



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Jéssica Pian Bez Birolo

**Avaliação do uso de compostos fosforescentes em materiais de construção
civil**

Araranguá

2025

Jéssica Pian Bez Birolo

**Avaliação do uso decompostos fosforescentes em materiais de construção
civil**

Dissertação/Qualificação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade da como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Tiago Elias Allievi Frizon, Ph.D.
Coorientador: Prof. Fernando Pelisser, Dr.

Araranguá

2025

Birolo, Jéssica Pian Bez
Avaliação do uso decompostos fosforescentes em
materiais de construção civil / Jéssica Pian Bez Birolo ;
orientador, Tiago Elias Allievi Frizon, coorientador,
Fernando Pelisser, 2025.
51 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em
Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2025.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Energia e
Sustentabilidade . 3. Compostos Fosforescentes em
Construção Civil. 4. Aluminato de estrôncio. 5. Construção
Civil. I. Frizon, Tiago Elias Allievi . II. Pelisser,
Fernando. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade.
IV. Título.

Jéssica Pian Bez Birolo

Título: Avaliação do uso de compostos fosforescentes em materiais de
construção civil

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 23 de junho de 2025,
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Prof. Tiago Elias Allievi Frizon, Pd.D
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Suzane Quintana Gomes Dr.(a)
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Israel Raitz Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de Mestra em Energia e Sustentabilidade..

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof.(a) Prof. Tiago Elias Allievi Frizon, Pd.D
Orientador

Araranguá, 2025.

À memória de minha mãe, minha eterna e maior incentivadora e inspiração,
cuja presença permanece viva em cada conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família e aos amigos, pelo carinho, paciência e incentivo ao longo desta jornada.

Ao meu marido Kássio, pela parceria incansável, pela paciência nos momentos mais difíceis e de ausência, e por estar sempre ao meu lado com amor e compreensão.

À minha sogra Rita, por todo o apoio e suporte prestado em tantas situações, com generosidade e presença acolhedora.

À minha irmã Simone, por seu apoio constante, por acreditar em mim e estar sempre disposta a ajudar, mesmo à distância ou nos momentos de silêncio.

Ao meu orientador PhD Tiago Elias Allievi Frizon, pela orientação atenta e dedicada, pela confiança depositada em meu trabalho, por me guiar com firmeza e generosidade e amizade em toda jornada.

À banca examinadora, pelo tempo dedicado à leitura e avaliação desta dissertação, pelas contribuições valiosas e pelas considerações que enriqueceram este trabalho.

Ao Laboratório de Materiais Avançados (LMA), pelo suporte técnico, estrutura e ambiente propício à realização das análises e experimentos necessários para o desenvolvimento deste estudo.

Aos colegas do laboratório, pela colaboração, troca de experiências e apoio nos momentos de desafios e descobertas.

[Conhecimento é poder. (BACON, 1597, p. 21)]

RESUMO

Devido à crescente demanda do consumo de energia aliado ao aumento do desenvolvimento econômico e populacional, cada vez mais torna-se necessário a busca por novas tecnologias, renováveis que reduzam o consumo de energia elétrica. Buscando aliar a eficiência energética e a sustentabilidade, este trabalho tem como objetivo avaliar o uso de compostos fosforescentes em materiais de construção civil, com foco na incorporação do aluminato de estrôncio dopado com európio e disprósio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu, Dy}$) em mantas impermeabilizantes, a fim de desenvolver um material com propriedades luminescentes de longa duração, que possa unir, estética e eficiência energética sustentável. Inicialmente, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, abordando a aplicação de compostos fosforescentes em elementos construtivos. Na etapa experimental, foram elaboradas misturas da manta impermeabilizante com 20%, 30 % e 40% de composto fosforescente. As amostras foram analisadas quanto à trabalhabilidade, emissão de luz e caracterização físico-química. A espectrofotometria de fluorescência revelou emissão máxima em 513,8 nm, confirmando emissão na faixa verde do espectro visível. O rendimento quântico foi de 22%, 56% e 63% para as amostras com 20%, 30% e 40% de composto fosforescente, respectivamente. Os ensaios de tempo de decaimento luminescente demonstraram que a amostra com 40% apresentou emissão residual de até 810 segundos, evidenciando a atuação dos íons Dy^{3+} na formação de “armadilhas eletrônicas”, prolongando a emissão. A análise de densidade indicou aumento na massa específica da manta com a adição do composto, impactando negativamente sua trabalhabilidade. Os resultados obtidos demonstram o potencial do material desenvolvido para aplicações em sinalizações de segurança e ambientes com baixa luminosidade, embora ajustes na formulação sejam necessários para garantir melhor desempenho na aplicação prática.

Palavras-chave: Fosforescência; fotoluminescência; aluminato de estrôncio; construção civil; materiais luminescentes; manta impermeabilizante.

ABSTRACT

Due to the growing demand for energy consumption, combined with the increase in economic and population development, the search for new renewable technologies that reduce electricity consumption has become increasingly necessary. In order to combine energy efficiency and sustainability, this study aims to evaluate the use of phosphorescent compounds in construction materials, focusing on the incorporation of strontium aluminate doped with europium and dysprosium ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu, Dy}$) into waterproofing membranes, with the purpose of developing a material with long-lasting luminescent properties that can combine aesthetics and sustainable energy efficiency. Initially, a systematic literature review was carried out, addressing the application of phosphorescent compounds in construction elements. In the experimental stage, mixtures of the waterproofing membrane with 20%, 30%, and 40% phosphorescent compound were prepared. The samples were analyzed regarding workability, light emission, and physicochemical characterization. Fluorescence spectrophotometry revealed a maximum emission at 513.8 nm, confirming emission in the green range of the visible spectrum. The quantum yield was 22%, 56%, and 63% for the samples with 20%, 30%, and 40% phosphorescent compound, respectively. Luminescent decay time tests showed that the sample with 40% presented residual emission of up to 810 seconds, evidencing the role of Dy^{3+} ions in the formation of "electron traps," which prolong emission. Density analysis indicated an increase in the specific mass of the membrane with the addition of the compound, negatively affecting its workability. The results obtained demonstrate the potential of the developed material for applications in safety signage and low-light environments, although adjustments in the formulation are necessary to ensure better performance in practical applications.

Keywords: Phosphorescence; photoluminescence; strontium aluminate; civil construction; luminescent materials; waterproofing membrane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação dos fenômenos de fluorescência e fosforescência	17
Figura 2 – Representação do processo para realização de fluorescência e fosforescência.....	18
Figura 3 – Diagrama de Jablonski.....	19
Figura 5 - Compostos de luminescência persistente.....	20
Figura 6– Tempo de decaimento dos compostos luminescentes dopados com diferentes matrizes.	21
Figura 4 - Diagrama de Jablonski adaptado, representando os mecanismos de emissão prolongada de luz em dopados com Eu^{3+} e Dy^{3+}	24
Figura 7– Auto-estradas iluminadas com materiais fosforescentes.	25
Figura 8 - Fotografias de impressões digitais utilizando pó fosforescente (SAO:Eu,Dy)	26
Figura 9– Comparação de folhas com e sem deposição de Ag.....	33
Figura 10 – Fluxograma das etapas experimentais.	35
Figura 11 – a) Composto fosforescente - Aluminato de estrôncio dopado EuDy, b) manta impermeabilizante.....	37
Figura 12– Composto fosforescente – Aluminato de estrôncio dopado EuDy	38
Figura 13 - Amostra com 20% de fosforescente (a), amostra com 20% de fosforescente (b), e amostra com 40% de fosforescente (c).....	39
Figura 14 - Amostra com 20% de fosforescente (a), amostra com 30% de fosforescente (b), e amostra com 40% de fosforescente (c) com emissão de luz.....	40
Figura 15 - Faixa de comprimento de onda de emissão da manta com mistura de 20% de composto fosforescente (a),30% de composto fosforescente (b), e 40 % de composto fosforescente (c).....	41
Figura 16 - Espectro eletromagnético com diferentes comprimentos de ondas de luz	41
Figura 18 – Espectrofluorímetro Horiba FluoroMax+	42
Figura 19 – Tempo de decaimento de luminescência das amostras (Respectivamente: Pó luminescente, manta impermeabilizante + pó luminescente e manta impermeabilizante)	44
Figura 20- Picnômetro com capacidade de 5ml.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Otimizações das amostras (a) Mistura com 20% de fosforescente, (b) Mistura com 30% de fosforescente e (c) Mistura com 40% de fosforescente.....	37
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PET	Polietileno Tereftalato
LMA	Laboratório de Materiais Avançados
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	LUMINESCÊNCIA, FLUORÊSCENCIA E FOSFORÊSCENCIA.....	16
3.2	COMPOSTOS FOSFORESCENTES.....	20
3.3	MECANISMO DE EMISSÃO PROLONGADA EM MATERIAIS FOSFORESCENTES DOPADOS COM EURÓPIO (Eu^{3+}) E DISPRÓSIO (Dy^{3+})	22
3.4	VANTAGENS E APLICABILIDADE DE COMPOSTOS FOSFORESCENTES NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	25
3.5	MÉTODOS DE SÍNTESE DE COMPOSTOS FOSFORESCENTES	27
3.6	FATORES QUE INFLUENCIAM A FOSFORESCENCIA.....	27
3.6.1	PREPARAÇÃO E FORMAS DE APLICAÇÃO DO COMPOSTO	28
3.6.2	COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS FOSFORESCENTES	29
3.6.3	TAMANHO DAS PARTÍCULAS	30
3.7	ESTUDOS COM DIFERENTES APLICAÇÕES DE COMPOSTOS FOSFORESCENTES.....	30
3.7.1	SrAl_2O_4: Eu^{2+}, Dy^{3+} em fibras luminescentes	30
3.7.2	SrAl_2O_4: Eu^{2+}, Dy^{3+} em selante luminescente a base de soja	31
3.7.3	SrAl_2O_4: Eu^{2+}, Dy^{3+} em revestimento cimentício a base de cimento e geopolímeros	31
3.7.4	Luminescência persistente utilizando Mg_2SiO_4: Mn^{2+}; M^{3+}	32
3.7.5	Aplicação de Ag em $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$:$\text{Eu}^{2+}$, Dy^{3+} para melhora da luminescência	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	MATERIAIS E REAGENTES	33
4.2	METODOLOGIA	34
5	RESULTADOS	35
5.1	OTIMIZAÇÃO DO PÓ FOSFORESCENTE E MANTA IMPERMEABILIZANTE	35

5.2	RESULTADO VISUAL DAS AMOSTRAS	39
5.3	ESPECTROFOTOMETRIA	40
5.4	ANÁLISE DA LUMINESCENCIA E INTENSIDADE DO BRILHO RESIDUAL 42	
5.5	ANÁLISE DA DENSIDADE	44
6	CONCLUSÕES.....	45
7	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda do consumo de energia aliada ao aumento do desenvolvimento econômico e populacional, busca-se formas de energia limpa e sustentável para atingir o equilíbrio entre o que se produz e o que se consome. Desta forma torna-se necessário a busca por novas tecnologias e materiais inteligentes que possam ser utilizados como iluminação natural de ambientes. (GOLDEMBERG, 1998)

Os compostos fosforescentes são substâncias físicas capazes de absorver energia de fontes externas, armazená-la em um curto período de tempo e em seguida liberar essa energia em forma de luz visível. Estes compostos são frequentemente empregados em sinalização de sistemas de segurança, direcionamento, iluminação noturna e revestimentos de emergência (JAIN et. al. 2016).

Buscando aliar a eficiência energética e a sustentabilidade, nesta dissertação será estudado compostos fosforescentes que possam ser utilizados na construção civil, em aplicações como materiais cimentícios, adesivos selantes, impermeabilizantes entre outros.

Nesta pesquisa será realizada uma análise da revisão bibliográfica para identificação dos compostos mais utilizados, os resultados de tempo de decaimento já obtidos pelos pesquisadores anteriores e os métodos de aplicação destes compostos, para que partir desta análise seja definido qual composto e método de aplicação a se utilizar.

Nesta pesquisa serão aplicados compostos fosforescentes em uma manta impermeabilizante com o intuito de avaliar o desempenho desse material com relação a fosforescência e alteração de suas propriedades mecânicas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo estudar compostos fosforescentes e sua aplicação na construção civil. Para o desenvolvimento de testes serão aplicados compostos luminescentes de aluminato de estrôncio em manta impermeabilizante para obtenção de uma manta com fosforescência de longa duração, visando desenvolver um material com um diferencial tecnológico e com aplicação diversificada para obtenção de melhora da qualidade de segurança e conforto das pessoas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar compostos fosforescentes de aluminato de estrôncio dopados com íons de terras raras em manta impermeabilizante.
- Avaliar o desempenho da luminescência da manta impermeabilizante modificada obtida.
- Avaliar estabilidade físico-química da manta impermeabilizante.
- Avaliar as propriedades mecânicas da manta impermeabilizante modificada obtida.
- Desenvolver a otimização de uma manta impermeabilizante com características luminescentes de longa duração.

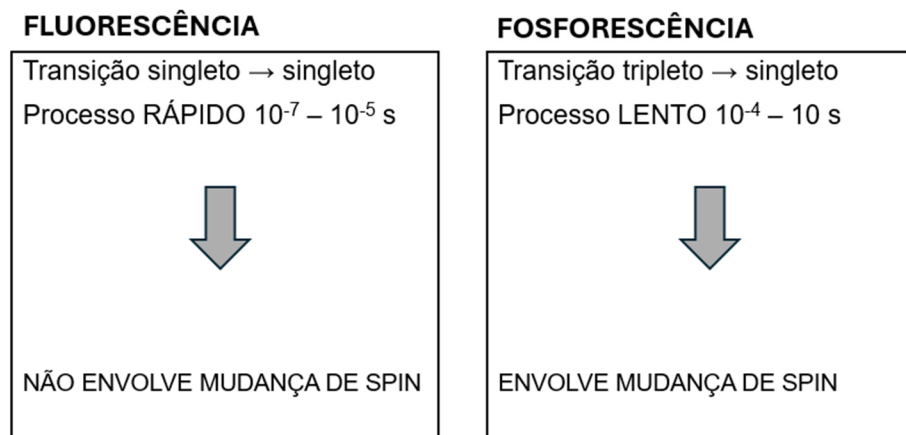
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 LUMINESCÊNCIA, FLUORÊSCENCIA E FOSFORÊSCENCIA

Com o aumento populacional e por consequência o aumento do consumo de energia e maior emissão de CO₂ na atmosfera se torna necessário cada vez mais a busca por novas tecnologias sustentáveis, que visam a redução do consumo de energia elétrica. Os produtos com fosforescência de longa duração são exemplos destes materiais tecnológicos que podem desempenhar um papel muito importante para a sustentabilidade e com baixo impacto ambiental. (GOLDEMBERG, 1998.)

A luminescência é o fenômeno de geração de luz sem calor e possui duas principais variações, a fluorescência e a fosforescência, dependendo da quantidade de tempo de luz emitida que continue a brilhar. Na fotoluminescência a excitação é feita pela absorção dos fótons, e compreende vários processos em que a luz é emitida quando elétrons passam de um estado para outro de menor energia. Conforme representado na Figura 1, a fluorescência ocorre de forma mais rápida do que a fosforescência, quando a fonte de excitação é removida, o brilho cessa em uma fração de segundo, quase que imediatamente, e a direção do spin do elétron não muda. Já na fosforescência quando a fonte de excitação é removida o brilho continua, se estendendo a minutos até várias horas, e a direção do spin do elétron pode mudar quando o elétron se move para um estado mais baixo de energia. (LAKOWICZ, 2009).

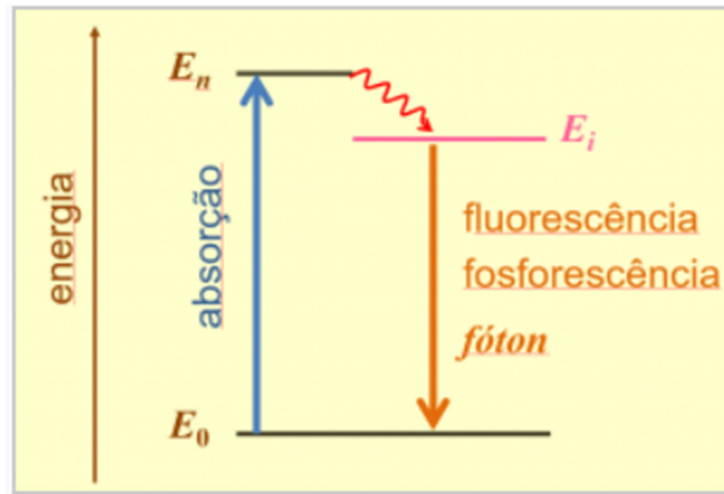
Figura 1 – Representação dos fenômenos de fluorescência e fosforescência



Fonte: Do autor, 2024.

A Figura 2 detalha os processos para realização da fluorescência ou fosforescência. Um átomo absorve um fóton (indicado pela linha azul) e muda do seu estado inicial, chamado estado fundamental (E_0), para um estado excitado, representado como E_n . Em seguida, ele retorna para um estado intermediário (E_i), por meio de um processo sem emissão de luz (indicado pela linha vermelha), ou através da emissão de um fóton. Finalmente, o átomo decai para o estado fundamental (indicado pela linha laranja), liberando um fóton no processo. Quando essa emissão de luz é rápida (na ordem dos nanossegundos), é chamada de fluorescência, enquanto se for mais lenta (na ordem dos milissegundos até horas), é conhecida como fosforescência. (LAKOWICZ, 2009).

Figura 2 – Representação do processo para realização de fluorescência e fosforescência



Fonte: Alves, 2021.

Os materiais fosforescentes são materiais que podem oferecer uma economia do consumo de energia elétrica, pois são capazes de emitir luz visível por um período prolongado após serem expostos a luz, através da fosforescência persistente. (JAIN et. al. 2016).

Ao longo da história as primeiras observações com relação a fosforescência careciam de explicações a respeito dos mecanismos de emissão luminosa e da forma que o fenômeno acontecia, e motivo de algumas substâncias serem luminescentes e outras não.

O professor e físico polonês Aleksander Jablónski em meados do século XX, desenvolveu um diagrama para descrever a absorção e emissão de luz, o “diagrama de Jablonski” como ficou conhecido, o qual contribuiu ao entendimento dos componentes que formam a matéria ao esclarecer os fenômenos de fluorescência e fosforescência de maneira simples e inovadora.

O diagrama de Jablonski mostra os diferentes estados eletrônicos de uma molécula (como os estados eletrônicos excitados e o estado eletrônico fundamental), bem como as transições entre esses estados, incluindo absorção de energia (excitação), emissão de energia (relaxamento), transferência de energia sem emissão de luz (como a transferência de energia entre moléculas em processos como a fluorescência ou a fosforescência), entre outros processos.

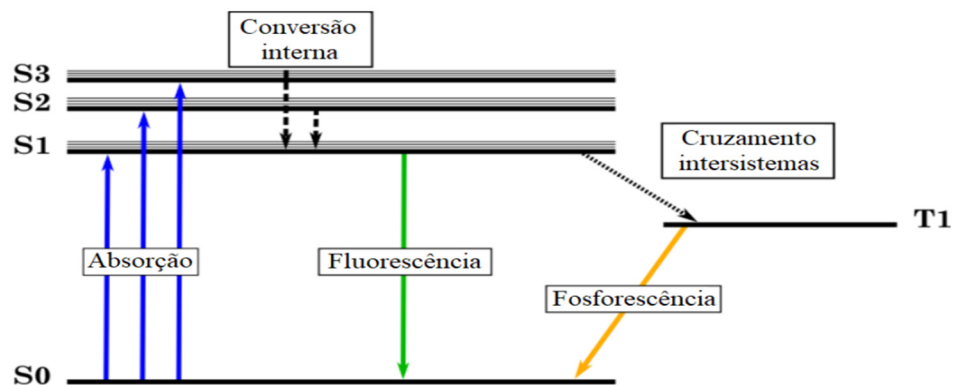
O diagrama de Perrin-Jablonski (Figura 3) mostra os processos de conversão de energia para obter o efeito de fluorescência e de fosforescência.

Os estados S_0 , S_1 , S_2 , S_3 representam os estados eletrônicos singletos fundamental, primeiro, segundo e terceiro estado de excitação, respectivamente, o

estado tripleto é representado por T_1 . Os números 0,1,2,3 etc, representam os estados vibracionais relacionados a cada estado.

A molécula absorve energia do fóton e passa do estado fundamental (S_0), para os estados excitados de maior energia, onde ocorre a conversão interna, uma transição não radiativa entre dois estados eletrônicos de mesma multiplicidade de spins, retornando ao estado excitado de menor energia (S_1), na fluorescência, ocorre emissão de um fóton a partir desse estado de energia e retorna ao estado fundamental, já na fosforescência, ocorre o cruzamento intersistema, onde há transição eletrônica levando a molécula a um estado excitado de multiplicidade de spin diferente, do estado S_1 até um estado tripleto T_1 , levando à emissão de um fóton a partir desse último estado de energia e emitindo luz após um tempo mais prolongado que na fluorescência até a molécula retornar ao estado fundamenta S_0 . (LAKOWICZ, 2010).

Figura 3 – Diagrama de Jablonski



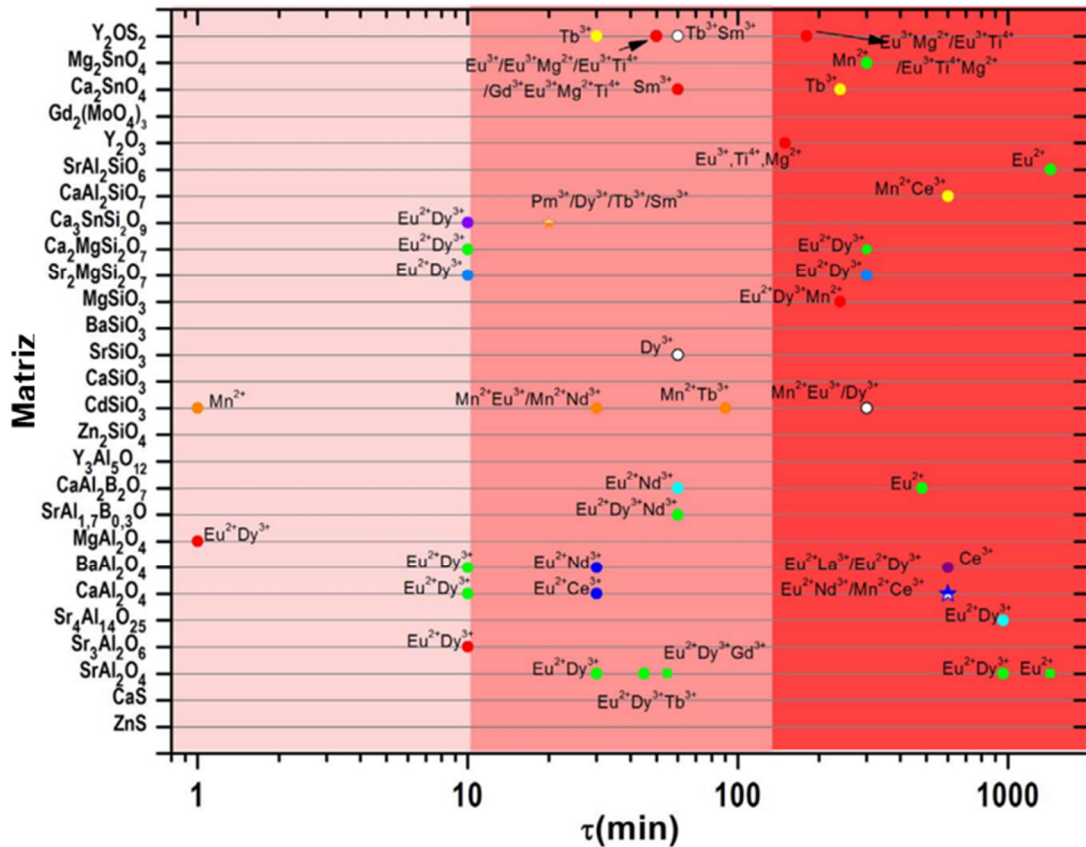
Fonte: Bagnato et al. (2023).

A fosforescência persistente é um fenômeno no qual os materiais têm a capacidade de absorvem energia luminosa, armazenar essa energia por um tempo e, em seguida, liberar a energia na forma de luz visível, mesmo quando a fonte de luz é removida por um longo período.

A busca por materiais com fosforescência persistente se deve ao fato de que esses materiais são capazes de promover segurança e visibilidade em locais escuros ou com baixa visibilidade, como quando utilizados em rodovias, equipamento de segurança, ou sinalização de emergência.

Em decorrência do composto e dos elementos químicos dopantes utilizados há a variação do tempo de luminescência, desde minutos até várias horas.

Figura 5– Tempo de decaimento dos compostos luminescentes dopados com diferentes matrizes.



Fonte: Rojas-Hernandez *et al.* (2018).

Através da análise das Figuras 4 e 5, pode-se destacar os compostos com potencial tempo de decaimento elevado, sendo CaAl₂O₄, Ca₂MgSi₂O₇ e SrAl₂O₄. Ambos dopados com íons de terras raras Eu, Dy, e possuindo comprimento de onda da luz emitida na faixa de 500 nm, resultando na emissão da cor verde. O tempo de decaimento dos compostos de CaAl₂O₄, Ca₂MgSi₂O₇ dopados com EuDy, resultaram em aproximadamente 10 minutos, já o composto de SrAl₂O₄ dopado com EuDy, obteve um tempo de decaimento bastante considerável, de aproximadamente 50 minutos.

O tempo de decaimento da fosforescência ou tempo de pós-luminescência refere-se ao intervalo durante o qual o olho humano percebe a emissão de luz após o término da excitação.

O olho humano é capaz de detectar uma faixa muito ampla de níveis de luminosidade, desde os ambientes mais escuros até os mais brilhantes. Essa capacidade é frequentemente medida em termos de "lumens" (unidade de fluxo luminoso) ou "lux" (unidade de iluminância, para descrever o iluminamento). (BEAR, 2015). A iluminação refere-se ao fluxo luminoso recebido por unidade de área sendo a menor iluminação percebida pelos olhos humanos é de 0,25 lux, enquanto o nível mais baixo de iluminação essencial para garantir a segurança no trânsito durante a noite, é de 3 lux.

Para a verificação da luminescência persistente de um material é necessário então avaliar a intensidade luminosa da superfície, sendo a luminância que corresponde a intensidade de luz emitida ou refletida por uma superfície em uma direção específica, esta medição é expressa em (cd/m^2). Segundo Hongwei Lin et al. (2023), o limite de percepção luminosa/visibilidade dos olhos humanos adaptados ao escuro é de $0,32 \text{ mcd}/\text{m}^2$.

Para que a sinalização seja eficaz, a intensidade do brilho precisa ser intensa o suficiente para que seja percebida pelas pessoas que circulam no local, também é necessário que a luz e sua intensidade sejam longas o suficiente durante o período noturno oferecendo assim segurança.

3.3 MECANISMO DE EMISSÃO PROLONGADA EM MATERIAIS FOSFORESCENTES DOPADOS COM EURÓPIO (Eu^{3+}) E DISPRÓCIO (Dy^{3+})

Neste trabalho, optou-se pela utilização do aluminato de estrôncio dopado com Európio e Disprósio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$), devido à sinergia entre esses dois dopantes: o Európio (Eu^{3+}) atua principalmente como centro emissor, enquanto o Disprósio (Dy^{3+}) funciona como armadilhador de cargas. (YAMAMOTO; MATSUZAWA, 1997).

Quando o material é excitado por radiação ultravioleta (UV) ou luz visível, os elétrons do Eu^{3+} são promovidos a níveis de energia mais elevados. Após a excitação, esses elétrons retornam ao estado fundamental por meio de transições eletrônicas do tipo $f-f$, que são parcialmente proibidas pelas regras de seleção da mecânica quântica. Como consequência, a emissão de fótons ocorre de forma lenta, resultando em um tempo de vida mais prolongado da luminescência. (YAMAMOTO; MATSUZAWA, 1997).

Por sua vez o Disprósio (Dy^{3+}), atua como um armadilhador de cargas. Durante a excitação, parte da energia é utilizada para promover elétrons para armadilhas de energia associadas ao Dy^{3+} . Esses elétrons ficam temporariamente aprisionados em estados metastáveis, e com o tempo e à temperatura ambiente retornam ao centro emissor (Eu^{3+}), reestimulando a emissão de luz. Esse mecanismo de liberação lenta dos elétrons aprisionados contribui diretamente para o prolongamento do tempo de vida da emissão luminosa. (YAMAMOTO; MATSUZAWA, 1997)

A persistência da emissão luminosa após a excitação, fenômeno conhecido como *afterglow* ou fosforescência prolongada, pode ser explicado com base no diagrama de Jablonski, adaptado para representar os processos energéticos em materiais dopados com íons terras-raras. Esse modelo fornece uma representação esquemática dos estados eletrônicos e das transições radiativas e não radiativas que ocorrem nos compostos luminescentes, conforme ilustrado na Figura 6.

No caso específico do sistema Eu^{3+}/Dy^{3+} , observa-se uma atuação conjunta entre os dois dopantes, o que resulta na prolongação da emissão luminosa mesmo após a fonte de excitação ser removida.

A excitação do material por radiação ultravioleta ou visível promove elétrons do estado fundamental (S_0) para níveis mais altos de energia (estados mais excitados), S_1 ou superiores. Em seguida, parte dos elétrons decai rapidamente por fluorescência ou fosforescência, outros, são aprisionados em níveis intermediários ou armadilhas de energia associadas ao Dy^{3+} e ocorre um processo rápido de relaxação não radiativa, denominado conversão interna, que leva os elétrons ao estado tripleto metastável (T_1). A partir desse ponto, dois mecanismos principais são responsáveis pela fosforescência:

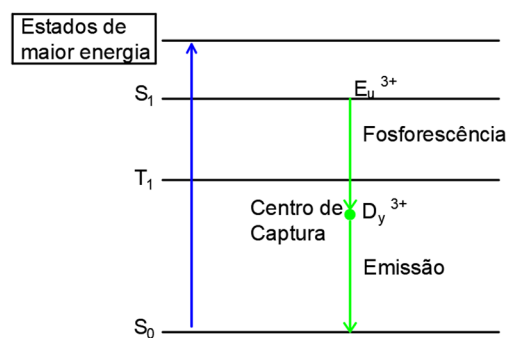
O primeiro mecanismo são as armadilhas de energia associadas ao Disprósio (Dy^{3+}) nas quais parte dos elétrons é aprisionada em defeitos estruturais na rede cristalina, como vacâncias e lacunas atômicas, que funcionam como armadilhas energéticas, favorecidas pela presença do íon Dy^{3+} contribuindo para o armazenamento e a liberação gradual de energia luminosa. (YAMAMOTO; MATSUZAWA, 1997). Os elétrons excitados permanecem temporariamente retidos em níveis de energia intermediários, sendo posteriormente liberados de forma gradual à

temperatura ambiente. Ao retornarem ao estado fundamental, ocorre a emissão de luz, caracterizando o fenômeno da fosforescência. Esse processo é ilustrado no diagrama da Figura 6, nos pontos indicados como “Centro de captura (Dy^{3+})” e “Emissão”.

O segundo mecanismo responsável pela fosforescência é o centro emissor de Európio (Eu^{3+}). Onde outra parcela dos elétrons relaxa diretamente para os níveis de energia do Eu^{3+} , promovendo transições eletrônicas do tipo f-f já mencionadas, com emissão de fótons de forma lenta e sustentada, (YAMAMOTO; MATSUZAWA, 1997). Esse mecanismo está representado na Figura 6 pelo ponto “Fosforescência”

Portanto, a presença combinada de Dy^{3+} como armadilhador de cargas e Eu^{3+} como centro emissor promove um mecanismo de recaptura e reemissão de energia que prolonga significativamente o brilho do material, mesmo na ausência de excitação contínua. Esse efeito é altamente desejável para aplicações em materiais de construção civil com função de sinalização luminosa passiva, contribuindo para segurança em edificações, especialmente em situações de emergência, além de alinhar-se a princípios de sustentabilidade e inovação tecnológica.

Figura 6 - Diagrama de Jablonski adaptado, representando os mecanismos de emissão prolongada de luz em dopados com Eu^{3+} e Dy^{3+}



Fonte: Do autor, (2025).

3.4 VANTAGENS E APLICABILIDADE DE COMPOSTOS FOSFORESCENTES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os compostos fosforescentes de longa duração vem sendo estudados e vem ganhando destaque na construção civil pelo apelo sustentável, segurança, eficiência energética, durabilidade e estética, podendo ser incorporados em diversos materiais e oferecer um design criativo e moderno.

Na Figura 7 é possível observar um projeto de auto-estrada que brilha no escuro realizado nos países baixos. A empresa responsável (Heijmans) em 2014, construiu 500 m em uma rodovia, as marcações foram realizadas com tintas fosforescentes depositadas em ranhuras após remoção de uma parte do pavimento. A empresa Heijmans afirmou que estas marcações brilharam por mais de 8 horas, e foi um grande sucesso no que tange a fosforescência, porém nestes testes em específico foram removidas após duas semanas pois não apresentaram resistência à água.

Figura 7– Auto-estradas iluminadas com materiais fosforescentes.



Fonte: Hongwei Lin *et al.* (2023).

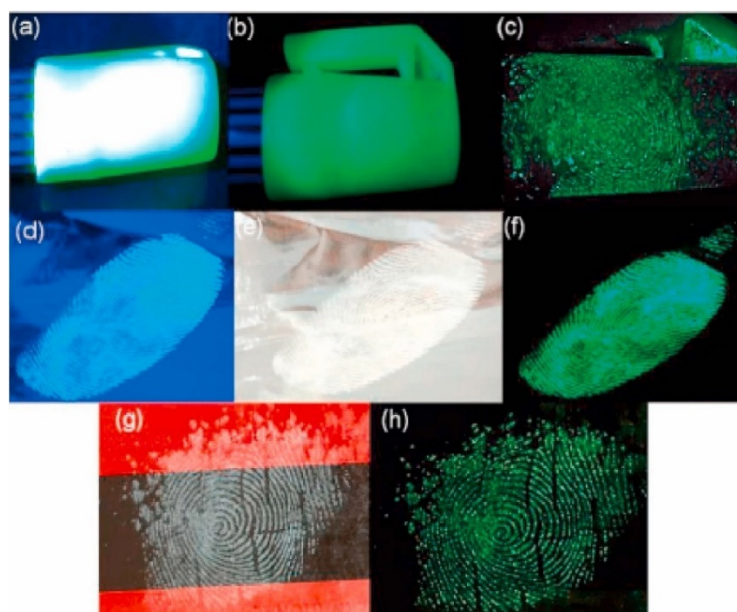
D. Chávez *et al.* (2021), analisou a capacidade de $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ com fase monoclinica para detecção de impressão digital. O que mostra eficiência nas detecções de impressões digitais em cenas de crimes. Este material foi excitado com lâmpada UV de 395 nm para revelar impressões digitais, conforme mostra a Figura 8, onde mostra oito fotografias, sendo (a) o polímero marcador fluorescente sob luz UV, (b) o polímero marcador fluorescente sob luz branca, (c) Impressão digital revelada

mostrando a fosforescência do pó SAO na superfície do polímero marcador fluorescente no escuro. (d) Folha de alumínio sob luz UV (395 nm). (e) Impressão digital revelada usando o pó $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ sob luz branca. (f) Impressão digital revelada no escuro em folha de alumínio. (g) Impressão digital revelada usando pó $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ exposto com luz branca na superfície do cartão de crédito. (h) Impressão digital revelada no escuro mostrando a fosforescência na superfície do cartão de crédito.

Na figura 8 (a), como um pó fluorescente foi aplicado em uma superfície também fluorescente, como mostrado na figura 8 (b), a impressão digital latente não foi percebida devido ao baixo contraste apresentado na imagem. (D. Chávez *et al* 2021).

De um modo geral o experimento mostrou que o pó fluorescente aplicado na superfície do cartão de crédito obteve bom desempenho e melhorou significativamente a detecção das impressões apresentando alto contraste possibilitando a detecção de linhas e detalhes bem definidos, já as superfícies do marcador fluorescente e papel alumínio precisam ser aprimoradas para que apresentem melhor desempenho, pois as linhas e detalhes das impressões não ficaram bem definidos dificultando a identificação das impressões. (D. Chávez *et al* 2021).

Figura 8 - Fotografias de impressões digitais utilizando pó fosforescente ($\text{SAO}:\text{Eu}, \text{Dy}$)



Fonte: D. Chávez *et al* (2021).

3.5 MÉTODOS DE SÍNTESE DE COMPOSTOS FOSFORESCENTES

Os métodos de síntese representam um papel fundamental ao que diz respeito ao tamanho das partículas. Hong Wei Lin et al. (2023), identifica e faz uma revisão dos principais métodos de síntese utilizados em materiais luminescentes, incluindo o método de estado sólido de alta temperatura, o método de combustão, o método de síntese hidrotérmica, o método sol-gel, a síntese de micro-ondas, o aquecimento a laser, entre outros, e afirma que embora existam muitos métodos de síntese para produzir partículas micrométricas, a melhor forma é através da reação no estado sólido e que somente os materiais sintetizados de forma convencional em altas temperaturas apresentam propriedades suficientes para aplicação tecnológica.

O $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$ pode ser sintetizado por diversos métodos, incluindo reação em estado sólido, sol-gel e combustão, permitindo a obtenção de partículas com diferentes tamanhos e morfologias. Essa versatilidade facilita sua incorporação em materiais de construção, como mantas impermeabilizantes, sem comprometer suas propriedades luminescentes (SON et al., 2009).

3.6 FATORES QUE INFLUENCIAM A FOSFORESCENCIA

A eficiência e a duração da fosforescência em materiais luminescentes são influenciadas por diversos fatores inter-relacionados que impactam diretamente o desempenho óptico dos compostos.

Entre os principais elementos que afetam esse fenômeno estão as condições de preparação e forma de aplicação, a composição dos materiais fosforescentes, base química e a proporção dos dopantes, a presença de agentes reflexivos, o tempo de exposição à fonte de excitação, bem como o tamanho das partículas do pó fosforescente. (HONG WEI LIN et al., 2023), (WENTONG WANG et al., 2023), (ANDREW WIESE et al, 2019),

A forma como esses fatores são controlados e combinados pode potencializar ou comprometer a intensidade da emissão luminosa, o tempo de decaimento do brilho residual e a estabilidade da fosforescência ao longo do tempo. Dessa forma, compreender e otimizar essas variáveis é essencial para o desenvolvimento de materiais fosforescentes com aplicações práticas na construção civil, especialmente

em soluções voltadas à sinalização de segurança, eficiência energética e inovação tecnológica.

3.6.1 PREPARAÇÃO E FORMAS DE APLICAÇÃO DO COMPOSTO

Conforme Hong Wei Lin et al. (2023) foram estudados as influências dos diferentes parâmetros de preparação e propuseram que a maior luminescência e intensidade de brilho residual, eram melhores quando preparados sob condições de atmosfera redutora, temperatura de sinterização de 1300 °C e retenção de 3 horas. O método de mistura e preparação de materiais com brilho prolongado, pode afetar a intensidade de luminescência e intensidade do brilho, por este motivo vários tipos de mistura e síntese são estudados e utilizados.

Wentong Wang et al. (2023) comparou os métodos diferentes de mistura de pó luminescente e de cura, e verificou a intensidade da luminescência bem como, a resistência das propriedades mecânicas entre outros fatores. Os métodos de mistura analisados foram pré-mistura, mistura conjunta e pós mistura e o método de cura coberto ou descoberto.

Wentong realizou a confecção das amostras utilizando cimento Portland Branco, pó luminescente com a composição $\text{SrAl}_2\text{O}_4 : \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$, e o pó reflexivo contendo como principal componente SiO_2 .

Tanto os métodos de pré-mistura, mistura conjunta e pós mistura tiveram influência nas propriedades de intensidade de luminescência.

Observou-se que o método de pré-mistura fornece a melhor intensidade de luminescência possivelmente pela ordem de hidrólise. Além disso foi possível observar que o método de cura coberto proporciona um ambiente mais uniforme para a hidratação mais completa da pasta de cimento e maior desempenho luminoso.

A intensidade de luminescência visível a olho nu atingiu duração de apenas 10 minutos. Observa-se que há uma diminuição rápida na luminescência e após atingir o tempo de 10 minutos há uma desaceleração neste decaimento, porém a partir deste tempo o brilho permanece em intensidade muito baixa (não visível a olho nu).

3.6.2 COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS FOSFORESCENTES

Em termos de composição há a influência direta do material fosforescente na determinação da intensidade de brilho. Quanto maior a pureza dos componentes luminescentes maior a intensidade de luminescência. Também o uso de quantidades apropriadas de materiais reflexivos (esferas de vidro) pode melhorar a intensidade do brilho residual.

Hong Wei Lin et al. (2023), em seu estudo a respeito das marcações rodoviárias, afirma que os primeiros materiais fosforescentes verdes persistentes foram preparados a base de sulfeto (ZnS), porém através dos avanços das pesquisas e da descoberta realizada por Matuzawa et al. (1996) sobre a eficiência de materiais à base de SrAl_2O_4 , que apresenta maior brilho e fez deixar de lado o uso de materiais à base de ZnS:Co,Cu . Dessa forma os materiais a base de aluminatos são candidatos escolhidos para este tipo de marcação, devido a uma maior eficiência quântica, uma vida útil mais longa e uma maior estabilidade química.

Wentong Wang et al. (2021), analisa a influência da distribuição do pó luminescente e da hidratação em materiais compósitos a base de cimento. Neste estudo foram aplicadas partículas de fósforo $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}/\text{Dy}^{3+}$ (pó luminescente) e esferas de vidro branca com superfície lisa refletivas (pó reflexivo), em pasta de cimento (cimento Portland). Tanto o pó luminescente quanto o cimento foram testados em diferentes concentrações. Observou-se que a distribuição do pó luminescente influencia as propriedades mecânicas dos materiais compostos à base de cimento auto luminescentes. Além disso o aumento do teor de pó luminescente pode aumentar inicialmente a resistência mecânica, mas em excesso pode haver uma redução, a faixa ideal de teor de pó luminescente é de 20 a 25% em peso. Constatou-se também que a uniformidade da distribuição do pó luminescente afeta a eficácia da luminescência do material.

O tempo de decaimento do brilho varia com a duração da iluminação que a amostra foi exposta. Quanto maior o tempo de iluminação da amostra maior o tempo de luminescência e decaimento do brilho. Também se observou que quanto maior a quantidade de pó luminescente resulta em maior tempo de decaimento.

O tempo de iluminação econômica eficiente com maior brilho inicial após irradiação é de 30 min, enquanto a iluminação da amostra por 60 min pode atingir 96,67% do brilho inicial máximo (iluminação de 240 min). O espectro de emissão ideal

é a luz amarelo-esverdeada na faixa entre 450 e 650 nm, com um valor de pico de 514 nm, e a cor é verde-amarelada, visível ao olho humano no escuro. A fonte de excitação utilizada foi uma lâmpada de arco de xenônio de 4W.

Neste estudo o tempo de decaimento de pós luminescência alcançou um brilho residual que pode atingir pelo menos 8 horas.

3.6.3 TAMANHO DAS PARTÍCULAS

Hong Wei Lin *et al.* (2023), descreve a importância do tamanho das partículas dos compostos fosforescentes, com o aumento do tamanho da partícula há o aumento da intensidade do brilho residual, porém ressalta que tamanho de partículas maiores tendem a deteriorar outras propriedades dos materiais.

Andrew Wiese *et al.* (2019), em seu estudo acerca do desenvolvimento de um selante luminescente a base de soja que possa ser aplicado na superfície do concreto, observou o mesmo fenômeno de aumento da intensidade do brilho proporcional ao aumento das partículas de aluminato de estrôncio.

3.7 ESTUDOS COM DIFERENTES APLICAÇÕES DE COMPOSTOS FOSFORESCENTES

3.7.1 SrAl₂O₄: Eu²⁺, Dy³⁺ em fibras luminescentes

Ge.M *et al.* (2012), trata da preparação e estudo da estrutura e propriedades de uma fibra luminescente de terras raras. Uma fibra funcional inovadora, denominada fibra luminescente de terras raras (ou simplesmente fibra luminescente), foi idealizada pelo autor. Ela é composta principalmente por materiais luminescentes de terras raras (SrAl₂O₄: Eu²⁺, Dy³⁺) e um polímero formador de fibra PET como matriz, combinados com pigmento inorgânico transparente e aditivos funcionais obtidos através de um processo de fiação especialmente desenvolvido. Após absorver luz visível por um período de 5 minutos, a fibra é capaz de armazenar energia luminosa, proporcionando emissão de luz na escuridão por mais de 10 horas. Esta fibra luminescente pode ser

utilizada em diversas áreas, como moda, navegação aérea, defesa, decoração, entre outros.

3.7.2 SrAl₂O₄: Eu²⁺, Dy³⁺ em selante luminescente a base de soja

Andrew Wiese *et al.* (2019), estuda o desenvolvimento de um selante luminescente a base de soja que possa ser aplicado na superfície do concreto o que pode ser útil para vedar o concreto e aumentar sua vida útil. O método de síntese utilizado envolve a adição de pigmentos luminescentes na preparação do concreto, em quantidades recomendadas de 1% a 7% em relação ao peso do cimento.

Neste estudo realizado por Andrew Wiese *et al.* (2019), foram feitos corpos de prova com uma mistura típica de argamassa à base de cimento Portland. O selante luminescente à base de soja utilizado consiste em três materiais: éster metílico de soja, poliestireno e pó de aluminato de estrôncio. Para os métodos de mistura foram testados três formas diferentes, a mistura do pó luminescente com cimento antes de misturar com a água e o agregado, a aplicação do pó luminescente com pincel na argamassa pronta, antes da pega (argamassa ainda em estado plástico) aproximadamente duas horas após o contato água-cimento, e a aplicação também com pincel na argamassa pronta depois da pega (após 28 dias). O estudo constatou que o método de mistura mais eficiente foi obtido através do método de pincelamento antes da cura, o segundo melhor método foi o de pincelamento depois da cura e o que demonstrou menor eficiência foi o método de mistura do pó luminescente com o cimento.

O experimento de Andrew Wiese *et al.* (2019) obteve um cimento que com a absorção da luz solar durante o dia, é capaz de irradiar este brilho no período noturno e permanecer iluminado por até 24 horas.

3.7.3 SrAl₂O₄: Eu²⁺, Dy³⁺ em revestimento cimentício a base de cimento e geopolímeros.

Peng Li *et al.* (2023), investigou o desempenho luminoso e de aderência de revestimentos cimentícios auto luminescentes de duas formas, à base de cimento

Portland branco e geopolímeros à base de metacaulim. O composto luminescente utilizado foi o pó fosforescente $\text{SrAl}_2\text{O}_4: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$. As variáveis estudadas foram as quantidades de pó de fósforo e o tamanho das partículas.

Peng Li *et al.* (2023), comparou uma fotografia tirada 10 minutos após a excitação, e tanto os ligantes baseados em cimento branco quanto os ligantes baseados em geopolímeros exibiram luminescência considerável. Após 3 meses de radiação solar durante a exposição ao intemperismo e reação de hidrólise no ambiente altamente alcalino dos ligantes, confirmando que os pós de fósforo tinham boa estabilidade química e estrutural.

O geopolímero apresentou menor desempenho luminoso, mas maior desempenho de ligação que o cimento branco. Porém ambos os revestimentos exibiram bom desempenho luminoso e de ligação durante a aplicação em campo.

3.7.4 Luminescência persistente utilizando $\text{Mg}_2\text{SiO}_4: \text{Mn}^{2+}; \text{M}^{3+}$

Atualmente pesquisas a respeito de materiais de luminescência persistente de longa duração com emissão na faixa espectral azul e verde são mais comuns, por esse motivo Doke, G. (2024), na busca por materiais na faixa espectral vermelha e infravermelha, sintetizou através do método de reação de estado sólido, materiais $\text{Mg}_2\text{SiO}_4: \text{Mn}^{2+}; \text{M}^{3+}$ ($\text{M}^{3+} = \text{B}^{3+}; \text{Al}^{3+}; \text{Ga}^{3+}; \text{In}^{3+}$). Os materiais quando excitados com raios X, apresentaram uma banda persistente ampla de Mn^{2+} com dois máximos em aproximadamente 625 nm e 730 nm. Após a cessação da irradiação, um afterglow de pelo menos 6 horas pôde ser observado. A pesquisa se concentra nas propriedades de armadilha dos materiais. Concluiu-se que pelo menos três níveis de armadilha discretos com energias de ativação aproximadamente entre 0,4-1,6 eV estavam presentes nas amostras. Além disso, o co-dopagem com íons $\text{Al}^{3+}; \text{Ga}^{3+}; \text{In}^{3+}$ melhorou a longevidade do material persistente $\text{Mg}_2\text{SiO}_4: \text{Mn}^{2+}$.

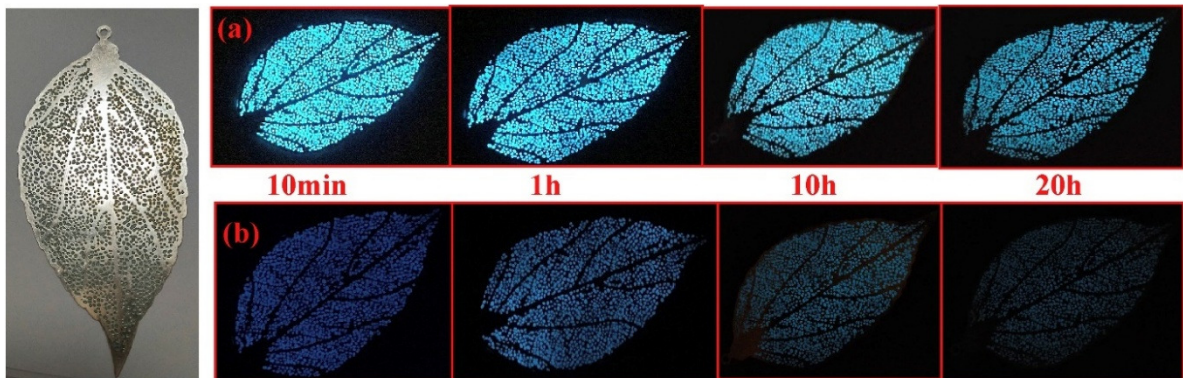
3.7.5 Aplicação de Ag em $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: \text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ para melhora da luminescência

Além do aluminato de estrôncio outros compostos fosforescentes estão sendo estudados, Hai O et al. (2020), aborda a aplicação de ressonância plasmônica de prata (Ag) para melhorar o desempenho da luminescência persistente em materiais

luminescentes persistentes. O estudo revela que a deposição de Ag na superfície de $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$, gera um efeito de plasma após ser irradiado com luz, aumentando a taxa de separação de elétrons e buracos foto-gerados, desta forma mais portadores são capturados e liberados para produzir luminescência persistente, o que resulta em uma melhoria significativa no desempenho da luminescência persistente e na faixa de resposta à luz. A ressonância plasmônica de Ag aumenta a luminosidade inicial em até 9 vezes e altera a intensidade e alcance da luz absorvida, melhorando efetivamente o desempenho da luminescência persistente, enquanto isso, o brilho do processo de decaimento lento é aumentado em mais de 2 vezes.

A pesquisa visou promover a aplicação de $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ e oferecer um método eficaz para melhorar a luminescência persistente de vários materiais luminescentes. As folhas brilhantes mostradas na Figura 9, mostra as fotografias usando (a) $\text{Ag}/\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ e (b) $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$, respectivamente, e a luminescência após serem excitadas pela luz solar por 10 minutos, os resultados mostram que com a deposição de Ag o desempenho luminescente foi bastante melhorado, o que evidencia o sucesso de sua aplicação.

Figura 9– Comparação de folhas com e sem deposição de Ag.



Fonte: Hai, O., *et al.* (2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS E REAGENTES

Neste trabalho, o reagente utilizado foi o aluminato de estrôncio dopado com európio (Eu^{3+}) e disprósio (Dy^{3+}), com fórmula química $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$ adquirido já pronto de fornecedor comercial, sem necessidade de etapas adicionais de síntese ou

purificação. Solventes como Tolueno e Etanol foram adquiridos da empresa *SERVILAB* e utilizados sem purificação prévia. Foi também utilizada uma manta impermeabilizante superflexível da empresa *BRASILFIX*, a qual também já foi fornecida pronta para uso.

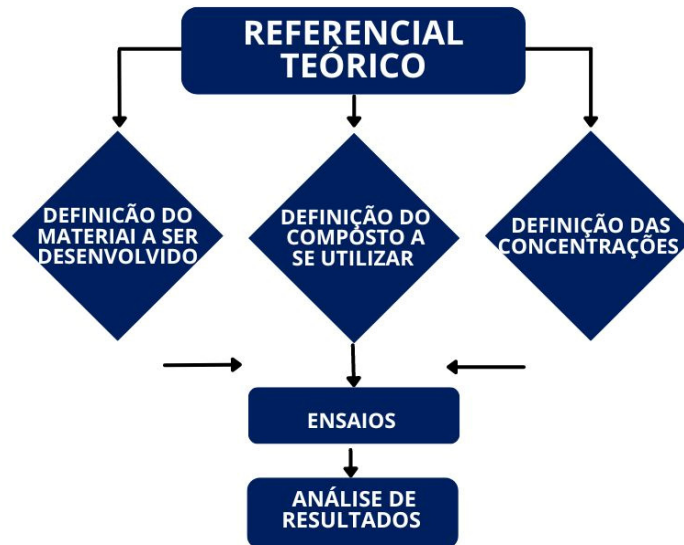
4.2 METODOLOGIA

Para a seleção dos artigos analisados foram coletados artigos que estudam compostos fosforescentes de longa duração, em materiais utilizados na construção civil, como cimentos, elementos rodoviários e argamassas, identificando as palavras-chave: fosforescência; fósforo; fotoluminescência, construção civil, longa duração, tendo como base o intervalo de tempo entre os anos de 2019 à 2024.

A partir dos resultados encontrados foi realizada uma seleção dos títulos de maior interesse de acordo com o tema da pesquisa e realizada uma análise criteriosa do conteúdo de cada artigo, extraindo as principais informações necessárias para a execução do embasamento teórico do trabalho. A base de dados utilizada foi em sua grande maioria Science Direct, também foram utilizados Scopus e Web of Sciene.

Após o referencial teórico, a etapa experimental foi realizada conforme fluxograma representado na Figura 10, onde foram realizadas as seguintes etapas: definição dos materiais utilizados, solventes e reagentes, definição das proporções do composto, ensaios e discussão dos resultados.

Figura 10 – Fluxograma das etapas experimentais.



Fonte: Do Autor, 2024.

A escolha do aluminato de estrôncio dopado com európio e disprósio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$) como composto fosforescente nesta pesquisa se deu por uma combinação de fatores que o tornam altamente atrativo para aplicações na construção civil.

A manta a ser utilizada como substrato foi uma membrana monocomponente de emulsão acrílica impermeabilizante, superflexível de secagem rápida, fácil de aplicar, pronta para o uso e aplicada a frio.

Foram confeccionadas lâminas da manta impermeabilizante, com aplicação de forma pincelada em uma peça de vidro com o auxílio de uma espátula, para posterior ensaios de luminescência e caracterização físico-química.

Para a avaliação do tempo de vida de emissão de luminescência das amostras, foram realizadas medidas de tempo de decaimento por meio do espectrofluorímetro Horiba FluoroMax+.

5 RESULTADOS

5.1 OTIMIZAÇÃO DO PÓ FOSFORESCENTE E MANTA IMPERMEABILIZANTE

Inicialmente, foi realizada a seleção do pó fosforescente a ser utilizado, seguida da etapa de otimização das proporções entre o pó fosforescente, a manta

impermeabilizante e o solvente (água). Diversas combinações foram avaliadas com o objetivo de identificar a formulação com melhor desempenho quanto à homogeneidade e eficiência luminosa.

O composto fosforescente escolhido para utilização nesta pesquisa foi o aluminato de estrôncio dopado com európio e disprósio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$), pelo fato dele ser altamente atrativo na construção civil e por uma combinação de fatores.

Embora existam outros materiais luminescentes com boa eficiência, como o sulfeto de zinco ($\text{ZnS}:\text{Cu}$) e compostos à base de terras-raras, como visto na literatura, o aluminato de estrôncio destaca-se por apresentar luminescência de longa duração, alta intensidade de emissão e boa estabilidade térmica e química. Além disso, o $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}, \text{Dy}$ é reconhecido por sua emissão verde intensa (~513 nm), o que facilita a visibilidade devido à boa percepção visual da luz verde em ambientes escuros. Essas propriedades são especialmente vantajosas para aplicações em sinalização de segurança e ambientes com baixa luminosidade. (NOR NAZIDA AWANG et al., 2016).

Outro fator determinante foi o baixo grau de toxicidade e a maior durabilidade do aluminato de estrôncio em comparação a outros compostos, o que o torna mais adequado para incorporação em materiais de construção sujeitos a intempéries e exigências de longa vida útil. (KANJANAPOKIN et al., 2023)

A presença dos íons Dy^{3+} como dopantes auxilia na criação de armadilhas eletrônicas profundas, promovendo uma persistência da luminescência superior mesmo após a interrupção da fonte de excitação. Esses aspectos, aliados à boa disponibilidade comercial e ao custo relativamente acessível, justificam a escolha do aluminato de estrôncio como base para o desenvolvimento do material luminescente desta pesquisa (LU et al., 2004).

A escolha da manta impermeabilizante a ser utilizada como substrato, se deu por suas características, por se tratar de uma membrana monocomponente de emulsão acrílica impermeabilizante, superflexível de secagem rápida, com facilidade de aplicação, pronta para o uso e com aplicação a frio. A qual possui alto rendimento, cobre as estruturas com uma proteção contínua e impermeável, proporciona excelente acabamento, alta resistência a fungos e bactérias e a pressões hidrostáticas positivas.

Pode ser aplicada em lajes de concreto ou pré-moldadas, coberturas inclinadas, marquises, telhados de fibrocimento, barro, zinco, telhas ecológicas, entre outras, calhas e canaletas de diversos substratos. Para coberturas sem trânsito.

A Figura 11 apresenta imagens do composto fosforescente selecionado para os testes (a) e da manta impermeabilizante utilizada na incorporação do material luminescente (b).

Figura 11 – a) Composto fosforescente - Aluminato de estrôncio dopado EuDy, b) manta impermeabilizante



Fonte: Do Autor, 2024.

Os primeiros testes realizados seguiram as proporções conforme apresentado na Tabela 1 onde foram avaliadas as proporções de 20%, 30% e 40% do composto fosforescente.

Tabela 1 – Otimizações das amostras (a) Mistura com 20% de composto fosforescente, (b) Mistura com 30% de fosforescente e (c) Mistura com 40% de fosforescente

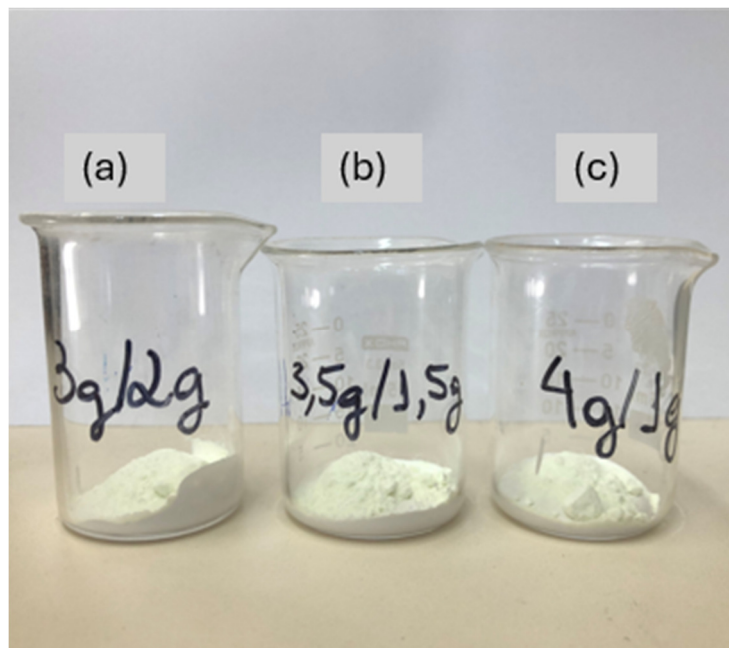
	Otimização		
	20% (a)	30% (b)	40% (c)
Manta Impermeabilizante	4,072g	3,501g	3,012 g
Composto Fosforescente	1,071g	1,502 g	2,081g

Fonte: Do autor (2024).

A Figura 12 apresenta imagens da pesagem do composto fosforescente, sendo possível visualizar a quantidade de material fosforescente adicionado na manta.

A manta possui secagem rápida, e foi constatado que o composto fosforescente absorve a água rapidamente, apresentando dificuldade de mistura devido ao endurecimento da manta, por este motivo em ambas as amostras foram adicionados 2,0 ml de H₂O a fim de melhorar a consistência do material.

Figura 12– Composto fosforescente – Aluminato de estrôncio dopado EuDy



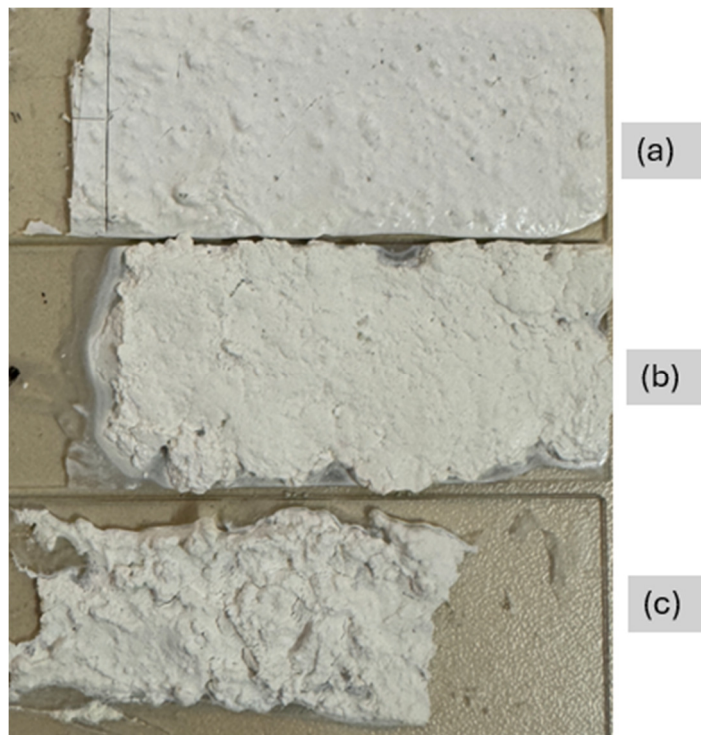
Fonte: Do Autor, 2024.

Devido a rapidez da absorção e dificuldade de mistura das amostras, além da adição de H₂O, foram realizados testes nas amostras com adição de tolueno e etanol como solventes, porém ambos apresentaram piores resultados em relação a adição de H₂O, apresentando dificuldade na homogeneidade com a manta e dificuldade na trabalhabilidade da manta.

5.2 RESULTADO VISUAL DAS AMOSTRAS

A Figura 13 representa respectivamente o resultado visual das amostras (a), (b) e (c) onde foi possível observar que a amostra (a) formou um filme com melhor trabalhabilidade e dispersão, já as amostras (b) e (c) apresentaram maior dificuldade de dispersão e formação de um filme uniforme, o que indicou necessidade de adicionar maior quantidade de água para maior uniformidade e facilidade de aplicação da mistura.

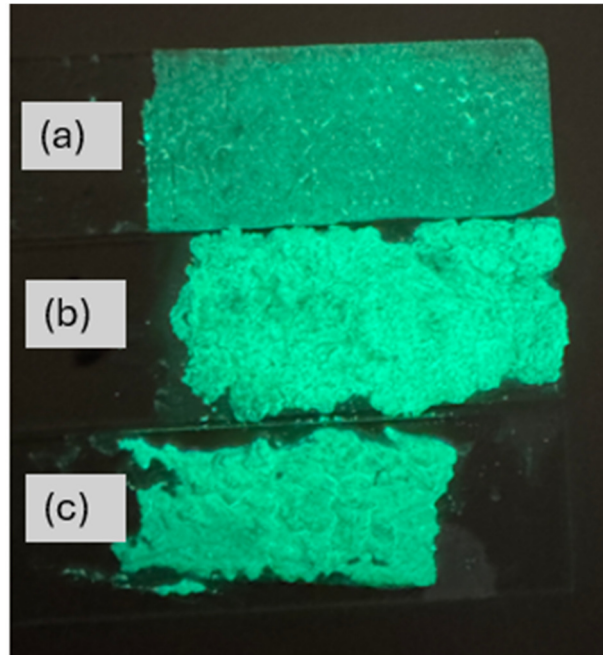
Figura 13 - Amostra com 20% de fosforescente (a), amostra com 30% de fosforescente (b), e amostra com 40% de fosforescente (c)



Fonte: Do autor (2024).

A Figura 14 representa respectivamente o resultado visual das amostras (a), (b) e (c) com a emissão da fluorescência quando expostas a luz, onde foi possível observar que as amostras emitiram luz na cor verde, e que a amostra (a) com menor quantidade de pó luminescente presente na mistura, apresentou menor emissão de luz em relação a amostra com mistura (b) e (c). Já as amostras (b) e (c), apresentaram emissões de luz semelhantes.

Figura 14 - Amostra com 20% de fosforescente (a), amostra com 30% de fosforescente (b), e amostra com 40% de fosforescente (c) com emissão de luz.



Fonte: Do autor (2024).

5.3 ESPECTROFOTOMETRIA

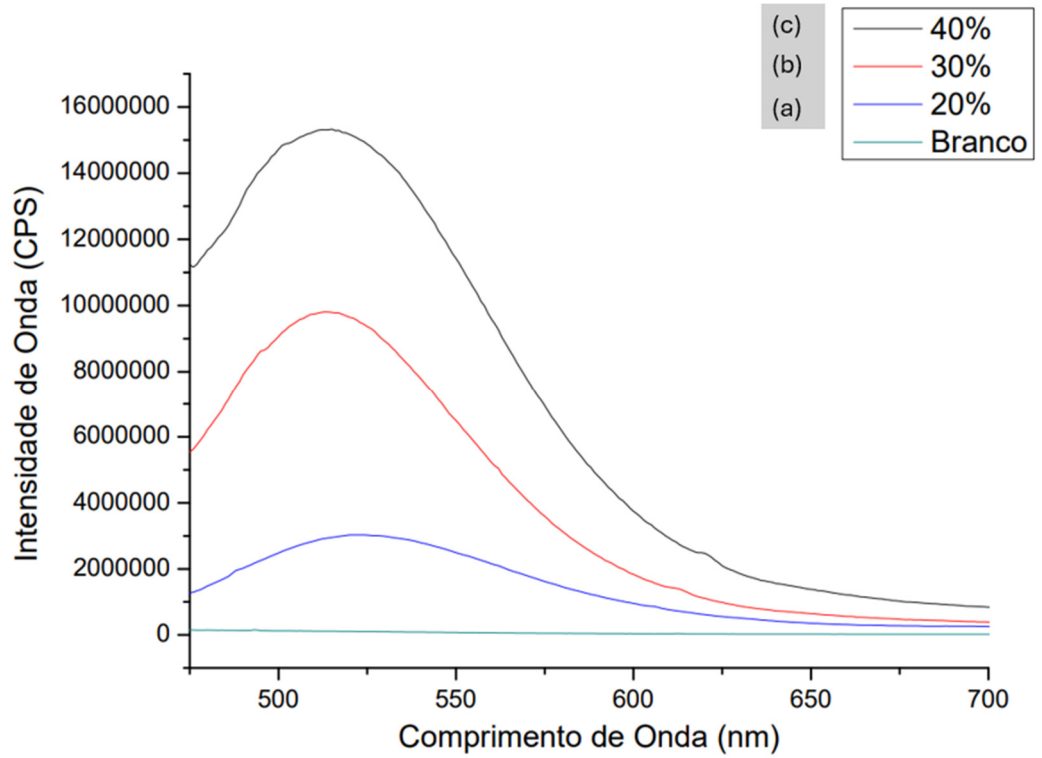
Foram realizados ensaios de espectrofotometria através do espectrofotômetro de Fluorescência HORIBA com o intuito de verificar os comprimentos de onda (λ) e intensidade de emissão das amostras.

Para a realização do ensaio além das amostras (a), (b) e (c) também foi preparada uma lâmina contendo um padrão (branco) para comparação, consistindo em apenas manta sem a adição de composto fosforescente.

A Figura 15 mostra os resultados obtidos, onde a amostra padrão (branco) não apresenta emissão de fluorescência. Já as amostras em que foram adicionados o composto fosforescente (amostras a,b e c), apresentaram emissão máxima em 513,8 (nm) em estado sólido, confirmando uma emissão na região verde do espectro, conforme indicado na Figura 16.

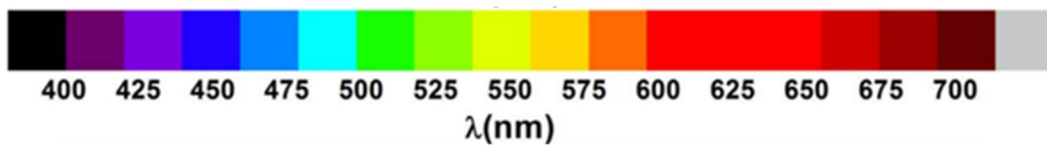
O resultado também mostrou que quanto maior a quantidade de pó fosforescente maior a intensidade de emissão e maior o percentual de rendimento quântico da fluorescência. O rendimento quântico de fluorescência (ϕ_{FL}), obteve um percentual de 22 % na amostra (a) 56 % na amostra (b), e 63 % na amostra (c).

Figura 15 - Faixa de comprimento de onda de emissão da manta com mistura de 20% de composto fosforescente (b),30% de composto fosforescente (b), e 40 % de composto fosforescente (c).



Fonte: Do autor (2024).

Figura 16 - Espectro eletromagnético com diferentes comprimentos de ondas de luz



Fonte: Rojas-Hernandez *et al.* (2018) Adaptada pelo autor.

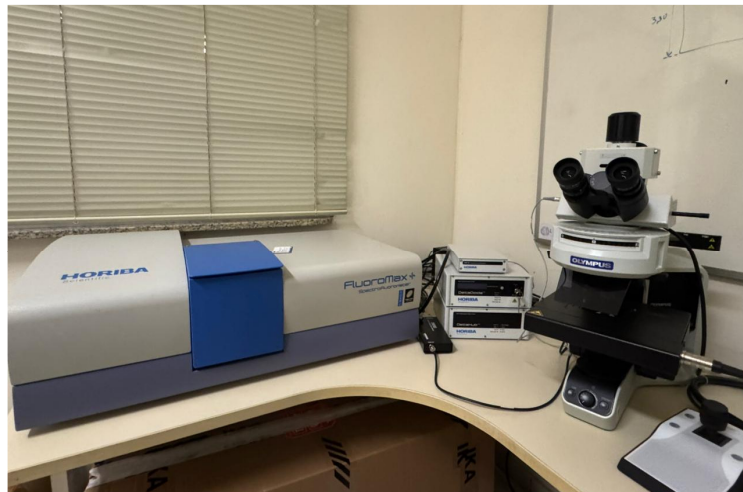
5.4 ANÁLISE DA LUMINESCENCIA E INTENSIDADE DO BRILHO RESIDUAL

A intensidade do brilho residual é um parâmetro fundamental para avaliar a visibilidade do material, sendo essencial que essa emissão luminosa seja suficientemente intensa para ser percebida a olho nu. Além disso, quanto maior o tempo de persistência da luminescência, maior é a eficiência do material em aplicações que requerem sinalização prolongada sem fonte contínua de excitação.

A caracterização do tempo de decaimento da emissão luminosa é essencial para compreender o comportamento fotofísico e o brilho residual de materiais luminescentes, especialmente aqueles com aplicação em sinalização de emergência ou marcadores de segurança. Esse parâmetro fornece informações sobre a duração da emissão após a interrupção da excitação, permitindo avaliar a eficiência e a persistência da fosforescência. (RODRIGUES et al., 2004)

Neste trabalho, para avaliar o tempo de vida de emissão de luminescência das amostras, foram realizadas medidas de tempo de decaimento por meio do espectrofluorímetro Horiba FluoroMax+ (Figura 17), equipamento de alta sensibilidade capaz de detectar emissões em diferentes escalas de tempo, com precisão espectral adequada para compostos dopados com íons terras-raras. O experimento consistiu na excitação da amostra em um comprimento de onda específico (365 nm), seguido pelo monitoramento da intensidade de emissão ao longo do tempo. Esses dados permitem a modelagem da curva de decaimento e a extração de parâmetros como a constante de tempo e a meia-vida da emissão.

Figura 17 – Espectrofluorímetro Horiba FluoroMax+



Fonte: Do autor, (2025).

A curva de decaimento do brilho residual tem papel importante para verificação da influência da quantidade de pó luminescente adicionado em relação a eficiência de iluminância da amostra. Para isto, utilizou-se o comprimento de onda de excitação que gerou a maior intensidade de emissão, de acordo com o espectro de emissão. A excitação utilizando uma fonte de luz ultravioleta (UV) de 365 nm, foi mantida durante 300 segundos e, cessada a excitação, a emissão foi registrada em função do tempo. Destes resultados foi possível extrair os valores dos tempos de decaimento típicos dos processos luminescentes.

A Figura 18 apresenta os resultados de tempo de decaimento de luminescência do pó fosforescente, da amostra C (manta impermeabilizante com adição de 40% de fosforescente) e da amostra branco (sem adição de composto fosforescente), respectivamente.

A amostra contendo apenas o pó luminescente apresentou um decaimento total de 1200 segundos após retirada a excitação.

O rápido decaimento inicial se deveu principalmente à emissão dos íons de Eu^{2+} , devido a transição ser permitida pelas regras de seleção espectroscópicas.

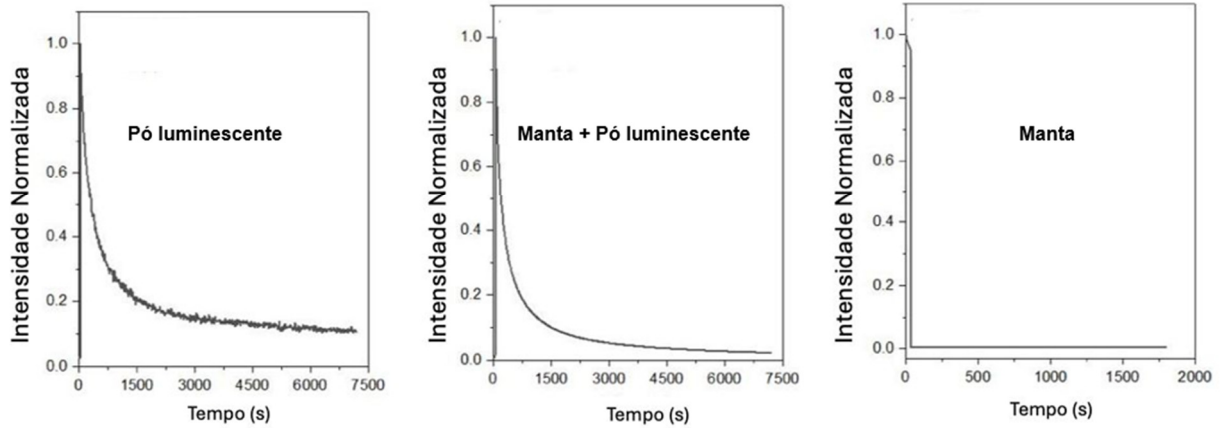
A emissão prolongada observada nos compostos dopados, que pode ser visto por meio da curva, se relaciona à criação de armadilhas eletrônicas mais profundas, favorecidas pela presença dos íons Dy^{3+} . Esses defeitos estruturais funcionam como reservatórios temporários de carga, retardando a recombinação e sustentando a luminescência. (QIU et al., 2007).

Já a amostra da manta impermeabilizante contendo o pó luminescente (40%), apresentou comportamento semelhante indicando um rápido decaimento inicial e após um prolongamento da emissão devido presença dos íons Dy^{3+} , indicando um tempo de decaimento de 810 segundos.

A amostra padrão sem adição de composto fosforescente, não apresentou propriedade de luminescência persistente, onde pode-se observar que após cessar a fonte de excitação a emissão caiu completamente sem apresentar emissão de luz (DOS; VALERIO, 2017).

A análise dos resultados obtidos contribui para a compreensão dos mecanismos de armazenamento e liberação de energia no material estudado, além de permitir a comparação com dados da literatura quanto à eficiência e estabilidade da luminescência.

Figura 18 – Tempo de decaimento de luminescência das amostras (Respectivamente: Pó luminescente, manta impermeabilizante + pó luminescente e manta impermeabilizante)

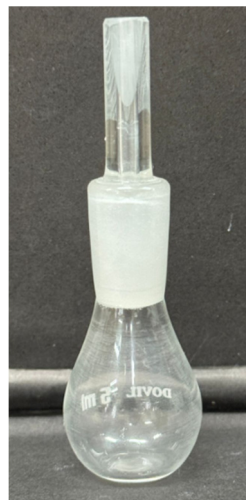


Fonte: Do autor (2025).

5.5 ANÁLISE DA DENSIDADE

Uma característica importante da manta impermeabilizante é a facilidade de aplicação e para tanto a densidade está diretamente relacionada com esta característica. Por este motivo para a caracterização físico-química do material foi realizado o ensaio de densidade do material manta impermeabilizante padrão branca, e da manta modificada, com o auxílio de um picnômetro de 5 ml, conforme Figura 20.

Figura 19- Picnômetro com capacidade de 5ml



Fonte: Do autor (2024).

A amostra padrão branca obteve a densidade de 7,86354 g/ml, já a manta impermeabilizante modificada com a adição do composto fosforescente obteve a densidade de 8,87350 g/ml. O que explica a piora na trabalhabilidade do material, devido ao aumento significativo da sua massa específica e maior dificuldade de aplicação.

6 CONCLUSÕES

Considerando a crescente demanda por soluções construtivas sustentáveis e eficientes do ponto de vista energético, esta pesquisa teve como propósito investigar a viabilidade técnica da incorporação de compostos fosforescentes em mantas impermeabilizantes, com foco no aluminato de estrôncio dopado com európio e disprósio. O estudo foi motivado pelos avanços apresentados no referencial científico, que apontam os aluminatos como materiais luminescentes altamente eficientes, com elevada estabilidade térmica e química, longa persistência do brilho e elevada intensidade de emissão, especialmente quando comparados a compostos baseados em sulfetos.

O levantamento bibliográfico evidenciou também que fatores como a atmosfera de síntese, o tempo e a temperatura de sinterização influenciam diretamente nas propriedades fotoluminescentes do material, sendo as melhores condições associadas à sinterização a 1300 °C por três horas em atmosfera redutora. Essas informações foram fundamentais para a compreensão do comportamento do pó luminescente incorporado à matriz testada, ainda que, neste estudo, tenha-se optado pelo uso de aluminato comercial previamente preparado.

Foram formuladas misturas contendo diferentes proporções de pó luminescente, utilizando-se inicialmente água como solvente — que, apesar de absorvida com facilidade pela manta impermeabilizante, mostrou-se mais adequada do que o tolueno e o etanol, testados como alternativa. Os ensaios físico-químicos, ópticos e de trabalhabilidade permitiram uma avaliação abrangente do desempenho do material desenvolvido. Os testes realizados permitiram identificar que a manta impermeabilizante com proporção de 20% de pó fosforescente apresentou melhor trabalhabilidade e formação de filme uniforme, enquanto a manta impermeabilizante

com proporção de 40% resultou em maior emissão de luz e tempo de decaimento mais prolongado.

A análise espectrofotométrica confirmou a emissão fluorescente na faixa verde do espectro (513,8 nm), característica dos compostos de SrAl_2O_4 e os ensaios de decaimento evidenciaram a eficácia da adição do composto fosforescente na manta impermeabilizante, conferindo propriedades luminescentes mesmo após curtos períodos de excitação, observou-se que, na amostra contendo 40% do composto, uma excitação rápida de 300 segundos resultou em um tempo de decaimento de 810 segundos

Portanto, a incorporação de 40% de aluminato de estrôncio dopado na manta impermeabilizante se mostrou promissora para aplicações que demandem visibilidade em condições de baixa luminosidade, como rotas de fuga e sinalizações de segurança passiva. No entanto, essa proporção comprometeu a trabalhabilidade do produto, indicando a necessidade de futuras otimizações na formulação para garantir o equilíbrio entre desempenho luminescente e aplicabilidade prática. Os resultados obtidos oferecem base sólida para o desenvolvimento de novos materiais inteligentes aplicáveis à construção civil, aliando inovação tecnológica, estética e segurança com princípios de sustentabilidade e eficiência energética.

7 REFERÊNCIAS

ALVES Elmo Salomão, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. 20. **Fluorescência e Fosforescência. Demonstrações de Física**, [S. l.], 2021. Disponível em: <http://demonstracoes.fisica.ufmg.br/artigos/ver/109/20.-Fluorescencia-e-fosforescencia>. Acesso em: 13 maio 2024.

ANDRE, J., & Owens, D. A. (2001). **The Twilight Envelope: A User-Centered Approach to Describing Roadway Illumination at Night**. *Human Factors*, 43(4), 620-630. <https://doi.org/10.1518/001872001775870331>.

BAGNATO, V. S.; REQUENA, M. B. **Terapia fotodinâmica**. São Carlos: Even3 Publicações Editora, 2023. 312 p. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/terapia-fotodinamica-dermatologica-programa-tfdbrasil-309087>. Acesso em: 19 maio 2025.

BI, Y. et al. Preparation and characterization of luminescent road-marking paint. **International journal of pavement research and technology**, v. 14, n. 2, p. 252–258, 23 set. 2020.

BEAR, M. F., CONNORS, B., & PARADISO, M. (2015). **Neuroscience: Exploring the brain** (4º ed). Lippincott Williams and Wilkins.

CHÁVEZ, D. et al. A review of phosphorescent and fluorescent phosphors for fingerprint detection. **Ceramics International**, set. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.259>

DOKE, G. (2024). **Phosphorescent compounds: Understanding persistent luminescence**. *Journal of Luminescence*, 245, 118831. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118831>. Acesso em: 23/04/2024

DOS, M.; VALERIO, G. Sinterização a laser do aluminato de estrôncio dopado via sol-gel modificado para aplicação como pigmento cerâmico. **Cerâmica**, v. 63, n. 365, p. 90–98, 1 mar. 2017.

GE M, GUO X, YAN Y. **Preparação e estudo da estrutura e propriedades da fibra luminescente de terras raras**. Revista de Pesquisa Têxtil. 2012;82(7):677-684. doi: 10.1177/0040517511429606.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1998.

Hai, O., Yang, E., Li, D., Bai, W., Ren, Q., & Wu, X. (2020). **Plasma effect : A simple method for improving the persistent luminescence and light response range of persistent luminescent materials**. Journal of Luminescence, 217(116785), 116785. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116785>.

HONGWEI LIN, FENG CHEN, HONGCHAO ZHANG, **Active luminous road markings: A comprehensive review of technologies, materials, and challenges** Construction and Building Materials, Volume 363, 2023.

HUANG, Y. et al. Smart Mechanoluminescent Phosphors: A Review of Strontium-Aluminate-Based Materials, Properties, and Their Advanced Application Technologies. *Advanced Science*, Weinheim: Wiley-VCH, v. 10, n. 6, 2204925, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.202204925>. Acesso em: 21 maio 2025.

INSTITUTO TFD-BRASIL. **Terapia Fotodinâmica Dermatológica: Programa TFD-Brasil**. [s.d.]. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/terapia-fotodinamica-dermatologica-programa-tfdbrasil-309087>. Acesso em: 19 maio 2025.

JAIN, A., Kumar, A., Dhoble, S. J., & Peshwe, D. R. (2016). **Persistent luminescence: An insight**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65, 135–153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.081>

KANJANAPOKIN, C. et al. Possibility to Apply Strontium Aluminate to Produce Light-Emitting Plants: Efficiency and Safety. **Chemistry & Biodiversity**, v. 20, n. 8, 12 jul. 2023.

LAKOWICZ, J. R. **Principles of fluorescence spectroscopy**. 3. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2010.

LU, Y. et al. SrAl₂O₄: Eu²⁺, Dy³⁺ phosphors derived from a new sol–gel route. **Microelectronics Journal**, v. 35, n. 4, p. 379–382, abr. 2004.

MATSUZAWA, T. et al. A New Long Phosphorescent Phosphor with High Brightness, SrAl₂O₄: Eu²⁺, Dy³⁺. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 143, n. 8, p. 2670–2673, 1 ago. 1996.

NOR NAZIDA AWANG et al. Luminescent Properties of SrAl₂O₄ Activated Eu²⁺, Dy³⁺ for Transparent Glaze Ceramics. **Springer eBooks**, p. 51–59, 1 jan. 2016.

QIU, Z. et al. Combustion synthesis of long-persistent luminescent SrAl₂O₄: Eu²⁺, R³⁺ (M=Sr, Ba, Ca, R=Dy, Nd and La) nanoparticles and luminescence mechanism research. **Acta Materialia**, v. 55, n. 8, p. 2615–2620, maio 2007.

RODRIGUES, P. et al. Fotoluminescência em materiais com desordem estrutural. **Cerâmica**, v. 50, n. 314, p. 138–144, 1 jun. 2004.

ROJAS-HERNANDEZ, R. E. et al. Designing nanostructured strontium aluminate particles with high luminescence properties. **Journal of Materials Chemistry C**, v. 3, n. 6, p. 1268–1276, 1 jan. 2015.

ROJAS-HERNANDEZ, R. E. et al. Long lasting phosphors: SrAl₂O₄:Eu, Dy as the most studied material. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2759–2770, 1 jan. 2018.

SON, N. M. et al. Synthesis of SrAl₂O₄: Eu²⁺Dy³⁺ phosphorescence nanosized powder by combustion method and its optical properties. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 187, p. 012017, 1 set. 2009.

TANG, X. et al. Evaluation of SrAl₂O₄:Eu, Dy phosphor for potential applications in thermoluminescent dosimetry. **Journal of Applied Clinical Medical Physics**, v. 22, n. 5, p. 191–197, 1 maio 2021.

VALEUR, B. (2002) **Molecular Fluorescence: Principles and Applications**. Wiley-VCH, Weinheim.

VAN DEN EECKHOUT, K.; SMET, P. F.; POELMAN, D. Persistent Luminescence in Eu²⁺-Doped Compounds: A Review. **Materials**, v. 3, n. 4, p. 2536–2566, 6 abr. 2010.

WANG, L. et al. One pot synthesis of ultrathin boron nitride nanosheet-supported nanoscale zerovalent iron for rapid debromination of polybrominated diphenyl ethers. **Journal of materials chemistry. A, Materials for energy and sustainability**, v. 1, n. 21, p. 6379–6379, 1 jan. 2013.

WENTONG WANG, AIMIN SHA, ZHEN LU, DONGDONG YUAN, WEI JIANG, ZHUANGZHUANG LIU, **Cement filled with phosphorescent materials for pavement: Afterglow decay mechanism and properties**, Construction and Building Materials, Volume 284, 2021.

WENTONG WANG, WENXIU JIAO, AIMIN SHA, XINZHOU LI, WEI JIANG, DONGDONG YUAN, **Study on the mechanics and functionalities of self-luminous cement-based materials with energy storage and slow release properties**, Solar Energy, Volume 259, 2023, Pages 72-85.

WIESE, A., WASHINGTON, T., TAO, B., & WEISS, W. J. (2015). **Assessing Performance of Glow-in-the-Dark Concrete**. Transportation Research Record, 2508(1), 31-38. <https://doi.org/10.3141/2508-04>.

YAMAMOTO, H.; MATSUZAWA, T. Mechanism of long phosphorescence of SrAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺ and CaAl₂O₄:Eu²⁺, Nd³⁺. **Journal of Luminescence**, v. 72-74, p. 287–289, jun. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(97\)00012-4](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(97)00012-4)

Y. Lee, S. Kim, H. Kim. **Determination of Optimal Mixing Ratio of Phosphorescent Pigment to Develop Phosphorescent Paint for Road Line Marking**, International Journal of Highway Engineering, 17 (5) (2015), pp. 67-73.