloy**. ACS Nano**, v. 5, p. 1321-1327, 2011.

CHEUNG, M. C.; CHAN, H. L. W.; CHOY, C. L. Study on barium titanate ceramics prepared by various methods. **Journal of Materials Science**. v. 36. P. 381-387. 2001.

CHU, K.; JIA, C. Enhanced strength in bulk graphene-copper composites. **Physica Status Solidi**, v. 211, n. 1, p. 184–190, 2014.

CHU, S. Y; YAN, S. L.; CHEN, S. L. Analysis of ZnO varistors prepared by the sol-gel method. **Ceramics International,** v. 26, p. 733-737, 2000.

CLARKE, D. R. Varistor ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 82, n. 3, p. 485-502, 1999.

CORDEIRO, G. L.; OLIVEIRA, R.R.; FERREIRA, N. A. M.; XAVIER, G. L.; YOSHITO, W. K.; LIMA, N. B.; LAZAR, D. R. R.; USSUI, V. **Síntese Química e Caracterização de Grafeno**. 59º Congresso Brasileiro de Cerâmica, p. 2324–2332, 2015.

DAWSON, W. J. Hydrothermal synthesis of advanced ceramic powder. **American Ceramic Society.** v. 67, p. 1673. 1988.

DE CARVALHO, E.; BERTOLETE, M.; MACHADO, F.; MUCCILO, E. N. S. Caracterização da perovskita $CaCu_3Ti_4O_{12}$ consolidada por sinterização assistida por campo elétrico. **Cerâmica**, v. 59, n. 350, p. 293-301, 2013.

DENG, CAOZHUANG.; YI, ZHANG.; YANG, DAN.; ZHANG, HAIZHONG.; ZHU, MINMIN. Recent Progress on Barium Titanate-Based Ferroelectrics for Sensor Applications**. Advanced Sensor Research**, v. 3, 2024.

DONG, Z.; BAHAR, M., M.; JIT, J.; KENNEDY, B.; PRIESTLY, B.; NG, J.; LAMB, D.; LIU, Y.; DUAN, L.; NAIDU, R. Issues raised by the reference doses for perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid. **Environment International**, v. 5, p. 86-94, 2017.

DROZDOVA, M. **Eletroconductive oxide ceramics with hybrid graphenated nanofibers**. 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Departament of Mechanical and Industrial Engineering, Tallinn University of Technology Scool of Engineering, Estônia. 2017.

DEGIOVANNI, A.; MAILLET, D.; ANDRÉ, S.; BATSALE, J.; MOINE, C. Thermal Quadrupoles: Solving the Heat Equation Through Integral Transforms. **John Wiley & Sons**. P. 388, 2000.

EBERT, J., N.; RHEINHEIMER, W. Electric field induced degradation of high-voltage PTCR Ceramics. **Open Ceramics,** v.11, 2022.

EDA, K. Zinc Oxide Varistors. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. v.10, n. 6, p. 736-746, 1989.

ELIAS, D.C. **Estudo das propriedades de transporte elétrico de grafeno e de grafeno hidrogenado.** Belo Horizonte: UFMG, 2009. Tese (Doutorado em Física) Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

ERTUG. B. The Fabrication of Porous Barium Titanate Ceramics via Pore-Forming Agents (PFAs) for Thermistor and Sensor Application**. Powder Metallurgy**, 2012.

FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. C**. Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise.** 7. ed. Bahia: Universidade Federal da Bahia. p. 1862-1870, v. 32. ISBN 1860-1870, 2009.

FONSECA, M. E. **SÍNTESE HIDROTERMAL DE NANOPARTÍCULAS BASEADAS EM CÉRIO E NIÓBIO: CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE CATALÍTICA**. Dissertação (Mestrado em Química). Programa de pós-graduação multicêntrico em Química**.** Cefet - MG. 2020.

FRANÇA JÚNIOR, S. A. N.; SOUZA, A. L. R.; L. B. CRUZ; F. VAZ; A. FERREIRA; F. BOHN; W. ACCHAR; M. A. CORREA. High frequency dielectric characterization of graphene doped flexible ceramics multilayers. **Ceramics International**, v. 48, p. 20260-20265. 2022.

FRÓZ, M. K. V. C. **Aplicação de sensor eletroquímico de grafeno induzido por laser para determinação da nimesulida**. 2024. Dissertação (Mestrado em Química) – UFMA, São Luís, 2024.

GAO, X.; YUE, H.; GUO, E.; ZHANG, H.; LIN, X.; YAO, L.; WANG, B. Mechanical properties and thermal conductivity of graphene reinforced copper matriz composites. **Powder Tecnology**, v. 301, p. 601-607. 2016.

GHARBI, A.; HAMLAOUI, Y.; PEDRAZA, F. Electrochemical exfoliation of graphene nanosheets and development of a novel efficient Ni-CeO2-Gr ternary nanocomposite coatings for dual functional anti-corrosion and wear-resistance. **Surface & Coatings Technology.** V. 494, part 2, 2024.

GIROTTO, E. M & SANTOS, I. A. Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuá-las corretamente. **Química Nova**, v. 25, n.4, 2002.

GLUCHOWSKI, P.; TOMALA, R.; JEZOWSKI, A.; SZEWCZYK, D.; MACALIK, B.; SMOLINA, I.; KURZYNOWSKI, T.; STREK, W. **Preparation and Physical characteristics of graphene ceramics. Nature,** v. 10**,** 2020.

GONÇALVES, B. G.; **Produção de heterojunção baseada em tântalo aplicado para fotocatálise.** 2022. Tese (Doutorado) – Curso de Ciência de materiais, Universidade Federal de Pernambuco, João Pessoa, 2022.

GONÇALVES, R. D. **Propriedades estruturais e eletrônicas de nanotubos e nanofitas BxCyNz:** UM ESTUDO POR PRIMEIROS PRINCÍPIOS. 2013. 86 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Departamento de Física, Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, João Pessoa, 2013.

GONÇALVES, R. S. **Efeitos de interface e da dopagem nas propriedades estruturais, óticas e elétricas de filmes finos de ZnO.** Dissertação (Mestrado em Física), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016.

GRALIK, G.; & BIAVA, G. Characterization of NTC automotive thermistor. **Revista Matéria**, v. 24, n. 4. 2019.

GUAN, S.; YANG, H.; CHENG, S.; WANG, X.; SUN, Y; YANG, X.; TAN, H.; ZHANG, H. Phase structure, domain structure, thermal stability, and high-temperature piezoelectric response of $BiFeO_3$–$BaTiO_3$ lead-free piezoelectric ceramics. **Ceramics International**, v. 50, n.1, p. 384-393, 2024.

GUANGNENG, F. LIXIA, H. XEGUANG, H. Growing thermistory of barrier dieletric. **Journal Crytal Growth**. v. 279, p. 289. 2005.

HENCH, L. WEST, J. **The sol-gel process**. Chemical Reviews. V. 90. P. 33-36. 1990. HEXOGRAPHENE. Destinatário: *e-mail.* **Ficha técnica de HP-50 – Grafeno**. Recebido em 02 out 2023.

HEYWANG, W. Study os dielectric barrier odf positives temperatures coefficients effects. **Solid Stade Electron**, V. 3, p. 51, 1961.

HOSSEINI, S. A., ROMANO, G., GREANEY, P. A. "Enhanced Thermoelectric Performance of Polycrystalline Si0.8Ge0.2 Alloys through the Addition of Nanoscale Porosity." **Arxiv preprint Arxiv**: 2103.14223. 2021.

HSIU-FUNG, C. Effect of sintering aids on the electrical properties of positive temperature coefficients of resistivity BaTiO3 ceramics. **Journal of Applied Physics**, v. 66, p.1382-1387. 1989.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13320-1: 1999. **Particle size analysis - Laser Diffraction methods.** 1ª ed. 1999.

JENKINS, R., SNYDER, R. L. **Introduction to X-ray Powder Diffractometry**. V.138 in Chemical Analysis. John Wiley & Sons, New York: Inc,1996.

KAHN, M. Barium titanate potential barrier study by PTC sensor**.** rev. **American Ceramic Society.** v. 50, p. 676. 1971.

KUILLA, T.; BHADRA, S.; YAO, D.; KIM, N. H.; BOSE, S.; LEE, J. H. Recent advances in graphene based polymer composites. **Progress in Polymer Science**, v. 35, p. 1350-1375, 2010.

KUWABARA, M., Barriers eletronics $CaTiO_3$ by convencional method. rev. **Advances in Ceramic,** v. 7, p. 137. 1984.

Leading the way in graphene electronics. *In*: **Paragraf**. 2024. Disponível em: https://www.paragraf.com/hall-sensors/. Acesso em 10 dez. 2024.

LEE, C., WEI, X., KYSAR, J. W., & HONE, J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. **Science**, v. 321, n. 5887, p. 385–388. 2008.

LIU, J.; He, J. L.; LONG, W. C. The dependence of sintering Temperature on Schottky Barrier and Bulk electron traps of ZnO varistors. **Science China**, v. 54, n. 2, p.375-378, 2011.

MAIO, A; PIBIRI, I; MANTIA, F. P.; SCAFFARO, R. **An overview of functionalized graphene nanomaterials for advanced applications.** 11. ed. Italy: Cittadella Universitaria, 2021.

MANCINI, W. M., & PAULIN FILHO, P. I. Barreiras de potencial mapeadas por microscopia de força atômica em cerâmicas à base de BaTiO3 dopadas com lantânio. **Cerâmica**, v. 53. p. 174-152. 2007.

MANZOOR, U. & KIM, D. K. Synthesis of nano-sized barium titanate powder by solid-stade reaction between barium carbonate and titânia. **J. Mater Sci Technot**, v. 23, p. 655-658, 2007.

MAKAROV, V. & TRONTELJ, M. Novel varistor material based on tungsten oxide. **Journal of Materials Science Letters**, v. 13, p. 937-939, 1994.

MARASCHIN, T. G**. Preparação de óxido de grafeno e óxido de grafeno reduzido e dispersão em matriz polimérica biodegradável.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia e tecnologia de materiais – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MARCONDES, C. G. N. **Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil, 2012.

MATSUOKA, M. Non-Ohmic properties of zinc-oxide ceramics. **Japanese Journal of Applied Physics,** v. 10, n. 6, p. 736-746, 1971.

MENDES FILHO, A. A.; PINTO, L. C. B. M.; OLIVEIRA, C. P.; ARAUJO, F. G. S. Influência das temperaturas de síntese e de queima na sinterização de cerâmicas de titanato de bário obtido por via hidrotérmica. **Revista REM**, v. 55, n. 2. 2002.

MILEWSKI, J.; MILLER, A.; SALACINSKI, J. **Int. J. Hydrogen En**. v.32 p.687, 2007.

MOTTA, F. V. **Estrutura e propriedade fotoluminescente do titanato de bário e cálcio obtido pelo método de polimerização de complexos (MPC).** 2008. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

MUNIZ, F. T. L. **Análise da equação de Scherrer pela teoria dinâmica da difração de raios x aplicada a distribuições de tamanho de cristalitos**. 2017. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Física da Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2017.

NEW SCIENCE VENTURES. **Finalmente, dispositivos eletrônicos de grafeno disponíveis para todos**. 2024. Disponível em: https://www.newscienceventures.com/finally-graphene-electronic-devices-available-for-all/. Acesso em: 10 dez. 2024.

NOGUEIRA, T. A. **Efeito das correntes de impulso de curta duração na degradação e na capacidade de absorção de energia de varistores a ZnO.** 2023. Tese (Doutorado em Engenharia elétrica – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023.

NOVOSELOV, K. S. Nobel Lecture: Graphene: Materials in Flatland. **Reviews of Modern Physics**, v. 83, p. 837-849, 2011.

NOVOSELOV. K. S., GEIM, A. K., MOROZOV, S. V., JIANG, D., ZHANG, Y., DUBONOS, S. V., GRIGORIEVA, I. V., FIRSOV, A. A. Electric field effect in atomically thin carbon films. **Science**, v. 306, p. 666-669, 2004.

O'DWYER, C**.** "Porous Semiconductors: Growth and Applications." **Arxiv preprint Arxiv**: 2208-13466. 2022.

Oliveira, F. C. **Previsibilidade de falhas em capacitores do barramento CC de inversores de frequência.** 2012. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

Oliveira, M. A. **Síntese e caracterização de cerâmicas ferroelétricas de $BaTiO_3$ modificadas com Sm^{3+}**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Física, 2012.

Oliveira, R. G. M. **Estudo das propriedades dielétricas e estruturais das matrizes cerâmicas $Na_2Nb_4O_{11}$ (NN) com aditivo de Bi_2O_3 para aplicações em componentes de rádio frequência e microondas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Teleinformática, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2012.

PARKER, W. J. et al.; **J. Appl. Phys**., v. 32, p. 1679-1681, 1961.

PARK, K.; KIM, J. G.; CHO, W. S. Effect of partially oxidized Ti powders on the microstructure and PTCR Characteristics of (Ba, Sr)TiO_3. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v.13, nº.1, p.13-19, 2002.

PATTIPAKA, S; LIM, Y; SON, Y; BAE, Y; PEDDIGARI, M.; HWANG, G. Ceramic-Based Dielectric Materials for Energy Storage Capacitor Applications**. Materials**, v. 17, n. 2277, p. 1-26, 2024.

PATTERSON, A. L. The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination. **Physical Review** v.56, p.978-982, 1939.

PAUNOVIC, V.; MITIC, V. V.; DJORDJEVIC, M.; PRIJIC, Z. Niobium doping effect on batio3 structure and dielectric properties. **Ceramics International, Elsevier**, v. 46, p. 8154–8164, 4 2020. ISSN 0272-8842.

PEREIRA, R. A.; FILHO, A. A. M.; ARAUJO, F. G. S. Influência do lantânio nas propriedades elétricas do titanato de bário obtido por síntese hidrotérmica. **Revista REM**, v. 59, n. 2, p. 207-212, 2006.

PIANARO, S. A.; BUENO, P. R.; LONGO, E.; VARELA, J. A. A new SnO_2 – based varistor system. **J. Mat. Sci. Lett**. v. 14, p. 692, 1995.

PHIRI, J.; GANE, P.; MALONEY, T. C. General overview of graphene: Production, properties and application in polymer composites. **Materials Science and Engineering**, v. 215, p. 9-28, 2017.

PU, Y.; CHEN. W.; CHEN. C.; HANS, T. L. Microstructure and dielectric properties of dysprosium-doped barium titanate ceramics**. Cerâmica**, v. 51, p. 214-218. 2005.

RANI, ROZINA A. et al. Thin films and nanostructures of niobium pentoxide: fundamental properties, synthesis methods and applications. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 2, n. 38, p. 15683-15703, 2014.

RICKERT**,** H**. Electrochemistry of Solids, an Introduction**. New York, 1982.

SABOORI, A.; PAVESE, M.; BADINI, C.; FINO, P. A Novel Approach to Enhance the Mechanical Strength and Electrical and Thermal Conductivity of Cu-GNP

Nanocomposites. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 49, n. 1, p. 333–345, 2018.

SALES, F. H.; ACCHAR, W.; P. COSTA, J. A. Propriedades elétricas de batio$_3$ dopado com sio$_2$ e bi$_2$o$_3$. **Holos**; v. 4, n. 27, 2011.

SALES, F. H. S.; DE CARVALHO, A. N. C. MEDIDAS ELÉTRICAS E DIELÉTRICAS EM CERÂMICAS DE $BaTIO_3$ DOPADAS COM SIO_2 E Nb_2O_5. **Holos**; v. 1, p. 1–18, 2019.

SANTOS, F. P.; CAMPOS, E.; COSTA, M.; MELO, F. C. L.; HONDA, R. Y.; MOTA, R. P. Superficial modifications in TiO_2 and Al_2O_3 ceramics. **Materials Research**, v. 6, n. 3, 353-357, 2003.

SANTOS, W. N; BALDO, J. B. **Anais do 39º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, Águas de Lindóia, SP, 484-488, 1995.

SANTOS, W. N. dos. O método de fio quente: Técnica em paralelo e técnica de superfície**. Cerâmica**, São Carlos, v. 306, n. 48, p.86-91, jun. 2002.

SEA-FUE, W.; YUNG-FU, H.; YU-WEN, H.; YI-XIN, L. Effect of Ta_2O_5 and Nb_2O_5 dopants on the stable dielectric properties of $BaTiO_3$-($Bi_{0.5}Na_{0.5}$) TiO_3-bsed materials. **Applied Sciences**. V. 5, n. 1, p. 221-234. 2015.

SEGAL, D. Chemical synthesis of ceramic materials. **Journal of Materials Chemistry**, v. 7, n. 8, p.1297–1305, 1997.

SEMANCIK, S.; FRYBERGER, T. B. Model Studies of SnO2 - based gas sensors: vacancy defects and Pd additive effects. **Sens. and Actuators,** B1, v. 97, 1990.

SENA, G. S.; SALES, R. V.; GOMES, E. S.; AMARAL, F.; MENDES, F.; MACEDO, A. A, M.; Síntese e caracterização do BaTiO3 pelo método da coprecipitação e aplicação em antenas patch de microfita. **Revista Matéria**. v. 26, nº 4, p. 2, 2021.

SEOL, J. H.; JO, I.; MOORE, A. L.; LINDSAY, L.; AITKEN, Z. H.; PETTES, M. T.; LI, X.; YAO, Z.; HUANG, R.; BROIDO, D.; MINGO, N.; RUOFF, R.; SHI, L. Two – Dimensional phonon transport in supported graphene. **Science**. v. 328, nº 5975, 2010.

SHAKER, LINA, M.; ABDULAMIE, A., A.; AL-AMIERY, A., A**.;** Graphene-Enabled Advancements in solar cells technology**. Journal of alloys and Compounds**. v. 1020, 2025.

SIGMA-ALDRICH BRASIL LTDA. **https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/aldrich/208515.** Acesso em 27/04/2025.

SIGMA-ALDRICH BRASIL LTDA**.** **https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/aldrich/342890.** Acesso em 27/04/2025.

SILVA, R. L. S.; BANERJEE, P.; FRANCO JÚNIOR, A. Functional properties of donor and acceptor co-doped high Dielectric constant zinc oxide ceramics. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v.21, n.18, p. 9456-9464, 2019.

SOARES, T.; FERRARO, G.; SANTOS, C. **Aulas de física**. 1ª ed. São Paulo. Ed. Atual, 1993.

SOLDANO, C.; MAHMOOD, A.; DUJARDIN, E. Production, properties and potential of graphene. **Carbon**, v. 48, p. 2127-2150, 2010.

SOUZA, J. C. S. **Desenvolvimento de uma estação de carregamento de baterias de carros elétricos.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica). Universidade do Porto, Portugal, 2023.

STANCAT, A. C; PAULON, V. A. **Anais da Conferência Sustainable Constructioninto the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement Based Materials**, p. 941-947, João Pessoa, PB, 2000.

STOJANOVIC, V. D.; SIMOES, A. Z.; SANTOS, P. C. O.; JOVALEKIC, C.; MITIC, V. V.; VARELA, J. A. Utilization of barium titanate for PTC sensor. **Journal of the European Ceramic Society**. v. 5., p. 1985. 2005.

STANKOVICH, S.; DIKIN, D. A.; PINER, R. D.; KOHLHAAS, K. A.; KLEINHAMMES, A.; JIA, Y.; WU, Y.; NGUYEN, S. T.; RUOFF, R. S. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. **Carbon,** v. 45, p.1558-1565, 2007.

THANGARASSU, S.; OH, T. H. Progress in poly(phenylene oxide) based cation exchange membranes for fuel cells and redox flow batteries applications. **International Journal of Hydrogen Energy,** v. 46, p. 38381-38415. 2021.

T. F. ANDRADE; R. MUCCILLO. Efeito da adição de óxido de zinco e de óxido de boro nas propriedades do zirconato de bário dopado com ítrio. **Cerâmica,** v. 57, p. 244-253. 2011.

THE WALL STREET JOURNAL. **https://www.wsj.com/articles/research-in-graphene-shows-new-potential-for-its-use-in-chips-5b2794a4?mod=tech_lead_story.** Acesso em 06/02/2024.

THVER, V.; MORISSETTE, S. L.; LEWIS, J. A.; TUTTLE, B. A.; VOIGT, J. A.; DIMOS, B. D. Direct-wire Fabrication of zinc oxide varistors. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 85, n. 1, p.123-128, 2002.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas em engenheiros**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

VAROL, T.; CANAKCI, A. Microstructure, electrical conductivity and hardness of multilayer graphene/Copper nanocomposites synthesized by flake powder metallurgy**. Metals and Materials International**, v. 21, n. 4, p. 704–712, 2015.

VIEIRA SEGUNDO, J. E. D.; VILAR, E. O. Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. **REMAP**, v. 1, n.1, p. 54–57, 2017.

VUOLO, J. **Fundamentos da teoria de erros**. 1ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1992.

ZHAO, J.; JI, P.; LI, Y.; LI, R.; ZHANG, K.; TIAN1, H.; YU, K.; BIAN, B.; HAO, L.; XIAO, X.; GRIFFIN, W.; DUDECK, N.; Ultrahigh-mobility semiconducting epitaxial graphene on silicon carbide. **Nature,** v**.** 625, p. 60-65. 2024.

ZHOU, X., YANG, Y., & ZHANG, Y**.** Enhancing electrical conductivity and mechanical properties of graphene/polymer composites*: A review*. **Journal of Materials Science**, v. 50, n.15, p. 5023–5032. 2015.

WANG, G.; HUANG. X.; JIANG, P.; Tailoring Dielectric properties and energy density of ferroeletric polymer nanocomposites by high-k nonowires. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 7, n. 3, 18027-18027, 2015.

WU, J. M. e LAI, C. H. Effect of lead oxide on niobium - doped titania varistors. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 74, n. 12, p. 3112-3117, 1991.

WU, J.; NAN, C.; LIN, Y.; DENG, Y. Giant Dielectric Permittivity Observed in Li and Ti Doped NiO. **Physical Review Letters**, v. 89, n.21, 2002.

XU D.; TANG M.; JIAO L.; YUAN H. M.; ZHAO, G. P.; CHENG X. N.; Effects of high-energy ball milling oxide-doped and varistor ceramic powder on ZnO varistor. **Science Direct Trans**, v. 22, p. 1423-1431, 2012.

XU, C., XU, B., GU, Y., XIONG, Z., SUN, J., ZHAO, X. S. Graphene-based electrodes for electrochemical energy storage. **Energy & Environmental Science**, 6, 1388-1414, 2013.

YAN, J.F.; RHODES, W. W. Preparation and Properties of TiO2 varistors. **Appl. Phys. Lett.**, v. 40, p. 536, 1982.
YAN, Z.; ZHANG, D.; ZHOU, X.; QI, H.; LUO, h.; ZHOU, K.; ABRAHAMS, I.; YAN, H. Silver niobate based lead-free ceramics with energy storage density. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 7, n.17, p. 10702-10711, 2019.

YANG, S.; WU, J. Novel niobium – doped titania varistor with added barium and bismut. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 76, p. 145, 1993.

APÊNDICE A – Tamanho de cristalito, largura a meia altura e posições dos picos do difratograma para os corpos de prova CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6 e CP7

Corpos de prova	Posições dos picos (2Θ)	Largura a meia altura- (FVHM)	Tamanho de Cristalito (Equação de Scherrer)
CP1 (referência)	22,16º	0,930º	30 nm
	31,46º	0,225º	37 nm
	38,82º	0,124º	52 nm
	45,30º	0,211º	37 nm
	56,18º	0,203º	35 nm
	65,86º	0,435º	24 nm
	75,12º	0,228º	40 nm
	Tamanho médio de Cristalito		34,4 nm
CP2	22,16º	0,324º	27 nm
	31,46º	0,238º	36 nm
	38,82º	0,125º	52 nm
	45,30º	0,152º	44 nm
	56,18º	0,192º	36 nm
	65,86º	0,450º	21 nm
	75,12º	0,497º	35 nm
	Tamanho médio de Cristalito		35,8 nm
CP3	22,16º	0,314º	28 nm
	31,46º	0,214º	39 nm
	38,82º	0,110º	55 nm
	45,30º	0,164º	42 nm
	56,18º	0,179º	38 nm
	65,86º	0,425º	22 nm
	75,12º	0,262º	29 nm
	Tamanho médio de Cristalito		36,1 nm
CP4	22,16º	0,366º	24 nm
	31,46º	0,235º	36 nm
	38,82º	0,128º	51 nm
	45,30º	0,170º	42 nm
	56,18º	0,127º	44 nm
	65,86º	0,309º	27 nm
	75,12º	0,162º	35 nm
	Tamanho médio de Cristalito		37 nm
CP5	22,16º	0,314º	28 nm
	31,46º	0,227º	37 nm
	38,82º	0,120º	53 nm
	45,30º	0,135º	47 nm
	56,18º	0,118º	45 nm
	65,86º	0,302º	27 nm
	75,12º	0,182º	43 nm
	Tamanho médio de Cristalito		40 nm
CP6	22,16º	0,313º	29 nm
	31,46º	0,238º	36 nm
	38,82º	0,120º	53 nm
	45,30º	0,123º	49 nm
	56,18º	0,111º	46 nm

	65,86º	0,446º	21 nm
	75,12º	0,168º	35 nm
	Tamanho médio de Cristalito		38,4 nm
CP7	22,16º	0,326º	27 nm
	31,46º	0,227º	37 nm
	38,82º	0,126º	52 nm
	45,30º	0,186º	40 nm
	56,18º	0,226º	44 nm
	65,86º	0,439º	21 nm
	75,12º	0,203º	32 nm
	Tamanho médio de Cristalito		36,1 nm

Fonte: próprio autor.

APÊNDICE B - Valores da temperatura x resistividade e temperatura x constante dielétrica

Temperatura (°C)	Resistividade (Ω m) CP1a	Resistividade (Ω m) CP1b	Média da resistividade CP1a e CP1b (1 kHz)	Desvio padrão
25	3.60E+03	3.96E+03	**3.78E+03**	2.56E+02
75	1.31E+04	1.31E+04	**1.31E+04**	8.49E+00
125	3.71E+03	3.67E+03	**3.69E+03**	3.14E+01
175	1.82E+03	2.41E+03	**2.11E+03**	4.18E+02
225	2.13E+03	3.20E+03	**2.66E+03**	7.55E+02
275	6.00E+03	8.14E+03	**7.07E+03**	1.51E+03
325	1.47E+04	1.45E+04	**1.46E+04**	1.87E+02
375	2.67E+04	2.88E+04	**2.78E+04**	1.48E+03
425	2.90E+04	2.72E+04	**2.81E+04**	1.27E+03

Temperatura (°C)	Resistividade (Ω m) CP2a	Resistividade (Ω m) CP2b	Média da resistividade CP2a e CP2b (1 kHz)	Desvio padrão
25	7.43E+02	8.73E+02	**8.08E+02**	9.13E+01
75	1.75E+03	1.57E+03	**1.66E+03**	1.24E+02
125	1.29E+03	1.45E+03	**1.37E+03**	1.15E+02
175	1.05E+03	1.02E+03	**1.04E+03**	2.12E+01
225	1.25E+03	1.26E+03	**1.25E+03**	8.59E+00
275	2.59E+03	2.59E+03	**2.59E+03**	2.86E+00
325	4.14E+03	4.28E+03	**4.21E+03**	9.90E+01
375	5.59E+03	5.44E+03	**5.52E+03**	1.06E+02
425	5.76E+03	5.66E+03	**5.71E+03**	7.07E+01

Temperatura (°C)	Resistividade (Ω m) CP3a	Resistividade (Ω m) CP3b	Média da resistividade CP3a e CP3b (1 kHz)	Desvio padrão
25	2.89E+03	2.77E+03	**2.83E+03**	8.59E+01
75	2.29E+03	2.62E+03	**2.46E+03**	2.31E+02
125	1.55E+03	1.35E+03	**1.45E+03**	1.40E+02
175	1.09E+03	1.03E+03	**1.06E+03**	3.82E+01
225	1.84E+03	1.10E+03	**1.47E+03**	5.27E+02
275	3.97E+03	1.33E+03	**2.65E+03**	1.87E+03
325	5.61E+03	3.06E+03	**4.33E+03**	1.81E+03
375	6.22E+03	5.31E+03	**5.77E+03**	6.46E+02
425	5.58E+03	6.17E+03	**5.88E+03**	4.17E+02

Temperatura (°C)	Resistividade (Ω m) CP4a	Resistividade (Ω m) CP4b	Média da resistividade CP4a e CP4b (1 kHz)	Desvio padrão
25	2.89E+03	3.02E+03	**2.96E+03**	9.19E+01
75	2.43E+03	2.53E+03	**2.48E+03**	7.07E+01
125	1.56E+03	1.52E+03	**1.54E+03**	2.83E+01
175	1.57E+03	1.36E+03	**1.47E+03**	1.46E+02
225	2.22E+03	2.87E+03	**2.55E+03**	4.60E+02
275	5.99E+03	5.63E+03	**5.81E+03**	2.57E+02
325	4.47E+04	4.46E+04	**4.47E+04**	7.00E+01
375	4.10E+04	4.10E+04	**4.10E+04**	3.18E+00
425	2.23E+04	1.94E+04	**2.08E+04**	2.09E+03

Temperatura (°C)	Resistividade (Ω m) CP5a	Resistividade (Ω m) CP5b	Média da resistividade CP5a e CP5b (1 kHz)	Desvio padrão
25	1.92E+03	2.36E+03	**2.14E+03**	3.11E+02
75	1.97E+03	1.83E+03	**1.90E+03**	1.01E+02
125	1.11E+03	1.25E+03	**1.18E+03**	1.01E+02
175	9.77E+02	1.31E+03	**1.15E+03**	2.39E+02
225	1.58E+03	1.52E+03	**1.55E+03**	4.32E+01
275	3.46E+03	2.46E+03	**2.96E+03**	7.04E+02
325	5.52E+03	6.12E+03	**5.82E+03**	4.28E+02
375	1.44E+04	1.55E+04	**1.49E+04**	8.02E+02
425	1.64E+04	1.65E+04	**1.64E+04**	8.17E+01

Temperatura (°C)	Resistividade (Ω m) CP6a	Resistividade (Ω m) CP6b	Média da resistividade CP6a e CP6b (1 kHz)	Desvio padrão
25	2.46E+03	2.44E+03	**2.45E+03**	9.86E+00
75	5.26E+03	5.13E+03	**5.20E+03**	8.91E+01
125	2.95E+03	1.61E+03	**2.28E+03**	9.42E+02
175	2.79E+03	2.21E+03	**2.50E+03**	4.06E+02
225	2.16E+03	1.45E+03	**1.80E+03**	5.02E+02
275	4.41E+03	3.68E+03	**4.05E+03**	5.17E+02
325	8.28E+03	6.29E+03	**7.29E+03**	1.41E+03
375	1.46E+04	1.54E+04	**1.50E+04**	5.66E+02
425	1.64E+04	1.65E+04	**1.65E+04**	6.36E+01

Temperatura (°C)	Resistividade (Ω m) CP7a	Resistividade (Ω m) CP7b	Média da resistividade CP7a e CP4b (1 kHz)	Desvio padrão
25	6.07E+03	6.03E+03	**6.05E+03**	2.55E+01
75	6.24E+03	6.39E+03	**6.31E+03**	1.08E+02
125	2.26E+03	2.42E+03	**2.34E+03**	1.14E+02
175	2.64E+03	2.58E+03	**2.61E+03**	4.42E+01
225	2.30E+03	3.12E+03	**2.71E+03**	5.78E+02
275	5.11E+03	5.17E+03	**5.14E+03**	3.88E+01
325	4.30E+04	5.10E+04	**4.70E+04**	5.67E+03
375	3.45E+04	3.29E+04	**3.37E+04**	1.14E+03
425	1.92E+04	1.90E+04	**1.91E+04**	1.53E+02

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP1a	Constante dielétrica (Ω m) CP1b	Média da Constante dielétrica CP1a e CP1b (1 kHz)	Desvio padrão
25	1.40E+02	1.42E+02	**1.41E+02**	1.36E+00
75	2.04E+02	2.14E+02	**2.09E+02**	6.78E+00
125	4.89E+03	5.10E+03	**5.00E+03**	1.46E+02
175	2.90E+02	2.62E+02	**2.76E+02**	1.98E+01
225	6.19E+02	5.12E+02	**5.66E+02**	7.56E+01
275	1.48E+03	1.21E+03	**1.35E+03**	1.92E+02
325	2.14E+03	1.79E+03	**1.97E+03**	2.51E+02
375	1.72E+03	1.52E+03	**1.62E+03**	1.45E+02
425	2.98E+03	2.59E+03	**2.79E+03**	2.75E+02

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP2a	Constante dielétrica (Ω m) CP2b	Média da Constante dielétrica CP2a e CP2b (1 kHz)	Desvio padrão
25	7.41E+09	7.51E+09	**7.46E+09**	6.88E+07
75	7.39E+09	7.42E+09	**7.41E+09**	2.00E+07
125	7.28E+09	7.33E+09	**7.30E+09**	3.55E+07
175	7.31E+09	7.28E+09	**7.30E+09**	2.22E+07
225	7.28E+09	7.21E+09	**7.25E+09**	5.55E+07
275	7.10E+09	7.15E+09	**7.13E+09**	3.33E+07
325	6.95E+09	6.98E+09	**6.97E+09**	2.44E+07
375	7.10E+09	7.45E+09	**7.27E+09**	2.46E+08
425	6.26E+09	6.20E+09	**6.23E+09**	4.66E+07

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP3a	Constante dielétrica (Ω m) CP3b	Média da Constante dielétrica CP3a e CP3b (1 kHz)	Desvio padrão
25	2.16E+09	2.17E+09	**2.17E+09**	7.40E+06
75	2.95E+09	3.42E+09	**3.18E+09**	3.36E+08
125	2.71E+07	2.68E+07	**2.69E+07**	2.07E+05
175	4.76E+07	4.77E+07	**4.77E+07**	6.66E+04
225	5.39E+07	5.38E+07	**5.39E+07**	3.70E+04
275	7.85E+07	7.84E+07	**7.84E+07**	7.40E+04
325	1.33E+09	1.35E+09	**1.34E+09**	1.41E+07
375	1.99E+09	2.01E+09	**2.00E+09**	1.63E+07
425	2.28E+09	2.29E+09	**2.28E+09**	2.96E+06

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP4a	Constante dielétrica (Ω m) CP4b	Média da Constante dielétrica CP4a e CP4b (1 kHz)	Desvio padrão
25	7.99E+01	7.35E+01	**7.67E+01**	4.54E+00
75	8.37E+01	8.41E+01	**8.39E+01**	2.81E-01
125	7.97E+01	7.96E+01	**7.96E+01**	4.44E-02
175	1.16E+02	1.10E+02	**1.13E+02**	4.29E+00
225	1.25E+02	1.13E+02	**1.19E+02**	8.88E+00
275	1.09E+02	1.03E+02	**1.06E+02**	4.05E+00
325	3.39E+02	3.51E+02	**3.45E+02**	8.58E+00
375	1.13E+03	1.10E+03	**1.11E+03**	2.29E+01
425	2.06E+03	1.80E+03	**1.93E+03**	1.79E+02

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP5a	Constante dielétrica (Ω m) CP5b	Média da Constante dielétrica CP5a e CP5b (1 kHz)	Desvio padrão
25	1.01E+02	1.14E+02	**1.07E+02**	9.28E+00
75	6.12E+03	6.52E+03	**6.32E+03**	2.84E+02
125	4.96E+02	5.03E+02	**5.00E+02**	4.95E+00
175	7.74E+01	7.64E+01	**7.69E+01**	6.58E-01
225	1.06E+02	9.66E+01	**1.01E+02**	6.75E+00
275	3.39E+02	2.82E+02	**3.10E+02**	4.06E+01
325	7.99E+02	6.92E+02	**7.46E+02**	7.63E+01
375	2.14E+03	2.03E+03	**2.08E+03**	7.47E+01
425	3.68E+03	3.20E+03	**3.44E+03**	3.44E+02

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP6a	Constante dielétrica (Ω m) CP6b	Média da Constante dielétrica CP6a e CP6b (1 kHz)	Desvio padrão
25	6.26E+01	6.26E+01	**6.26E+01**	2.96E-02
75	1.28E+03	1.53E+03	**1.40E+03**	1.78E+02
125	4.34E+02	4.98E+02	**4.66E+02**	4.55E+01
175	6.89E+01	6.82E+01	**6.86E+01**	4.81E-01
225	7.84E+01	8.26E+01	**8.05E+01**	2.94E+00
275	1.53E+02	1.74E+02	**1.64E+02**	1.48E+01
325	4.78E+02	5.59E+02	**5.19E+02**	5.74E+01
375	1.58E+03	1.81E+03	**1.70E+03**	1.66E+02
425	2.63E+03	2.92E+03	**2.78E+03**	2.03E+02

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP7a	Constante dielétrica (Ω m) CP7b	Média da Constante dielétrica CP7a e CP7b (1 kHz)	Desvio padrão
25	3.48E+01	3.98E+01	**3.73E+01**	3.56E+00
75	4.04E+01	3.95E+02	**2.18E+02**	2.51E+02
125	3.85E+01	4.34E+01	**4.10E+01**	3.46E+00
175	3.98E+01	4.32E+01	**4.15E+01**	2.41E+00
225	4.01E+01	4.90E+01	**4.46E+01**	6.30E+00
275	4.62E+01	6.99E+01	**5.81E+01**	1.67E+01
325	1.06E+02	1.46E+02	**1.26E+02**	2.84E+01
375	6.14E+02	5.05E+02	**5.59E+02**	7.69E+01
425	2.01E+03	1.34E+03	**1.67E+03**	4.75E+02

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP1a	Constante dielétrica (Ω m) CP1b	Média da Constante dielétrica CP1a e CP1b (10 kHz)	Desvio padrão
25	1.15E+02	1.15E+02	**1.15E+02**	1.78E-01
75	1.77E+02	1.73E+02	**1.75E+02**	2.91E+00
125	1.33E+02	1.28E+02	**1.31E+02**	3.51E+00
175	1.23E+02	1.23E+02	**1.23E+02**	2.22E-01
225	1.15E+02	1.15E+02	**1.15E+02**	5.92E-02
275	1.06E+02	1.06E+02	**1.06E+02**	5.92E-02
325	1.04E+02	1.04E+02	**1.04E+02**	3.26E-01
375	1.10E+02	1.08E+02	**1.09E+02**	1.60E+00
425	1.44E+02	1.38E+02	**1.41E+02**	4.56E+00

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP2a	Constante dielétrica (Ω m) CP2b	Média da Constante dielétrica CP2a e CP2b (10 kHz)	Desvio padrão
25	6.53E+01	7.73E+01	**7.13E+01**	8.50E+00
75	6.20E+01	6.67E+01	**6.43E+01**	3.37E+00
125	6.66E+01	7.65E+01	**7.16E+01**	6.97E+00
175	7.37E+01	7.35E+01	**7.36E+01**	1.11E-01
225	7.26E+01	7.60E+01	**7.43E+01**	2.42E+00
275	8.18E+01	8.58E+01	**8.38E+01**	2.84E+00
325	9.23E+01	1.22E+02	**1.07E+02**	2.07E+01
375	1.37E+02	1.93E+02	**1.65E+02**	3.96E+01
425	2.41E+02	3.84E+02	**3.13E+02**	1.01E+02

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP3a	Constante dielétrica (Ω m) CP3b	Média da Constante dielétrica CP3a e CP3b (10 kHz)	Desvio padrão
25	8.98E+01	8.99E+01	**8.99E+01**	3.70E-02
75	8.81E+01	3.00E+02	**1.94E+02**	1.50E+02
125	8.38E+01	9.65E+01	**9.02E+01**	8.94E+00
175	8.64E+01	1.01E+02	**9.38E+01**	1.05E+01
225	7.78E+01	9.08E+01	**8.43E+01**	9.22E+00
275	8.14E+01	1.03E+02	**9.23E+01**	1.55E+01
325	8.18E+01	1.14E+02	**9.79E+01**	2.27E+01
375	8.13E+01	1.23E+02	**1.02E+02**	2.91E+01
425	8.28E+01	1.44E+02	**1.13E+02**	4.31E+01

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP4a	Constante dielétrica (Ω m) CP4b	Média da Constante dielétrica CP4a e CP4b (10 kHz)	Desvio padrão
25	6.05E+01	6.57E+00	**3.35E+01**	3.81E+01
75	1.47E+02	1.57E+01	**8.14E+01**	9.28E+01
125	5.89E+01	6.34E+00	**3.26E+01**	3.72E+01
175	5.83E+01	6.20E+00	**3.22E+01**	3.68E+01
225	5.21E+01	5.47E+00	**2.88E+01**	3.30E+01
275	4.79E+01	5.16E+00	**2.65E+01**	3.02E+01
325	4.74E+01	5.11E+00	**2.62E+01**	2.99E+01
375	5.42E+01	5.79E+00	**3.00E+01**	3.42E+01
425	7.50E+01	7.74E+00	**4.14E+01**	4.76E+01

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP5a	Constante dielétrica (Ω m) CP5b	Média da Constante dielétrica CP5a e CP5b (10 kHz)	Desvio padrão
25	4.66E+01	4.79E+01	**4.73E+01**	**9.32E-01**
75	7.29E+01	6.43E+01	**6.86E+01**	**6.05E+00**
125	4.66E+01	4.45E+01	**4.55E+01**	**1.51E+00**
175	3.01E+01	3.56E+01	**3.28E+01**	**3.88E+00**
225	5.73E+01	5.72E+01	**5.73E+01**	**6.46E-02**
275	8.01E+01	8.13E+01	**8.07E+01**	**8.58E-01**
325	7.46E+01	7.34E+01	**7.40E+01**	**8.60E-01**
375	6.31E+01	6.32E+01	**6.32E+01**	**9.54E-02**
425	6.57E+01	6.51E+01	**6.54E+01**	**3.97E-01**

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP6a	Constante dielétrica (Ω m) CP6b	Média da Constante dielétrica CP6a e CP6b (10 kHz)	Desvio padrão
25	1.24E+02	1.29E+02	**1.26E+02**	**3.70E+00**
75	1.57E+02	1.58E+02	**1.57E+02**	**7.52E-01**
125	1.15E+02	1.14E+02	**1.14E+02**	**6.95E-01**
175	7.43E+01	7.49E+01	**7.46E+01**	**4.14E-01**
225	7.05E+01	7.09E+01	**7.07E+01**	**3.08E-01**
275	6.76E+01	6.74E+01	**6.75E+01**	**1.32E-01**
325	6.56E+01	6.57E+01	**6.57E+01**	**4.15E-02**
375	6.22E+01	6.23E+01	**6.23E+01**	**4.91E-02**
425	6.03E+01	6.02E+01	**6.03E+01**	**8.20E-02**

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP7a	Constante dielétrica (Ω m) CP7b	Média da Constante dielétrica CP7a e CP7b (10 kHz)	Desvio padrão
25	4.47E+01	4.70E+01	**4.59E+01**	**1.63E+00**
75	4.36E+01	4.34E+01	**4.35E+01**	**1.11E-01**
125	4.02E+01	4.03E+01	**4.03E+01**	**5.18E-02**
175	4.17E+01	4.18E+01	**4.18E+01**	**5.92E-02**
225	4.12E+01	4.13E+01	**4.13E+01**	**6.66E-02**
275	4.09E+01	4.09E+01	**4.09E+01**	**7.11E-15**
325	4.06E+01	4.08E+01	**4.07E+01**	**8.14E-02**
375	4.07E+01	4.06E+01	**4.07E+01**	**8.88E-02**
425	4.13E+01	4.14E+01	**4.14E+01**	**3.70E-02**

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP1a	Constante dielétrica (Ω m) CP1b	Média da Constante dielétrica CP1a e CP1b (100 Hz)	Desvio padrão
25	1.65E+03	1.84E+03	**1.75E+03**	1.40E+02
75	7.36E+02	6.12E+02	**6.74E+02**	8.70E+01
125	3.16E+02	2.87E+02	**3.01E+02**	1.99E+01
175	2.94E+02	2.35E+02	**2.64E+02**	4.23E+01
225	3.02E+02	1.86E+02	**2.44E+02**	8.22E+01
275	1.33E+03	1.18E+03	**1.26E+03**	1.06E+02
325	3.33E+03	3.87E+03	**3.60E+03**	3.80E+02
375	9.66E+03	1.92E+04	**1.44E+04**	6.71E+03
425	1.52E+04	1.46E+04	**1.49E+04**	4.13E+02

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP2a	Constante dielétrica (Ω m) CP2b	Média da Constante dielétrica CP2a e CP2b (100 Hz)	Desvio padrão
25	2.68E+03	9.48E+02	**1.81E+03**	1.23E+03
75	4.20E+03	5.04E+04	**2.73E+04**	3.27E+04
125	4.07E+03	9.49E+02	**2.51E+03**	2.21E+03
175	6.57E+02	1.02E+03	**8.40E+02**	2.58E+02
225	1.20E+03	8.34E+02	**1.01E+03**	2.55E+02
275	1.53E+03	2.15E+03	**1.84E+03**	4.39E+02
325	3.24E+04	5.86E+03	**1.92E+04**	1.88E+04
375	1.12E+04	8.44E+03	**9.82E+03**	1.96E+03
425	2.16E+04	6.85E+04	**4.50E+04**	3.31E+04

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP3a	Constante dielétrica (Ω m) CP3b	Média da Constante dielétrica CP3a e CP3b (100 Hz)	Desvio padrão
25	1.32E+04	1.61E+04	**1.47E+04**	2.09E+03
75	3.59E+04	3.71E+04	**3.65E+04**	8.36E+02
125	2.64E+02	1.83E+02	**2.23E+02**	5.79E+01
175	1.82E+02	1.58E+02	**1.70E+02**	1.70E+01
225	2.52E+02	1.04E+04	**5.35E+03**	7.21E+03
275	1.31E+03	6.29E+02	**9.69E+02**	4.80E+02
325	1.52E+03	1.77E+03	**1.65E+03**	1.77E+02
375	3.43E+03	2.88E+03	**3.15E+03**	3.90E+02
425	7.62E+03	6.90E+03	**7.26E+03**	5.03E+02

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP4a	Constante dielétrica (Ω m) CP4b	Média da Constante dielétrica CP4a e CP4b (100 Hz)	Desvio padrão
25	2.61E+03	2.82E+02	**1.44E+03**	1.64E+03
75	1.89E+05	1.60E+04	**1.03E+05**	1.22E+05
125	1.19E+03	7.15E+01	**6.32E+02**	7.93E+02
175	1.72E+02	3.02E+01	**1.01E+02**	1.01E+02
225	2.14E+02	3.37E+01	**1.24E+02**	1.27E+02
275	5.45E+02	1.53E+02	**3.49E+02**	2.77E+02
325	2.07E+03	3.47E+02	**1.21E+03**	1.22E+03
375	2.86E+03	2.70E+02	**1.57E+03**	1.83E+03
425	1.52E+04	1.31E+03	**8.28E+03**	9.85E+03

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP5a	Constante dielétrica (Ω m) CP5b	Média da Constante dielétrica CP5a e CP5b (100 Hz)	Desvio padrão
25	7.42E+01	1.03E+02	**8.86E+01**	**2.04E+01**
75	1.10E+02	7.05E+01	**9.01E+01**	**2.78E+01**
125	9.56E+01	9.38E+01	**9.47E+01**	**1.28E+00**
175	5.07E+01	6.10E+01	**5.58E+01**	**7.30E+00**
225	7.60E+01	5.15E+01	**6.37E+01**	**1.73E+01**
275	6.79E+01	8.25E+01	**7.52E+01**	**1.03E+01**
325	1.49E+02	1.02E+02	**1.26E+02**	**3.33E+01**
375	6.94E+01	1.48E+02	**1.09E+02**	**5.56E+01**
425	2.31E+02	2.62E+02	**2.46E+02**	**2.21E+01**

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP6a	Constante dielétrica (Ω m) CP6b	Média da Constante dielétrica CP6a e CP6b (100 Hz)	Desvio padrão
25	1.65E+02	1.49E+02	**1.57E+02**	**1.12E+01**
75	3.47E+02	5.62E+02	**4.55E+02**	**1.52E+02**
125	1.50E+02	9.21E+01	**1.21E+02**	**4.07E+01**
175	1.11E+02	1.56E+02	**1.33E+02**	**3.14E+01**
225	1.57E+02	1.00E+02	**1.28E+02**	**4.00E+01**
275	1.61E+02	1.18E+02	**1.40E+02**	**3.02E+01**
325	2.80E+02	2.30E+02	**2.55E+02**	**3.51E+01**
375	3.83E+02	3.21E+02	**3.52E+02**	**4.41E+01**
425	5.45E+02	7.28E+02	**6.37E+02**	**1.29E+02**

Temperatura (°C)	Constante dielétrica (Ω m) CP7a	Constante dielétrica (Ω m) CP7b	Média da Constante dielétrica CP7a e CP7b (100 Hz)	Desvio padrão
25	7.06E+02	3.69E+02	**5.38E+02**	2.39E+02
75	7.71E+02	8.29E+02	**8.00E+02**	4.07E+01
125	1.42E+02	1.40E+02	**1.41E+02**	1.88E+00
175	1.82E+02	1.47E+02	**1.65E+02**	2.46E+01
225	8.73E+01	1.18E+02	**1.03E+02**	2.19E+01
275	1.07E+02	1.02E+02	**1.05E+02**	3.88E+00
325	1.58E+02	1.39E+02	**1.48E+02**	1.32E+01
375	2.35E+02	2.59E+02	**2.47E+02**	1.71E+01
425	5.92E+02	5.74E+02	**5.83E+02**	1.24E+01

Fonte: próprio autor.

APÊNDICE C – Valores dos ensaios térmicos dos corpos de prova.

RESULTADO GERAL - TITANATO DE BÁRIO DOPADO

Data ensaio	Número de medidas	Cod. Amostra	Média da difusividade térmica (m^2/s)	Desvio padrão amostral (m^2/s)
02/01/2025	12	CP1_Amostra A	1.22E-06	5.16E-08
02/01/2025	9	CP1_Amostra B	1.22E-06	9.08E-08
07/01/2025	2	CP1_Amostra A	1.16E-06	
07/01/2025	5	CP1_Amostra A	1.18E-06	7.10E-08
13/01/2025	5	CP1_Amostra B	1.23E-06	6.19E-08
13/01/2025	7	CP1_Amostra B	1.22E-06	7.60E-08
03/01/2025	13	CP2_Amostra 1	1.36E-06	8.27E-08
03/01/2025	13	CP2_Amostra2	1.13E-06	6.06E-08
08/01/2025	4	CP2_Amostra 1	1.35E-06	4.02E-08
08/01/2025	5	CP2_Amostra 2	1.13E-06	7.64E-08
15/01/2025	13	CP2 Amostra1	1.31E-06	8.11E-08
15/01/2025	14	CP2_Amostra 2	1.09E-06	6.15E-08
15/01/2025	2	CP3_Amostra 1	1.23E-06	
15/01/2025	2	CP3_Amostra 1	1.25E-06	
08/01/2025	5	CP4_Amostra 1	1.13E-06	7.23E-08
08/01/2025	5	CP4_Amostra 2	1.32E-06	9.67E-08
15/01/2025	13	CP4_Amostra 2	1.41E-06	5.62E-08
16/01/2025	11	CP4_Amostra 1	1.13E-06	7.63E-08
06/01/2025	12	CP5_Amostra 1	1.11E-06	4.15E-08
08/01/2025	5	CP5_Amostra 1	1.10E-06	6.62E-08
15/01/2025	12	CP5_Amostra 1	1.11E-06	6.08E-08
06/01/2025	11	CP6_Amostra 2	1.10E-06	4.53E-08
08/01/2025	4	CP6_Amostra 1	1.25E-06	7.33E-08
08/01/2025	3	CP6_Amostra 2	1.12E-06	2.54E-08
14/01/2025	7	CP6_Amostra 1	1.30E-06	6.60E-08
14/01/2025	2	CP6_Amostra 2	1.10E-06	
15/01/2025	9	CP6_Amostra 1	1.26E-06	6.69E-08
07/01/2025	12	CP7_Amostra 1	1.22E-06	5.74E-08
07/01/2025	15	CP7_Amostra 2	1.30E-06	7.29E-08
08/01/2025	5	CP7_Amostra 1	1.15E-06	5.77E-08
08/01/2025	5	CP7_Amostra 2	1.39E-06	9.41E-08
14/01/2025	7	CP7_Amostra 1	1.14E-06	7.03E-08
14/01/2025	8	CP7_Amostra 2	1.27E-06	3.61E-08

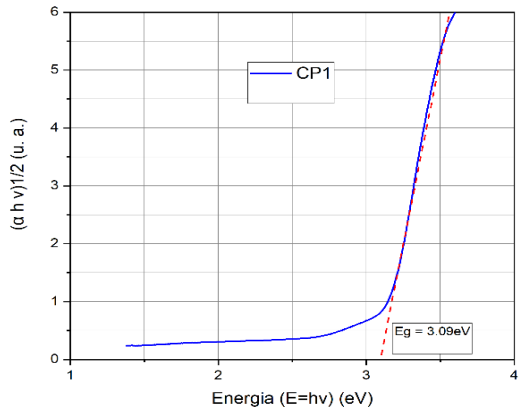
Amostra (25°C)	Número de medições da difusividade térmica	Média da difusividade térmica (m^2/s)	Calor específico (J/Kg K)	Condutividade térmica (W/m K)	Densidade Dulk (Kg/m^3)
CP1	40	1.21E-06	610	3.35	4560
CP2	62	1.23E-06	2530	15.49	4980
CP3	4	1.24E-06	1270	6.94	4410
CP4	34	1.25E-06	1150	5.89	4100
CP5	30	1.11E-06	990	4.70	4280
CP6	36	1.19E-06	710	3.43	4060
CP7	52	1.25E-06	1070	5.56	4170

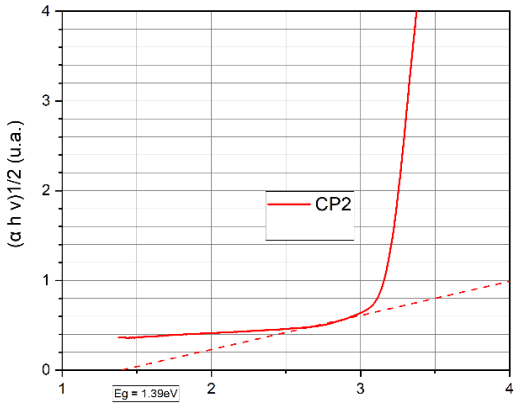
$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ $c_p = \frac{C}{m}$

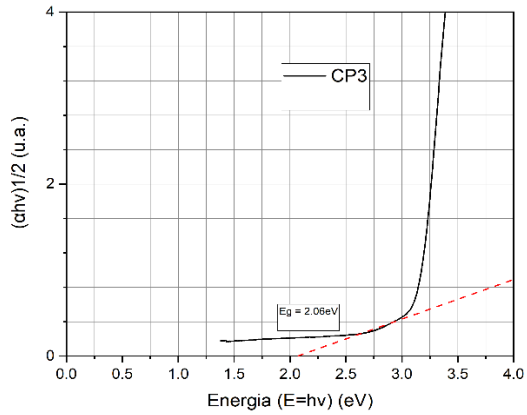
Onde: k é a condutividade térmica (W/m K); α é a difusividade térmica (m^2/s) ; ρ é a densidade (kg/m^3); C é a capacidade térmica (J/K) e Cp (J/Kg K) é o calor específico.

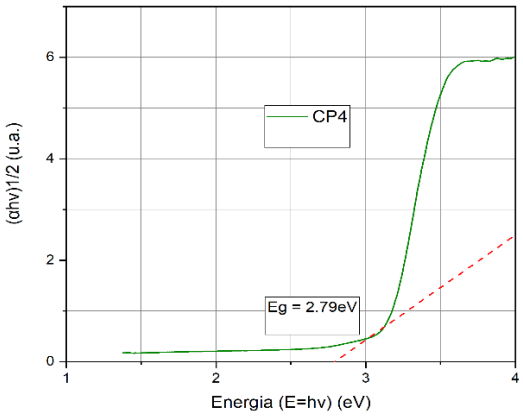
Fonte: próprio autor.

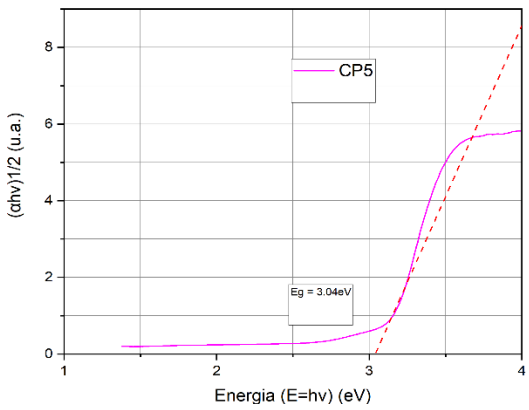
APÊNDICE D – Análise DRS Uv – Vis dos materiais.

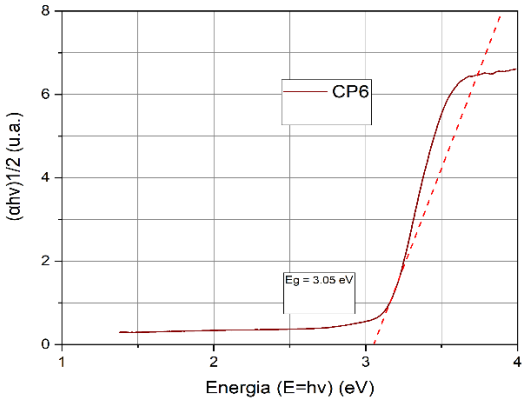


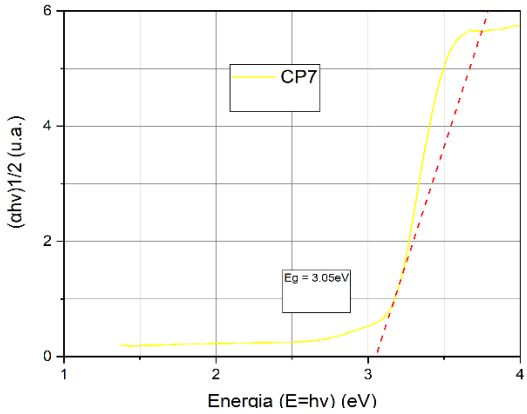












Fonte: próprio autor.