

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO
CIENTÍFICA – PIBIC

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DO LISRVO₄ PURO E DOPADO

Área de conhecimento: Ciências Exatas e da Terra;
Subárea do conhecimento: Física;
Especialidade do conhecimento: Luminescência.

Relatório Final
Período da bolsa: de (10/2022) a (08/2023)

Este projeto é desenvolvido com bolsa de iniciação científica

PIBIC/COPES

Orientador: Marcos Vinicius dos Santos Rezende

Autor: Sabrinna Macedo Oliveira

SUMÁRIO

1. **Introdução**
2. **Objetivos**
3. **Metodologia**
4. **Resultados e discussões**
5. **Conclusões**
6. **Perspectivas**
7. **Referências bibliográficas**

Materiais luminescentes que emitem radiação visível são altamente requisitados em diversas aplicações tecnológicas, especialmente na fabricação de diodos emissores de luz (LEDs). Destaca-se o grupo dos vanadatos, como o LiSrVO_4 [1]. Esta família de compostos atua como matrizes hospedeiras para íons de terras raras, exibindo excelentes propriedades luminescentes. O LiSrVO_4 opado com íons Eu^{3+} [2], Tb^{3+} [3], Sm^{3+} [4] e Yb^{3+} [5] tem sido amplamente investigado, com diferentes procedimentos utilizados para otimizar suas propriedades luminescentes. Diversas rotas de síntese, incluindo reação de combustão, sol-gel e reação de estado sólido, têm sido empregadas para obter compostos eficientes em propriedades ópticas, enfocando produção rápida e acessível. Recentemente, houve uma dedicação significativa à pesquisa de fósforos com cores ajustáveis, devido a suas diversas aplicações em áreas como dispositivos de exibição óptica [6], tecnologias biológicas [7], LEDs [8-9] e outros. A co-dopagem com múltiplos íons Ln^{3+} tem sido uma abordagem comum para ajuste multicolor de fósforos, embora a produção de cores ajustáveis muitas vezes seja complexa, envolvendo ajuste de concentrações de multi-íons dopados [10-11], modificações de estrutura cristalina [12], alterações no comprimento de onda de excitação [13] ou temperatura [14]. No entanto, frequentemente isso resulta em baixa eficiência luminescente e instabilidade química [15]. Idealmente, fósforos com cores ajustáveis poderiam ser obtidos por meio de um único dopante em uma estrutura cristalina estável. Nesse contexto, compostos à base de vanadato são notáveis como estruturas hospedeiras devido à alta estabilidade química e eficiência de luminescência. Apresentando intensa transferência de carga (CT) e bandas de absorção no ultravioleta, os vanadatos têm sido desenvolvidos como fósforos de alto desempenho nos últimos anos [16-19]. Atualmente, estudos também se concentram em compostos como $\text{NaAla}(\text{VO}_4)_2$ ($A=\text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$) [20] e $\text{KLa}_5\text{O}_5(\text{VO}_4)_2$ [2], que exibem ampla emissão na região visível sob excitação UV.

Os vanadatos têm se mostrado promissores como candidatos a termômetros luminescentes devido à sua eficiente transferência de energia do grupo vanadato $[\text{VO}_4]_3$ para íons de terras raras (RE^{3+}), gerando grande interesse no desenvolvimento de sensores de temperatura baseados em fluorescência [21-22]. A termometria ratiométrica, que se baseia na razão de intensidades de dois picos de emissão, surge como uma abordagem promissora para medições precisas de temperatura. O estudo específico do LiSrVO_4 como hospedeiro para íons Eu^{3+} demonstrou eficiente transferência de energia e ajuste de cor de emissão, além de propriedades luminescentes relacionadas à temperatura.

Além disso, melhorias na resposta UV de dispositivos de carga acoplada (CCDs) têm sido buscadas para aplicações em espectroscopia UV, litografia UV e monitoramento de chamas que emitem luz UV [28–30]. Revestir os CCDs com

fósforos para converter fótons UV em visíveis tem sido uma estratégia eficaz, com vantagens significativas em termos de fotoestabilidade e eficiência. Entre os ortovanadatos do tipo $AlBIVVO_4$, os hospedeiros de vanadato $ASrVO_4$ ($A=Li, Na, K$) ganham destaque pela estabilidade térmica e capacidade de produzir fósforos inorgânicos eficientes com ativadores de terras raras [34-36]. Estudos específicos sobre $LiSrVO_4:Tb^{3+}$ ressaltam sua adequação para a resposta de CCDs de silício em termos de comprimento de onda de emissão. Esse fósforo apresenta potencial como material para dispositivos de silício deslocados por UV, visando geração de imagens e detecção.

2. Objetivos

2.1 Objetivo geral

O objetivo central deste estudo é aprimorar as propriedades estruturais e investigar os defeitos presentes no $LiSrVO_4$, tanto em sua forma pura quanto dopada, por meio da otimização das condições de síntese utilizando a rota sol-gel modificada. Os resultados experimentais serão minuciosamente comparados com simulações computacionais, proporcionando uma base sólida para a aplicação desses materiais em diodos emissores de luz (LEDs) e como componentes sensíveis para dispositivos de imagens ultravioleta (UV).

2.2 Objetivos específicos

- Preparar amostras de $LiSrVO_4$ tanto na forma pura quanto dopada com európio e térbio, utilizando a metodologia do método sol-gel modificado.
- Investigar a influência das características estruturais nas propriedades do $LiSrVO_4$, empregando análises de difração de raios-X (DRX) para compreender a correlação entre a estrutura cristalina e as propriedades luminescentes.
- Avaliar a relação entre a estrutura cristalina, concentração de dopante e morfologia das amostras, utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV) para obter insights sobre como esses fatores afetam as propriedades luminescentes.

3. Metodologia

3.1 Preparação dos Nanopós

Os nanopós foram sintetizados por meio da rota sol-gel, seguindo um procedimento adaptado da literatura [37 - 39]. Os reagentes necessários, como precursores metálicos e agentes complexantes, foram selecionados e pesados de acordo com as proporções estequiométricas previamente determinadas. O processo de mistura e homogeneização foram realizado em um meio aquoso sob agitação constante [40,41].

3.2 Síntese e Tratamento Térmico

O precursor resultante da etapa anterior foram submetidos a um tratamento térmico controlado, onde ocorreu a decomposição e formação dos nanopós desejados. O aquecimento foi realizado em um forno com rampas de temperatura definidas, seguido por um período de patamar apropriado para garantir a completa reação [42 - 44].

3.3 Análise por Difratomia de Raios-X

Os nanopós obtidos foram analisados por difratometria de raios-X (DRX) para determinar sua estrutura cristalina. A identificação das fases cristalinas foi realizada por comparação com bancos de dados cristalográficos [45 - 47].

4. Resultados e discussões

Os gráficos de DRX (Fig. 10-12) mostram os padrões de difração de raio X que surgem ao irradiar um material com raios X. Neles, o eixo horizontal representa o ângulo de difração (2θ) e o eixo vertical representa a intensidade de difração.

Os picos no gráfico correspondem às reflexões dos planos cristalinos do material. Cada pico indica uma distância entre planos de átomos dentro da estrutura cristalina, e a posição do pico está relacionada ao ângulo de difração. A posição dos picos pode ser usada para determinar a disposição atômica e a estrutura cristalina do material.

A intensidade dos picos depende da distribuição dos átomos na amostra e sua disposição cristalina. Picos intensos indicam planos com alta densidade atômica e maior ordenamento. Além disso, a amplitude e a forma dos picos podem fornecer informações sobre o tamanho do cristal, a pureza e as possíveis tensões do material.

Ao analisar os padrões de DRX das amostras sintetizadas na Figura 1, foi observada uma evolução significativa na cristalinidade do LiSrVO_4 à medida que a temperatura de tratamento térmico é aumentada. Inicialmente, a 500°C , picos de baixa intensidade indicaram uma fase inicial de cristalização. À medida que a temperatura foi elevada, os picos se tornaram mais nítidos e intensos, caracterizando a formação gradual da estrutura cristalina. A 700°C , foi observado a intensificação dos picos no padrão de DRX, sugerindo uma maior cristalinidade. Isso indica que a reação química estava progredindo e que a estrutura LiSrVO_4 estava se formando mais completamente. O aumento da cristalinidade foi corroborado pelo aumento nas intensidades relativa dos picos. Com a elevação da temperatura para 800°C , os picos de difração se tornaram ainda mais agudos e intensos. Isso demonstrou uma melhoria na qualidade da cristalinidade, sugerindo uma estrutura mais ordenada e menos defeitos. Os padrões de DRX mostraram uma concordância mais próxima com valores esperados para o padrão de difração do composto LiSrVO_4 . Ao alcançar 900°C , a intensidade e aguçamentos dos picos atingiram um ponto máximo. Essa temperatura permitiu a obtenção do LiSrVO_4 com a mais alta qualidade cristalina possível dentro das condições experimentais. Os picos de difração atingiram intensidades máximas e estavam mais próximos das posições esperadas conforme apresentado na figura 1, indicando uma estrutura altamente ordenada e bem formada.

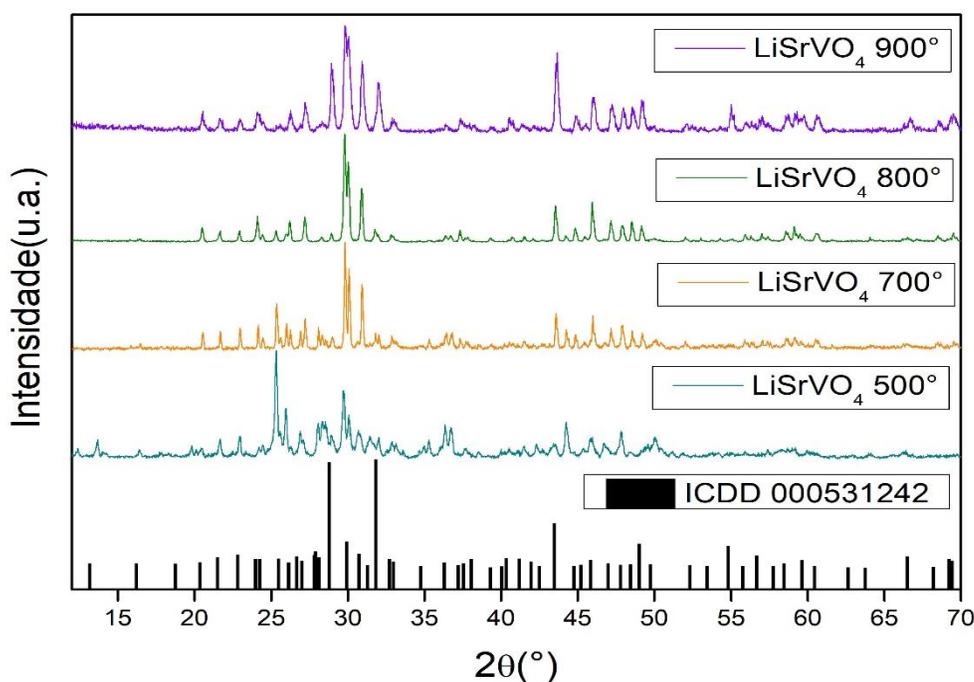


Figura 1 – Difratometria de raios X das amostras de LiSrVO_4 calcinadas a diferentes temperaturas.

A investigação foi expandida para analisar a influência das variações de concentração de lítio e temperaturas de tratamento térmico (variando de 500°C até 900°C em incrementos de 100°C). Na figura 2, observou-se uma combinação complexa de efeitos na formação da estrutura cristalina do LiSrVO_4 . Aumentando a concentração de lítio de 1,0 para 1,1, nota-se diferenças na intensidade e nas posições dos picos de difração de raio X. Isso sugere que a variação na concentração de lítio tem um impacto direto na ordem da estrutura cristalina, possivelmente influenciando as distâncias e os ângulos entre os planos cristalinos. Ao variar as temperaturas de tratamento térmico, observa-se a evolução na cristalinidade do LiSrVO_4 com o aumento da temperatura. A 500°C e 600°C , os picos de baixa intensidade sugeriram uma fase inicial de cristalização, enquanto as temperaturas mais elevadas (700°C , 800°C e 900°C) resultaram em picos mais intensos, indicando uma melhoria gradual na formação da estrutura. Conforme mostra a figura 2. As variações nas concentrações de lítio e nas temperaturas de tratamento térmico parecem interagir de maneira complexa. À medida que a concentração aumenta, as temperaturas para a formação da estrutura podem variar. Isso pode ser resultado das diferenças nas taxas de difusão dos íons de lítio na estrutura, que podem influenciar a formação dos sítios cristalinos e a ordem das fases.

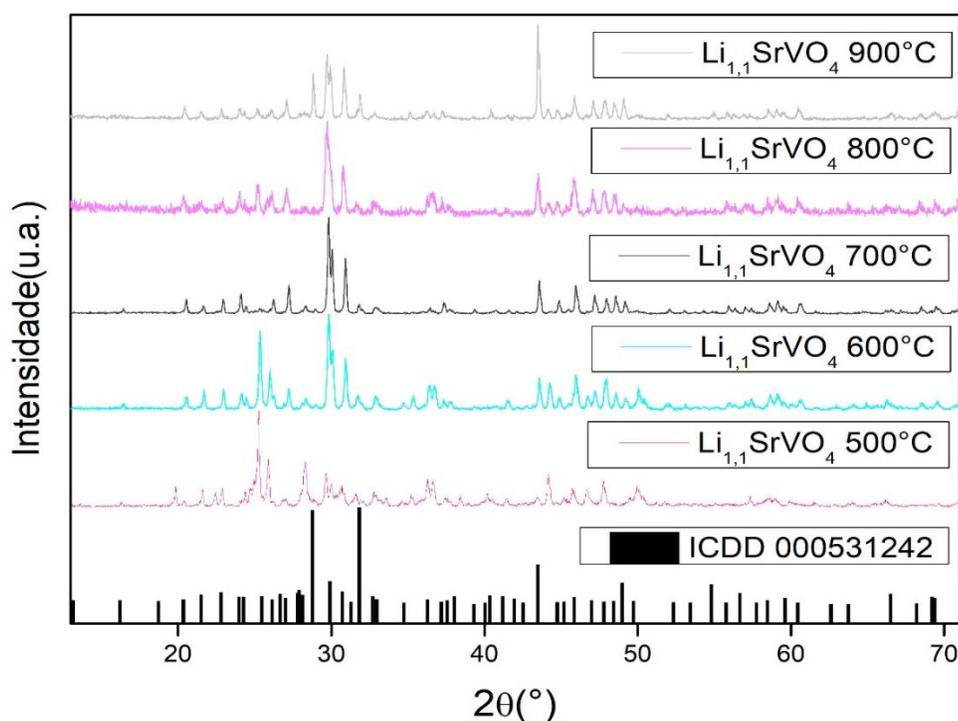


Figura 2 – Difratometria de raios X das amostras de LiSrVO_4 calcinadas a diferentes temperaturas.

Neste estágio da investigação, o foco se manteve na influência da variação da concentração de lítio em combinação com temperaturas específicas (700°C, 800°C e 900°C). A 700°C, os picos de difração começam a se intensificar. A 800°C e 900°C, picos adicionais aparecem, conforme mostra a figura 3, sugerindo possíveis fases cristalinas adicionais ou uma melhoria na cristalinidade.

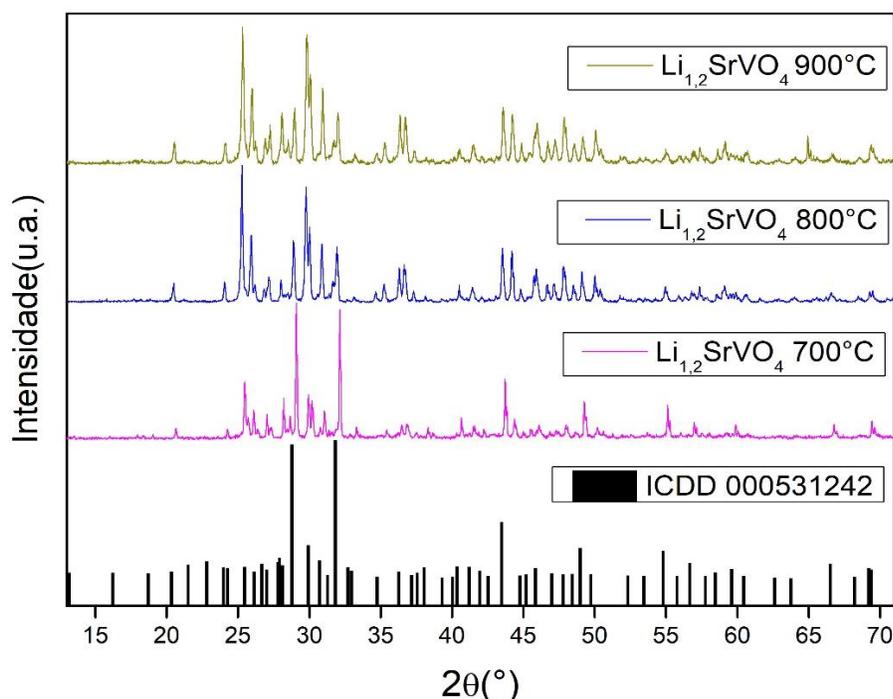


Figura 3 – Difratomia de raios X das amostras de LiSrVO_4 calcinadas a diferentes temperaturas.

Ao variar a concentração de lítio para 1,2, observa-se mudanças na intensidade e nas posições dos picos de difração de raio x. Isso sugere que a alteração na concentração de lítio afeta a ordem da estrutura cristalina e pode levar a diferentes fases cristalinas. A presença de picos adicionais pode indicar a formação de novas fases em função dessa variação de concentração.

O aumento na quantidade de picos observados a 800°C e 900°C pode ser atribuído a várias razões. Primeiramente, essas temperaturas podem estar favorecendo a formação de múltiplas fases cristalinas. Além disso, o aumento da temperatura pode permitir a cristalização mais completa das amostras, revelando picos que estavam mascarados em temperaturas mais baixas. Também é possível que essas temperaturas estejam promovendo uma maior ordem na estrutura cristalina, levando a mais picos de difração.

Continuada a exploração pelas consequências das variações de concentração de lítio no composto LiSrVO_4 , desta vez com a concentração de 1,3. As temperaturas de 700°C, 800°C e 900°C foram escolhidas novamente, uma vez que permitiram uma comparação direta entre os efeitos da variação da concentração de

lítio nas mesmas condições de tratamento. Isso facilitou a identificação de padrões consistentes ou alterações específicas causadas apenas pela variação da concentração de lítio.

Ao analisar os padrões de DRX para a concentração de lítio 1,3, nota-se que os gráficos são semelhantes entre si, para todas as temperaturas, sugerindo padrões consistentes de difração para essas condições. No entanto, uma observação significativa é o deslocamento dos picos de difração para direita (figura 4), em comparação com as concentrações anteriores. Esse deslocamento pode indicar uma mudança nas dimensões da célula unitária e uma possível expansão da estrutura cristalina. O deslocamento dos picos de difração para direita sugere um aumento nas distâncias interatômicas dentro da estrutura. Isso pode ser resultado da maior quantidade de íons de lítio incorporados na rede cristalina, causando uma expansão da estrutura. O aumento da concentração de lítio pode estar criando um ambiente mais distante entre os átomos, resultando em uma estrutura cristalina ligeiramente modificada.

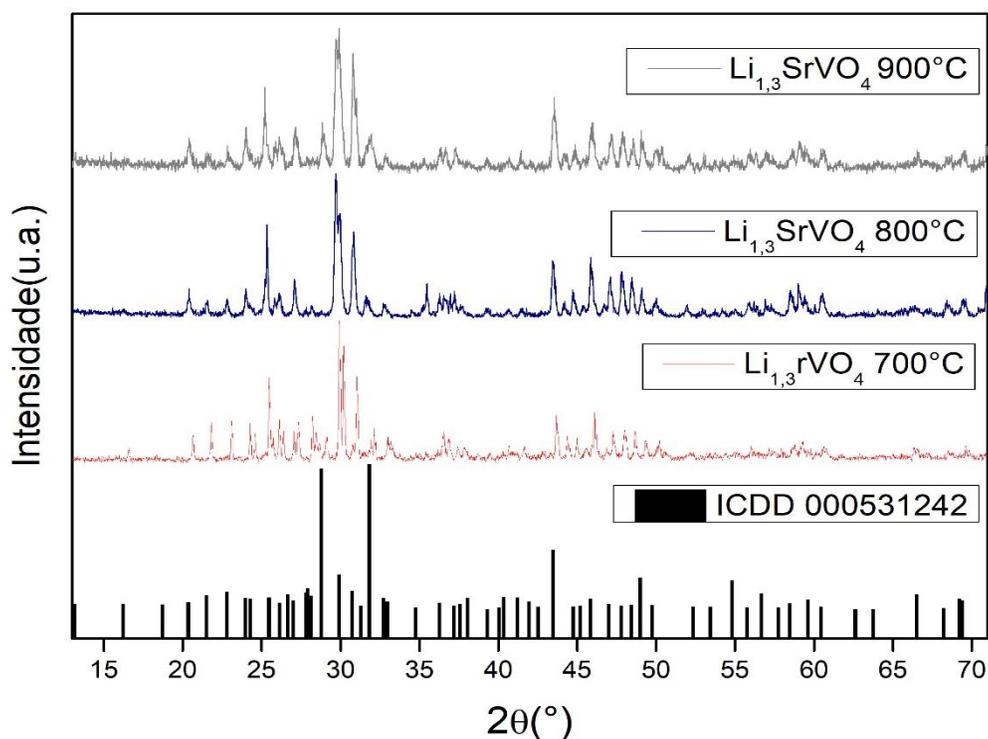


Figura 4 – Difractometria de raios X das amostras de LiSrVO₄ calcinadas a diferentes temperaturas.

Considerando uma concentração de lítio de 1,4 nas mesmas temperaturas de tratamento térmico anteriores: 700°C, 800°C e 900°C. Foi observado uma mudança na intensidade de alguns picos. Especificamente, nota-se que alguns picos que eram mais intensos em concentrações anteriores reduziram sua intensidade. Esse fenômeno pode ser indicativo de alterações na ordem da estrutura cristalina em resposta à variações da concentração de lítio.

A diminuição na intensidade de certos picos (figura 5) de difração sugere que a variação da concentração de lítio está afetando a quantidade ou a ordem das fases cristalinas presentes. A incorporação de íons de lítio em diferentes concentrações pode levar a diferentes arranjos atômicos e portanto, a diferentes padrões de difração.

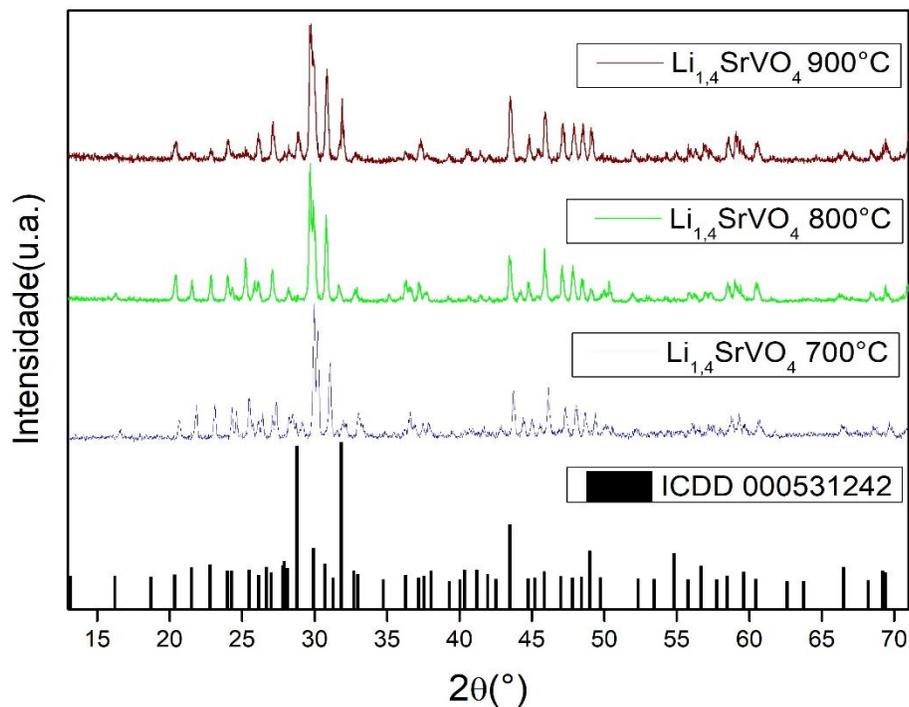


Figura 5 – Difractometria de raios X das amostras de LiSrVO_4 calcinadas a diferentes temperaturas.

Nesta etapa, focalizamos na concentração de lítio de 1,5 e realizamos análises de DRX apenas para a temperatura de tratamento térmico de 700°C. Optamos por analisar apenas essa temperatura, a qual mostrou respostas interessantes nas etapas anteriores da pesquisa. Essa escolha nos permitiu comparar os resultados com variações anteriores. Notamos que os picos próximos de 30 no eixo horizontal (2θ) estão com baixa intensidade. Isso indica que as fases cristalinas correspondentes a esses picos podem não estar se formando tão completamente em comparação com as concentrações anteriores.

A baixa intensidade dos picos próximos de 30 no eixo horizontal (figura 6) sugere que a concentração de 1,5 de lítio pode estar afetando negativamente a formação das fases cristalinas associadas a esses picos. Isso pode ser resultado de uma interação complexa entre os íons de lítio. Essas observações têm implicações importantes para a síntese controlada do LiSrVO_4 , uma vez que diferentes concentrações podem levar a diferentes estruturas cristalinas em uma mesma temperatura.

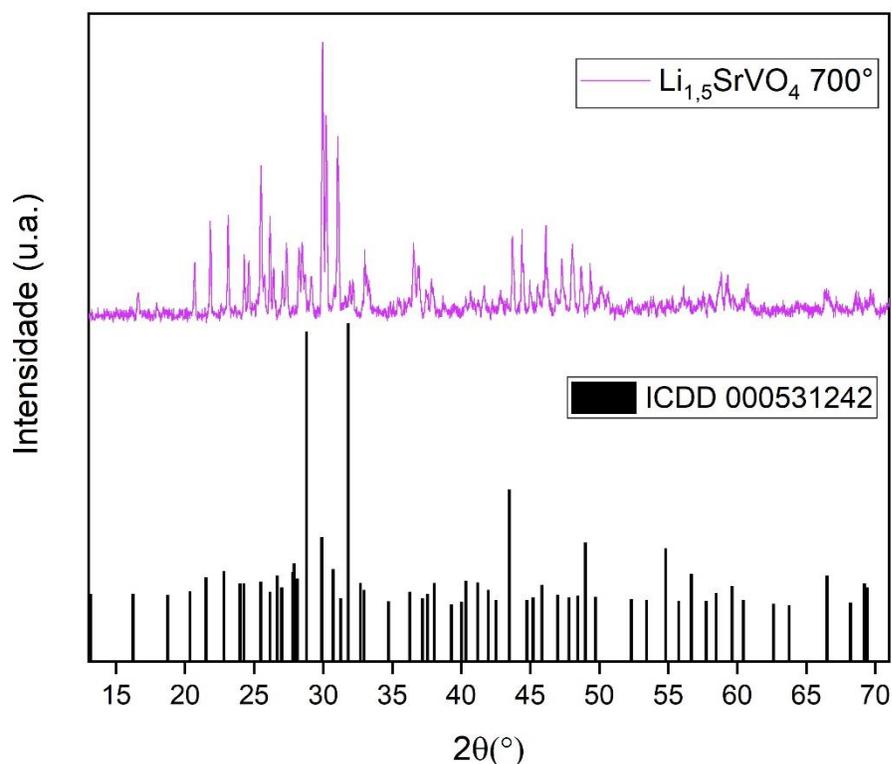


Figura 6 – Difratomia de raios X das amostras de LiSrVO_4 calcinadas a diferentes temperaturas.

Exploramos a influência da utilização de diferentes soluções (água destilada e cerveja Bohemia puro malte) como meio de síntese por rota sol-gel modificada nas propriedades cristalinas do conjunto LiSrVO_4 . Além disso, consideramos diferentes temperaturas de tratamento térmico para entender como essas variáveis afetam os padrões de DRX e, conseqüentemente, a estrutura cristalina resultante.

Iniciada a análise dos padrões de DRX do LiSrVO_4 sintetizado utilizando água destilada e cerveja como soluções de síntese. Observa-se que, para ambas as soluções os picos característicos de difração estão presentes. No entanto, possíveis variações nas intensidades dos picos e nas posições podem indicar diferenças nas propriedades cristalinas e na qualidade da formação do composto.

Ao variar as temperaturas de tratamento térmico, observa-se como os padrões de DRX evoluíram para ambas as soluções. A análise das intensidades e posições dos picos nos forneceu informações valiosas sobre a cristalinidade, a ordem da estrutura e as possíveis fases cristalinas presentes.

Comarando os padrões de DRX entre a água destilada e a cerveja, é possível observar se a utilização de cerveja como meio de síntese introduz diferenças significativas na formação da estrutura do LiSrVO_4 . As variações nas intensidades ou posições dos picos podem sugerir uma influência da cerveja nos processos de formação da fase cristalina, isso pode ser verificado na figura 7.

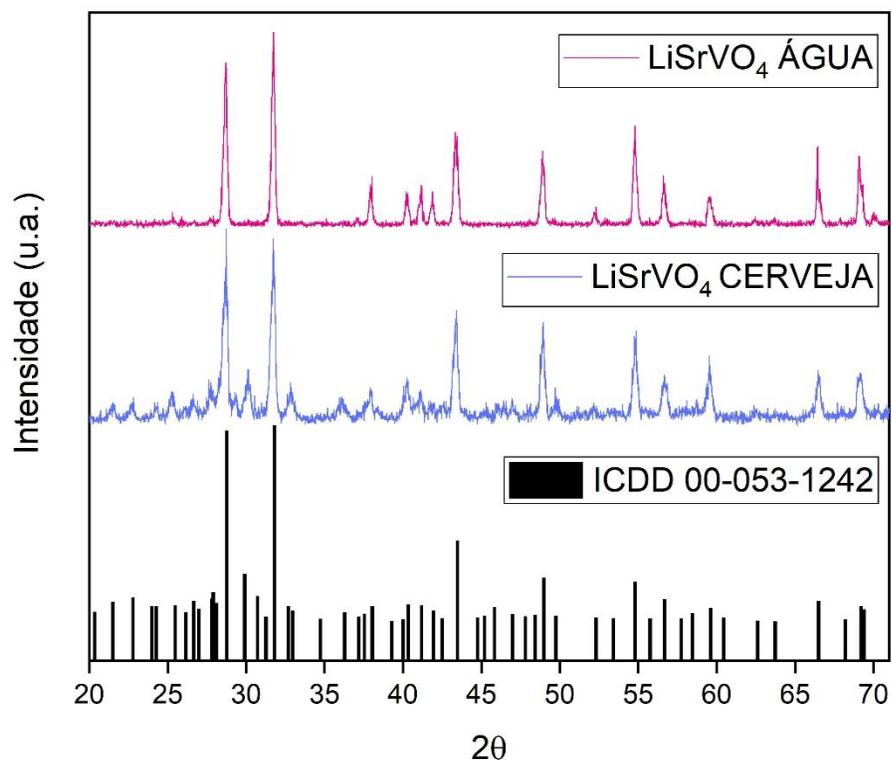


Figura 7 – Difractometria de raios X das amostras de LiSrVO_4 calcinadas a diferentes temperaturas.

Foi examinado o padrão DRX do LiSrVO_4 sintetizado por rota sol-gel modificada, empregando uma temperatura de tratamento térmico de 900°C . A escolha dessa temperatura foi baseada em considerações de otimização das propriedades do LiSrVO_4 . Essa temperatura pode ser um ponto crítico no processo de síntese, onde ocorre uma cristalização mais completa, resultando em uma estrutura mais ordenada e definida.

Ao tratar as amostras a 900°C , observa-se uma evolução significativa na intensidade e nas posições dos picos de difração de raio X (figura 8). Essa evolução sugere que a estrutura cristalina do LiSrVO_4 estava se formando de maneira mais completa e bem definida. O aumento na intensidade dos picos indica uma maior cristalinidade e um melhor arranjo dos átomos na estrutura.

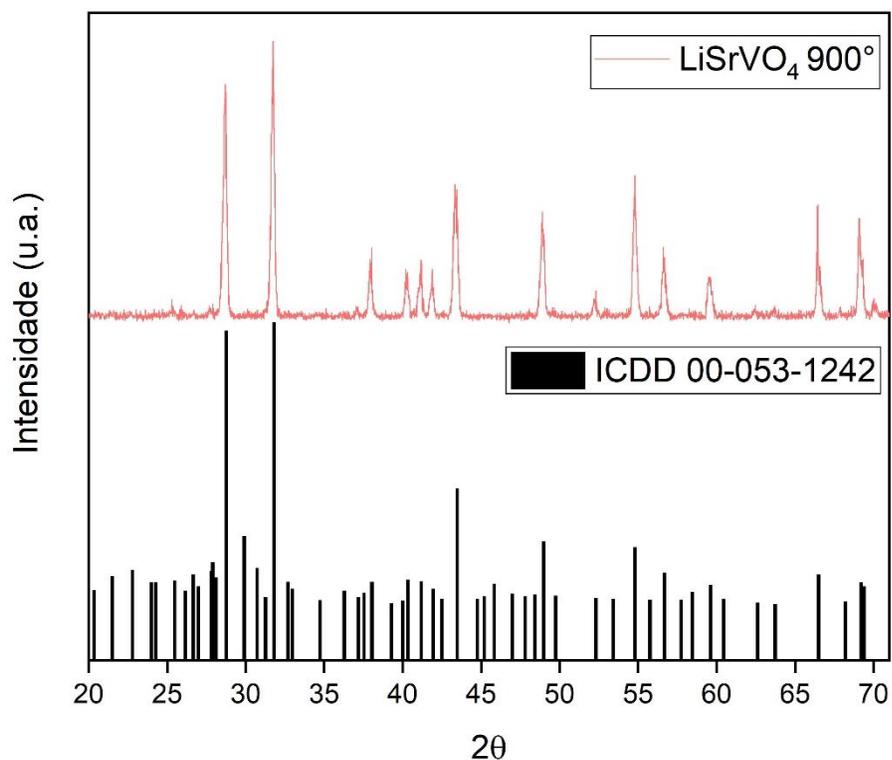


Figura 8 – Difratometria de raios X das amostras de LiSrVO_4 calcinadas a diferentes temperaturas.

As investigações foram expandidas das propriedades cristalinas do LiSrVO_4 sintetizado por rota sol-gel modificada a 900°C , explorando o efeito da dopagem e co-dopagem de íons específicos: Európio (Eu) e Térbio (Tb). Essa investigação é importante para entender como essas dopagens afetam os padrões de difração de raios X e, por conseguinte, a estrutura cristalina.

Dopagem refere-se à introdução controlada de íons estranhos na rede cristalina de um material para modificar suas propriedades. Neste estudo, foi explorado os efeitos de dopagem com íons de európio, térbio e a dopagem com európio e co-dopagem com térbio nas amostras de LiSrVO_4 .

Ao analisar os padrões de DRX das amostras dopadas, notamos variações nas intensidades e posições dos picos de difração em comparação com a amostra não dopada. Essas variações indicam que a dopagem e co-dopagem afetaram a ordem da estrutura cristalina do LiSrVO_4 .

As variações nas intensidades e posições dos picos de difração (figura 9) podem ser atribuídas às interações entre os íons dopantes e a estrutura cristalina. A substituição de íons Sr por íons dopantes pode levar a uma expansão ou contração da estrutura, resultando em mudanças nas distâncias interatômicas e, portanto, nos padrões de difração.

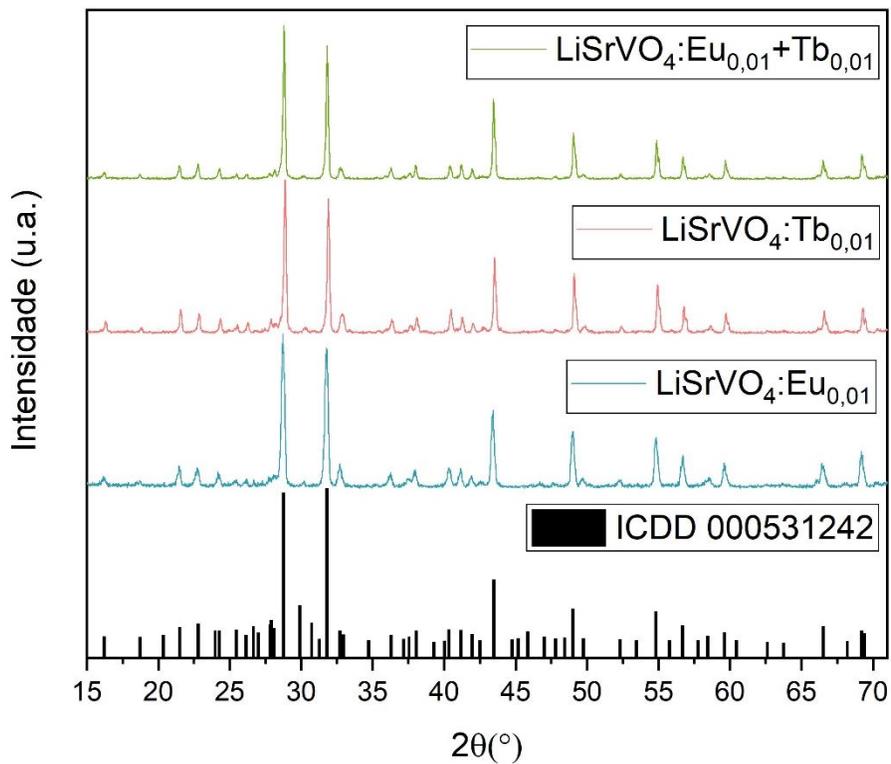


Figura 9 – Difratomia de raios X das amostras de LiSrVO_4 calcinadas a diferentes temperaturas.

Subsequentemente, ampliamos nosso estudo para examinar as amostras dopadas com íons de európio e co-dopadas com íons de térbio em várias concentrações específicas: 0,07, 0,05 e 0,03. Conforme mostra a figura 10. Isso serve para entender como diferentes concentrações desses íons afetam a estrutura cristalina do LiSrVO_4 .

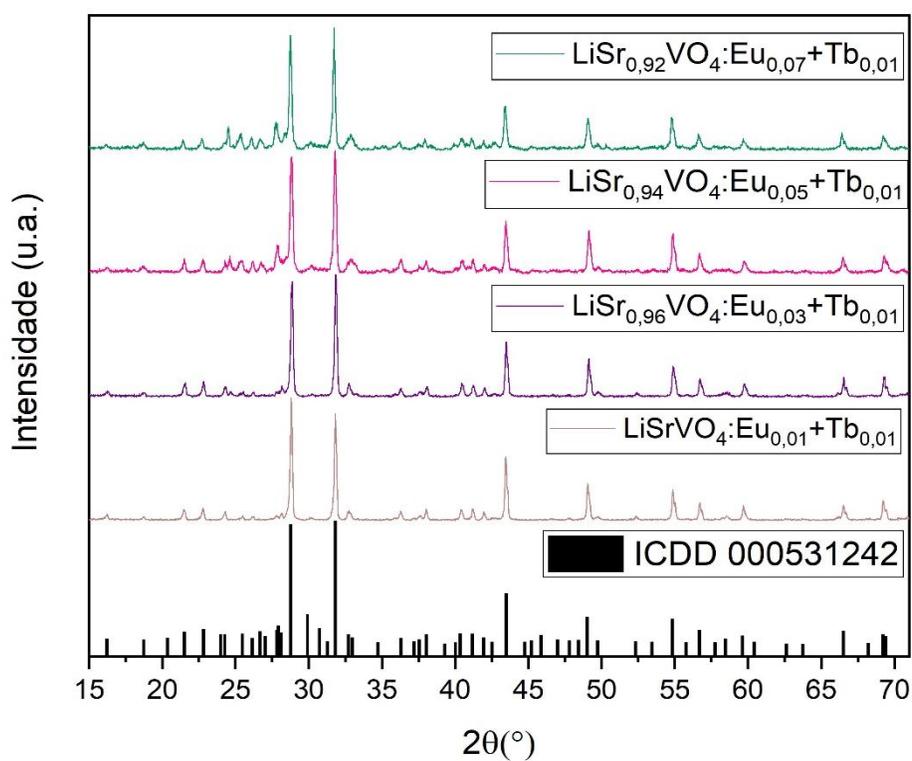


Figura 10 – Difratomia de raios X das amostras de LiSrVO_4 calcinadas a diferentes temperaturas.

Dopar e co-dopar com diferentes concentrações de íons de európio e térbio pode alterar propriedades do LiSrVO_4 de maneira significativa. Essa etapa da pesquisa explora a influência dessas variações. Ao analisar os padrões de DRX das amostras dopadas e co-dopadas com diferentes concentrações (figura 11), observa-se mudanças nas intensidades e posições dos picos de difração em relação as amostras anteriores. Essas mudanças podem ser resultados das diferentes quantidades de íons dopantes incorporados na estrutura cristalina.

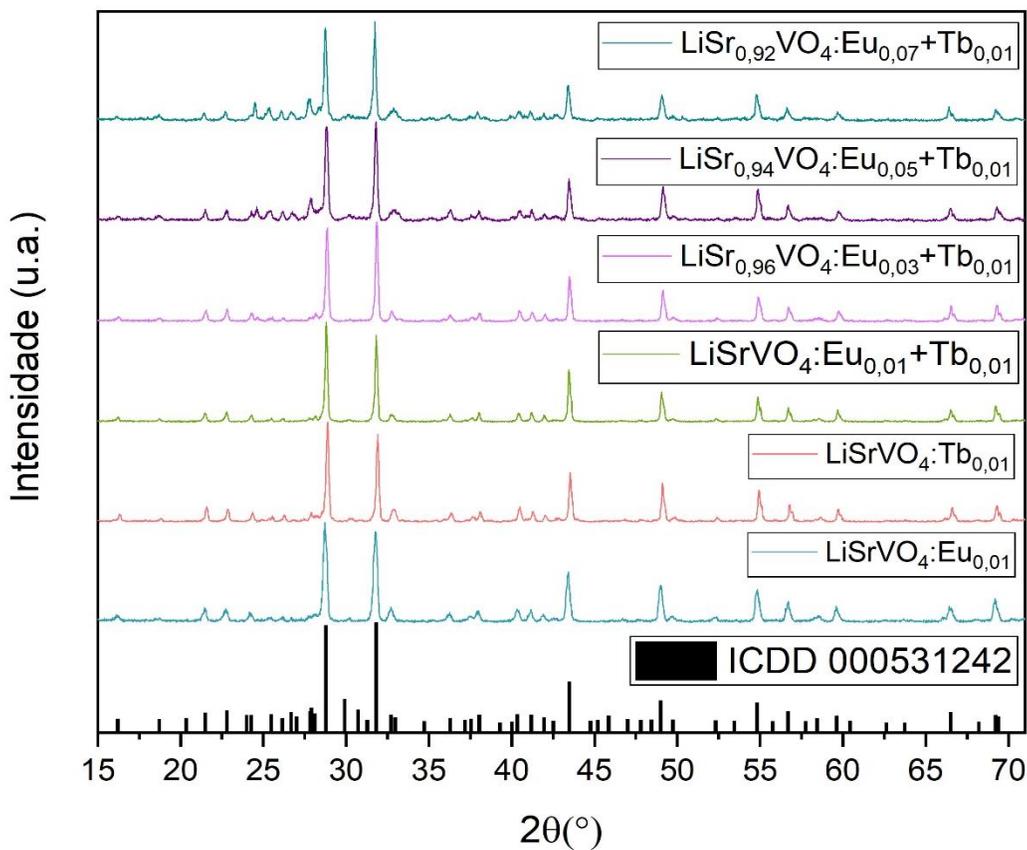


Figura 11 – Difratomia de raios X das amostras de LiSrVO_4 calcinadas a diferentes temperaturas.

A variação dos íons dopantes pode afetar propriedades como a luminescência e as propriedades magnéticas do material. Mudanças nas intensidades dos picos nos padrões de DRX podem estar correlacionadas com essas propriedades e fornecer informações sobre a quantidade de íons incorporados. Essas observações são relevantes para engenharia de materiais com propriedades específicas para aplicações em dispositivos optoeletrônicos, magnéticos e outros. A correlação entre as variações de concentração, estrutura

cristalina e propriedades funcionais é crucial para o desenvolvimento de materiais sob medida.

5. Conclusões

No decorrer desta pesquisa, mergulhamos em uma investigação abrangente das propriedades cristalinas do composto LiSrVO_4 , utilizando a rota sol-gel modificada. Isso levou a desvendar as complexidades da estrutura cristalina do material e a compreender como diferentes variáveis, como dopagem, concentração, temperatura e solvente, podem impactar suas propriedades.

Começamos com a caracterização inicial das amostras não dopadas, explorando como variações nas condições de síntese e temperaturas influenciam os padrões de DRX. Essa fase nos proporcionou insights essenciais sobre a obtenção da estrutura cristalina desejada e as condições ótimas para essa síntese.

Em seguida, adentramos no mundo das dopagens e co-dopagens. Ao examinar amostras dopadas com íons európio e térbio, identificamos mudanças nas intensidades e posições dos picos de DRX, indicando alterações na estrutura cristalina e suas correlações com as propriedades funcionais. A co-dopagem adicionou uma complexidade, demonstrando como a combinação de íons pode influenciar as características do material.

A exploração das variações de concentração dos íons dopantes e co-dopantes revelou que pequenas mudanças na composição podem desencadear reorganizações atômicas significativas, afetando as distâncias interatômicas e os ângulos de difração observados nos padrões de DRX. Essas variações têm implicações importantes para a obtenção de propriedades específicas, como luminescência e magnetismo.

As diferentes temperaturas de tratamento térmico também desempenharam um papel fundamental em nossa análise. A escolha da temperatura correta influencia a cristalinidade e a ordem da estrutura, refletindo-se nos padrões de DRX. A correlação entre temperatura e estrutura cristalina demonstra como a cinética de reação desempenha um papel crucial na obtenção de materiais com propriedades desejadas.

Em conjunto, essas investigações destacam a importância de uma abordagem multidisciplinar para compreender as propriedades cristalinas dos materiais. A análise detalhada dos padrões de DRX revelou informações valiosas sobre a reorganização atômica e suas implicações nas propriedades.

Esses achados têm implicações significativas para aplicações tecnológicas e científicas, onde o ajuste preciso das propriedades é crucial.

Em síntese, essa pesquisa não apenas desvendou os segredos da estrutura cristalina do LiSrVO_4 , mas também destacou o poder da pesquisa detalhada para moldar e orientar a criação de materiais funcionais com propriedades sob medida. A exploração das propriedades cristalinas é um trampolim para novas descobertas e avanços tecnológicos que impactarão positivamente a sociedade.

6. Perspectivas

O estudo realizado forneceu uma base sólida de compreensão das propriedades estruturais dos nanopós sintetizados por rota sol-gel modificada. No entanto, há várias áreas que podem ser exploradas em futuros trabalhos para aprofundar e expandir o conhecimento sobre esses materiais e suas aplicações. Algumas perspectivas incluem:

- Explorar diferentes composições químicas dos nanopós por meio de dopagem controlada ou variações nas proporções estequiométricas pode levar à sintonização das propriedades ópticas, permitindo a criação de materiais com emissões específicas para aplicações em diferentes dispositivos.
- Investigar as propriedades eletrônicas e magnéticas dos nanopós pode revelar informações sobre os níveis de energia dos elétrons e a presença de estados magnéticos, abrindo portas para aplicações em eletrônica e dispositivos de armazenamento magnético.
- Realizar estudos de estabilidade das propriedades ópticas e estruturais dos nanopós ao longo do tempo pode fornecer informações cruciais para a viabilidade de suas aplicações práticas em dispositivos de longa duração.
- Explorar novas técnicas de caracterização, como microscopia de varredura por sonda, espectroscopia de correlação de fótons ou análise de tempo de vida de fluorescência, pode proporcionar uma compreensão mais abrangente das propriedades dos nanopós.

Em resumo, as perspectivas envolvem a exploração mais aprofundada das propriedades e aplicações dos nanopós sintetizados por rota sol-gel modificada, bem como a busca por inovações tecnológicas que possam aproveitar ao máximo suas características únicas. Essas direções de pesquisa têm o potencial de

contribuir significativamente para avanços científicos e tecnológicos nas áreas de nanomateriais e dispositivos ópticos.

7. Referências bibliográficas

- [1] C. Qin, Y. Huang, H.J. Seo, J. Am. Ceram. Soc. 96 (2013) 1181–1187
- [2] X. Zhou, L. Chen, S. Jiang, G. Xiang, L. Li, X. Tang, X. Luo, Y. Pang, Dye. Pigment. 151 (2018) 219–226.
- [3] P. Biswas, V. Kumar, Kamni, Mater. Today Proc. 28 (2020) 1018–1023.
- [4] P. Biswas, V. Kumar, V. Sharma, A.K. Bedyal, N. Padha, H.C. Swart, Phys. B Condens. Matter 535 (2018) 221–226.
- [5] N.S. Sawala, S.K. Omanwar, J. Alloys Compd. 686 (2016) 287–291
- [6] K. Li, M. Shang, H. Lian, J. Lin, Recent development in phosphors with different emitting colors via energy transfer, J. Mater. Chem. C 4 (2016) 5507–5530.
- [7] Y. Liu, D. Tu, H. Zhu, E. Ma, X. Chen, Lanthanide-doped luminescent nanobioprobes: from fundamentals to biodetection, Nanoscale 5 (2013) 1369–1384.
- [8] T. Wang, P. Li, H. Li, Color-tunable luminescence of organoclay-Based Hybrid materials showing potential applications in white LED and thermosensors, ACS Appl. Mat. Interfaces 6 (2014) 12915–12921
- [9] F. W. Kang, Y. Zhang, M. Y. Peng, Controlling the energy transfer via multi luminescent centers to achieve white light/tunable emissions in a single-phased X2-type Y₂SiO₅:Eu³⁺, Bi³⁺ phosphor for ultraviolet converted LEDs. Inorg. Chem. 54 (2015) 1462–1473.
- [10] M. Ding, H. Zhang, D. Chen, Q. H. J. Xi, Z. Ji, Color-tunable luminescence, energy transfer and temperature sensing behavior of hexagonal NaYF₄:Ce³⁺/Tb³⁺/Eu³⁺ microcrystals, J. Alloys Compd. 672 (2016) 117–124.
- [11] W. Xie, G. Liu, X. Dong, J. Wang, W. Yu, Doping Eu³⁺/Sm³⁺ into CaWO₄:Tm³⁺, Dy³⁺ phosphors and their luminescence properties, tunable color and energy transfer, RSC Adv. 6 (2016) 26239–26246.
- [12] P. Dai, X. Zhang, L. Bian, S. Lu, Y. Liu, X. Wang, Color tuning of (K_{1-x}, Na_x)SrPO₄:0.005Eu²⁺, yTb³⁺ blue-emitting phosphors via crystal field modulation and energy transfer, J. Mater. Chem. C 1 (2013) 4570–4576.
- [13] X. Zhang, Q. Lian, J. Zhang, P. Cai, S. Il Kim, H. J. Seo, Tunable emission properties of Ca₃B₂O₆:Ce³⁺ polycrystalline ceramics under ultraviolet light excitation, Ceram. Int. 41 (2015) 3469–3473
- [14] F. Kang, H. Zhang, L. Wondraczek, X. Yang, Y. Zhang, Band-Gap modulation in single Bi³⁺-doped Y-Sc-Nb-Vanadates for color tuning over the whole visible spectrum, Chem. Mater. 28 (2016) 2692–2703.
- [15] J. Wang, C. Wang, Y. Feng, H. Liu, Luminescence and energy transfer of a color tunable phosphor: Ba₂CaLa_{1-x}M_x(PO₄)₃, (M = Dy, Tm, Eu) for warm white UV LEDs, Ceram. Int. 41 (2015) 11592–11597.

- [16] T. Nakajima, M. Isobe, T. Tsuchiya, Y. Ueda and T. Kumagai, Direct fabrication of metavanadate phosphor films on organic substrates for white-light-emitting devices, *Nat. Mater.* 7 (2008) 735-740.
- [17] H. Wang, L. Wang, One-pot syntheses and cell imaging applications of poly(amino acid) coated $\text{LaVO}_4:\text{Eu}^{3+}$ luminescent nanocrystals, *Inorg. Chem.* 52 (2016) 2439-2445.
- [18] V. Tamara Gavrilović, J. Dragana Jovanović, Krisjanis Smits, Multicolor upconversion luminescence of $\text{GdVO}_4 : \text{Ln}^{3+} / \text{Yb}^{3+}$, ($\text{Ln}^{3+} = \text{Ho}^{3+}, \text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}, \text{Ho}^{3+} / \text{Er}^{3+} / \text{Tm}^{3+}$) nanorods, *Dyes Pigm.* 126 (2016) 1-7.
- [19] F. Wang, X. Xue, X. Liu, Multicolor tuning of (Ln, P)-doped YVO_4 nanoparticles by single-wavelength excitation, *Angew. Chem. Int. Ed.* 47 (2008) 906-909.
- [20] C. Qin, Y. Huang, H. J. Seo, Structure and luminescence of new red-emitting materials- Eu^{3+} -doped triple orthovanadates $\text{NaAl}(\text{VO}_4)_2$, ($A = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$), *J. Am. Ceram. Soc.* 96 (2013) 1181-1187.
- [IGUAL A REF 2] M. Colmont, S. Saitzek, A. Katelnikovas, H. Kabbour, J. Olchowka, Host-sensitized luminescence properties in $\text{KLa}_5\text{O}_5(\text{VO}_4)_2:\text{Eu}^{3+}$ for solid-state lighting applications, *J. Mater. Chem. C* 4 (2016) 7277-7285.
- [21] Y. Yang, L. Chen, F. Jiang, M. Yu, X. Wan. A family of doped lanthanide metal-organic frameworks for wide-range temperature sensing and tunable white light emission, *J. Mater. Chem. C* 5 (2017) 1981-1989.
- [22] M. D. Dramićanin, Sensing temperature via downshifting emissions of lanthanide-doped metal oxides and salts. A review, *Methods Appl. Fluoresc.* 4 (2016) 042001.
- [23] D. Zhao, D. Yue, K. Jiang, Y. Cui, Q. Zhang, Ratiometric dual-emitting MOF-dye thermometers with a tunable operating range and sensitivity, *J. Mater. Chem. C* 5 (2017) 1607-1613
- [24] J. H. Wang, M. Li, J. Zheng, X. C. Huang, D. Li, A dual-emitting $\text{Cu}_6\text{-Cu}_2\text{-Cu}_6$ cluster as a self-calibrated, wide-range luminescent molecular thermometer, *Chem. Commun.* 50 (2014) 9115-9118.
- [25] X. Chai, J. Li, Y. Zhang, X. Wang, Y. Li, Bright dual-mode green emission and temperature sensing properties in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped MgWO_4 phosphor. *RSC Adv.* 6 (2016) 64072-64078
- [26] J. S. Liao, L. Nie, Q. Wang, S. J. Liu, H. R. Wen, $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ phosphors: Hydrothermal synthesis, optical spectroscopy and green upconverted temperature sensing behavior, *Rsc Adv.* 6 (2016) 35152-35159.
- [27] Y. Cui, H. Xu, Y. Yue, Z. Guo, J. Yu, Z. Chen, J. Gao, Y. Yang, G. Qian, B. Chen, A luminescent mixed-lanthanide metal-organic framework thermometer, *J. Am. Chem. Soc.* 134 (2012) 3979-3982.
- [28] M.M. Blouke, M.W. Cowens. J.E. Hall, J.A. Westphal, A.B. Christensen, *Appl. Opt.* 19 (19) (1980) 3318-3321.
- [29] D. Ren, Z. Zhao, J. Xi, B. Li, Z. Li, H. Zhao, L. Cui, H. Xu, *Sensors* 18 (2018) 2442.

- [30] T. Okino, S. Yamahira, S. Yamada, Y. Hirose, A. Odagawa, Y. Kato, T. Tanaka, *Sensors* 18 (2018) 314.
- [31] S.J. Alexander, Phosphor Coated UV Responsive CCD Image Sensors, University of Waterloo, Ontario, 2002, MSc Thesis.
- [32] WAR. Franks, M.J. Kiik, A. Nathan, *IEEE Trans, Electr. Dev.* 50 (2) (2003) 352-358.
- [33] K.H. Butler, *Fluorescent Lamp Phosphors: Technology and Theory*, Springer-Verlag, New York, 1994.
- [34] P. Biswas, V. Kumar, O.M. Ntwaeaborwa, H.C. Swart, *Mater. Res. Express* 2 (2)(2015) 025010
- [35] P. Biswas, V. Kumar, N. Padha, H.C. Swart, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 28 (2017) 6159-6169.
- [36] B.V. Slobodin, L. Surat. R.F. Samigullina, A.V. Ishchenko, A.N. Cherepanov, B.V. Shulgin, *Inorg. Mater.* 45 (2009) 428-431.
- [37] NASSAR, Eduardo J. et al. Fenilsilicato dopado com Eu III obtido pelo método sol-gel. **Química Nova**, v. 30, p. 1567-1572, 2007.
- [38] BRAGA, Aluska do Nascimento Simões et al. Influência de diferentes solventes na síntese de mulita por sol-gel. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 2021.
- [39] Maciel, A. P., et al. "Método sol-gel modificado para obtenção de alumina nanoencapsulada com terras raras." *Cerâmica* 51 (2005): 52-57.
- [40] REZENDE, Simone M. de et al. Aplicação de resinas sulfônicas como catalisadores em reações de transesterificação de óleos vegetais. **Polímeros**, v. 15, p. 186-192, 2005.
- [41] Cruz, Luana Barbosa da. *Obtenção de fitas cerâmicas a base de NiO/CDG via colagem de fitas*. MS thesis. Brasil, 2017.
- [42] OBA, Renato et al. *Simulação e análise térmica de forno túnel aplicado à indústria cerâmica*. 2015.
- [43] Silva, Marcio Rogério da. *Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de Eucalypto citriodora e Pinus taeda*. Diss. Universidade de São Paulo, 2012.
- [44] MONTANI, Samara da Silva et al. *Estudo da reação de redução do NO pelo CO em catalisadores modelo de cobre e paládio suportados alumina e ceria-zircônia*. 2014.
- [45] DE MELO, Clovis Januario. *Determinação das propriedades vibracionais da liga nanoestruturada CuSb por Espectroscopia Raman*. 2013.
- [46] BATISTA, Adriano Corrêa et al. *Caracterização da matéria-prima com tamanho de partículas nanométricas utilizadas no processamento do compósito WC-10% Co*. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, p. e-12813, 2020.
- [47] SILVA, Jessica Oliveira da. *Identificação de fases cristalográficas em nanopartículas funcionalizadas*. 2023.