

# RESSALVA

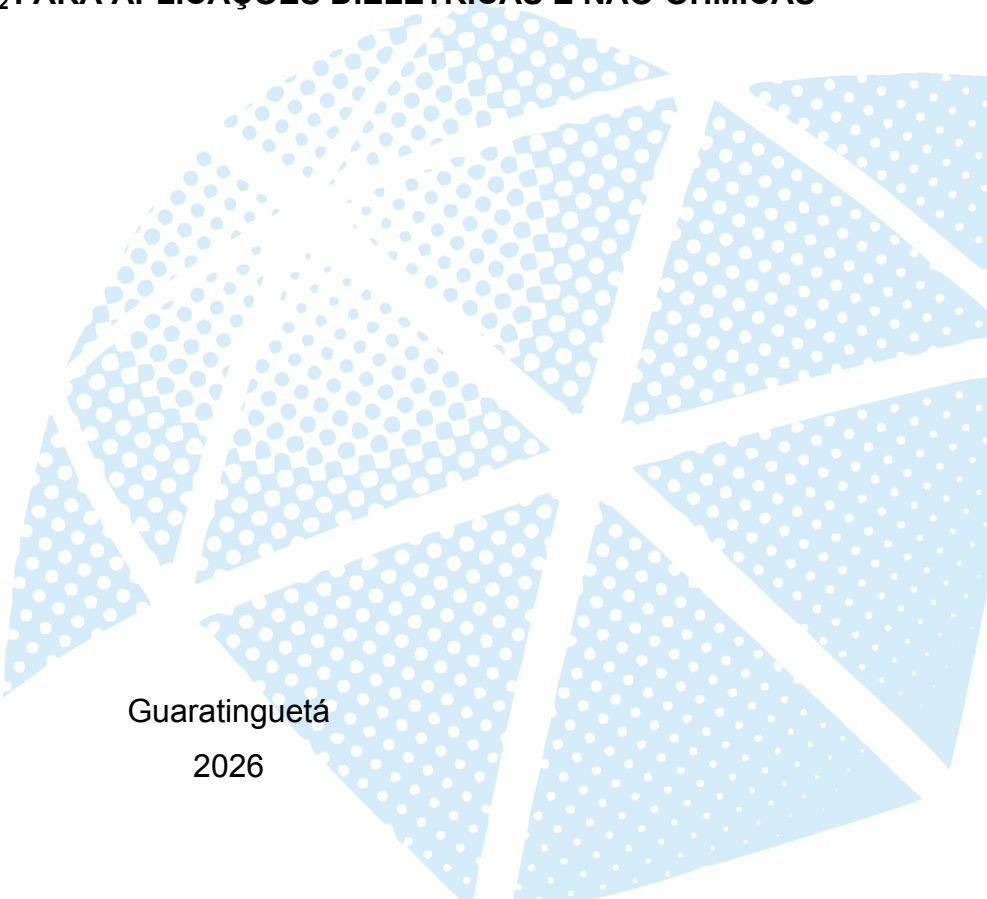
Atendendo solicitação do(a)  
autor(a), o texto completo desta  
Dissertação será disponibilizado  
somente a partir de 04/11/2026

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**  
**Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Guaratinguetá**

**PABLO SAMUEL DE FREITAS CHAVES**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPOSTOS CERÂMICOS AVANÇADOS À BASE DE  
 $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{CaWO}_4/\text{TiO}_2$  PARA APLICAÇÕES DIELÉTRICAS E NÃO-ÔHMICAS**

Guaratinguetá  
2026



**PABLO SAMUEL DE FREITAS CHAVES**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPOSTOS CERÂMICOS AVANÇADOS À BASE DE  
 $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{CaWO}_4/\text{TiO}_2$  PARA APLICAÇÕES DIELÉTRICAS E NÃO-ÔHMICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais.

Área de Concentração: Ciência dos materiais

Orientador: Miguel Ángel Ramírez Gil

Guaratinguetá

2026

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C512d | <p>Chaves, Pablo Samuel de Freitas</p> <p>Desenvolvimento de compostos cerâmicos avançados à base de <math>\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}</math> / <math>\text{CaWO}_4</math> / <math>\text{TiO}_2</math> para aplicações dielétricas e não-ôhmicas / Pablo Samuel de Freitas Chaves - Guaratinguetá, 2026.</p> <p>89 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 76-87</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Miguel Ángel Ramírez Gil</p> <p>1. Materiais cerâmicos. 2. Semicondutores de óxido metálico. 3. Varistores. 4. Ciência dos materiais.</p> <p>I. Título.</p> <p>CDU 620.1(043)</p> |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Luciana Máximo  
Bibliotecária/CRB-8 3595

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Desenvolvimento de compostos cerâmicos à base de  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{CaWO}_4/\text{TiO}_2$  para aplicações dielétricas e não ôhmicas

**AUTOR:** PABLO SAMUEL DE FREITAS CHAVES

**ORIENTADOR:** MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais, área: Ciência de Materiais pela Comissão Examinadora:

 Documento assinado digitalmente  
**MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL**  
Data: 04/05/2026 18:11:39-0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL (Participação Virtual)  
Departamento de Materiais e Tecnologia / UNESP / Câmpus de Guaratinguetá - FEG

 Documento assinado digitalmente  
**ALEXANDRE ZIRPOLI SIMÕES**  
Data: 05/05/2026 08:47:22-0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Prof. Dr. ALEXANDRE ZIRPOLI SIMÕES (Participação Virtual)  
Departamento de Materiais e Tecnologia / UNESP / Câmpus de Guaratinguetá - FEG

 Documento assinado digitalmente  
**HENRIQUE PICCOLI MORENO**  
Data: 05/05/2026 18:42:05-0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Dr. HENRIQUE PICCOLI MORENO (Participação Virtual)  
Departamento de Química / CDMF - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Sorocaba, 04 de maio de 2026.

Aos meus pais, que me ensinaram que o conhecimento mais genuíno transcende os livros: revela-se verdadeiramente na forma como compreendemos a vida e nos relacionamos com aqueles que nos cercam.

## **AGRADECIMENTOS**

Com grande satisfação gostaria de expressar sincero agradecimento ao meu orientador, professor Miguel Ángel Ramírez Gil que por seis anos, me auxilia, apoia e supervisiona diretamente todas as minhas atividades acadêmicas, obrigado por me mostrar um pouco do seu profundo conhecimento em materiais e cerâmicas avançadas, a admiração e respeito que sinto são imensas.

A todos os pesquisadores, técnicos, colegas e servidores que contribuíram de alguma forma com este trabalho. Em especial, aos funcionários da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá –UNESP. Domingos Hasmann Neto, Gustavo Eduardo de Souza Carvalho e Tuane Stefania Reis dos Santos que me auxiliaram diversas vezes nos laboratórios, meu grande obrigado. A minha colega e amiga Isabela Luiza Rodrigues Cintra que sempre se mostrou disposta a ajudar e a me inserir no meio acadêmico.

Por fim, e nem um pouco menos importante, agradeço aos meus pais, Maria Eloina de Sousa Freitas e Francisco Peterson de Matos Chaves, por me proporcionarem estrutura, força e incentivo para continuar estudando, obrigado por alimentarem isso em mim desde cedo. Aos meus dois irmãos e melhores amigos Mica e Piter que por muitas vezes escutaram horas sobre ciência dos materiais, apenas para me apoiar, meu mais profundo obrigado.

Por fim, agradeço ao financiamento deste trabalho pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

"Nos campos da observação, o acaso favorece apenas as mentes preparadas."  
(Pasteur, 1854, tradução nossa).

## RESUMO

A engenharia de compósitos tem se mostrado útil na modulação das características dielétricas e não ôhmicas das cerâmicas, pois a presença de novas fases pode modular a barreira de potencial além de modificar a microestrutura original, otimizando propriedades e reduzindo limitações presentes na fase pura. Em estudos anteriores comprovou-se que o limite de solubilidade do íon  $W^{6+}$  na rede cristalina do  $CaCu_3Ti_4O_{12}$  está entre 2,0-2,5% em massa, mostrando melhoras significativas nas propriedades dielétricas e não-ôhmicas do material final. Com o objetivo de formar uma cerâmica ternária de  $CaCu_3Ti_4O_{12}/CaWO_4/TiO_2$  pós-cerâmicos de  $CaCu_3Ti_4O_{12}$  com adição de íons  $W^{6+}$  além do limite de solubilidade e teores progressivos de  $TiO_2$  (0,5% a 2%) foram sintetizados por reação em estado sólido, método de baixo custo e ambientalmente menos agressivo. As amostras foram calcinadas a 900 °C por 12 horas, após análise termogravimétrica e sinterizadas a 1100°C por 2 horas, alcançando densidade relativa superior a 80%. Análises de difratometria de raios X com refinamento Rietveld confirmaram a formação de compósitos multifásicos  $CaCu_3Ti_4O_{12}/CaWO_4/TiO_2$ , com segregação da fase scheelita ( $CaWO_4$ ) devido ao excesso de  $W^{6+}$  na rede. As cerâmicas sinterizadas apresentaram propriedades não-ôhmicas promissoras, com destaque para as composições com 0,5% de  $TiO_2$  ( $\alpha = 87,5$ ;  $I_f = 64 \mu A$ ) e com adição de 1% de  $TiO_2$  ( $\alpha = 518$ ;  $I_f = 37 \mu A$ ), que superaram significativamente a amostra de  $CaCu_3Ti_4O_{12}$  ( $\alpha = 8$ ;  $I_f = 260 \mu A$ ). Gráficos de Arrhenius construídos a partir das medidas de condutividade foram utilizados para revelar a influência do campo elétrico no processo condutivo. A amostra com adição de 1% de  $TiO_2$ , de maior coeficiente de não linearidade, apresenta também maior sensibilidade ao campo elétrico, indicando mecanismo de condução termicamente ativado e assistido por campo. O estudo demonstra que a modificação (micro)estrutural do  $CaCu_3Ti_4O_{12}$  por  $WO_3$  e  $TiO_2$  é complexa, exigindo análise além de tamanho e morfologia de grão, com correlação essencial entre defeitos, equilíbrio de fases, potenciais de barreira nos contornos e dependência térmica e do campo elétrico.

**Palavras-chave:**  $CaCu_3Ti_4O_{12}$ ;  $CaWO_4$ ; compósitos cerâmicos; propriedades não-ôhmicas.

## ABSTRACT

Composite engineering has proven effective in modulating the non-ohmic electrical characteristics of ceramics, as the presence of new phases can alter the potential barrier and modify the original microstructure, thereby optimizing properties and reducing limitations inherent to the pure phase. Previous studies have demonstrated that the solubility limit of  $W^{6+}$  ions in the  $CaCu_3Ti_4O_{12}$  crystal lattice lies between 2.0–2.5 wt.%, resulting in significant improvements in the non-ohmic and dielectric properties of the final material. In order to obtain a ternary ceramic system of  $CaCu_3Ti_4O_{12}/CaWO_4/TiO_2$ ,  $CaCu_3Ti_4O_{12}$  powders doped with  $W^{6+}$  ions beyond the solubility limit and with progressive  $TiO_2$  contents (0.5–2 wt.%) were synthesized via the solid-state reaction method, a low-cost and environmentally less aggressive route. The samples were calcined at 900 °C for 12 hours, following thermogravimetric analysis, and subsequently sintered at 1100 °C for 2 hours, achieving relative densities above 80%. X-ray diffraction analyses with Rietveld refinement confirmed the formation of multiphase  $CaCu_3Ti_4O_{12}/CaWO_4/TiO_2$  composites, with segregation of the scheelite phase ( $CaWO_4$ ) due to the excess  $W^{6+}$  in the lattice. The sintered ceramics exhibited promising non-ohmic properties, particularly for compositions with 0,5 wt.%  $TiO_2$  ( $\alpha = 87,5$ ;  $I_L = 64 \mu A$ ) and with 1 wt.%  $TiO_2$  addition ( $\alpha = 518$ ;  $I_L = 37 \mu A$ ), both significantly outperforming the reference (pure) sample ( $\alpha = 8$ ;  $I_L = 260 \mu A$ ). Arrhenius plots derived from conductivity measurements were used to elucidate the influence of the electric field on the conduction process. The sample containing 1 wt.%  $TiO_2$ , which exhibited the highest nonlinearity coefficient, also showed greater sensitivity to the electric field, indicating a thermally activated and field-assisted conduction mechanism. This study demonstrates that the (micro)structural modification of  $CaCu_3Ti_4O_{12}$  by  $WO_3$  and  $TiO_2$  is complex, requiring analysis beyond grain size and morphology, with essential correlations among defects, phase equilibrium, grain boundary barrier potentials, and thermal and electric field dependence.

**Keywords:**  $CaCu_3Ti_4O_{12}$ ;  $CaWO_4$ ; ceramic composites; non-ohmic properties.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Número de publicações sobre cerâmicas à base de CCTO ao longo dos anos. Número de publicações sobre cerâmicas à base de CCTO ao longo dos anos. Termos utilizados na busca “CaCu <sub>3</sub> Ti <sub>4</sub> O <sub>12</sub> ; CCTO; <i>Calcium copper titanate</i> ; <i>calcium copper titanate perovskite</i> ”. Resultados referentes a abril de 2026. | 19 |
| Figura 2 – Célula unitária do CaCu <sub>3</sub> Ti <sub>4</sub> O <sub>12</sub> com destaque para os poliedros de coordenação TiO <sub>6</sub> e CuO <sub>4</sub> .                                                                                                                                                                                                   | 20 |
| Figura 3 – Mecanismos de polarização associados a um dielétrico em função da frequência do campo elétrico aplicado (polarizações: eletrônica – atômica – orientacional – salto – alterações espaciais).                                                                                                                                                               | 24 |
| Figura 4 – Representação esquemática do modelo IBLC, onde $t_{C,grão}$ e $t_{grão}$ representam os comprimentos associados aos contornos de grão e aos grãos, respectivamente.                                                                                                                                                                                        | 26 |
| Figura 5 – Curva E-J representativa da resposta não-ôhmica típica para um varistor cerâmico.                                                                                                                                                                                                                                                                          | 30 |
| Figura 6 – Modelo de barreira de potencial proposto por Félix para cerâmicas de CCTO. Modelo de barreira de potencial proposto por Félix para cerâmicas de CCTO, onde $\omega$ é largura da região do contorno de grão e $\phi_b$ é a altura da barreira de potencial.                                                                                                | 33 |
| Figura 7 – Mecanismos de condução eletrônica por emissão de (1) Schottky e (2) Poole-Frenkel entre grãos, em um sistema à base de CaCu <sub>3</sub> Ti <sub>4</sub> O <sub>12</sub> .                                                                                                                                                                                 | 34 |
| Figura 8 – Estrutura tetragonal do CaWO <sub>4</sub> com destaque para os poliedros de coordenação CaO <sub>8</sub> e WO <sub>4</sub> .                                                                                                                                                                                                                               | 36 |
| Figura 9 – Representação esquemática do processo de preparação dos pós do sistema CaCu <sub>3</sub> Ti <sub>4</sub> O <sub>12</sub> /WO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> .                                                                                                                                                                                              | 40 |
| Figura 10 – Representação esquemática do preparo e das caracterizações realizadas nas pastilhas cerâmicas do sistema CaCu <sub>3</sub> Ti <sub>4</sub> O <sub>12</sub> /WO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> .                                                                                                                                                           | 46 |
| Figura 11 – (a) Curvas TG e (b) DTG obtidas para as misturas de precursores em atmosfera de ar atmosférico com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.                                                                                                                                                                                                                  | 48 |
| Figura 12 – Curvas DTA obtidas para as misturas de precursores em atmosfera de ar atmosférico com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.                                                                                                                                                                                                                               | 50 |
| Figura 13 – Refinamento de Rietveld para as amostras (a) CWT-0, (b) CWT-0.5, (c) CWT-1, (d) CWT-1.5 e (e) CWT-2 na forma de pastilha.                                                                                                                                                                                                                                 | 53 |
| Figura 14 – Micrografias obtidas por MEV para as amostras (a) CWT-0, (b)                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 57 |

CWT-0.5, (c) CWT-1, (d) CWT-1.5 e (e) CWT-2 na forma de pastilha

Figura 15 – Micrografias e mapas elementares obtidos por MEV-EDS para as amostras (a) CWT-0, (b) CWT-0.5, (c) CWT-1, (d) CWT-1.5 e (e) CWT-2 na forma de pastilha. 58

Figura 16 – Densidade aparente (a) e relativa (b) das amostras CWT-0, CWT-0.5, CWT-1, CWT-1.5 e CWT-2 sinterizadas a 1100°C por 2 horas. 60

Figura 17 – Curvas J-E para o CCTO puro e compósitos CWT-0, CWT-1, CWT-1.5 e CWT-2 na forma de pastilha 61

Figura 18 – Curvas  $\ln(\sigma) \cdot 1000 \cdot T^{-1}$  para as amostras CWT-0, CWT-0.5, CWT-1, CWT-1.5 e CWT-2 na forma de pastilhas em a)  $E=0,2$  kV/cm; b)  $0,5$  kV/cm e c)  $0,8$  kV/cm. 65

Figura 19- Curvas a)  $\epsilon'$  e b)  $\tan\delta$  vs frequência para os compósitos CWT-0, CWT-0.5, CWT-1, CWT-1.5 e CWT-2 na forma de pastilha. 69

Figura 20– Energias de solução para diferentes mecanismos de desordem intrínseca, normalizadas por defeito, para os compósitos  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12} / \text{CaWO}_4 / \text{TiO}_2$  74

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Estudos envolvendo cerâmicas a base de CCTO para aplicações dielétricas                                                                                                                                                                   | 28 |
| Tabela 2 – Percentuais de perda de massa dividido por etapas para as misturas de precursores para as amostras CWT-0, CWT-0.5, CWT-1, CWT-1.5 e CWT-2                                                                                                 | 49 |
| Tabela 3 – Parâmetros estruturais obtidos por refinamento para as amostras CWT-0, CWT-0.5, CWT-1, CWT-1.5 e CWT-2 na forma de pastilha.                                                                                                              | 54 |
| Tabela 4 – Parâmetros descritivos da resposta não-ôhmica para o CCTO puro e compósitos CWT-0, CWT-1, CWT-1.5 e CWT-2 na forma de pastilha. Os valores de $\alpha$ foram calculados em diferentes intervalos para melhor comparação com a literatura. | 64 |
| Tabela 5 – Valores de energia de ativação em função do campo elétrico e respectivos coeficientes de variação para o CCTO puro e compósitos CWT-0, CWT-0.5, CWT-1, CWT-1.5 e CWT-2                                                                    | 65 |
| Tabela 6 – Comparação da resposta não ôhmica para materiais sintetizados por SSR (reação em estado sólido), SG (sol-gel) e SSS (sinterização em estado sólido), atualmente estudados e/ou aplicados em aplicações de varistores.                     | 67 |
| Tabela 7- Parâmetros descritivos da resposta dielétrica para os compósitos CWT-0, CWT-0.5, CWT-1, CWT-1.5 e CWT-2 na forma de pastilha.                                                                                                              | 69 |
| Tabela 8– Parâmetros de potencial interatômico para os compósitos CCTO/CaWO <sub>4</sub> /TiO <sub>2</sub> .                                                                                                                                         | 70 |
| Tabela 9 – Comparação entre os parâmetros de rede calculados e os dados experimentais da literatura.                                                                                                                                                 | 71 |
| Tabela 10- Esquemas de defeitos intrínsecos presentes nas 3 fases do compósito cerâmico estudado                                                                                                                                                     | 73 |

## SUMÁRIO

|                |                                                                            |           |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                          | <b>12</b> |
| <b>2</b>       | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b>                                               | <b>16</b> |
| 2.1            | ESTRUTURA E PROPRIEDADES DO $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (CCTO) | 16        |
| 2.2            | MÉTODO DE REAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO                                          | 19        |
| 2.3            | RESPOSTA DIELÉTRICA                                                        | 20        |
| 2.4            | RESPOSTA NÃO-ÔHMICA                                                        | 27        |
| 2.5            | MODIFICADORES MICROESTRUTURAIS                                             | 33        |
| 2.5.1          | $\text{TiO}_2$                                                             | 33        |
| 2.5.2          | $\text{CaWO}_4$                                                            | 34        |
| <b>3</b>       | <b>OBJETIVOS</b>                                                           | <b>36</b> |
| 3.1            | OBJETIVO GERAL                                                             | 36        |
| 3.2            | OBJETIVOS ESPECÍFICOS                                                      | 36        |
| <b>4</b>       | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                                 | <b>37</b> |
| 4.1            | PREPARAÇÃO DAS CERÂMICAS NA FORMA DE PÓS                                   | 37        |
| 4.2            | CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA                                                     | 39        |
| 4.3            | PREPARAÇÃO DAS CERÂMICAS NA FORMA DE PASTILHAS                             | 39        |
| 4.4            | CARACTERIZAÇÃO DAS CERÂMICAS NA FORMA DE PASTILHAS                         | 40        |
| 4.4.1          | Caracterização (micro)estrutural                                           | 40        |
| 4.4.2          | Método de simulação computacional                                          | 41        |
| 4.4.3          | Caracterização física- Método hidrostático (Arquimedes)                    | 41        |
| 4.4.4          | Caracterização da resposta dielétrica                                      | 42        |
| 4.4.5          | Caracterização da resposta não-ôhmica                                      | 44        |
| <b>5</b>       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                                             | <b>46</b> |
| 5.1            | CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DOS PÓS CERÂMICOS                                   | 46        |
| 5.2            | CARACTERIZAÇÃO DAS CERÂMICAS NA FORMA DE PASTILHAS                         | 50        |
| 5.2.1          | Caracterização (micro)estrutural                                           | 50        |
| <b>5.2.1.1</b> | <b><i>Difratometria de raios X</i></b>                                     | <b>50</b> |
| <b>5.2.1.2</b> | <b><i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i></b>                    | <b>54</b> |
| 5.2.2          | Caracterização física (Método de Arquimedes)                               | 58        |
| 5.2.3          | Caracterização da resposta não-ôhmica                                      | 60        |
| 5.2.4          | Caracterização da resposta dielétrica                                      | 67        |
| 5.2.5          | Simulações computacionais                                                  | 69        |
| <b>6</b>       | <b>CONCLUSÃO</b>                                                           | <b>74</b> |
| <b>7</b>       | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>                                    | <b>75</b> |
|                | <b>REFERÊNCIAS</b>                                                         | <b>76</b> |
|                | <b>DADOS CURRICULARES</b>                                                  | <b>88</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Brasil é o país com a maior incidência de raios do mundo, onde ocorrem cerca de 77,8 milhões de descargas atmosféricas por ano (INPE, 2026). O país apresenta, em média, oito mil raios por minuto causando prejuízos significativos à população, a equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos como mostra o levantamento feito pela Confederação Nacional de Municípios (CNM): entre janeiro de 2013 e janeiro de 2025, as descargas elétricas impactaram mais de 155 mil pessoas em todo o território nacional resultando em perdas econômicas superiores a R\$ 29,1 milhões. Os maiores danos foram registrados na agricultura (R\$22,5 milhões), seguidos pelo comércio (R\$1,5 milhão) e pela pecuária (R\$215,4 mil) (CNM, 2025). Diante desse cenário de riscos, torna-se imprescindível a proteção de circuitos eletroeletrônicos, aspecto crucial para garantir a funcionalidade e a segurança dos dispositivos que permeiam nosso cotidiano.

Componentes como capacitores, utilizados no armazenamento de energia elétrica, filtragem e estabilização de sinais e varistores, empregados diretamente na proteção contra sobretensões transitórias, desempenham papel fundamental na confiabilidade de sistemas eletrônicos modernos. Enquanto os capacitores são críticos para o desempenho e vida útil dos sistemas, dado que atuam diretamente no condicionamento e estabilidade elétrica desses circuitos (LAADJAL; CARDOSO, 2023), varistores operam como dispositivos de proteção ativa, conduzindo correntes elevadas durante eventos de sobretensão e limitando picos que poderiam causar falhas catastróficas (LEVINE, 1975). Dessa forma, esses componentes são essenciais para mitigar os efeitos de flutuações elétricas e garantir a operação segura e estável de dispositivos eletrônicos. Nesse contexto, a crescente demanda por sistemas mais compactos e de alto desempenho impõe novos desafios ao desenvolvimento desses dispositivos, tornando necessário considerar a tendência de miniaturização na indústria eletroeletrônica contemporânea (TAHA *et al.*, 2022; KIM *et al.*, 2025).

Nos últimos anos, o processo de redução de dimensão de componentes passivos em dispositivos eletroeletrônicos tem sido um dos principais focos de pesquisadores e indústrias, impulsionado pelas necessidades de tecnologia compacta. Esse avanço tornou-se possível especialmente a partir da década de

1950, quando os semicondutores e transistores revolucionaram a produção de equipamentos eletrônicos, viabilizando aparelhos cada vez mais portáteis (HODDESON; RIORDAN, 1997).

Nas equações 1-2, é demonstrada a relação entre a geometria e a constante dielétrica de um capacitor cerâmico de placas paralelas. Essa relação mostra que é possível miniaturizar o sistema ( $A$ , área do eletrodo) ao aumentar a permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ), mantendo a capacitância ( $C$ ) e a espessura ( $d$ ) do capacitor constantes.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

$$A = \frac{Cd}{\epsilon} \quad (2)$$

Em muitos materiais industriais com alta constante dielétrica, como o  $\text{BaTiO}_3$ , é comum observar também características ferroelétricas, decorrentes de deslocamentos atômicos, especialmente dos íons de titânio ( $\text{Ti}^{4+}$ ) em sua estrutura (DENG *et al.*, 2024). Em razão das transições de fase, materiais ferroelétricos tendem a apresentar uma redução abrupta da constante dielétrica ao ultrapassar a temperatura de Curie, o que pode limitar seu uso em certas aplicações, incluindo capacitores, já que esses dispositivos necessitam ter uma estabilidade térmica para operar apropriadamente. Essas limitações motivaram o interesse crescente, na última década, por cerâmicas à base de  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  (CCTO), que apresentam constante dielétrica elevada ( $10^4$ ) e estável, sem sofrer transições de fase ferroelétrica em ampla faixa de temperatura (100-600 K) e frequências ( $10^3$ - $10^6$  Hz) diferenciando-se de compostos ferroelétricos tradicionais (SUBRAMANIAN *et al.*, 2000).

Os compostos cerâmicos à base de CCTO são materiais que chamam atenção também pelo caráter multifuncional com potencial de aplicação em diversas formas, como pós (MORENO *et al.*, 2021; PRAXEDES *et al.*, 2022; SAQIB; SHAH; ADNAN, 2022; ROHILLA *et al.*, 2023), pastilhas (JESUS *et al.*, 2023; MORENO *et al.*, 2025) e filmes (JIANG *et al.*, 2022; XUE *et al.*, 2023; GAO *et al.*, 2024). São suas propriedades dielétricas (KUMARI *et al.*, 2023; PETINARDI *et al.*, 2024), não-ôhmicas (JUMPATAM *et al.*, 2022; HARRAK, *et al.*, 2025; SUN, *et al.*, 2025), sensoras (CHATTOPADHYAY; NAYAK, 2022; ESPINOZA-GONZÁLEZ, *et al.*, 2023), ópticas (YU *et al.*, 2022; PANG *et al.*, 2023), fotocatalíticas (BARTOLETTI *et al.*,

2023; CHANDA *et al.*, 2025) e magnéticas (GAVRILOVA *et al.*, 2022; KUMARI *et al.*, 2024) que os tornam materiais muito versáteis e de alto interesse científico.

No entanto, o CCTO apresenta limitações intrínsecas que restringem sua aplicação tecnológica direta. As perdas dielétricas relativamente elevadas ( $\tan\delta \approx 0,15\text{--}0,31$ ) constituem o principal obstáculo para capacitores de alta frequência, pois podem gerar aquecimento excessivo e comprometer a eficiência dos dispositivos. Analogamente, para aplicações varistoras a corrente de fuga elevada também é um desafio a ser superado.

Sustentados pelo modelo de camada capacitiva de barreira interna (IBLC, do inglês- *Internal Barrier Layer Capacitor*) estudos observaram que alterações nos valores da densidade e composição dos contornos de grão ( $R_{cg}$ ) do CCTO podem aprimorar suas características dielétricas e não-ôhmicas superando suas principais limitações como altos valores de perdas dielétricas e corrente de fuga (ADAMS; SINCLAIR; WEST, 2006; LIN, *et al.*, 2008). Estudos conduzidos por diversos grupos de pesquisa demonstraram que a adição de óxidos metálicos e dopagens multielementares ao CCTO pode promover aprimoramento sinérgico das características elétricas, superando as limitações das dopagens simples (RHOUMA, *et al.*, 2017; YU, *et al.*, 2022; HAQUE, *et al.* 2025).

Além da dopagem, outra abordagem amplamente explorada para modificação das propriedades elétricas do  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  consiste no desenvolvimento de compósitos cerâmicos. Nesses sistemas, a introdução de fases secundárias promove alterações na microestrutura, nos mecanismos de condução e nas interfaces grão/contorno de grão, possibilitando o ajuste da permissividade, redução de perdas dielétricas e até mudanças no regime de condução elétrica. Estudos recentes demonstram que compósitos CCTO/grafeno (DENG, *et al.*, 2023), CCTO/óxidos de terras raras (ONYEBUCHI, *et al.*, 2026) e sistemas híbridos com outros dielétricos (S. MISHRA; P. MISHRA, 2022) podem modificar significativamente o comportamento elétrico do material, evidenciando o potencial dessa estratégia para superar limitações intrínsecas do CCTO.

Nesse contexto, observa-se que, em determinadas condições, a própria dopagem pode induzir a formação de compósitos. Como observado em um estudo anterior do nosso grupo de pesquisa (MORENO, *et al.*, 2025) no qual o CCTO foi dopado com íons  $\text{W}^{6+}$  e a partir de um teor de aproximadamente 2,5% em massa, o limite de solubilidade desses íons na rede cristalina foi ultrapassado. Como

consequência, ocorreu a segregação da fase  $\text{CaWO}_4$  (estrutura do tipo *scheelita*), resultando na formação de um compósito cerâmico CCTO/ $\text{CaWO}_4$ . A presença dessa fase não apenas alterou a microestrutura do material, como também impactou diretamente suas propriedades elétricas. A resposta corrente-tensão revelaram uma melhora significativa da propriedade não-ôhmica do sistema CCTO/ $\text{CaWO}_4$  em comparação ao CCTO puro, evidenciada pelo aumento do coeficiente de não linearidade e pela redução da corrente de fuga. Esses resultados demonstraram que a formação desse compósito promoveu modificações nos mecanismos de condução elétrica, associadas ao fortalecimento das barreiras de potencial nos contornos de grão, reforçando o papel da engenharia de compósitos como estratégia eficaz para otimização das propriedades elétricas do CCTO.

Considerando que tanto a origem da constante dielétrica gigante quanto o comportamento não-ôhmico do CCTO estão intrinsecamente relacionados à sua microestrutura heterogênea, especialmente aos efeitos associados aos grãos e contornos de grão, torna-se evidente que estratégias capazes de modificar essas regiões são fundamentais para o controle de suas propriedades elétricas. Nesse sentido, conforme discutido anteriormente, a introdução de espécies dopantes pode não apenas alterar a rede cristalina, mas também induzir a formação de fases secundárias, resultando em sistemas compósitos com respostas elétricas significativamente distintas.

Neste trabalho se propôs a estudar compósitos de  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{CaWO}_4$  modificados por adições progressivas de  $\text{TiO}_2$  (0,5%;1%;1,5%;2%), visando correlacionar os efeitos da adição de  $\text{TiO}_2$  com a evolução da constante dielétrica e resposta não-ôhmica do material. Este estudo ganha relevância ao investigar um compósito ternário inédito onde o comportamento sinérgico entre as fases existentes pode gerar um material dielétrico e varistor otimizado que poderá contribuir para superar os desafios atuais de perda dielétrica, estabilidade térmica e miniaturização, fomentando o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos multifuncionais seguros, compactos e eficientes, em sintonia com as demandas contemporâneas da indústria e da sociedade.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a incorporação de  $\text{WO}_3$  e  $\text{TiO}_2$  no sistema  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  promove alterações significativas no equilíbrio de fases, na microestrutura e nas propriedades elétricas do material. A formação do composto ternário contendo a fase de  $\text{CaWO}_4$  e  $\text{TiO}_2$  foi confirmada pelo refinamento de Rietveld.

Do ponto de vista microestrutural, a adição de  $\text{TiO}_2$  exerceu papel determinante na modulação do crescimento de grão e da morfologia. Observou-se uma tendência de refinamento microestrutural associada à redução da mobilidade dos contornos de grão, atribuída à presença de fases complementares e à possível segregação de  $\text{TiO}_2$  nesses contornos. Para maiores teores de  $\text{TiO}_2$ , os grãos apresentaram morfologia mais facetada, com tendência a formas quase cúbicas, indicando uma transição para um regime de crescimento controlado por energia de interface. Essa modificação microestrutural influencia diretamente a formação e a estabilidade das barreiras de potencial nos contornos de grão. Simulações atomísticas reproduziram com precisão as estruturas cristalinas e revelaram que o  $\text{CaWO}_4$  e o  $\text{TiO}_2$  acomodam preferencialmente defeitos intrínsecos, explicando sua estabilização nos contornos de grão e seu papel na modulação da química desses contornos.

Em termos elétricos, as amostras modificadas apresentaram resposta não-ôhmica significativamente superior à amostra de referência, com destaque para as composições CWT-0.5 ( $\alpha = 87,5$ ;  $I_f = 64 \mu\text{A}$ ) e CWT-1 ( $\alpha = 518$ ;  $I_f = 37 \mu\text{A}$ ), que exibiram comportamento típico de supervalistores. Esse desempenho está associado à presença de vacâncias de oxigênio ( $V_o^{\bullet\bullet}$ ) e à formação de heterogeneidades elétricas decorrentes da coexistência das fases, que favorecem a formação de barreiras de potencial nos contornos de grão.

A análise por meio dos gráficos de Arrhenius evidenciou a influência do campo elétrico no processo de condução, indicando que a amostra com maior coeficiente de não linearidade (CWT-1) também apresenta maior sensibilidade ao campo aplicado e menor perda dielétrica ( $\tan\delta = 0,09$ ), caracterizando um mecanismo de transporte termicamente ativado e assistido por campo. Dessa forma,

os resultados confirmam que a engenharia de compósitos no sistema  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{CaWO}_4/\text{TiO}_2$  é uma estratégia eficaz para a modulação das propriedades não-ôhmicas. Evidencia-se que a resposta elétrica desses materiais não pode ser compreendida apenas com base em parâmetros microestruturais clássicos, como tamanho e morfologia de grão, sendo essencial considerar a interação entre defeitos, fases presentes e potenciais de barreira nos contornos de grão, bem como sua dependência com a temperatura e o campo elétrico.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar profundamente as propriedades dielétricas dos compósitos em função da temperatura e da frequência, por meio de espectroscopia de impedância, com ajuste dos dados utilizando modelos de circuitos equivalentes no software ZView;
- Avaliar o efeito da atmosfera de sinterização, variando a pressão parcial de oxigênio, sobre a densificação, microestrutura e a resposta não-ôhmica dos compósitos, visando correlacionar a formação de defeitos com o desempenho elétrico;
- Explorar rotas alternativas de sinterização, como sinterização por micro-ondas, e comparar os resultados obtidos com o método convencional, com ênfase nas propriedades elétricas e na evolução microestrutural.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, B.; SINCLAIR, C.; WEST, R. Characterization of grain boundary impedances in fine-and coarse-grained  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **Physical Review B**, College Park, MD, v. 73, n. 9, p. 094124, 2006.
- ADLER, D. Insulators: electrical conductivity. *In*: BROOK, R. J. (ed.). **Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials**. Oxford: Pergamon Press, 1991. p. 238-242.
- AMARAL, J. B. *et al.* Computer modelling of undoped and  $\text{Eu}^{3+}$ -doped  $\text{LiLa}(\text{WO}_4)_2$ . **physica status solidi (c)**, Weinheim, v. 10, n. 2, p. 165-167, 2013.
- ANNAMALAI, A. *et al.* Modern synthesis and sintering techniques of calcium copper titanium oxide ( $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ) Ceramics and its current Trend in prospective applications: a mini-review. **Nanomaterials**, Basel, v. 12, n. 18, p. 3181, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C373-18**: standard test method for water absorption, apparent density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products, ceramic tiles, and glass tiles. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
- BAHADUR, J. *et al.* Non-Debye to Debye transition of ac dielectric response in  $\text{YCrO}_3$  nanoceramic under sintering: effect of pore structure. **Journal of Physics: Condensed Matter**, Bristol, v. 20, n. 35, p. 355203, 2008.
- BALAMURUGAN, S. *et al.* Profound impact on different properties of calcium tungstate scheelite,  $\text{CaWO}_4$  phase stabilized via wider synthesis conditions. **Inorganic Chemistry Communications**, Amsterdam, v. 155, p. 111090, 2023.
- BARBIER, B. *et al.*  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics from co-precipitation method: Dielectric properties of pellets and thick films. **Journal of the European Ceramic Society**, Kidlington, v. 29, n. 4, p. 731-735, 2009.
- BARTOLETTI, A. *et al.* Identification of structural changes in  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  on high energy ball milling and their effect on photocatalytic performance. **Catalysis Science & Technology**, Cambridge, v. 13, n. 4, p. 1041-1058, 2023.
- BASHA, S. *et al.* Solid state reaction method for nanomaterials synthesis: a comprehensive review on characterization, properties, and applications. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECO-FRIENDLY FIBERS AND POLYMERIC MATERIALS, 2024, Singapore. **Proceedings [...]**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 667-689.
- BOCHU, B. *et al.* Synthèse et caractérisation d'une série de titanates pérowskites isotopes de  $[\text{CaCu}_3](\text{Mn}_4)\text{O}_{12}$ . **Journal of Solid State Chemistry**, San Diego, v. 29, n. 2, p. 291-298, 1979.
- BOONLAKHORN, J.; KIDKHUNTHOD, P.; THONGBAI, P. Significantly improved giant dielectric response in giant dielectric response in  $\text{CaCu}_{2.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Ti}_{4-x}\text{Ge}_x\text{O}_{12}$  ( $x = 0.05, 0.10$ ) ceramics. **Materials Today Communications**, Amsterdam, v. 21, p. 100633, 2019.

BOONLAKHORN, J.; THONGBAI, P. Dielectric properties, nonlinear electrical response and microstructural evolution of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_{4-x}\text{Sn}_x\text{O}_{12}$  ceramics prepared by a double ball-milling process. **Ceramics International**, Kidlington, v. 46, p. 4952-4958, 2020.

BOONLAKHORN, J. *et al.* Enhanced giant dielectric properties and improved nonlinear electrical response in acceptor-donor ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ta}^{5+}$ )-substituted  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **Journal of Advanced Ceramics**, Beijing, v. 10, n. 6, p. 1243-1255, 2021.

BOONLAKHORN, J. *et al.* Dielectric properties and nonlinear electrical response of  $\text{Nb}^{5+}/\text{Cr}^{3+}$ -codoped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **ACS Applied Electronic Materials**, Washington, v. 6, n. 4, p. 2514-2524, 2024.

BUENO, P. R.; VARELA, J. A. Electronic ceramics based on polycrystalline  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $(\text{Sn}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_2$  solid solution. **Materials Research**, São Carlos, v. 9, p. 293-300, 2006.

BUENO, P. R. *et al.* A polaronic stacking fault defect model for  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  material: an approach for the origin of the huge dielectric constant and semiconducting coexistent features. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Bristol, v. 42, p. 055404, 2009.

CANESSA, E.; NGUYEN, V. L. Non-linear I–V characteristics of double Schottky barriers and polycrystalline semiconductors. **Physica B: Condensed Matter**, Amsterdam, v. 179, n. 4, p. 335-341, 1992.

CAO, W. *et al.* High performance  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ -doped  $\text{ZnO-Cr}_2\text{O}_3$ -based varistors with high breakdown field strength and excellent aging resistance. **Ceramics International**, Kidlington, v. 51, n. 14, p. 19568-19578, 2025.

CHANDA, N. *et al.*  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{CNT}$  nanocomposite for enhanced photocatalytic seawater splitting to hydrogen generation. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 140, p. 36-44, 2025.

CHATTOPADHYAY, A.; NAYAK, J. Improvement of humidity sensing performance and dielectric response through pH variation in  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **Sensors and Actuators A: Physical**, Lausanne, v. 341, p. 113603, 2022.

CHATTOPADHYAY, A.; MOHANTY, B.; NAYAK, J. A study of structural, morphological, optical and humidity sensing properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  powders synthesized by combustion method. **Materials Today Communications**, Amsterdam, v. 33, p. 104196, 2022.

CHEN, W.-T. T. *et al.* Contrasting conduction mechanisms of two internal barrier layer capacitors: (Mn, Nb)-doped  $\text{SrTiO}_3$  and  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ . **Journal of Applied Physics**, Melville, NY, v. 121, p. 064107, 2017.

CHUNG, S. Y.; KIM, I. D.; KANG, S. J. L. Strong nonlinear current-voltage behaviour in perovskite-derivative calcium copper titanate. **Nature Materials**, London, v. 3, p. 774-778, 2004.

CLARKE, D. R. Varistor Ceramics. **Journal of the American Ceramics Society**,

Hoboken, v. 82, p. 485-502, 1999.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS. **Tempestades de raios causaram mais de R\$ 29 milhões em prejuízos nos últimos 12 anos, aponta levantamento da CNM**. Brasília, DF: CNM, 7 fev. 2025. Disponível em: <https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/tempestades-de-raios-causaram-mais-de-r-29-milhoes-em-prejuizos-nos-ultimos-12-anos-aponta-levantamento-da-cnm>. Acesso em: 20 dez. 2025.

COELHO, A. A. TOPAS and TOPAS-Academic: An optimization program integrating computer algebra and crystallographic objects written in C++. **Journal of Applied Crystallography**, Chester, v. 51, p. 210-218, 2018.

CORTÉS, J. A. *et al.* Dielectric and non-ohmic analysis of  $\text{Sr}^{2+}$  influences on  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ -based ceramic composites. **Materials Research Bulletin**, Amsterdam, v. 134, p. 111071, 2021.

COTRIM, G. *et al.* Tunable capacitor-varistor response of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{CaTiO}_3$  ceramic composites with  $\text{SnO}_2$  addition. **Materials Characterization**, New York, v. 170, p. 110699, 2020.

DAHL, M.; LIU, Y.; YIN, Y. Composite titanium dioxide nanomaterials. **Chemical Reviews**, Washington, DC, v. 114, n. 19, p. 9853-9889, 2014.

DE ALMEIDA-DIDRY, S. *et al.* A core-shell synthesis of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  (CCTO) ceramics showing colossal permittivity and low electric losses for application in capacitors. **Solid State Sciences**, Paris, v. 109, p. 106431, 2020.

DENG, C. *et al.* Recent progress on barium titanate-based ferroelectrics for sensor applications. **Advanced Sensor Research**, Weinheim, v. 3, n. 6, p. 2300168, 2024.

DENG, C. *et al.* Spark plasma sintered graphene/copper calcium titanate ceramic composites with negative permittivity and enhanced thermal conductivity. **Ceramics International**, Amsterdam, v. 49, n. 10, p. 16149-16155, 2023.

DESCHANVRES, A.; RAVEAU, B.; TOLLEMER, F. Étude de la substitution du titane ou du vanadium par le niobium dans  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  et  $\text{V}_2\text{O}_3$ . **Bulletin de la Société Chimique de France**, Paris, n. 11, p. 4077-4078, 1967.

DHAVALA, L. *et al.* Exceptional dielectric and varistor properties of Sr, Zn and Sn co-doped calcium copper titanate ceramics. **RSC advances**, Cambridge, v. 13, n. 16, p. 10476-10487, 2023.

JR D., GALE B.; OVERHAUSER, A. W. Theory of the dielectric constants of alkali halide crystals. **Physical Review**, Lancaster, v. 112, n. 1, p. 90, 1958.

ELASHMAWI, I. S. Effect of addition of calcium tungstate ( $\text{CaWO}_4$ ) nanoparticles on the structural, optical, and dielectric properties in Cs/PVA nanocomposite films. **Ceramics International**, Amsterdam, v. 51, n. 5, p. 6557-6566, 2025.

ESPINOZA-GONZÁLEZ, R.; HEVIA, S.I.; ADRIAN, Á. Effects of strontium/lanthanum co-doping on the dielectric properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  prepared by reactive sintering.

**Ceramics International**, Amsterdam, v. 44, n. 13, p. 15588-15595, 2018.

ESPINOZA-GONZÁLEZ, R. *et al.* Selective NO<sub>2</sub> Detection of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> Ceramic Prepared by the Sol-Gel Technique and DRIFT Measurements to Elucidate the Gas Sensing Mechanism. **Materials**, Basel, v. 16, n. 9, p. 3390, 2023.

EXAME. **Brasil é o ‘campeão mundial’ de raios com 8 mil descargas por minuto**. São Paulo, 25 jan. 2026. Disponível em: <https://exame.com/brasil/brasil-e-o-campeao-mundial-de-raios-com-8-mil-descargas-por-minuto/>. Acesso em: 27 jan. 2026.

FELIX, A. A.; ORLANDI, M. O.; VARELA, J. A. Schottky-type grain boundaries in CCTO ceramics. **Solid State Communications**, Oxford, v. 151, p. 1377–1381, 2011.

FELIX, A. A. **Propriedades multifuncionais do CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>**: estudo dos mecanismos e suas aplicações. 2013. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2013.

FELIX, A. *et al.* Role of oxygen on the phase stability and microstructure evolution of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, Amsterdam, v. 37, p. 129–136, 2017.

GÂBEL, F. *et al.* Conduction mechanisms study in CaCu<sub>2.8</sub>Ni<sub>0.2</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ceramics sintered at different temperatures. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 828, p. 154388, 2020.

GALE, J. D. GULP: A computer program for the symmetry-adapted simulation of solids. **Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions**, London, v. 93, n. 4, p. 629-637, 1997.

GALLAGHER, P. K.; JOHNSON J., D. W. The effects of sample size and heating rate on the kinetics of the thermal decomposition of CaCO<sub>3</sub>. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 6, p. 6783, 1973.

GAO, F. *et al.* Improving energy storage properties of polyarylene ether nitrile with coral-like CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> nanorods. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 493, p. 152830, 2024.

GAVRILOVA, T. *et al.* Magnetic Properties of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>: Fe Solid Solutions O<sub>12</sub>. In: **Physics and Chemistry of Elementary Chemical Processes**. Novosibirsk: Boreskov Institute of Catalysis, 2022. p. 135.

GOMATHI, T. *et al.* Fabrication of chitosan-coated calcium tungstate (CaWO<sub>4</sub>/Chitosan) and its Antioxidant, antimicrobial and photocatalytic activity. **Inorganic Chemistry Communications**, Amsterdam, v. 163, p. 112300, 2024.

GRZEBIELUCKA, E. C. *et al.* Improvement in varistor properties of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ceramics by chromium addition. **Journal of Materials Science and Technology**, Shenyang, v. 41, p. 12-20, 2020.

GUPTA, A.; SRIVASTAVA, A. L.; SHUKLA, R. K. History and development of

perovskite. In: GUPTA, A.; SRIVASTAVA, A. L.; SHUKLA, R. K. (ed.). **Perovskite Solar Cells: sustainable materials, device design, renewable energy applications**. Berlin: De Gruyter, 2025. p. 1-24.

GUSEVA, A. F. *et al.* Effect of the Particle Size of the Components of  $\text{CaWO}_4\text{--Al}_2\text{O}_3$  Composites on Their Transport Properties. **Inorganic Materials**, New York, v. 60, n. 8, p. 983-993, 2024.

HAQUE, E. *et al.* Structural, microstructural, and dielectric properties of a novel  $\text{La}^{3+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  co-doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **Materials Chemistry and Physics**, Amsterdam, v. 338, p. 130689, 2025.

HARRAK, A. *et al.* Structural evolution, electrical properties, and non-ohmic behavior of barium-doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics synthesized via solid-state method. **Ceramics International**, Oxford, v. 51, n. 4, p. 5812-5821, 2025.

HODDESON, L.; RIORDAN, M. **Crystal fire: the birth of the information age**. New York: W. W. Norton & Company, 1997.

HOMES, C. C. *et al.* Charge transfer in the high dielectric constant materials  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  and  $\text{CdCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ . **Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics**, College Park, v. 67, p. 1-4, 2003.

INFANTIYA, S. G. *et al.* Calcium copper titanate a perovskite oxide structure: effect of fabrication techniques and doping on electrical properties—a review. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Cham, v. 33, n. 20, p. 15992-16028, 2022.

IRVINE, J. TS.; SINCLAIR, D.C.; WEST, A.R. Electroceramics: characterization by impedance spectroscopy. **Advanced materials**, Weinheim, v. 2, n. 3, p. 132-138, 1990.

JALAFI, I. *et al.* Expansion of the stability range of the  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  (CCTO) ceramics through Co-substitution with  $\text{Sc}^{3+}/\text{Zr}^{4+}$ . **Ceramics International**, Oxford, v. 51, p. 102345, 2025.

JANSEN, M. A concept for synthesis planning in solid-state chemistry. **Angewandte Chemie International Edition**, Weinheim, v. 41, n. 20, p. 3746-3766, 2002.

JESUS, L. M. *et al.* Polymeric synthesis and conventional versus laser sintering of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  electroceramics:(micro) structures, phase development and dielectric properties. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 654, p. 482-490, 2016.

JESUS, L. M. *et al.* Electrical microstructure evolution of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  (CCTO) ceramics: From resistive and core shell-like to semiconducting grains. **Ceramics International**, Oxford, v. 49, n. 15, p. 25594-25601, 2023.

JIANG, M. *et al.* Preparation and characterization of Mg-doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  thin films. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, Changsha, v. 32, n. 5, p. 1589-1597, 2022.

JUMPATAM, J. *et al.* Influences of  $\text{Sr}^{2+}$  doping on microstructure, giant dielectric behavior, and non-ohmic properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{CaTiO}_3$  ceramic composites. **Molecules**, Basel, v. 26, n. 7, p. 1994, 2021.

JUMPATAM, J. *et al.* Giant dielectric behavior and non-ohmic properties in  $\text{Mg}^{2+} + \text{F}^-$  co-doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **Journal of Asian Ceramic Societies**, Abingdon, v. 10, n. 2, p. 414-423, 2022.

KAWRANI, S. *et al.* From synthesis to applications: copper calcium titanate (CCTO) and its magnetic and photocatalytic properties. **ChemistryOpen**, Weinheim, v. 8, n. 7, p. 922-950, 2019.

KE, L. *et al.* The transition from non-ohmic to ohmic characteristics in  $\text{La}_2\text{O}_3$  doped  $\text{ZnO-MgO-TiO}_2$  linear resistance ceramics. **Ceramics International**, Oxford, v. 48, n. 10, p. 13855-13861, 2022.

KIM, T. S. *et al.* Future trends of display technology: micro-LEDs toward transparent, free-form, and near-eye displays. **Light: Science & Applications**, Nanjing, v. 14, n. 1, p. 335, 2025.

KIM, I.D. *et al.* Microsphere templating as means of enhancing surface activity and gas sensitivity of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  thin films. **Nano letters**, Washington, DC, v. 6, n. 2, p. 193-198, 2006.

KING, G.; WOODWARD, P. M. Cation ordering in perovskites. **Journal of Materials Chemistry**, Cambridge, v. 20, n. 28, p. 5785-5796, 2010.

KUMARI, N. *et al.* Study of dielectric properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  synthesized via different routes: Effect of sintering temperature. **Ceramics International**, Oxford, v. 49, n. 2, p. 2549-2556, 2023.

KUMARI, N. *et al.* Dielectric and electromagnetic shielding behavior of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{silicone rubber}$  composites. **Journal of Materials Research**, New York, v. 39, n. 19, p. 2684-2695, 2024.

LAADJAL, K.; CARDOSO, A. J. M. Multilayer ceramic capacitors: an overview of failure mechanisms, perspectives, and challenges. **Electronics**, Basel, v. 12, n. 6, p. 1297, 2023.

LEVINE, J. D. Theory of varistor electronic properties. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, Philadelphia, v. 5, n. 4, p. 597-608, 1975.

LI, X. G. *et al.* Decomposition kinetic characteristics of calcium carbonate containing organic acids by TGA. **Arabian Journal of Chemistry**, Riyadh, v. 10, p. S2534-S2538, 2017.

LIN, Y. *et al.* Grain boundary behavior in varistor-capacitor  $\text{TiO}_2$ -rich  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 103, n. 7, p. 074111, 2008.

LIU, J. W. *et al.* Dielectric properties of Eu-doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  with different compensation mechanisms. **Acta Metallurgica Sinica (English Letters)**, Beijing, v. 30, n. 2, p. 97-103, 2017.

LÓPEZ-SOLANO, J. *et al.* Crystal stability and pressure-induced phase transitions in scheelite  $\text{AWO}_4$  (A= Ca, Sr, Ba, Pb, Eu) binary oxides. I: A review of recent ab initio calculations, ADXRD, XANES, and Raman studies. **Physica status solidi (b)**, Weinheim, v. 244, n. 1, p. 325-330, 2007.

LUNKENHEIMER, P. *et al.* Nonintrinsic origin of the colossal dielectric constants in  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ . **Physical Review B**, College Park, v. 70, p. 172102, 2004.

LV, Y.; ZUO, R. Microstructure and microwave dielectric properties of low-temperature sinterable  $(1-x)\text{Ba}_3(\text{VO}_4)_2-x\text{CaWO}_4$  composite ceramics. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Cham, v. 24, n. 4, p. 1225-1230, 2013.

MA, H. L. *et al.* Raman study of phase transformation of  $\text{TiO}_2$  rutile single crystal irradiated by infrared femtosecond laser. **Applied surface science**, Amsterdam, v. 253, n. 18, p. 7497-7500, 2007.

MANN, M. *et al.* Evaluation of scalable synthesis methods for aluminum-substituted  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  solid electrolytes. **Materials**, Basel, v. 14, n. 22, p. 6809, 2021.

MAO, P. *et al.* Grain size effect on the dielectric and non-ohmic properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics prepared by the sol-gel process. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 778, p. 625-632, 2019.

MATSUOKA, M. Nonohmic properties of zinc oxide ceramics. **Japanese Journal of Applied Physics**, Tokyo, v. 10, p. 736-746, 1971.

MO, S. D.; CHING, W. Y. Electronic and optical properties of three phases of titanium dioxide: Rutile, anatase, and brookite. **Physical review B**, College Park, v. 51, n. 19, p. 13023, 1995.

MOMMA, K.; IZUMI, F. VESTA: a three-dimensional visualization system for electronic and structural analysis. **Journal of Applied Crystallography**, Chester, v. 41, n. 3, p. 653-658, 2008.

MORENO, H. P. **Análise da resposta óptica e elétrica de cerâmicas a base de  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  na forma de pós e pastilhas com incorporação de tungstênio.** Orientador: Miguel Ángel Ramírez Gil. 2023. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2023.

MORENO, H. *et al.* Tunable photoluminescence of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  based ceramics modified with tungsten. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 850, p. 156652, 2021.

MORENO, H. *et al.* Tuning dielectric and nonohmic properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics with W doping. **Materials Research Bulletin**, Amsterdam, v. 190, p. 113046, 2025.

MOTT, N. F.; LITTLETON, M. J. Conduction in polar crystals. I. Electrolytic conduction in solid salts. **Transactions of the Faraday Society**, London, v. 34, p. 485-499, 1938.

MISHRA, S.; MISHRA, P. Synthesis and characterization of CCTO0.5-BT0.5/epoxy hybrid ceramic polymer composite for electronic applications. **Materials Today: Proceedings**, Amsterdam, v. 67, p. 372-376, 2022.

NOBRE, F. X. *et al.* Hydrothermal temperature dependence of  $\text{CaWO}_4$  nanoparticles: structural, optical, morphology and photocatalytic activity. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Cham, v. 32, n. 8, p. 9776-9794, 2021.

NONGLEK, S. *et al.* Grain growth suppression and electrical performance optimization in  $\text{Ho}^{3+}$ -doped CCTO ceramics for capacitor–varistor integration. **Results in Physics**, Amsterdam, v. 68, p. 108467, 2025.

NOWOTNY, M. K. *et al.* Defect chemistry of titanium dioxide. Application of defect engineering in processing of  $\text{TiO}_2$ -based photocatalysts. **The Journal of Physical Chemistry C**, Washington, DC, v. 112, n. 14, p. 5275-5300, 2008.

ONYEBUCHI, A. C. *et al.* Microwave synthesis and characterization of calcium copper titanate oxide and composites for supercapacitor applications. **Next Materials**, Amsterdam, v. 10, p. 101585, 2026.

ORREGO, S. *et al.* Photoluminescence behavior on  $\text{Sr}^{2+}$  modified  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ -based ceramics. **Ceramics International**, Oxford, v. 44, p. 10781-10789, 2018.

OUYANG, X. *et al.* Enhanced extrinsic dielectric response of  $\text{TiO}_2$  modified  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **Ceramics International**, Oxford, v. 41, n. 10, p. 13447-13454, 2015.

PANG, A. L. *et al.* Photocatalytic degradation of organic dye under UV light using  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  nanoparticles synthesized by sol-gel route: effect of calcination temperature. **Inorganic Chemistry Communications**, Amsterdam, v. 150, p. 110462, 2023.

PARRA, R. *et al.* Photoluminescent  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ -based thin films synthesized by a sol-gel method. **Journal of the American Ceramic Society**, Westerville, v. 91, n. 12, p. 4162-4164, 2008.

PETINARDI, G. M. *et al.* Non-stoichiometry influence on dielectric properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ -based ceramics. **Materials Science and Engineering: B**, Lausanne, v. 300, p. 117095, 2024.

PONCE, M. *et al.* Electrical behavior analysis of n-type  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  thick films exposed to different atmospheres. **Journal of the European Ceramic Society**, Stoke-on-Trent, v. 35, n. 1, p. 153-161, 2015.

PRAXEDES, F. M. *et al.* Interface matters: Design of an efficient  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ -rGO photocatalyst. **Powder Technology**, Lausanne, v. 404, p. 117478, 2022.

RAMÍREZ, M. A. *et al.* Non-Ohmic and dielectric properties of a  $\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  polycrystalline system. **Applied Physics Letters**, Melville, v. 89, n. 21, p. 212102, 2006.

RHOUMA, S. *et al.* Comparative studies of pure, Sr-doped, Ni-doped and co-doped

CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ceramics: enhancement of dielectric properties. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 717, p. 121-126, 2017.

RICE, R. W. Ceramic processing: an overview. **AIChE Journal**, New York, v. 36, n. 4, p. 481-510, 1990.

RIETVELD, H. M. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. **Journal of Applied Crystallography**, Chester, v. 2, n. 2, p. 65-71, 1969.

ROHILLA, V. *et al.* Synthesis and Characterization of Calcium Copper Titanate (CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>) Powder as a Brown-Coloured Inorganic Pigment with High Infra-Red Reflectance. **ECS Advances**, Pennington, v. 2, n. 3, p. 032002, 2023.

ROSE, G. Beschreibung mehrerer neuer Mineralien des Urals. **Annalen der Physik und Chemie**, Leipzig, v. 48, p. 564-578, 1839.

SABU, N. A. *et al.* Enhanced structural and optical properties of the polyaniline-calcium tungstate (PANI-CaWO<sub>4</sub>) nanocomposite for electronics applications. **The European Physical Journal Plus**, Heidelberg, v. 132, n. 6, p. 290, 2017.

SAGADEVAN, S.; SUNDARAM, A. S. **A brief review of the relevant dielectric theories of solids**. Latin-American Journal of Physics Education, Mexico City, v. 8, n. 3, p. 3302, 2014.

SAQIB, N. U.; SHAH, I.; ADNAN, R. An emerging photocatalyst for wastewater remediation: a mini-review on CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> photocatalysis. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 29, n. 27, p. 40403-40414, 2022.

SCHROEDER, H. Poole-Frenkel-effect as dominating current mechanism in thin oxide films—An illusion?!. **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 117, n. 21, p. 215103, 2015.

SENYSHYN, A. *et al.* Thermal structural properties of calcium tungstate. **Journal of Applied Crystallography**, Chester, v. 44, n. 2, p. 319-326, 2011.

SHEN, Y.; CHIOU, B.; HO, C. Effects of annealing temperature on the resistance switching behavior of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> films. **Thin Solid Films**, Amsterdam, v. 517, n. 3, p. 1209-1213, 2008.

SINCLAIR, D. C. *et al.* CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>: One-step internal barrier layer capacitor. **Applied Physics Letters**, Melville, v. 80, p. 2153-2155, 2002.

SIQUEIRA, N. L. C. *et al.* Revealing the Structural, Electric, and High-Frequency Dielectric Properties of Residue Doped-CaWO<sub>4</sub> Flexible Multilayer Ceramic Sheets. **Materials Research**, São Carlos, v. 28, p. e20240522, 2025.

SREEJIVUNGSA, K. *et al.* Colossal permittivity and humidity sensing properties of CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> ceramics derived from cockle shell CaCO<sub>3</sub> via CO<sub>2</sub> absorption. **Scientific Reports**, London, v. 15, n. 1, p. 18030, 2025.

SRIPAKDEE, C. *et al.* Very high-performance dielectric and non-ohmic properties of

novel X8R-type  $\text{Ca}_{1-1.5x}\text{Ho}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/\text{TiO}_2$  ceramics. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 779, p. 521-530, 2019.

SUBRAMANIAN, M. A. *et al.* High Dielectric Constant in  $\text{ACu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  and  $\text{ACuTi}_3\text{FeO}_{12}$  Phases. **Journal of Solid State Chemistry**, New York, v. 151, p. 323-325, 2000.

SUN, J. *et al.* Optimized dielectric and non-ohmic characteristics in  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics via grain boundary engineering. **Ceramics International**, Oxford, v. 51, p. 101234, 2025.

SWATSITANG, E.; KUMNORKAEW, P.; PUTJUSO, T. Thermal stability improvement of dielectric properties and non-ohmic characteristic of  $\text{CaCu}_{3+x}\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics via a Cu-nonstoichiometric approach. **Ceramics International**, Oxford, v. 47, n. 17, p. 24149-24162, 2021.

TAHA, T. B. *et al.* Nanotechnology and Computer Science: Trends and advances. **Memories - Materials, Devices, Circuits and Systems**, Lausanne, v. 2, p. 100011, 2022.

TALEBINEZHAD, H. *et al.* Dielectric behavior and non-ohmic behavior of CCTO/ $\text{SiO}_2$  composites. *In*: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE APPLICATIONS OF FERROELECTRICS (ISAF), 2017, Atlanta. **Proceedings [...]**. Piscataway: IEEE, 2017. p. 96-99.

TANG, Z. *et al.* Significantly enhanced breakdown field in  $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics by tailoring donor densities. **Journal of the European Ceramic Society**, Stoke-on-Trent, v. 38, p. 1569-1575, 2018.

TANG, Z. *et al.* Optimized dual-function varistor-capacitor ceramics of core-shell structured  $x\text{Bi}_{2/3}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}/(1-x)\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  composites. **Journal of the European Ceramic Society**, Stoke-on-Trent, v. 40, p. 3437-3444, 2020.

TANG, Z. *et al.* Significantly enhanced varistor properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ -based ceramics by designing superior grain boundary: Deepening and broadening interface states. **Journal of Materials Science & Technology**, Shenyang, v. 108, p. 82-89, 2022.

THIRURAMANATHAN, P. *et al.* Fabrication of miniaturized high bandwidth dielectric resonator on patch (DRoP) antenna using high dielectric  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  nanoparticles. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 747, p. 1033-1042, 2018.

THONGBAI, P. *et al.* Microstructural evolution and Maxwell–Wagner relaxation in  $\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{Ti}_{4-x}\text{Zr}_x\text{O}_{12}$ : The important clue to achieve the origin of the giant dielectric behavior. **Materials Research Bulletin**, Amsterdam, v. 60, p. 695-703, 2014b.

TIAN, J. *et al.* Microstructure and nonlinear electrical properties in  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -ZnO varistor ceramics. **Materials Science and Engineering: B**, Lausanne, v. 300, p. 117084, 2024.

TIAN, T. *et al.* Electronic polarizability as the fundamental variable in the dielectric properties of two-dimensional materials. **Nano Letters**, Washington, DC, v. 20, n. 2,

p. 841-851, 2020.

TIAN, T. *et al.* Novel ultrahigh-performance ZnO-based varistor ceramics. **ACS Applied Materials & Interfaces**, Washington, DC, v. 13, n. 30, p. 35924-35929, 2021.

TIAN, T. *et al.* Influence of  $\text{TiO}_2$  doping on the grain growth and electrical properties of ZnO– $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -based varistor ceramics. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 1008, p. 176657, 2024.

VAZ, I. C. F. **Síntese e caracterização de  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  com doadores de elétrons Nb e Mo**. Orientador: Francisco Moura Filho. Coorientador: Márcio Tsuyoshi Yasuda. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itabira, 2016.

WANG, C. *et al.* A general method to synthesize and sinter bulk ceramics in seconds. **Science**, Washington, DC, v. 368, n. 6490, p. 521-526, 2020.

WANG, J. *et al.* Improved dielectric, nonlinear and magnetic properties of cobalt-doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, Stoke-on-Trent, v. 38, n. 10, p. 3505-3511, 2018.

WANG, S. *et al.* Structure characterization, optical and photoluminescence properties of scheelite-type  $\text{CaWO}_4$  nanophosphors: Effects of calcination temperature and carbon skeleton. **Optical Materials**, Amsterdam, v. 99, p. 109562, 2020.

WU, R. *et al.* Enhanced thermal and dielectric properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  by (Fe, La)-co-doping. **Journal of Materials Chemistry C**, Cambridge, v. 11, n. 35, p. 12037-12047, 2023.

XU, C. *et al.* Performance optimization of cold-sintered ZnO varistors: dual breakthroughs in the breakdown field and nonlinear coefficient. **Materials Science in Semiconductor Processing**, Amsterdam, v. 200, p. 109902, 2025.

XUE, R. *et al.* Improved optical, dielectric, and nonlinear properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  thin films by chromium doping. **Thin Solid Films**, Amsterdam, v. 779, p. 139940, 2023.

XUE, R. *et al.* Enhanced dual-function capacitor–varistor properties in  $\text{Bi}_{2/3}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ – $\text{AgNbO}_3$  composite ceramics. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Cham, v. 36, n. 19, p. 1178, 2025.

YANCHEVSKII, O. Z. *et al.* Microstructure, chemical composition, and dielectric response of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics doped with F, Al, and Mg ions. **Heliyon**, London, v. 9, n. 8, p. e18938, 2023.

YU, H. *et al.* Enhanced electrical and photoluminescence properties of  $\text{BiSbO}_4$ -doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics by modifying grain boundary response. **Ceramics International**, Oxford, v. 48, n. 16, p. 23428-23435, 2022.

YU, Y. *et al.* Sr and Zr Co-doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics with improved dielectric properties. **Materials**, Basel, v. 15, n. 12, p. 4243, 2022.

ZHANG, G. *et al.* The effect of  $\text{TiO}_2$  on the dielectric performance of  $\text{ZrO}_2$ -and- $\text{Nb}_2\text{O}_5$  pre-doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **Materials**, Basel, v. 17, n. 23, p. 5824, 2024.

ZHANG, J. *et al.*  $\text{SrTiO}_3$ -modified  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics with low dielectric loss and excellent temperature stability for X8P capacitors. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Cham, v. 34, n. 14, p. 1148, 2023.

ZHANG, Y. *et al.* Titanate and titania nanostructured materials for environmental and energy applications: a review. **RSC Advances**, Cambridge, v. 5, n. 97, p. 79479-79510, 2015.

ZHANG, Z. *et al.* Synthesis of dumbbell-like  $\text{Bi}_2\text{WO}_6@\text{CaWO}_4$  composite photocatalyst and application in water treatment. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 292, p. 948-953, 2014.

ZHAO, J. *et al.* Strontium-doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics with very low dielectric loss synthesized by the sol-gel method. **Applied Physics A**, Berlin, v. 128, n. 4, p. 340, 2022.

ZHENG, Q.; FAN, H.; LONG, C. Microstructures and electrical responses of pure and chromium-doped  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ceramics. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v. 511, p. 90-94, 2012.

## DADOS CURRICULARES

| IDENTIFICAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | PABLO SAMUEL DE FREITAS CHAVES<br>22/01/2001                                                                               |
| Nacionalidade                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | brasileira                                                                                                                 |
| Nome em citações bibliográficas:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Chaves, Pablo Samuel de Freitas<br>Chaves, P.S.F.                                                                          |
| Currículo Lattes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <a href="http://lattes.cnpq.br/1840687667348866">http://lattes.cnpq.br/1840687667348866</a>                                |
| ORCID                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <a href="https://orcid.org/0000-0002-3731-8675">https://orcid.org/0000-0002-3731-8675</a>                                  |
| FORMAÇÃO ACADÊMICA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                            |
| 2019/2023                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Graduação em Engenharia de Materiais<br>Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP                      |
| 2025/2025                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Curso de Letramento Científico<br>Núcleo Técnico de Atenção Psicossocial (NTAPS),<br>Universidade Estadual Paulista, UNESP |
| PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                            |
| <p>MORENO, H.; TEIXEIRA, M. G.; <b>CHAVES, P. S. F.</b>; DE ARAÚJO, K. C.; MOREIRA, A. J.; PEREIRA, E. C.; TEODORO, M. D.; REZENDE, M. V. S.; LONGO, E.; SIMÕES, A. Z.; RAMIREZ, M. A. New insights into <math>\text{XSnO}_3</math> (X = Ca, Ba) photocatalysts for ciprofloxacin degradation based on theoretical defect formation and surface morphology. <i>Journal of Alloys and Compounds</i>, v. 1058, p. 186992, 2026.</p> <p>ROCHA, L. S. R.; ACERO, G.; FLORES, E. M.; <b>CHAVES, P. S. F.</b>; PONCE, M. A.; SAMBRANO, J.; SIMÕES, A. Z. Tracking the polar properties at <math>\text{LaTiO}_3/\text{KTaO}_3</math> heterostructures. <i>Physica B-Condensed Matter</i>, v. 733, p. 418430, 2026.</p> |                                                                                                                            |
| PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                            |
| Bancas de trabalhos de conclusão                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                            |
| SIMOES, A. Z.; HANGAI, B. V. A.; <b>CHAVES, P. S. F.</b> . Participação em banca de João Vitor Julião Gonçalves. <b>Estudo da Influência do Método Hidrotermal assistido por Micro-ondas (HAM) na Síntese de Nanomateriais de NiO</b> . 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                            |

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2025.

M.A RAMÍREZ; MORENO, H. P.; **CHAVES, P. S. F.** Participação em banca de Marcos Henrique Da Silva Silvestre. **Síntese e caracterização de compósitos cerâmicos à base de  $\text{BaSn}_{(1-x)}\text{Ti}_{(x)}\text{O}_3$  na forma de pós visando aplicações fotocatalíticas.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2024.

### Orientações

### PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS

REUNIÃO TÉCNICA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, 6., 2025, (Presidente Prudente). Efeitos da Modificação com  $\text{WO}_3$  e  $\text{TiO}_2$  nas Propriedades Dielétricas e Não-Ôhmicas do  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ . 2025. (Encontro).

REUNIÃO TÉCNICA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, 6., 2025, (Presidente Prudente). Minicurso: Técnicas de Fluorescência, Espectroscopia e Imageamento Raman (Horiba), 2025. (Minicurso).

XI SIAT- SIMPÓSIO DE ANÁLISES TÉRMICAS, 11., 2025, (Guaratinguetá). O papel estratégico da análise térmica no desenvolvimento de materiais cerâmicos avançados multifuncionais ( $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  e  $\text{CaWO}_4$ ). 2025. (Simpósio).

XI SIAT- SIMPÓSIO DE ANÁLISES TÉRMICAS, 11., 2025, (Guaratinguetá). Minicurso: Apresentações Científicas na era da inteligência artificial (IA), 2025. (Minicurso).

XXXVII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 37., 2025, (Guaratinguetá). Avaliador de painéis científicos. 2025 (Congresso).