

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

Estudo Colorimétrico em Materiais Compósitos de Partículas
Cerâmicas Fotoluminescentes Dispersas em Meios
Transparentes

Ricardo de Melo Caneloi dos Santos

Prof. Dr. Giovani Fornereto Gozzi

Rio Claro (SP)

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

RICARDO DE MELO CANELOI DOS SANTOS

ESTUDO COLORIMÉTRICO EM MATERIAIS
COMPÓSITOS DE PARTÍCULAS CERÂMICAS
FOTOLUMINESCENTES DISPERSAS EM MEIOS
TRANSPARENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Bacharel em Física.

Rio Claro - SP

2025

S237e

Santos, Ricardo de Melo Caneloi dos

Estudo colorimétrico em materiais compósitos de partículas cerâmicas
fotoluminescentes dispersas em meios transparentes / Ricardo de Melo Caneloi
dos Santos. -- Rio Claro, 2025

45 f. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Física) - Universidade
Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio
Claro

Orientador: Giovani Fornereto Gozzi

1. Colorimetria. 2. Cerâmicas luminescentes. 3. LECCEL. 4. coordenadas CIE.
5. Fotoluminescência. I. Título.

RICARDO DE MELO CANELOI DOS SANTOS

ESTUDO COLORIMÉTRICO EM MATERIAIS
COMPÓSITOS DE PARTÍCULAS CERÂMICAS
FOTOLUMINESCENTES DISPERSAS EM MEIOS
TRANSPARENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Bacharel em Física.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Giovani Gozzi (orientador)
Prof. Dr. André Livorati
Prof. Dr. Makoto Yoshida

Rio Claro, 14 de Novembro de 2025

Assinatura do aluno

Assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela vida, pela saúde e pela força concedida em cada etapa desta caminhada, sem Ele, nada disso seria possível.

À minha família, pelo apoio incansável, pelo incentivo diário e pela paciência e compreensão diante das minhas ausências e desafios enfrentados durante esta jornada.

Aos amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos de maior dificuldade e também nas conquistas, trazendo risadas, leveza e motivação ao longo do percurso.

Aos colegas, pela parceria, pelas trocas de conhecimento e pelo espírito colaborativo que contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu orientador, pela oportunidade, pela confiança depositada e pelas orientações valiosas que foram fundamentais para o amadurecimento deste trabalho.

À empresa TICON, pelo suporte, pela disponibilidade dos materiais e pela confiança depositada, contribuindo de maneira essencial para a execução deste trabalho.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho, deixo minha sincera gratidão.

RESUMO

Dispositivos eletroluminescentes produzidos com compósitos utilizam micropartículas de cerâmicas luminescentes dispersas em meios condutores para converter energia elétrica em luz, com a vantagem de permitirem fabricação por impressão gráfica. No entanto, a baixa durabilidade desses dispositivos limita sua aplicação. Este trabalho propõe a dispersão dessas cerâmicas em meios transparentes à radiação ultravioleta, aproveitando sua propriedade fotoluminescente para converter luz UV em luz visível. Foram produzidas diversas amostras com diferentes cerâmicas e resinas, e essas foram analisadas colorimetricamente por meio das coordenadas CIE, buscando avaliar a emissão luminosa resultante da excitação ultravioleta. A proposta visa combinar a flexibilidade de processamento dos dispositivos impressos com a estabilidade de fontes UV, abrindo caminho para novas aplicações em sistemas ópticos híbridos.

Palavras-chave: cerâmicas luminescentes, LECEL, fotoluminescência, radiação ultravioleta, coordenadas CIE.

ABSTRACT

Composite based electroluminescent devices comprises microparticles of luminescent ceramics dispersed in conductive matrix to convert electrical energy to light, with the advantage of enabling fabrication through graphic printing techniques. However, the low durability of these devices limits their application. This study proposes the dispersion of photoluminescent ceramics in UV transparent matrix to convert UV light to visible light. Several samples have been produced using different photoluminescent ceramics and resins. The samples light emission spectra have been obtained and analyzed using CIE coordinates to evaluate the visible emission resulting from UV excitation. The approach aims to combine the processing flexibility of printing devices with the stability of UV light sources, paving the way for new applications in hybrid optical systems.

Keywords: luminescent ceramics, LECEL, photoluminescence, ultraviolet radiation, CIE coordinates.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVOS	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 FUNDAMENTOS DA COLORIMETRIA.....	11
3.2 CERÂMICAS LUMINESCENTES E LUMINESCÊNCIA.....	12
3.3 MEDIDAS COLORIMÉTRICA DE EMISSÃO	14
3.4 INFLUÊNCIA DA MATRIZ E O MEIO DISPERSIVO.....	16
3.5 APLICAÇÃO E ESTRATÉGIAS PARA EMISSÃO BRANCA.....	17
3.6 ESPECTROFLUORÍMETRO NA CARACTERIZAÇÃO DE EMISSÃO	18
3.7 INTERAÇÃO ENTRE ÍONS DOPANTES E REDE CRISTALINA.....	19
3.8 MISTURA DE EMISSÕES E ENGENHARIA DE COR	19
3.9 EFEITO DA RESINA E MEIOS DE ENCAPSULAMENTO	21
3.10 ESTABILIDADE ÓPTICA E FOTOENVELHECIMENTO	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
4.1 MATERIAIS.....	23
4.2 MÉTODOS.....	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
6 CONCLUSÕES	38
7 REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A luz sempre desempenhou um papel central na compreensão dos fenômenos naturais [1], constituindo-se não apenas como elemento essencial para a vida e para a percepção visual, mas também como um objeto de estudo fundamental na física. O avanço das teorias eletromagnética e quântica possibilitou a compreensão das propriedades da luz, que se manifesta ora como onda, ora como partícula, atribuindo à luz, um caráter intrinsecamente complexo e multifacetado. [2] Esse entendimento consolidou a luz como uma ferramenta indispensável para aplicações científicas e tecnológicas em diversas áreas.

Dentre os aspectos de maior relevância prática, destaca-se a luz branca, percebida como tal em razão da combinação equilibrada de múltiplos comprimentos de onda que compõem o espectro visível. [3] Embora sua principal fonte natural seja o Sol, a luz branca pode ser gerada artificialmente por meio de diferentes dispositivos emissores, como lâmpadas incandescentes, fluorescentes e diodos emissores de luz (LEDs), cada qual apresentando características espectrais, eficiências e propriedades operacionais distintas.

Os LEDs (Light Emitting Diodes) são dispositivos semicondutores capazes de emitir radiação eletromagnética quando submetidos à polarização direta, por meio do fenômeno da eletroluminescência. [4] Tal emissão resulta da recombinação radiativa de portadores de carga (elétrons e lacunas) no interior da junção semicondutora, com consequente liberação de energia na forma de fótons. A energia, e portanto o comprimento de onda da luz emitida, é determinada pelas propriedades do material semicondutor empregado. Graças ao avanço na área de engenharia de banda proibida, que é o processo de ajustar e controlar a largura da banda proibida de um material para modificar suas propriedades ópticas e eletrônicas, os LEDs podem cobrir uma ampla faixa do espectro, desde o infravermelho até o ultravioleta. As vantagens associadas a essa tecnologia incluem elevada eficiência energética, longa durabilidade, dimensões reduzidas, resistência a choques mecânicos e flexibilidade de aplicação, fatores que justificam sua ampla utilidade em setores como iluminação, sinalização, eletrônica e biomedicina. [29]

Nos últimos anos, a busca por materiais emissores de luz branca com elevada eficiência e estabilidade tem sido objeto de diversas pesquisas, impulsionadas pela demanda crescente por dispositivos avançados de iluminação e

exibição. [30] Entre as abordagens mais promissoras, destaca-se a incorporação de materiais fotoluminescentes (substâncias que absorvem radiação em um determinado comprimento de onda e a reemitem em outro) em matrizes transparentes, como resinas poliméricas. Em particular, as cerâmicas fotoluminescentes, compostas por materiais cristalinos dopados com íons ativadores, destacam-se por sua elevada estabilidade térmica e química, bem como pela sua eficiência quântica, qualificando-se como candidatos ideais para aplicações optoeletrônicas e fotônicas. [5]

A dispersão de micropartículas cerâmicas luminescentes em matrizes ópticas transparentes permite a obtenção de compósitos que podem ser excitados por radiação ultravioleta (UV), promovendo a emissão de luz no espectro visível. A luz ultravioleta corresponde à radiação eletromagnética com comprimentos de onda situados entre aproximadamente 100 e 400 nanômetros, subdividida convencionalmente nas faixas UVA (320 - 400 nm), UVB (280 - 320 nm) e UVC (100 - 280 nm), cada uma com características específicas de interação com a matéria. [6] A produção de radiação UV pode ser realizada por diversas fontes, destacando-se os LEDs emissores de ultravioleta, que, além de apresentarem elevada eficiência e seletividade espectral, eliminam a necessidade do uso de mercúrio, elemento tóxico e perigoso presente em muitas lâmpadas UV tradicionais.

O controle das propriedades fotoluminescentes dos compósitos pode ser ajustado em função da natureza, concentração e distribuição das partículas cerâmicas incorporadas, permitindo a modulação precisa do espectro de emissão. A caracterização dessas emissões é realizada por meio de análise colorimétrica utilizando as coordenadas definidas pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE). As coordenadas CIE são parâmetros numéricos que descrevem objetivamente a cor percebida, independentemente da intensidade luminosa. O sistema de representação mais utilizado é o CIE 1931, que expressa a cor por meio de duas coordenadas de cromaticidade, x e y , localizadas no espaço bidimensional de cromaticidade. [7] A coordenada x indica a fração relativa do componente espectral associado ao vermelho, enquanto a coordenada y representa a fração correspondente ao verde; a componente azul é inferida, uma vez que a soma das três componentes deve ser unitária ($x + y + z = 1$). Embora tais coordenadas descrevam adequadamente a tonalidade e a saturação da cor, a luminância, relacionada à intensidade percebida, é expressa separadamente pelo parâmetro Y .

Complementarmente, a análise da temperatura de cor correlacionada (TCC) fornece uma métrica descritiva da aparência cromática da luz emitida, permitindo categorizar a emissão em faixas qualitativas como “branco quente” ou “branco frio”, aspectos cruciais para aplicações em iluminação arquitetural, automotiva e biomédica. [8]

2 OBJETIVOS

Diante desse contexto, o presente trabalho propõe a realização de um estudo colorimétrico sistemático de materiais compósitos constituídos por partículas cerâmicas fotoluminescentes dispersas em meios transparentes. O objetivo principal é analisar o espectro de emissão dessas estruturas sob excitação por radiação ultravioleta, empregando técnicas espectroscópicas e colorimétricas para determinar a composição espectral da luz emitida e sua classificação utilizando coordenadas CIE. Os resultados obtidos poderão contribuir para o desenvolvimento de novos materiais emissores de luz branca com potencial aplicação em sistemas de iluminação de alta eficiência e dispositivos optoeletrônicos personalizados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fundamentos da Colorimetria

A colorimetria é a ciência que descreve quantitativamente a percepção da cor, buscando traduzir em valores mensuráveis um fenômeno que, à primeira vista, é subjetivo e dependente da visão humana. Ela estabelece sistemas padronizados que permitem comparar, reproduzir e comunicar cores de maneira universal, independentemente de variações individuais na percepção. Para isso, baseia-se em modelos que relacionam o estímulo físico da radiação luminosa, caracterizado por sua distribuição espectral, com a resposta fisiológica do olho humano.

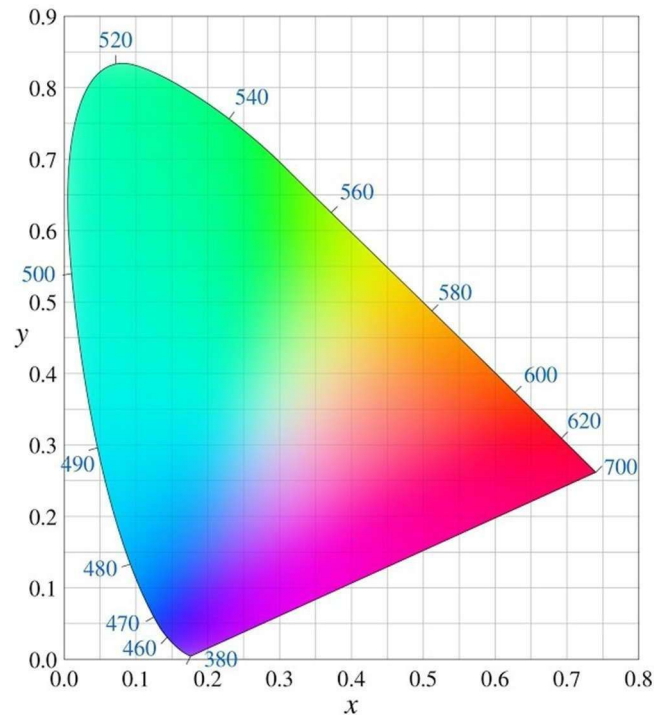
A percepção da cor está diretamente ligada ao funcionamento dos cones da retina, que são sensíveis a diferentes regiões do espectro visível. Assim, a cor percebida não depende apenas do comprimento de onda dominante da fonte luminosa ou do material emissor, mas também da intensidade relativa com que diferentes comprimentos de onda chegam ao olho. [9] Nesse contexto, a intensidade espectral $I(\lambda)$ de uma fonte ou material emissor desempenha papel fundamental, pois é a partir dessa distribuição que o sistema visual interpreta o estímulo cromático.

Para padronizar essa relação entre estímulo físico e percepção, a Comissão Internacional de Iluminação (CIE) desenvolveu, em 1931, o sistema CIE XYZ, que introduziu as chamadas funções de sensibilidade espectral médias do observador padrão. A partir delas, é possível calcular coordenadas tricômicas (X, Y, Z) que representam de forma numérica qualquer cor visível. Para simplificação e melhor visualização gráfica, essas coordenadas são normalizadas, originando o espaço bidimensional de cromaticidade CIE 1931 (x, y), no qual a soma das componentes é constante.

O diagrama resultante, apresentado na Figura 1, mostra a distribuição de todas as cores visíveis ao olho humano. Seu contorno, conhecido como curva espectral, corresponde às cores puras de comprimentos de onda específicos, enquanto o interior da figura representa as misturas resultantes de diferentes proporções de radiação. A região central, mais próxima do branco, corresponde a cores de baixa saturação, enquanto as bordas apresentam cores mais saturadas. Esse diagrama é amplamente utilizado em ciência dos materiais, óptica, engenharia de iluminação e indústrias gráficas, pois permite comparar cores de diferentes

fontes, analisar pureza cromática e determinar coordenadas de emissão de materiais luminescentes. [10]

Figura 1 – Diagrama de cromaticidade CIE 1931 (espaço de cores x, y), representando a percepção das cores visíveis pelo olho humano em função do comprimento de onda.



Fonte: Imagem obtida na Internet. (commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE1931xy, 2025)

A luz percebida pelo olho humano depende da distribuição espectral da fonte luminosa. Essa distribuição pode ser convertida em coordenadas cromáticas (x, y) usando as seguintes relações:

$$x = \frac{X}{X+F+Z}, y = \frac{Y}{X+F+Z}. \quad (1)$$

Com:

$$X = \int I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, Y = \int I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, Z = \int I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

onde $I(\lambda)$ representa a intensidade espectral da fonte ou do material emissor e λ o comprimento de onda.

3.2 Cerâmicas Luminescentes e Fotoluminescência

As cerâmicas luminescentes constituem uma classe de materiais sólidos policristalinos capazes de absorver energia eletromagnética e reemitir parte dessa energia na forma de radiação luminosa. Tais materiais apresentam elevada

estabilidade térmica, resistência mecânica e durabilidade, características que os tornam promissores para diversas aplicações tecnológicas, como dispositivos optoeletrônicos, iluminação de estado sólido (LEDs), lasers, sensores e marcadores de segurança.

O fenômeno de luminescência em cerâmicas está diretamente associado à presença de dopantes ativos, geralmente íons de terras-raras, que são um grupo de 17 elementos químicos conhecidos por suas propriedades eletrônicas únicas, muito usados em lasers, ímãs superfortes, fósforos luminescentes, LEDs, baterias e dispositivos de alta tecnologia, ou metais de transição (como Mn^{2+} e Cr^{3+}), incorporados em uma matriz hospedeira. [11] Essa matriz, normalmente composta por óxidos, aluminatos ou silicatos, fornece o ambiente cristalográfico para os dopantes, influenciando as propriedades espectrais e a eficiência do processo de emissão. A escolha adequada da matriz é fundamental, pois afeta a intensidade de emissão, a transparência óptica e a supressão de processos de perda não-radiativa.

Dentre os mecanismos responsáveis pela emissão luminosa, a fotoluminescência é o mais relevante para o estudo de cerâmicas luminescentes. Nesse processo, o material absorve fótons de maior energia, geralmente na região do ultravioleta ou azul, promovendo elétrons para estados excitados. Em seguida, ocorrem relaxações internas não-radiativas, nas quais parte da energia é dissipada por interações com a rede cristalina (fônons). Finalmente, os elétrons retornam a estados fundamentais ou metastáveis, emitindo fótons de menor energia, tipicamente na região do visível. [12] Esse fenômeno está associado ao chamado deslocamento de Stokes, no qual o comprimento de onda da emissão (λ_{em}) é maior que o da excitação (λ_{exc}).

A descrição desses processos exige compreender a relação fundamental da radiação eletromagnética. Experimentalmente, Planck demonstrou que a energia de um fóton é quantizada e proporcional à sua frequência, de modo que

$$E = h\nu, \quad (3)$$

onde h é a constante de Planck e ν a frequência da radiação. Sabendo que a frequência está relacionada à velocidade de propagação da luz (c) e ao comprimento de onda (λ) pela relação

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (4)$$

temos a expressão combinada

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (5)$$

Essa dedução evidencia que quanto menor o comprimento de onda, maior a energia transportada pelo fóton. Assim, durante a excitação, o fóton absorvido possui energia $E_{\text{exc}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{exc}}}$, enquanto na emissão o fóton liberado possui energia $E_{\text{em}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{em}}}$, sendo $E_{\text{em}} < E_{\text{exc}}$ em virtude da dissipação não-radiativa.

A eficiência do processo fotoluminescente é frequentemente avaliada pelo rendimento quântico (5), definido como a razão entre o número de fótons emitidos e o número de fótons absorvidos. Esse parâmetro depende de diversos fatores, tais como a natureza do dopante, a simetria do sítio cristalino ocupado, a concentração de íons ativos e a interação com a matriz hospedeira. Concentrações muito baixas resultam em baixa intensidade de emissão, enquanto concentrações excessivas podem causar o fenômeno de autoextinção, no qual ocorre transferência de energia não-radiativa entre íons próximos, reduzindo o rendimento global.

Dessa forma, o estudo das cerâmicas luminescentes e de sua fotoluminescência envolve tanto a otimização da matriz hospedeira quanto a seleção apropriada e a concentração adequada dos dopantes. [13] Essa engenharia de materiais permite ajustar o espectro de emissão de acordo com as necessidades específicas de cada aplicação, como fósforos para LEDs de luz branca, emissores em dispositivos de segurança ou materiais para sensores ópticos.

3.3 Medidas Colorimétricas de Emissão

A caracterização colorimétrica das cerâmicas luminescentes é um passo essencial para compreender e otimizar suas propriedades ópticas em aplicações práticas. Esse processo é realizado a partir do espectro de emissão $I(\lambda)$, obtido por técnicas como espectrofotometria ou espectrofluorimetria, no qual se registra a intensidade emitida em função do comprimento de onda. A partir desses dados experimentais, podem-se calcular parâmetros colorimétricos padronizados, que permitem posicionar e classificar a emissão do material no espaço cromático da CIE (Commission Internationale de l'Éclairage).

Essas coordenadas permitem verificar não apenas a tonalidade da emissão, mas também sua saturação e proximidade em relação a regiões de interesse, como as cores primárias, secundárias ou o ponto de branco. Dessa forma, tornam-se

fundamentais para avaliar a adequação da cor emitida em aplicações específicas, como fósforos para LEDs brancos.

Outro parâmetro de grande relevância é a temperatura de cor correlacionada (TCC), que indica a tonalidade da luz emitida em comparação com um corpo negro aquecido a determinada temperatura. O cálculo é realizado por interpolação da posição da amostra em relação à curva de Planck (locus de corpo negro) no diagrama de cromaticidade. Valores de TCC mais baixos (próximos de 3000 K) correspondem a tonalidades quentes, como amareladas e avermelhadas, enquanto valores mais altos (superiores a 6000 K) indicam tonalidades frias, azuladas. [14] Esse parâmetro é amplamente utilizado na indústria de iluminação, pois permite classificar o tipo de luz produzida pelo material luminescente.

O Índice de Reprodução de Cor (CRI) é outro indicador crucial, pois quantifica a capacidade da fonte de luz em reproduzir fielmente as cores de objetos iluminados em comparação a uma fonte de referência. O CRI varia de 0 a 100, sendo que valores acima de 80 já indicam boa reprodução de cores, enquanto valores superiores a 90 são desejáveis em aplicações que exigem alta qualidade de iluminação, como em ambientes médicos, artísticos e fotográficos. [15] Em materiais luminescentes, o CRI está diretamente relacionado à largura espectral da emissão e à uniformidade da cobertura das regiões do visível.

Como exemplo, pode-se citar a emissão de uma cerâmica dopada com íons Ce^{3+} , excitada em 365 nm. Nesse caso, o espectro de emissão pode gerar coordenadas CIE $(x, y) = (0,30; 0,32)$, posicionadas próximas ao ponto de branco neutro no diagrama cromático. Essa proximidade indica que o material apresenta potencial para aplicação em dispositivos emissores de luz branca, sendo adequado para iluminação em estado sólido. Além disso, a análise conjunta das coordenadas cromáticas, da TCC e do CRI fornece uma visão abrangente da qualidade da emissão, permitindo avaliar a eficiência e a adequação do material para aplicações tecnológicas específicas.

Logo, as medidas colorimétricas de emissão constituem uma etapa indispensável na caracterização de cerâmicas luminescentes. Elas não apenas permitem posicionar a cor emitida no espaço cromático, mas também fornecem informações sobre a tonalidade, a fidelidade na reprodução de cores e a eficiência global do material como fonte luminosa. Tais parâmetros são fundamentais para orientar o desenvolvimento de novos fósforos e compósitos luminescentes com

aplicações em LEDs brancos, sensores ópticos, dispositivos de segurança, entre muitas outras aplicações.

3.4 Influência da Matriz e do Meio Dispersivo

A resposta óptica de materiais luminescentes não depende exclusivamente da natureza do dopante ativo, mas também está fortemente associada às características da matriz cerâmica e ao meio em que o material está disperso. A matriz hospedeira determina o ambiente cristalográfico dos íons dopantes; alterações na simetria local do sítio de coordenação, presença de vacâncias, tensões de rede e impurezas estruturais podem modificar os níveis de energia eletrônicos, alterando o espectro de emissão, a largura espectral e a eficiência fotoluminescente. Além disso, o meio dispersivo, por exemplo, resinas poliméricas, solventes líquidos ou substratos vítreos, influencia a propagação e a atenuação da radiação tanto na faixa de excitação quanto na de emissão, afetando a intensidade detectada e o acoplamento óptico com o ambiente externo.

A atenuação da radiação ao atravessar um meio homogêneo pode ser descrita pela Lei de Beer–Lambert, cuja dedução baseia-se em um modelo simples de interação entre a luz e o material. [16] Considerando um feixe monocromático de intensidade $I(x)$ propagando-se na direção x através de um meio homogêneo, admite-se que a perda de intensidade ao longo de um pequeno trecho dx é proporcional à intensidade presente nesse trecho e à concentração de espécies absorventes no meio. Essa hipótese leva à equação diferencial:

$$dI(x) = -knI(x)dx, \quad (6)$$

onde k é uma constante de proporcionalidade intrínseca ao material e n é a concentração das espécies absorventes. A integração entre $x = 0$ e $x = d$, correspondente à espessura da amostra, resulta em:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -knd, \quad (7)$$

e, portanto,

$$I = I_0e^{-knd}. \quad (8)$$

Definindo $\alpha = kn$, obtém-se a forma usual:

$$I = I_0e^{-\alpha d}. \quad (9)$$

Em química de espectrofotometria utiliza-se frequentemente a versão em logaritmo decimal, definindo a absorbância $A = -\log_{10}(I/I_0)$, que conduz à

expressão linear $A = \varepsilon nd$, na qual ε é o coeficiente de extinção molar. [17]

Essa formulação pressupõe que o meio seja homogêneo, que não haja espalhamento significativo de luz e que a interação entre a radiação e as espécies absorventes seja linear. Em sistemas mais complexos, como dispersões de cerâmicas em resinas ou solventes, esses pressupostos podem ser violados devido a efeitos adicionais, como reabsorção da emissão, espalhamento múltiplo e heterogeneidade na distribuição das partículas. Nesses casos, desvios em relação ao comportamento exponencial previsto pela Lei de Beer–Lambert podem ocorrer, exigindo ajustes na interpretação experimental.

Do ponto de vista prático, a equação evidencia que tanto o coeficiente de absorção α quanto a espessura do meio d atuam exponencialmente na redução da intensidade transmitida. Em resinas parcialmente absorvedoras na região ultravioleta, por exemplo, uma fração significativa da radiação incidente pode ser atenuada antes de atingir as partículas luminescentes. Isso implica menor número de fótons efetivamente absorvidos pelos dopantes e, conseqüentemente, menor intensidade de emissão. Para contornar esse efeito, é comum adotar meios com alta transmitância na região de excitação, utilizar camadas de menor espessura ou ajustar a concentração de partículas a fim de compensar as perdas ópticas. [18] A escolha adequada da matriz e do meio dispersivo, portanto, torna-se essencial para maximizar a eficiência de excitação e preservar as propriedades luminescentes do material em aplicações tecnológicas.

3.5 Aplicações e Estratégias para Emissão Branca

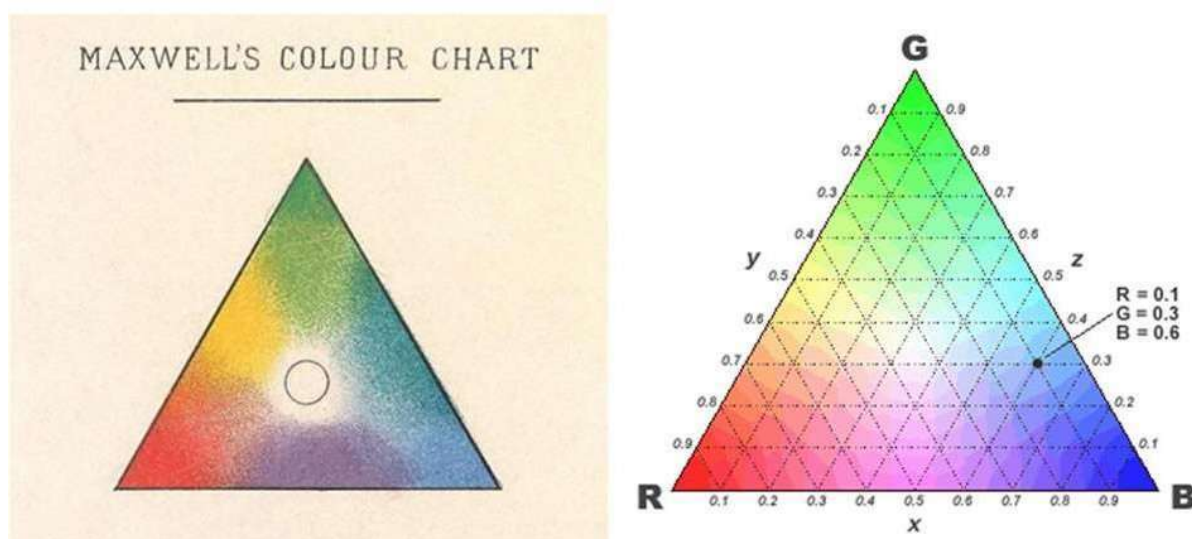
A obtenção de emissão branca a partir de cerâmicas luminescentes representa um dos principais objetivos em aplicações optoeletrônicas, como dispositivos de iluminação em estado sólido e painéis de exibição. Para alcançar essa emissão, diferentes estratégias podem ser empregadas, destacando-se a combinação de dopantes distintos, a utilização de materiais com bandas largas e a mistura aditiva das emissões primárias azul, verde e vermelha. A superposição controlada dessas emissões possibilita ajustar a resposta espectral global de forma a atingir coordenadas cromáticas próximas ao ponto de luz branca ideal.

Do ponto de vista colorimétrico, a cor resultante de uma mistura de emissores depende da soma das contribuições espectrais individuais, que são ponderadas de acordo com suas intensidades relativas. Assim, ao combinar diferentes cerâmicas

luminescentes em um mesmo meio dispersor, torna-se possível manipular a proporção de suas emissões de maneira a obter um espectro resultante que se aproxima da luz branca. Essa estratégia é amplamente utilizada por permitir o ajuste fino das coordenadas cromáticas até valores próximos de (0,33; 0,33) no sistema CIE 1931, ponto de referência associado à luz branca ideal.

A relação entre a composição espectral e a percepção da cor pode ser ilustrada por diagramas triangulares, nos quais as emissões primárias vermelho, verde e azul delimitam o espaço de combinações possíveis. Como mostrado na Figura 2, diferentes proporções dessas componentes resultam em cores variadas, sendo que a região central corresponde às combinações que conduzem à emissão branca. [19]

Figura 2 – Representação triangular das combinações de cores propostas por Maxwell, evidenciando a formação da luz branca a partir da mistura das emissões primárias.



Fonte: Imagem obtida na Internet. (cudl.lib.cam.ac.uk/view, 2025)

3.6 Espectrofluorimetria na Caracterização de Emissão

A espectrofluorimetria constitui a principal técnica experimental utilizada para a caracterização da emissão de materiais fotoluminescentes. Esse método baseia-se na excitação da amostra com radiação de comprimento de onda previamente definido e na posterior detecção da intensidade da luz emitida em função do comprimento de onda. [20] Dessa forma, é possível obter o espectro de emissão do material, fornecendo informações diretas sobre a posição dos máximos de emissão,

largura de banda e intensidade relativa dos picos característicos.

Além de permitir a identificação qualitativa dos centros emissores, a espectrofluorimetria também possibilita análises quantitativas por meio da comparação das intensidades entre diferentes amostras ou condições de excitação. Essa técnica é amplamente empregada na avaliação de cerâmicas luminescentes, uma vez que possibilita correlacionar a composição química, os dopantes utilizados e a resposta óptica resultante. Assim, torna-se uma ferramenta fundamental para o estudo da eficiência de conversão de energia e para o ajuste fino das propriedades espectrais em aplicações voltadas à emissão de luz branca.

3.7 Interação entre Íons Dopantes e Rede Cristalina

As cerâmicas luminescentes empregadas nesta pesquisa consistem, em sua maioria, em matrizes hospedeiras dopadas com íons ativadores. A energia dos níveis eletrônicos desses dopantes, e conseqüentemente a cor da emissão, depende fortemente da interação com o campo cristalino local gerado pela rede hospedeira.

De acordo com a teoria do campo cristalino, a inserção de um íon ativador em uma rede iônica leva à separação dos orbitais degenerados ($3d$ ou $4f$), cuja magnitude pode ser descrita pelo parâmetro de desdobramento cristalino Δ . [21] No caso de um ambiente octaédrico, essa separação é dada por:

$$\Delta_{\text{oct}} = \frac{6}{5} \times \Delta_{\text{tet}}, \quad (10)$$

onde Δ_{oct} e Δ_{tet} correspondem, respectivamente, aos parâmetros de desdobramento em campos octaédricos e tetraédricos. Essa diferença energética influencia diretamente a posição espectral da emissão, modificando a energia das transições eletrônicas possíveis.

Além disso, o fenômeno conhecido como deslocamento de Stokes também exerce influência significativa, uma vez que a emissão ocorre em energia mais baixa (maior comprimento de onda) do que a absorção inicial, devido à relaxação não radiativa intermediária. [22] Esse deslocamento citado pode ser expresso pela relação a seguir:

$$\Delta E_{\text{Stokes}} = E_{\text{absorção}} - E_{\text{emissão}}, \quad (11)$$

onde $E_{\text{absorção}}$ representa a energia do fóton absorvido e $E_{\text{emissão}}$ a energia do fóton emitido.

3.8 Mistura de Emissões e Engenharia da Cor

A obtenção de luz branca em materiais fotoluminescentes depende da composição adequada de emissões em diferentes regiões do espectro visível, tipicamente azul, verde e vermelho. Essa composição pode ser alcançada por diferentes estratégias, como a mistura de partículas de cerâmicas distintas, a co-dopagem em uma mesma matriz (menos comum) ou ainda a sobreposição de espectros largos.

Para descrever matematicamente o fenômeno da emissão composta, considere que cada dopante ou cada fase cerâmica emite um espectro $I_i(\lambda)$, cuja intensidade relativa é ponderada por um fator w_i , que representa a contribuição de cada componente no sistema. [23] A emissão total observada experimentalmente pode ser expressa como a soma linear das emissões individuais:

$$I_{\text{total}}(\lambda) = i \times \sum_i w_i I_i(\lambda). \quad (12)$$

Essa equação pode ser deduzida a partir do princípio da superposição de intensidades. Se considerarmos que a intensidade luminosa total em um dado comprimento de onda λ resulta da soma direta dos fótons emitidos por diferentes centros luminescentes, tem-se:

$$I_{\text{total}}(\lambda) = I_1(\lambda) + I_2(\lambda) + I_3(\lambda) + \dots \quad (13)$$

No entanto, na prática, cada centro emissor não contribui igualmente. A intensidade de cada componente depende de fatores como concentração de dopantes, eficiência quântica e absorção seletiva da matriz. Para levar isso em conta, introduz-se o peso relativo w_i , que normaliza a contribuição de cada componente de forma que:

$$\sum_i w_i = 1. \quad (14)$$

Assim, a expressão final para a intensidade total da emissão adquire a forma ponderada:

$$I_{\text{total}}(\lambda) = \sum_i w_i \times I_i(\lambda). \quad (15)$$

A escolha adequada dos pesos w_i é crucial para que as coordenadas cromáticas resultantes, obtidas no diagrama CIE 1931, se aproximem do ponto (0,33; 0,33), correspondente à luz branca de referência. [24] Caso haja desequilíbrio nos valores de w_i , a emissão tenderá a apresentar dominante azulada, esverdeada ou alaranjada, prejudicando a qualidade da cor final.

3.9 Efeito da Resina e Meios de Encapsulamento

A dispersão de partículas luminescentes em meios como resinas acrílicas, epóxis ou silicones constitui uma etapa fundamental no desenvolvimento de dispositivos fotônicos e optoeletrônicos. O encapsulamento não apenas confere estabilidade mecânica e proteção contra fatores ambientais, mas também desempenha papel decisivo nas propriedades ópticas do sistema.

Um dos principais efeitos está relacionado à absorção parcial da radiação de excitação pelo próprio meio, o que pode reduzir a intensidade efetiva disponível para estimular os centros luminescentes. Além disso, a alteração do índice de refração introduzida pelo encapsulante modifica o caminho óptico da luz e pode gerar espalhamento adicional, alterando a eficiência de extração fotônica. Outro fator crítico é a tendência de aglomeração das partículas em determinados meios poliméricos, comprometendo a homogeneidade da emissão e, em alguns casos, causando zonas de autoabsorção. [25]

A escolha criteriosa da matriz de encapsulamento deve priorizar elevada transparência na região espectral de excitação (tipicamente 355–405 nm), além de compatibilidade química com as partículas luminescentes, a fim de preservar a estabilidade e evitar processos de degradação óptica. Assim, a engenharia do meio hospedeiro não deve ser vista apenas como suporte físico, mas como componente ativo no desempenho luminescente final do dispositivo.

3.10 Estabilidade Óptica e Fotoenvelhecimento

A estabilidade óptica sob excitação ultravioleta contínua é um requisito fundamental para a viabilidade de materiais fotoluminescentes em aplicações tecnológicas. O fenômeno de fotoenvelhecimento pode comprometer tanto a intensidade quanto a cromaticidade da emissão ao longo do tempo, reduzindo a eficiência do dispositivo. Diversos mecanismos estão associados a essa degradação, como a oxidação dos íons dopantes, reações químicas entre a matriz cerâmica e o meio ambiente, amarelamento da resina encapsulante e a formação de centros de cor relacionados a defeitos estruturais.

Para avaliar a durabilidade dos materiais, são realizados ensaios de envelhecimento acelerado, nos quais as amostras são submetidas a radiação UV em condições controladas durante períodos prolongados. Nessas análises, a evolução da emissão é monitorada por meio de espectros de fotoluminescência e das

coordenadas cromáticas CIE 1931, permitindo identificar variações na tonalidade e na pureza da cor ao longo do tempo.

A variação da intensidade luminescente ao longo do tempo pode ser descrita por uma lei de decaimento exponencial. [26] Considerando que a taxa de degradação é proporcional à intensidade luminosa instantânea $I(t)$, tem-se:

$$\frac{dI(t)}{dt} = -\beta I(t), \quad (16)$$

onde β é a constante de degradação associada ao processo de fotoenvelhecimento.

Separando as variáveis e integrando:

$$\int \frac{1}{I(t)} dI(t) = -\beta \int dt \quad (17)$$

$$\ln I(t) = -\beta t + C. \quad (18)$$

Aplicando a condição inicial $I(0) = I_0$, obtém-se $C = \ln I_0$. Portanto, a solução final é:

$$I(t) = I_0 e^{-\beta t}. \quad (19)$$

Essa expressão mostra que a intensidade da emissão decai exponencialmente com o tempo de exposição à radiação UV, sendo β um parâmetro característico que quantifica a velocidade do fotoenvelhecimento. Valores baixos de β indicam maior estabilidade óptica, ao passo que valores elevados correspondem a rápida degradação da emissão.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

As investigações realizadas neste trabalho basearam-se na utilização de cerâmicas luminescentes em pó, resinas acrílicas transparentes, fotoiniciadores sensíveis à radiação ultravioleta, além de recipientes e moldes específicos para a manipulação dos compósitos ópticos, como lâminas de vidro de laboratório e placas de petri.

O conjunto de materiais foi selecionado de forma a garantir tanto a confiabilidade dos resultados quanto a viabilidade de comparação com parâmetros previamente estabelecidos em documentação técnica e literatura científica. No total, foram empregadas quatorze diferentes amostras de cerâmicas luminescentes, cada uma delas fornecida em pó fino e homogêneo, característica fundamental para assegurar a dispersão adequada em meios transparentes e a homogeneidade da emissão luminescente.

Tais amostras foram previamente caracterizadas nas tabelas a seguir, nas quais constata a cor de emissão e o comprimento de onda de emissão máxima ($\lambda_{\max}$). A Tabela 1 apresenta a lista dos compostos cerâmicos analisados e suas respectivas cores de emissão esperadas quando excitados, servindo como referência inicial para a interpretação dos resultados espectrais obtidos.

Tabela 1 – Relação dos compostos cerâmicos utilizados e suas respectivas cores de emissão esperadas sob excitação.

Numeração	Composto da Cerâmica	Cor de Emissão
1	Silicato de Zinco	Verde
2	Oxissulfeto de Ítrio	Branco
3	Óxido de Alumínio e Ítrio	Branco
4	Oxissulfeto de Ítrio	Rosa
5	Sulfeto de Zinco	Azul
6	Silicato de Ítrio	Azul
7	Tungstato de Cálcio	Azul
8	Sulfeto de Zinco	Azul
9	Fluoreto de Zinco e Magnésio	Laranja
10	Sulfeto de Zinco	Verde
11	Fluoreto de Potássio e Magnésio	Laranja
12	Silicato de Cálcio	Laranja
13	Fluoreto de Magnésio	Laranja
14	Oxissulfeto de Ítrio	Vermelho

Fonte: Autoria própria.

Já a Tabela 2 apresenta os compostos cerâmicos investigados juntamente com os seus comprimentos de onda de emissão esperados sob excitação, fornecendo uma base comparativa para a análise dos espectros obtidos experimentalmente.

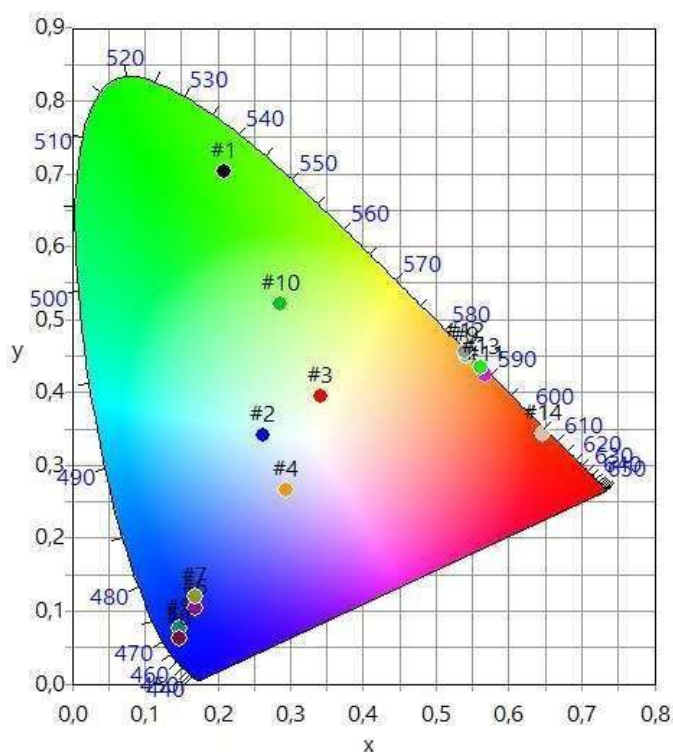
Tabela 2 – Relação dos compostos cerâmicos utilizados e seus respectivos comprimentos de onda esperados sob excitação.

Numeração	Composto da Cerâmica	Comprimento de Onda de Emissão
1	Silicato de Zinco	530 nm
2	Oxissulfeto de Ítrio	545 nm
3	Óxido de Alumínio e Ítrio	555 nm
4	Oxissulfeto de Ítrio	545 nm
5	Sulfeto de Zinco	450 nm
6	Silicato de Ítrio	440 nm
7	Tungstato de Cálcio	430 nm
8	Sulfeto de Zinco	450 nm
9	Fluoreto de Zinco e Magnésio	585 nm
10	Sulfeto de Zinco	545 nm
11	Fluoreto de Potássio e Magnésio	590 nm
12	Silicato de Cálcio	585 nm
13	Fluoreto de Magnésio	580 nm
14	Oxissulfeto de Ítrio	605 nm

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3 a seguir, são apresentadas as cerâmicas luminescentes listadas na Tabela 2, distribuídas no diagrama de cromaticidade CIE 1931 (x, y). Essa representação permite visualizar de forma clara as coordenadas cromáticas de cada material, evidenciando suas diferenças de emissão e possibilitando a comparação direta entre as quatorze amostras estudadas.

Figura 3 – Diagrama de cromaticidade CIE 1931 (x,y) contendo a distribuição das quatorze cerâmicas luminescentes, destacando suas respectivas coordenadas de emissão.



Fonte: Autoria própria.

Esses dados de referência desempenharam papel essencial no presente estudo, servindo como base comparativa para os resultados experimentais obtidos em laboratório. A manipulação dos pós luminescentes demandou cuidados específicos. As condições ambientais de armazenamento, em temperatura e umidade controladas, foram mantidas constantes, garantindo a preservação das propriedades ópticas até o momento da preparação dos compósitos e das análises experimentais.

Nos experimentos realizados, a incorporação das cerâmicas luminescentes em uma matriz foi efetivamente conduzida utilizando a resina acrílica transparente comercial Clear ou uma solução de hidróxi-propilcelulose (HPC) dissolvida em etilenoglicol. A escolha dessas formulações se deveu à elevada transmitância da resina na faixa do espectro visível, permitindo a observação da luminescência sem perdas significativas por absorção ou espalhamento, e à capacidade da HPC de melhorar a dispersão das partículas cerâmicas, reduzindo a formação de agregados. A presença do etilenoglicol atuou como plastificante, conferindo maior homogeneidade à mistura e facilitando a manipulação do compósito antes da cura UV. A combinação de HPC e etilenoglicol também promoveu uma estabilidade físico-

química adicional, crucial para a preservação das propriedades luminescentes durante a exposição à radiação ultravioleta e o manuseio experimental.

Além disso, a presença da hidroxipropilcelulose (HPC) na formulação desempenhou um papel crucial na homogeneização da mistura e na estabilidade das partículas cerâmicas durante a polimerização. O HPC atuou como agente dispersante, reduzindo a agregação das cerâmicas e garantindo uma distribuição uniforme no interior da matriz. Essa ação, combinada com a resina acrílica e o etilenoglicol, permitiu a obtenção de placas rígidas, transparentes e com luminescência homogênea, assegurando que a intensidade da emissão fosse preservada de maneira consistente ao longo de toda a superfície do compósito.

A formulação final, contendo 90% de resina Clear ou HPC/etilenoglicol e 10% de cerâmica, garantiu tanto a transparência da matriz quanto a intensidade de emissão desejada, evidenciando a importância do equilíbrio entre a quantidade de resina e de cerâmica para o desempenho óptico do compósito. Os filmes preparados apresentaram superfícies lisas e ausência de microfissuras, favorecendo a passagem uniforme da luz excitadora e a emissão homogênea da luminescência. Esses resultados indicam que a integração de HPC com etilenoglicol na matriz acrílica não apenas otimiza a dispersão das partículas, mas também contribui para a estabilidade mecânica e óptica do material, tornando-o adequado para aplicações em dispositivos optoeletrônicos e sistemas fotoluminescentes avançados.

Para a manipulação das amostras em pó e dos compósitos preparados, foram utilizados recipientes de vidro transparente, o que permitiu o controle rigoroso das quantidades empregadas em cada ensaio. Além disso, foram adotados moldes cilíndricos de dimensões padronizadas (1 cm de diâmetro e 2 mm de altura), que possibilitaram a produção de placas homogêneas e comparáveis entre si. Esses moldes facilitaram tanto a padronização da espessura das amostras quanto a uniformidade da distribuição da cerâmica na resina. Em algumas análises complementares, utilizou-se o auxílio de arruelas metálicas com 10 mm de diâmetro interno, de modo a delimitar a região analisada durante os ensaios espectroscópicos e garantir reprodutibilidade. A caracterização óptica das amostras envolveu o uso de dois instrumentos principais.

O primeiro equipamento utilizado foi o espectrômetro de emissão Ocean Optics USB2000+, amplamente empregado em ensaios ópticos preliminares devido à sua versatilidade e confiabilidade. Acoplado ao software SpectraSuite, esse

espectrômetro possibilitou a obtenção de espectros de emissão com resolução ajustável em 1,5 nm, permitindo a análise detalhada das características luminescentes das amostras. A facilidade de integração com computadores e a rápida aquisição de dados tornaram esse sistema ideal para experimentos exploratórios, possibilitando a identificação preliminar de picos de emissão e a avaliação qualitativa da intensidade luminescente das cerâmicas incorporadas à matriz polimérica.

Posteriormente, empregou-se um espectrofotômetro UV-Visível Varian Cary-50 Conc, referência consolidada em caracterização óptica de materiais luminescentes, que ofereceu controle preciso sobre o comprimento de onda de excitação na região do ultravioleta próximo, entre 355 e 405 nm. As fendas de entrada e saída foram cuidadosamente ajustadas entre 2,5 e 10,0 nm, de acordo com a necessidade de otimização entre intensidade de sinal e resolução espectral. Esse instrumento foi fundamental para a aquisição de espectros de absorbância e transmitância das amostras, permitindo a avaliação detalhada da transparência da matriz polimérica após a incorporação das cerâmicas. Além disso, o Cary-50 (Figura 4) possibilitou análises quantitativas da eficiência de excitação e emissão, fornecendo dados essenciais para a correlação entre a concentração de partículas luminescentes e a intensidade observada, bem como para a determinação do impacto da matriz polimérica sobre a propagação da radiação luminosa.

Figura 4 – Espectrofotômetro de fluorescência Varian Cary Eclipse, utilizado para aquisição dos espectros de emissão das amostras cerâmicas luminescentes.



Fonte: Imagem obtida na Internet. (geminibv.com/labware, 2025)

Assim, o conjunto de materiais e instrumentos empregados neste trabalho foi cuidadosamente selecionado para atender às exigências experimentais e assegurar resultados confiáveis, reprodutíveis e comparáveis aos dados disponíveis na literatura.

4.2 Métodos

A metodologia experimental foi organizada em etapas sucessivas, cada uma delas concebida para investigar aspectos específicos do comportamento luminescente das cerâmicas em pó e dos compósitos preparados. As etapas envolveram desde análises preliminares, realizadas com as amostras em estado de pó, até a caracterização aprofundada das dispersões em resina, incluindo a comparação com dados de referência, cálculos cromáticos e testes de fotoestabilidade.

Na primeira etapa, cada amostra de cerâmica luminescente foi pesada em quantidade inicial de 1,0 g, utilizando-se balança analítica de precisão de 0,1 mg (Shimadzu AY220). As cerâmicas foram depositadas em placas petri e excitadas diretamente por LEDs de 365 nm, como na Figura 5.

Figura 5 – Caixa branca com amostra de cerâmica verde em seu interior, iluminada por um sistema de LED para análise óptica.

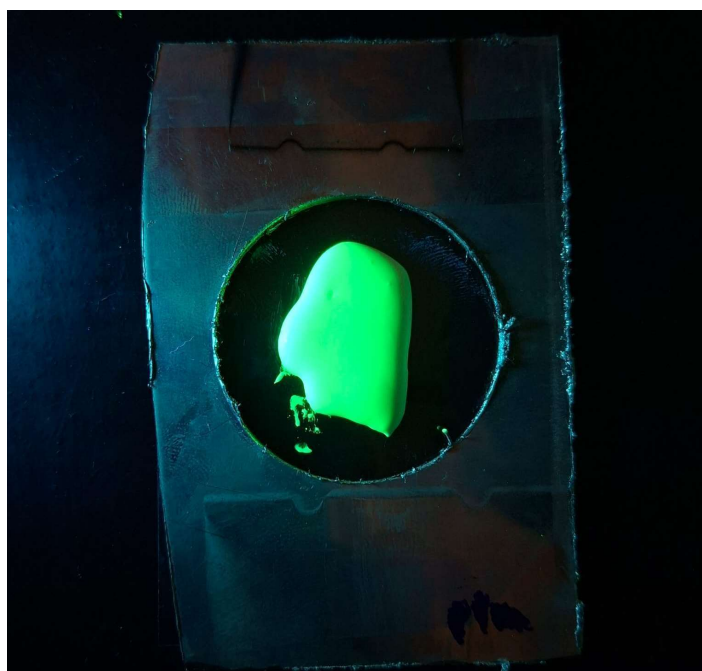


Fonte: Autoria própria.

Essa etapa inicial possibilitou a obtenção de dados preliminares e sua comparação direta com os parâmetros especificados pelos fabricantes em seus respectivos *data sheets*. Durante essa fase, foi constatado que a massa de material utilizada excedia o necessário, resultando em desperdício sem proporcionar melhorias significativas na intensidade luminescente observada. Diante disso, optou-se por ajustar as quantidades utilizadas nas etapas subsequentes, reduzindo a massa para aproximadamente 0,3 g. Essa alteração permitiu uma utilização mais racional dos recursos, mantendo a qualidade dos resultados espectrais obtidos, sem prejuízos em termos de desempenho ou confiabilidade dos dados.

A segunda etapa consistiu na preparação de compósitos sólidos por meio da dispersão controlada da cerâmica em resina acrílica líquida. Inicialmente, foram testadas formulações contendo 1 g de cerâmica e 1 g de resina. Observou-se, porém, que tais proporções não eram adequadas para o volume dos moldes utilizados, resultando em amostras de difícil manipulação. A formulação final foi então ajustada para 0,5 g de resina, 0,05 g de cerâmica, valores que proporcionaram boa homogeneização do material, reduzindo problemas de segregação das partículas luminescentes.

Figura 6 – Amostra de cerâmica luminescente dispersa em resina sob excitação por luz UV, evidenciando emissão verde característica.



Fonte: Autoria própria.

A mistura foi agitada manualmente durante 5 minutos para assegurar uma dispersão uniforme, e em seguida exposta à radiação ultravioleta de 365 nm por 60 minutos, resultando amostras adequadas para caracterização óptica. Além da formulação padrão, foram preparadas amostras com concentrações variadas de cerâmica luminescente (5%, 10% e 20% em massa), até que foi decidido que a mais adequada era a de 10%. Essa abordagem experimental permitiu investigar a relação entre a concentração de partículas luminescentes e a intensidade de emissão, bem como identificar possíveis efeitos indesejados, como autoabsorção e dispersão excessiva de luz. Todas as medições foram conduzidas em ambiente escuro, utilizando-se uma caixa revestida com material preto fosco em seu interior na primeira etapa, já que quando as amostras foram inseridas no espectrofotômetro, não era necessário esse revestimento, já que o próprio equipamento já proporciona um ambiente totalmente escuro para a amostra. Essas estruturas tiveram como função principal eliminar interferências da iluminação ambiente e minimizar reflexões difusas, garantindo a confiabilidade dos dados espectrais.

O posicionamento das fibras ópticas e das fontes de excitação foi rigidamente controlado com suportes metálicos ajustáveis, assegurando a repetibilidade das medições. Nos ensaios de emissão, as cerâmicas foram excitadas por LEDs e por lâmpadas de xenônio acopladas ao espectrofluorímetro.

Foram testados seis comprimentos de onda de excitação distintos: 355, 365, 375, 385, 395 e 405 nm. Para cada condição, os espectros de emissão foram coletados desde $\lambda_{exc} + 10$ nm até 1000 nm, abrangendo tanto o espectro visível quanto a região do infravermelho próximo. Esse procedimento assegurou uma análise abrangente do sistema, de modo a verificar todos os parâmetros relevantes. Assim, foi possível confirmar a consistência dos dados obtidos e garantir que os resultados apresentados correspondessem às condições mais adequadas e confiáveis para a pesquisa desenvolvida.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A etapa inicial do processo experimental consistiu na determinação dos comprimentos de onda de emissão das amostras estudadas. Para isso, foi empregado o espectrômetro Ocean Optics USB2000+, acoplado ao software Spectra Suite, o que possibilitou a aquisição dos espectros de emissão com elevada precisão e confiabilidade. A análise espectral permitiu a identificação dos comprimentos de onda característicos de cada cerâmica luminescente, resultando nos valores consolidados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Relação dos compostos cerâmicos utilizados e seus respectivos comprimentos de onda medidos sob excitação.

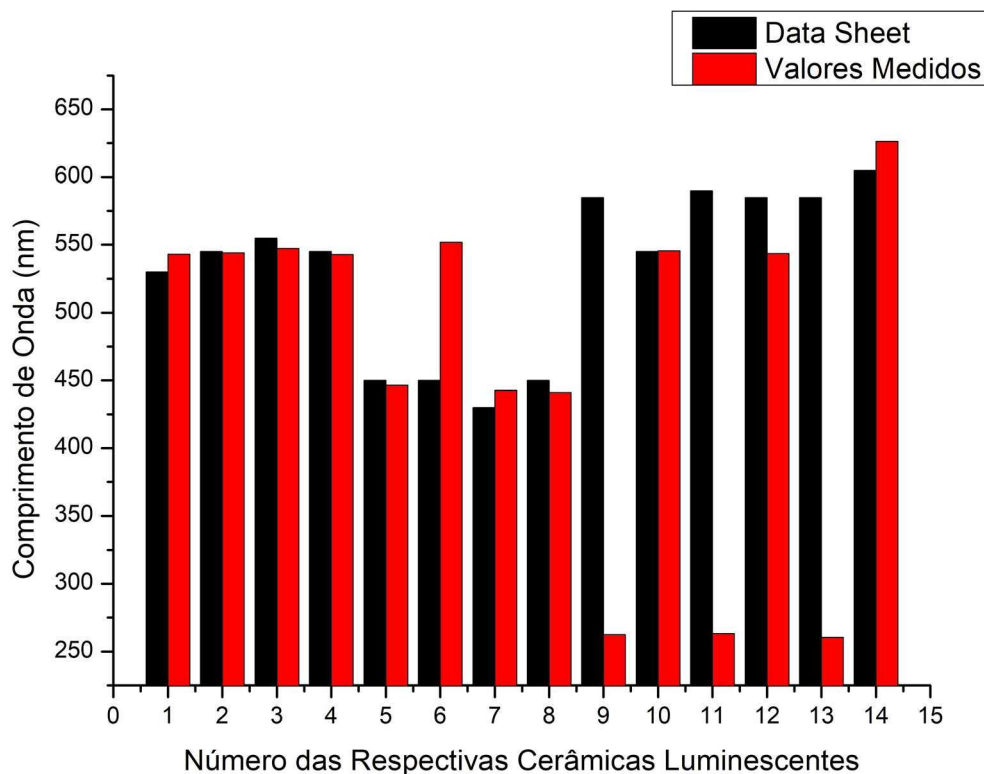
Numeração	Composto da Cerâmica	Comprimento de Onda de Emissão (Medidos)
1	Silicato de Zinco	542,99 nm
2	Oxissulfeto de Ítrio	544,02 nm
3	Óxido de Alumínio e Ítrio	547,39 nm
4	Oxissulfeto de Ítrio	542,73 nm
5	Sulfeto de Zinco	446,34 nm
6	Silicato de Ítrio	551,78 nm
7	Tungstato de Cálcio	442,67 nm
8	Sulfeto de Zinco	441,10 nm
9	Fluoreto de Zinco e Magnésio	262,45 nm
10	Sulfeto de Zinco	545,57 nm
11	Fluoreto de Potássio e Magnésio	263,26 nm
12	Silicato de Cálcio	543,50 nm
13	Fluoreto de Magnésio	260,58 nm
14	Oxissulfeto de Ítrio	626,14 nm

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, esses resultados experimentais foram confrontados com os valores de referência fornecidos nos data sheets das amostras, que representam as especificações teóricas e padrões reportados pelo fabricante. A comparação revelou tanto a proximidade quanto eventuais discrepâncias entre os dados medidos e os valores nominais esperados, permitindo uma avaliação crítica da qualidade e fidelidade das amostras analisadas.

Com base nessa comparação direta, foi elaborado um gráfico (Figura 7), no qual é possível visualizar de forma direta e clara a relação entre os resultados experimentais obtidos nas primeiras medidas e os dados de catálogo citados anteriormente.

Figura 7 – Gráfico de comparação entre os comprimentos de onda de emissão das cerâmicas luminescentes obtidos experimentalmente (valores medidos) e os fornecidos pelos respectivos data sheets.



Fonte: Autoria própria.

Essa representação gráfica facilita a interpretação dos desvios e aproximações, servindo como ferramenta essencial para validar a metodologia empregada. De forma geral, verifica-se que a maioria das amostras apresenta uma boa concordância entre os valores medidos e os reportados, evidenciando a confiabilidade do procedimento experimental adotado. Amostras como as de número 1, 2, 3, 4, 5, 7 e 12 demonstram alinhamento muito próximo entre os dois conjuntos de dados, com variações pequenas, geralmente dentro da margem de incerteza típica de medidas espectroscópicas. Esse resultado reforça a adequação da metodologia utilizada e a qualidade intrínseca das cerâmicas analisadas.

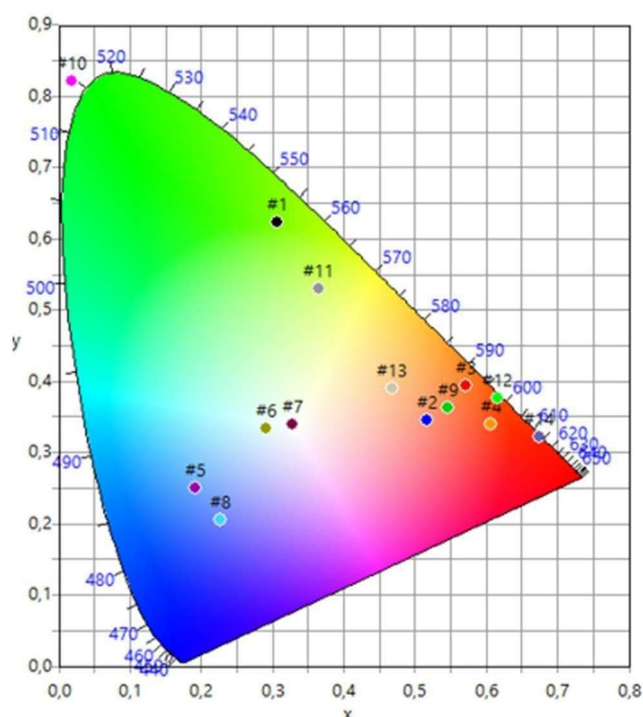
Entretanto, algumas amostras revelaram discrepâncias significativas. Por exemplo, a amostra 6 apresentou um valor experimental notavelmente superior ao esperado, sugerindo possíveis fatores como: influência de impurezas, variações na concentração do dopante luminescente, ou até uma heterogeneidade na matriz cerâmica, que pode deslocar os níveis de energia.

Situações semelhantes podem ser observadas nas amostras 9, 10, 11, 13 e

14, que exibem valores experimentais deslocados para regiões menores do espectro (menores comprimentos de onda). Esse comportamento pode ser atribuído à presença de defeitos estruturais ou à ocorrência de centros de cor, que favorecem transições eletrônicas alternativas, modificando a emissão característica da cerâmica. Outro ponto relevante é a amostra 15, que apresentou valor experimental superior ao registrado no *data sheet*. Esse desvio pode estar relacionado a reabsorção interna da luz emitida, efeitos de autoabsorção ou até mesmo à configuração do aparato experimental, como o alinhamento das fibras ópticas e a intensidade da fonte de excitação.

Além da determinação dos comprimentos de onda de emissão, também foram obtidas, por meio do sistema Ocean Optics acoplado ao software Spectra Suite, as coordenadas cromáticas CIE de cada cerâmica luminescente. A coleta dessas coordenadas foi essencial, pois traduz o espectro de emissão em informações perceptíveis ao olho humano, posicionando cada material em um diagrama cromático. Esse diagrama permite visualizar de forma objetiva a proximidade (ou afastamento) entre os pontos medidos experimentalmente e os valores teóricos fornecidos pelo fabricante, como visto na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama de cromaticidade CIE 1931 (x,y) contendo a distribuição das quatorze cerâmicas luminescentes medidas no espectrometro, destacando suas respectivas coordenadas de emissão.



Fonte: Autoria própria.

A comparação entre o diagrama cromático CIE construído a partir das medidas experimentais e aquele obtido a partir dos valores de referência fornecidos nos data sheets revela, de maneira geral, uma boa correspondência entre os dois conjuntos de resultados. As amostras tendem a ocupar regiões semelhantes no espaço de cromaticidade, o que confirma a confiabilidade do método de aquisição espectral realizado com o sistema Ocean Optics e a validade da metodologia experimental adotada.

Apesar dessa concordância global, algumas diferenças merecem destaque. Na região do azul - violeta, por exemplo, amostras como a de número 5 e 8 apresentaram deslocamentos em relação aos pontos de referência, indicando emissões ligeiramente modificadas em direção ao azul ou ao verde. [27]

Nas amostras com emissões localizadas na região do verde - amarelado, como as de números 6, 7 e 11, observa-se que os pontos experimentais se mantêm próximos dos valores teóricos, mas tendem a se deslocar para posições mais centrais no diagrama. Esse comportamento sugere emissões menos saturadas cromaticamente, o que pode estar associado à sobreposição parcial de bandas de emissão ou a efeitos de autoabsorção da própria radiação emitida pelo material no processo da coleta.

Na região do laranja ao vermelho, onde se encontram amostras como 2, 9, 13 e 14, os desvios se tornam mais visíveis. Enquanto os valores de referência se situam próximos à borda do diagrama, indicando emissões mais puras e bem definidas, os pontos experimentais deslocam-se em direção ao interior do gráfico, revelando uma perda de pureza cromática. Tal efeito pode ter origem em processos de espalhamento da luz dentro da cerâmica ou em emissões secundárias decorrentes da interação entre dopante e matriz. [28]

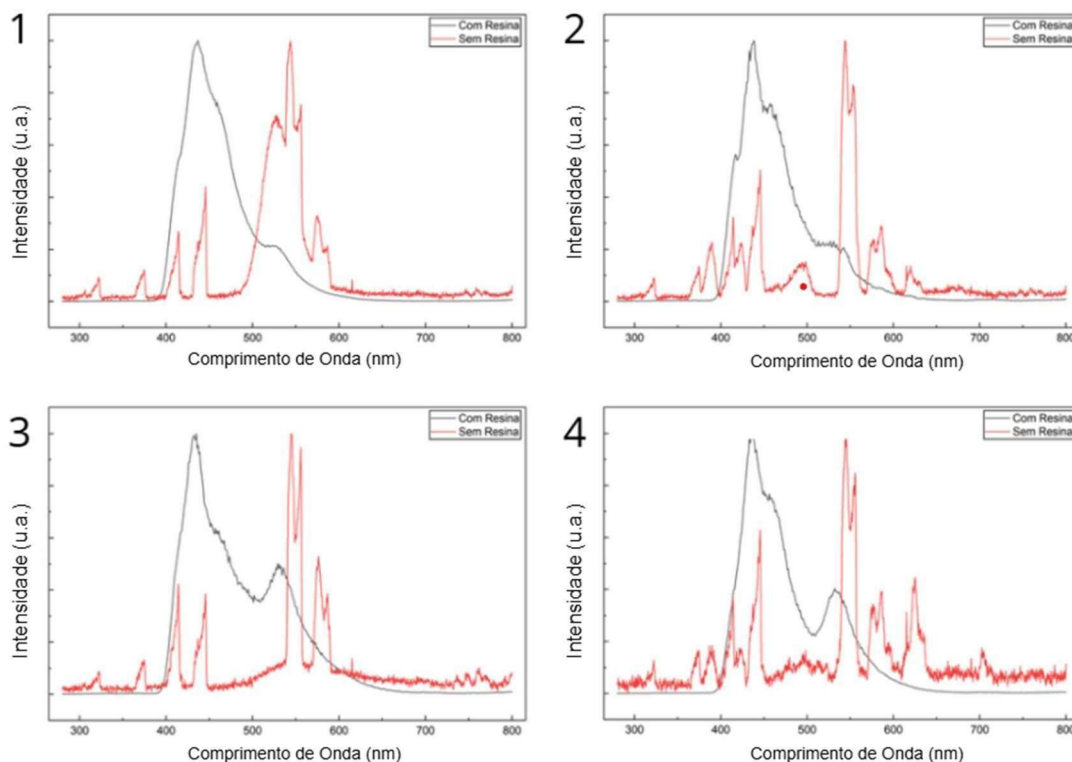
Por outro lado, algumas amostras, como as de números 1, 3 e 12, apresentaram resultados bastante próximos dos valores de referência, demonstrando um alinhamento direto entre o que foi medido e o que era esperado. Esses casos reforçam a consistência da metodologia utilizada e demonstram que, para certos materiais, as propriedades luminescentes permanecem estáveis mesmo após possíveis variações de síntese ou manipulação. Em termos gerais, pode-se afirmar que a comparação entre os diagramas não apenas confirma a confiabilidade do processo experimental, mas também evidencia como fatores intrínsecos, como a dopagem e os defeitos estruturais, e fatores extrínsecos, como as condições de

medição e o alinhamento do sistema óptico, podem impactar diretamente na cor percebida. Essa análise é particularmente relevante para aplicações tecnológicas, uma vez que deslocamentos mesmo pequenos no espaço cromático podem comprometer o desempenho de dispositivos como LEDs brancos, telas emissivas e sistemas de iluminação de alta precisão.

Nos experimentos realizados, as resinas associadas às micropartículas de cerâmicas luminescentes apresentaram comportamento uniforme na dispersão dos materiais ativos. Verificou-se que a escolha da resina afeta diretamente a homogeneidade do filme e a intensidade da emissão luminosa. A interação entre a matriz polimérica e as partículas cerâmicas favorece a estabilidade estrutural, evitando aglomerações e sedimentações durante a cura. Além disso, a resina atua como barreira protetora contra oxigênio e umidade, contribuindo para a manutenção da emissão ao longo do tempo. Esses resultados reforçam o papel do meio polimérico não apenas como suporte físico, mas também como componente funcional essencial para preservar as propriedades ópticas dos materiais incorporados.

Inicialmente, foram conduzidos experimentos utilizando a resina *Clear* como meio hospedeiro para a incorporação das cerâmicas luminescentes. Contudo, as análises espectrais revelaram que a emissão detectada provinha predominantemente da própria resina. Em outras palavras, a resposta óptica observada não refletiu de maneira satisfatória a contribuição das cerâmicas dispersas, uma vez que a intensidade emitida pela resina se sobrepunha às bandas características das cerâmicas. Esse comportamento é claramente evidenciado pelos gráficos apresentados na Figura 9, nos quais se observa o domínio espectral da resina sobre a emissão total do sistema.

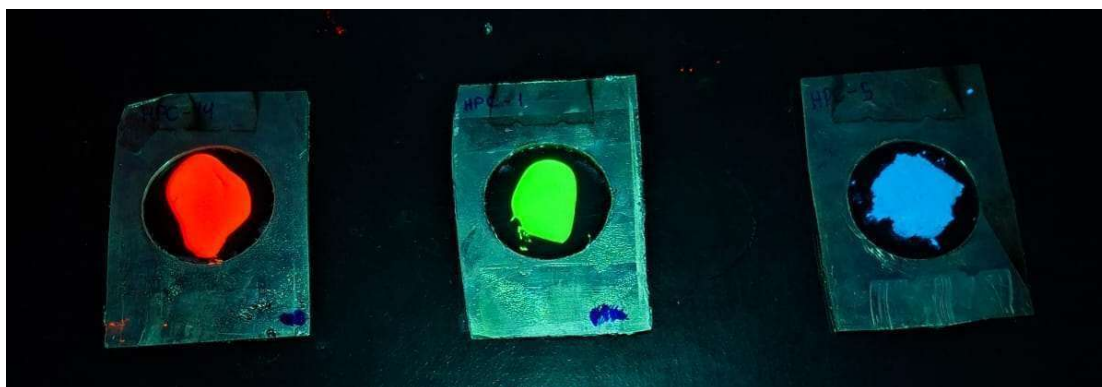
Figura 9 – Espectros de emissão evidenciando a luminescência proveniente exclusivamente da resina nas amostras 1, 2, 3 e 4.



Fonte: Autoria própria

Diante desse comportamento indesejado, o estudo passou a empregar resina à base de HPC com etilenoglicol, cuja formulação apresentou resultados muito mais promissores, evidenciando emissão efetiva das cerâmicas incorporadas, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Exemplo das amostras preparadas com resina à base de HPC e etilenoglicol, as quais vêm apresentando resultados promissores de emissão e uniformidade.



Fonte: Autoria própria

Adicionalmente, a análise dos filmes poliméricos mostrou que a variação na

composição e concentração da resina permite modular características como transparência, viscosidade e capacidade de adesão a substratos diversos. Filmes preparados com concentrações adequadas de resina apresentaram superfícies lisas e sem microfissuras, resultando em uma difusão mais uniforme da luz emitida pelas cerâmicas. A combinação de resina e etilenoglicol revelou-se especialmente eficiente na redução de tensões internas durante a cura, garantindo a integridade mecânica dos filmes e ampliando sua durabilidade.

Com base nesses resultados, a pesquisa segue em desenvolvimento com a utilização da resina HPC associada ao etilenoglicol e diferentes cerâmicas luminescentes, visando aperfeiçoar a dispersão e intensificar a emissão luminosa. Estão sendo planejadas novas medições espectrais, análises colorimétricas e testes de estabilidade óptica dessas amostras, de modo a avaliar o comportamento sob diferentes condições de excitação e tempo de exposição. Essa continuidade permitirá consolidar a compreensão dos efeitos da matriz polimérica nas propriedades fotoluminescentes e contribuir para o avanço no desenvolvimento de materiais híbridos de alto desempenho.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como finalidade central a investigação colorimétrica de compósitos formados por partículas cerâmicas fotoluminescentes dispersas em matrizes transparentes, com excitação por radiação ultravioleta. Desde sua concepção, o projeto buscou integrar conhecimentos da física da luz, da ciência dos materiais e da colorimetria, a fim de propor uma alternativa viável para a caracterização e futura aplicação desses compósitos em dispositivos de conversão óptica.

A pesquisa foi estruturada em etapas bem definidas, que contemplaram desde a seleção criteriosa das cerâmicas luminescentes e das resinas, até a preparação experimental das amostras e o delineamento de metodologias adequadas para análise espectral e cromática. A execução dos procedimentos experimentais demonstrou que a proposta é factível e metodologicamente robusta.

A dispersão das cerâmicas em resina acrílica transparente, associada ao uso de fotoiniciadores para polimerização sob radiação UV, possibilitou a obtenção de compósitos sólidos homogêneos e transparentes, com potencial para análises ópticas reproduzíveis. Além disso, a utilização de equipamentos de espectroscopia, como o espectrofluorímetro e o espectrofotômetro UV-Vis, garantiu a confiabilidade da etapa de caracterização, abrindo caminho para a coleta de dados consistentes em trabalhos subsequentes.

A metodologia desenvolvida assegurou a preparação adequada das amostras, a padronização dos ensaios e a definição de parâmetros experimentais relevantes, como as concentrações de cerâmica, os comprimentos de onda de excitação e as condições de coleta dos espectros. Assim, o estudo cumpriu o papel de estabelecer uma base sólida para a análise colorimétrica, garantindo que os dados a serem obtidos futuramente possam ser tratados de maneira confiável, comparados com valores de referência e discutidos em termos de aplicabilidade tecnológica.

Outro aspecto importante a ser ressaltado é a relevância científica do tema abordado. A busca por materiais emissores de luz branca está diretamente associada ao avanço das tecnologias de iluminação e exibição, que demandam dispositivos mais eficientes, duráveis e ambientalmente sustentáveis. Nesse contexto, as cerâmicas fotoluminescentes apresentam vantagens consideráveis em

relação a outros materiais, como maior estabilidade térmica e química, além de boa eficiência quântica.

A incorporação dessas cerâmicas em matrizes transparentes, como resinas acrílicas, surge como estratégia promissora para superar limitações de durabilidade de dispositivos eletroluminescentes convencionais, possibilitando novas aplicações em sistemas híbridos que combinam fontes UV com conversores foto-luminescentes. Além da contribuição tecnológica, a pesquisa também cumpriu um papel formativo. O desenvolvimento deste trabalho permitiu aprofundar o contato com técnicas experimentais de síntese, preparação e caracterização de materiais, além de consolidar o domínio de conceitos teóricos fundamentais em óptica, espectroscopia e colorimetria.

A experiência prática proporcionou ainda a oportunidade de compreender os desafios associados à manipulação de materiais luminescentes e às limitações experimentais, como a necessidade de ajustes de concentração, uniformidade de dispersão e controle de condições ambientais durante os ensaios. Esses aspectos agregam maturidade científica e contribuem para a formação de um perfil mais crítico e investigativo. Cabe destacar também que a metodologia aqui empregada pode ser estendida para outras composições e sistemas, ampliando as possibilidades de aplicação da abordagem proposta.

A utilização de diferentes resinas, concentrações ou combinações de dopantes, por exemplo, pode permitir a obtenção de emissões ajustadas a faixas específicas do espectro visível, viabilizando aplicações em iluminação arquitetural, biomédica ou até mesmo em dispositivos de segurança. Do ponto de vista da pesquisa básica, a metodologia desenvolvida contribui para a compreensão das interações entre partículas luminescentes e matrizes hospedeiras, fornecendo subsídios para futuros trabalhos voltados à engenharia de cor e ao estudo da estabilidade óptica em condições extremas.

Em síntese, o estudo cumpriu seu objetivo de estabelecer uma metodologia consistente para a análise colorimétrica de compósitos luminescentes. Os resultados obtidos apontam para a possibilidade de explorar novos sistemas ópticos híbridos, unindo a eficiência de fontes ultravioletas à versatilidade de cerâmicas fotoluminescentes em meios transparentes. O êxito alcançado confirma a relevância desta pesquisa e justifica sua continuidade, tanto em âmbito acadêmico quanto em aplicações tecnológicas.

7 REFERÊNCIAS

- [1] **Lequeux, J. The Nature of Light.** In: François Arago: A 19th Century French Humanist and Pioneer in Astrophysics. Cham: Springer, 2016. Astrophysics and Space Science Library, v. 421. p. 57-87.
- [2] Carmichael, H. Quantum Fluctuations of Light: A Modern Perspective on Wave/Particle Duality. In: **Quantum Mechanics at the Crossroads** (The Frontiers Collection). Springer, Berlin / Heidelberg, 2007.
- [3] Zavaleta, Andrés; Lykhin, Aleksandr O.; Monteiro, Jorge H. S. K. et al. **Full Visible Spectrum and White Light Emission with a Single**, Input-Tunable Organic Fluorophore. Journal of the American Chemical Society, v. 142, n. 48, p. 20306-20312, 2020.
- [4] Performance Enhancement and Applications Review of Nano Light Emitting Device (LED). In: “**Performance Enhancement and Applications Review of Nano Light Emitting Device (LED)**”, *Scientific Reports*, PMC, 2021.
- [5] Ma, Yong, Zhang, Li, Zhou, Tian et al. **High quantum efficiency transparent ceramics with excellent thermal stability for high-power white LEDs/LDs.** Journal of Materials Chemistry C, v. 8, p. 16427-16435, 2020.
- [6] Gozzi, G. **A study of the electroluminescence mechanism in a light-emitting composite produced with PEDOT:PSS, PVA and Zn₂SiO₄:Mn.** OPTICAL MATERIALS. 84, 843-851 (2018)
- [7] Santos, L. F.; Pereira, C. J. **Composição de cores através da calibração radiométrica e fotométrica de LEDs: Teoria e experimento.** Revista Brasileira de Ensino de Física, 35 (2), 2314, (2013).
- [8] CHEN, Q.; PAN, Z.; WU, J.; XUE, C. **An Investigation into the Effects of Correlated Color Temperature and Illuminance of Urban Motor Vehicle Road Lighting on Driver Alertness.** Sensors, v. 24, n. 15, p. 4927, 2024.

- [9] SILVA, K. V. **Percepção da cor**. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], 2006. 120 p.
- [10] OHNO, Y. **CIE Fundamentals for Color Measurements**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2023.
- [11] LI, Y. et al. **Ce/Mn/Cr: (Re,Y)₃Al₅O₁₂ Phosphor Ceramics**. *Materials*, v. 16, n. 20, p. 6667, 2023.
- [12] LI, Z. et al. **Luminescence properties of SrLaGa₃O₇ fluorescent ceramics doped with rare-earth ions**. *Journal of Luminescence*, v. 231, p. 117793, 2021.
- [13] ALVES, Y. G. S. **Estudo da luminescência persistente em cerâmicas de SrAl₂O₄ e CaAl₂O₄ dopadas com Eu²⁺ e Eu³⁺**. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado em Física), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.
- [14] Wendt, Sheila Cristina. **"Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica."** 2006.
- [15] Perikala, M., et al. **"Excellent color rendering index single system white light."** *Scientific Reports*, 2021.
- [16] Mayerhöfer, T. G.; Popp, J. (2019). **Beer's law derived from electromagnetic theory**. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 215, 335-342.
- [17] Oshina, I.; Spigulis, J. **Beer–Lambert law for optical tissue diagnostics: current state of the art and the main limitations**. *Journal of Biomedical Optics*, 2021.
- [18] RIBEIRO, Guilherme Kubo. **Materiais submicrométricos aplicados à produção de compósitos eletroluminescentes: uso de nanotubos de carbono como fase condutora e produção de pó cerâmico eletroluminescente submicrométrico**. 2023. Tese (Doutorado em Física), Instituto de Geociencias e

Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2023.

[19] Sarih, N. M. et al. **“White Light Emission from a Simple Mixture of Fluorescent Dyes.”** Scientific Reports, v. 9, 2019.

[20] LIN, Hongbin; SONG, Xiaorong; et al. **Photoluminescent Characterization of Metal Nanoclusters: Basic Parameters, Methods, and Applications.** Advanced Materials, v. 36, n. 25, artigo 2401002, 2024.

[21] SONG, Z.; XIAO, X.; WU, Y.; ZHANG, J. Basic crystal field theory: **A simple and useful tool to interpret d-orbital splitting, its dependence on geometry and ligand field strength.** Journal of Solid State Chemistry, v. 309, p. 122990, 2022.

[22] ABBAD, P. et al. **Dynamic Stokes shift in green fluorescent protein variants.** Nature, v. 448, n. 7151, p. 1135–1138, 2007.

[23] MOREIRA, S. P. **Síntese e caracterização de materiais cerâmicos dopados com íons Eu^{3+} : efeitos estruturais e ópticos.** 2006. 120 p. Tese (Doutorado em Química). Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2006.

[24] REDDY, M. L. P.; BEJOYMOHANDAS, K. S. **Single-component white-light-emitting materials based on lanthanide coordination assemblies.** Dalton Transactions, v. 54, p. 9441–9457, 2025

[25] SOUZA, N. R. S. **Estudo de sistemas poliméricos coloidais como meios de contraste em imagens biomédicas.** 2018. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

[26] BERBERAN-SANTOS, M. N.; SILVA, E. S.; SANTOS, A. M. P. D. **Mathematical functions for the analysis of luminescence decay curves.** Chemical Physics, v. 315, n. 3, p. 171–182, 2005.

[27] **SHUBINA, M. V.** et al. The “Blue Shift” of Emission Maximum and the Fluorescence Quantum Yield as Quantitative Spectral Characteristics of Dissolved

Humic Substances. *E-Proceedings in Marine Science*, Oldenburg, v. 9, n. 1, p. 1–7, 2010.

[28] **RODRIGUES, A. dos S. et al.** Applications of fluorescence spectroscopy in protein–ligand interactions. *Biophysical Chemistry Advances*, [S. l.], v. 4, p. 100020, 2023.

[29] **Zhang, Meihe; Zhang, Yunsong.** Status and prospects of wide bandgap semiconductor devices. *Applied and Computational Engineering*, v. 23, p. 252–262, 2023.

[30] **Xiang, H. Y.; Zuo, C. T.; Zeng, H. B.; Ding, L. M.** White light-emitting diodes from perovskites. *Journal of Semiconductors*, v. 42, n. 3, p. 030202, 2021.