

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JÚLIA TONET

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE INCORPORAÇÃO SUPERFICIAL DE
PÓ LUMINESCENTE EM ARGAMASSA PARA CONCRETO**

CAXIAS DO SUL

2019

JÚLIA TONET

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE INCORPORAÇÃO SUPERFICIAL DE
PÓ LUMINESCENTE EM ARGAMASSA PARA CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado como parte dos requisitos para obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Civil sob a orientação da prof. Dra Janete Eunice Zorzi e a coordenação do prof. M.Sc Matheus Lemos Nogueira.

CAXIAS DO SUL

2019

JÚLIA TONET

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE INCORPORAÇÃO SUPERFICIAL DE
PÓ LUMINESCENTE EM ARGAMASSA PARA CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado como parte dos requisitos para
obtenção da aprovação na disciplina de
Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia
Civil sob a orientação da prof. Dra Janete
Eunice Zorzi e a coordenação do prof. M.Sc
Matheus Lemos Nogueira.

Aprovada em __/__/2019

Banca Examinadora

Profa Dra Janete Eunice Zorzi

Universidade de Caxias do Sul - UCS

Profa M.Sc Muriel Scopel Froener

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof M.Sc Maurício Schafer

Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

Os materiais luminescentes adquiriram um nicho no mercado atual, sendo utilizados em interruptores, pinturas de segurança, brinquedos, dentre outros. Linhas de pesquisa desenvolvidas estudam a aplicação desses materiais para produção de concretos luminosos com fins estéticos e inovadores. O presente trabalho analisa três diferentes métodos de incorporação superficial de materiais luminescentes em uma argamassa de concreto convencional, visando obter um produto final que emita brilho pelo maior tempo possível sem alterar significativamente a resistência da argamassa. Foi realizada a caracterização de diferentes materiais luminescentes para escolha do mais adequado, através de ensaios de emissão e decaimento luminoso. O material escolhido foi utilizado para preparação de vidro cerâmico luminescente e resina acrílica luminescente, na proporção de 10% em massa. Foram realizadas moldagens de corpos de prova cilíndricos para ensaios de resistência à compressão, com diferentes métodos de aplicação do material, que incluem pincelamento de resina acrílica luminescente no estado fresco, no estado endurecido, e inserção pontual de vidro cerâmico luminescente, bem como a moldagem de corpos de prova prismáticos para ensaio de decaimento luminoso. Os ensaios realizados e o cálculo de viabilidade econômica indicam que o método mais adequado é o pincelamento de resina acrílica luminescente no estado fresco.

Palavras chave: Luminescência, Argamassa, Taxa de decaimento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração das bandas em um material isolante.....	8
Figura 2 – Esquema de trocas entre bandas.....	9
Figura 3 – Matrizes e dopantes	10
Figura 4 – Tempo de decaimento de diferentes matrizes e dopantes.....	11
Figura 5 – Difração de raio x para aluminatos de estrôncio.....	12
Figura 6 – Comparação entre corpos de prova com dióxido de silício	14
Figura 7 – Resultados de luminescência para selante polimérico a) com diferentes espessuras e b) em diferentes estágios de cura do concreto	15
Figura 8 – Fluxograma de atividades.....	18
Figura 9 – Ensaio de espectrofotometria	19
Figura 10 – Espectrofotometria para lâmpada de led-UV	19
Figura 11 – Espectrofotometria para aluminatos de estrôncio	20
Figura 12 – Espectrofotometria para sulfetos de zinco	21
Figura 13 – Aparelho Varian para ensaio de decaimento luminoso	22
Figura 14 – Gráficos de luminescência para aluminato de estrôncio.....	23
Figura 15 – Gráficos de luminescência para sulfetos de zinco	24
Figura 16 – Gráfico de luminescência para pó de vidrado cerâmico com aluminato de estrôncio azul	26
Figura 17 – Vidrado cerâmico com material luminescente	27
Figura 18 – Choque térmico em material fundido	28
Figura 19 – Pó de vidrado cerâmico com material luminescente.....	28
Figura 20 – Ensaio de consistência de argamassa	30
Figura 21 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos.....	31
Figura 22 – Corpos de prova com aplicação de resina acrílica com material luminescente.....	32
Figura 23 – Corpo de prova com aplicação de vidrado cerâmico com material luminescente.....	33
Figura 24– Corpos de prova cilíndricos para ensaio de resistência à compressão	34
Figura 25 – Corpo de prova de argamassa com vidrado cerâmico luminescente	36
Figura 26 – Resultados de luminescência para corpos de prova com aplicação de resina acrílica luminescente nos estados fresco e endurecido	37

Figura 27 – Resultado de luminescência para corpo de prova com aplicação de vidrado cerâmico luminescente	38
Figura 28 – Resistências à compressão aos 7 e 21 dias de idade	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempos de decaimentos para aluminatos	25
Tabela 2 - Tempos de decaimentos para vidro cerâmico com aluminato de estrôncio azul.....	26
Tabela 3 – Traço de argamassa utilizado.....	29
Tabela 4 – Medições de consistência de argamassa.....	30
Tabela 5 – Tempos de decaimentos para argamassas com aplicação de material luminescente	38
Tabela 6 - Valores de insumos	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 OBJETIVO PRINCIPAL	7
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
1.3 DELIMITAÇÕES	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 MATERIAIS LUMINESCENTES	8
2.2 CARACTERÍSTICAS E APELO COMERCIAL.....	11
2.3 APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL.....	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 MATERIAIS.....	17
3.2 MÉTODOS.....	17
3.2.1 Caracterização dos materiais luminescentes	18
3.2.1.1 Espectrofotometria.....	18
3.2.1.2 Ensaios de luminescência	21
3.2.2 Preparação dos corpos de prova	27
3.2.2.1 Preparação do vidro cerâmico com material luminescente.....	27
3.2.2.2 Definição do traço e caracterização da argamassa	29
3.2.2.3 Moldagem dos corpos de prova.....	30
3.2.3 Caracterização dos corpos de prova	33
3.2.3.1 Luminescência.....	33
3.2.3.2 Resistência à compressão.....	34
3.2.4 Verificação de viabilidade econômica	35
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	36
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	36
4.1.1 Ensaios de luminescência nas argamassas	36
4.1.2 Resistência à compressão	39
4.2 VERIFICAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	40
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS.....	43
6 REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os materiais luminescentes vêm ganhando cada vez mais espaço no mercado. Suas propriedades luminosas adquiriram um nicho na indústria luminotécnica, bem como em brinquedos e itens de sinalização (Lisensky, Patel e Reich, 1996). Recentemente, vem sido estudada a possibilidade de incorporação desses materiais a plásticos, polímeros e concretos.

A seleção disponível desses materiais no mercado é muito abrangente, apresentando grandes variações no preço e na qualidade do produto. Pesquisadores como Rojas-Hernandez *et al.* (2018) estudaram as diferentes características dos materiais luminescentes, bem como técnicas para aumentar a sua intensidade e duração de brilho. Além disso, Getz *et al.* (2017) também verificaram as variáveis que afetam as propriedades luminosas desses materiais, tais como calor, contato direto com água e interação com outros materiais.

No que se refere aos concretos e argamassas, existe a possibilidade de incorporar componentes luminescentes que armazenem energia durante o dia e liberem energia luminosa por tempo prolongado durante a noite. Os concretos e argamassas luminescentes podem ter aplicações em diversos campos, tais como iluminação de emergência de baixa luminosidade, indicações luminosas e paisagismo decorativo, e atendem principalmente a critérios estéticos e funcionais em projetos inovadores.

No ramo da Engenharia Civil, a maioria dos estudos envolvendo a incorporação de materiais luminescentes em concreto abrangem a adição direta do pó na mistura de concreto convencional, o que segundo Gao *et al.* (2018) resulta no comprometimento da resistência mecânica do mesmo. Portanto, dentro desse contexto, o presente trabalho visa o estudo de métodos alternativos para produção de uma argamassa de concreto luminescente, bem como um estudo de viabilidade econômica do melhor método.

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal do presente trabalho é identificar o melhor método de incorporação de um material luminescente para produzir uma argamassa de concreto luminescente.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Identificar o melhor método de incorporação deste material a uma argamassa de concreto convencional;
- b) Analisar a influência do material luminescente na resistência à compressão da argamassa de concreto;
- c) Verificar a viabilidade econômica de produção de um concreto luminescente.

1.3 DELIMITAÇÕES

- a) Escolher um material que produza luminescência intensa e pelo maior tempo possível para desenvolvimento do projeto.

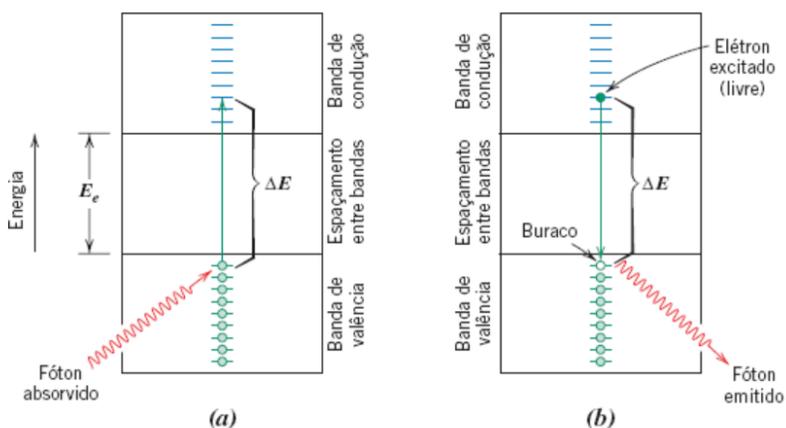
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica, são apresentados todos os estudos pertinentes ao embasamento teórico do presente projeto. Buscou-se desde informações técnicas e características dos materiais utilizados, até projetos de pesquisa de aplicação dos mesmos, e os estudos citados são usados como base para desenvolvimento da metodologia e análise dos resultados encontrados.

2.1 MATERIAIS LUMINESCENTES

Por definição, um material luminescente é um material que possui a capacidade de absorver energia e reemitir-na na forma de luz visível. Segundo Callister e Rethwisch (2016, p. 785), a luminescência possui diferentes classificações dependendo do tempo entre os eventos de absorção e a reemissão, sendo considerado fluorescente o material que consegue reemitir luz visível por menos de 1 segundo, e fosforescente para tempos mais longos. O fenômeno da absorção de energia ocorre quando um elétron passa para um estado de energia chamado excitado, ou seja, de maior energia. Quando esse elétron retorna para um estado de menor energia, ocorre a emissão da luz visível. Tudo isso ocorre devido à troca entre bandas de valência e condução, que pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 – Ilustração das bandas em um material isolante

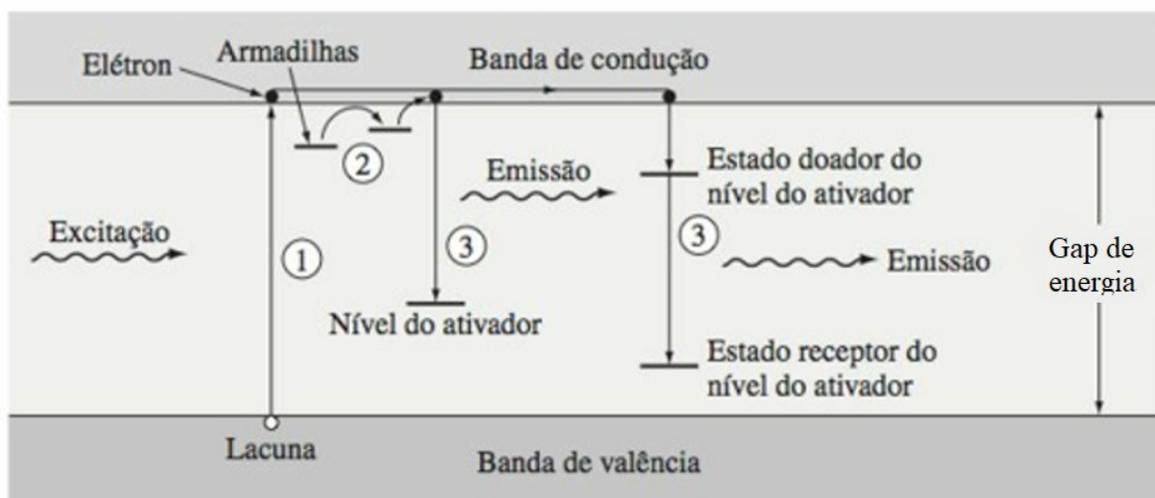


Fonte: Callister e Rethwisch (2016).

O fenômeno da excitação de elétrons envolve os materiais semicondutores com espaçamentos entre bandas com valores de 1,8 a 3,1 eV, que são os valores de energia para a luz visível. É importante notar que não é necessário que a reemissão de luz ocorra na mesma frequência em que ocorreu a absorção, e isso resulta em diferentes cores que dependem das frequências dos feixes transmitidos e reemitidos (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Quando um material possui características luminescentes, normalmente é composto por uma matriz inorgânica e um íon dopante, geralmente da série dos lantanídeos ou um metal de transição. Dependendo das características do material dopante, ele exercerá uma das duas funções dentro da matriz: emissor ou armadilha (Figura 2). O dopante com função de emissor continuará emitindo radiação para a matriz inorgânica por um determinado tempo após a fonte de energia ser esgotada ou removida. Em contrapartida, o dopante armadilha tem a capacidade de armazenar certa parte da energia que foi entregue ao material (ROJAS-HERNANDEZ *et al.*, 2018). Os elétrons podem ser excitados termicamente de uma armadilha a outra ou para o interior da banda de condução, ou podem cair para níveis superiores de ativadores (doadores) e, em seguida, para níveis mais baixos de receptores, emitindo luz visível (Smith e Hashemi, 2012).

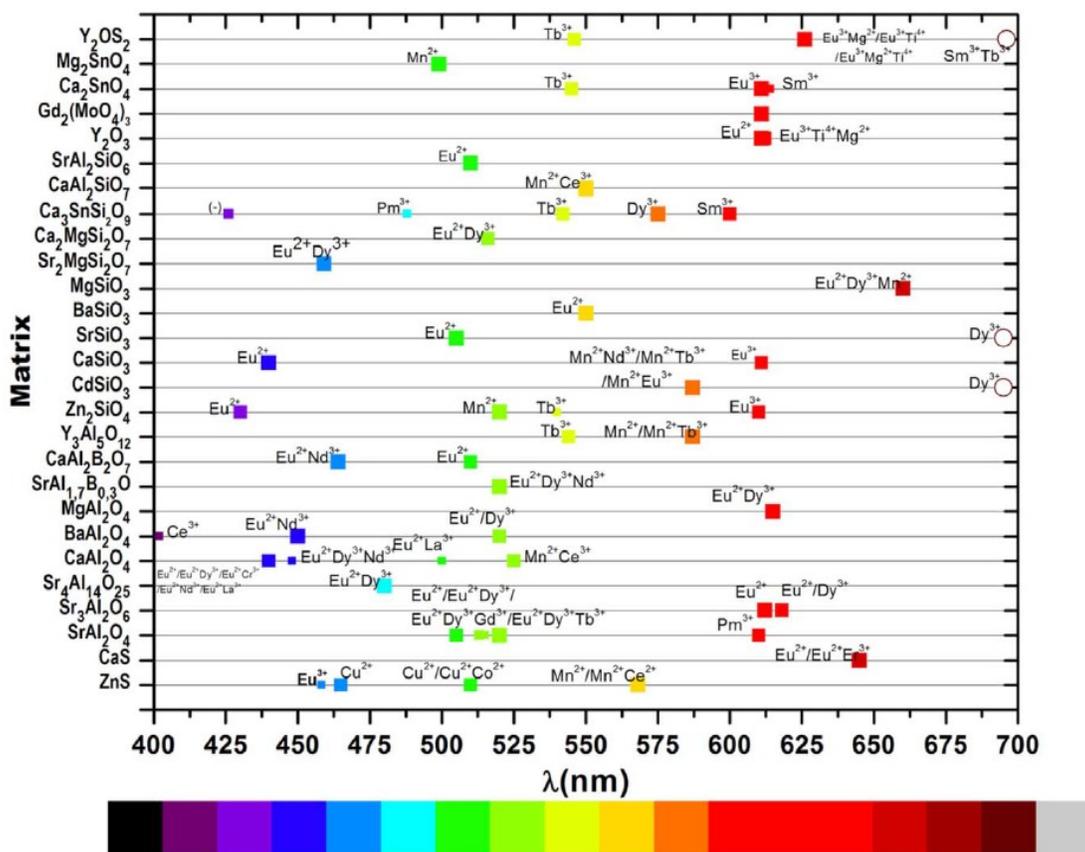
Figura 2 – Esquema de trocas entre bandas



Fonte: Adaptado de Smith e Hashemi (2012).

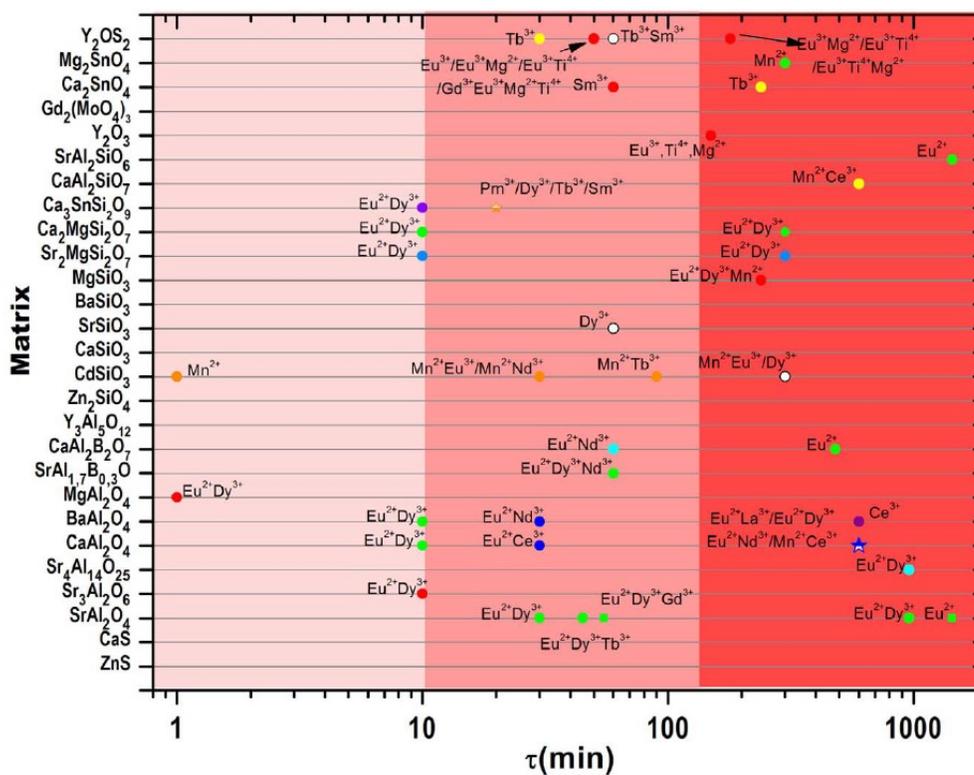
Diferentes dopantes em diferentes matrizes serão responsáveis pela variação de comprimentos de onda de luz emitida pelos materiais luminescentes (Figura 3), o que resulta em diferentes cores, bem como diferentes tempos de decaimento da luminosidade desse material (Figura 4).

Figura 3 – Matrizes e dopantes



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

Figura 4 – Tempo de decaimento de diferentes matrizes e dopantes



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

2.2 CARACTERÍSTICAS E APELO COMERCIAL

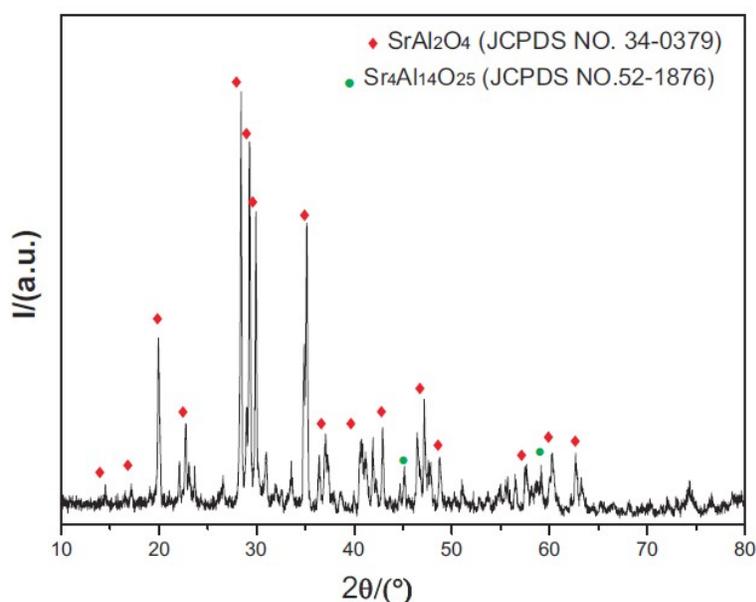
Os materiais luminescentes possuem inúmeras aplicações comerciais. São utilizados em lâmpadas fluorescentes, brinquedos, letreiros, tomadas e interruptores, sinalização de saídas de emergência, paisagismo, dentre outros.

Existe uma ampla seleção de materiais luminescentes com diferentes características de luminosidade no mercado. Segundo pesquisa de Lisensky, Patel e Reich (1996), o sulfeto de zinco dopado com cobre (ZnS:Cu) é um material semiconductor comumente utilizado que emite uma luz amarelo-esverdeada, e apresenta propriedades fosforescentes quando excitado por diferentes comprimentos de onda. Além disso, Getz *et al.* (2017) constataram que a temperatura elevada é um dos fatores que afeta negativamente a taxa de decaimento da luminosidade do sulfeto

de zinco, e que as fontes UV são as que propiciam maior duração da mesma. Esse material é o mais comumente utilizado em brinquedos, tomadas e tintas devido ao seu baixo custo de mercado.

Outro material bastante estudado é o aluminato de estrôncio, usualmente dopado com európio ou disprósio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}$, Dy). Apesar de possuir preço bem mais elevado, principalmente devido aos seus dopantes serem materiais raros, o aluminato de estrôncio possui luminosidade mais intensa e por uma maior quantidade de tempo. No entanto, o material apresenta baixa resistência à água quando comparado com o sulfeto de zinco, e tende a hidrolisar e se deteriorar mais facilmente (ROJAS-HERNANDEZ *et al.*, 2018). Segundo Hu *et. al* (2018), a luminescência intensa dos aluminatos de estrôncio se deve pela ocorrência de uma transição dos íons Eu^{+2} de $4f^65d$ para $4f^7$. Como existem diferentes matrizes e dopantes para a família dos aluminatos de estrôncio, os ensaios de difração de raio X auxiliam na identificação da estrutura atômica desses materiais e análise quantitativa de composição dos mesmos (Figura 5), onde é possível identificar os picos que correspondem a cada elemento químico.

Figura 5 - Difração de raio x para aluminatos de estrôncio



Fonte: Hu *et. al* (2018).

Ainda de acordo com Lisensky, Patel e Reich (1996), os materiais luminescentes podem apresentar diferentes comportamentos de decaimento luminoso. Em decaimentos de ordem zero, os materiais apresentam decaimento linear, pois não dependem da quantidade de elétrons nem de espaços livres na banda de condução. Já os decaimentos de primeira ordem apresentam comportamento exponencial e dependem da quantidade de elétrons ou de espaços livres. Por fim, os decaimentos de segunda ordem são descritos pela soma de duas equações, e dependente das duas condições anteriormente mencionadas. A maioria dos materiais estudados se enquadra nos decaimentos de primeira e segunda ordem.

2.3 APLICAÇÕES NA ENGENHARIA CIVIL

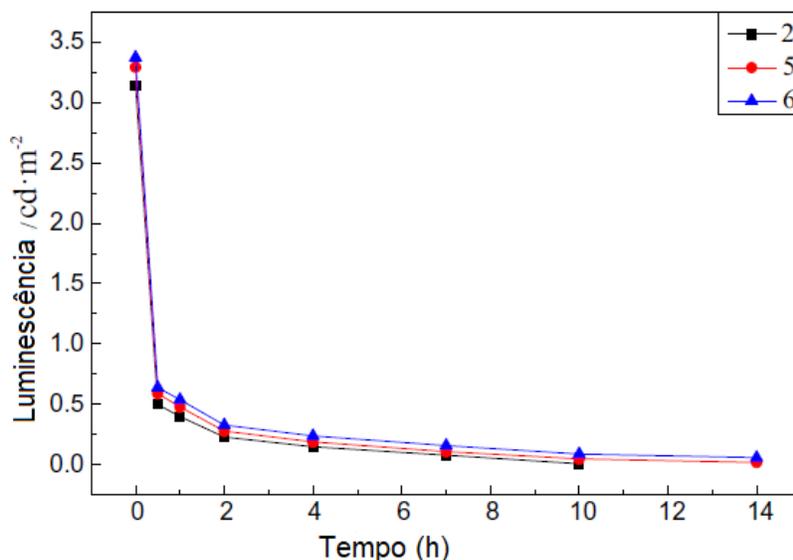
No campo da Engenharia Civil, recentemente vem sendo estudada a possibilidade de aplicação desses materiais. Diversas pesquisas foram realizadas avaliando a adição de material luminescente ao concreto por diferentes métodos, resultando no chamado concreto luminescente. Esse concreto passa a apresentar a característica de fosforescência, e emite luz visível quando exposto a fontes de energia. Na Holanda, uma ciclovia foi desenvolvida com esse tipo de material inserido no pavimento, com a intenção de que o material receba luz solar direta durante o dia e emita luz visível durante a noite, iluminando o caminho da ciclovia sem a necessidade de utilização de energia elétrica.¹

Zhao, Li e Wang (2013) testaram a adição de 3 pós luminescentes distintos diretamente à mistura de cimento, água, areia e brita, variando a concentração de 2, 4, 6 e 8% da massa de cimento em gramas de material luminescente. Os resultados obtidos demonstram que a fosforescência foi possível e obteve decaimento exponencial, porém a resistência à compressão e tração do concreto diminui conforme o aumento da dosagem de pó luminescente. A persistência de brilho foi a melhor com dosagem de 8%.

¹ HOLANDA inaugura ciclovia que brilha no escuro. 2014. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/11/141113_ciclovia_holanda_brilhass>.

Em um estudo mais recente, Gao *et al.* (2018) também substituiu parte da massa de cimento com pó luminescente ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}$, Dy), e ainda fez uso de um pó reflexivo composto de dióxido de silício (SiO_2) que tem a função de amplificar a reflexão de luz do pó luminescente. Diferentes concentrações de pó luminescente e pó reflexivo foram testadas, e por meio de testes pode-se observar na Figura 6 que o dióxido de silício aumenta a intensidade do brilho, apesar de a diferença não ser muito grande. Foram apresentados os resultados para 0, 10 e 20% de dióxido de silício, grupos 2, 5 e 6 respectivamente.

Figura 6 – Comparação entre corpos de prova com dióxido de silício



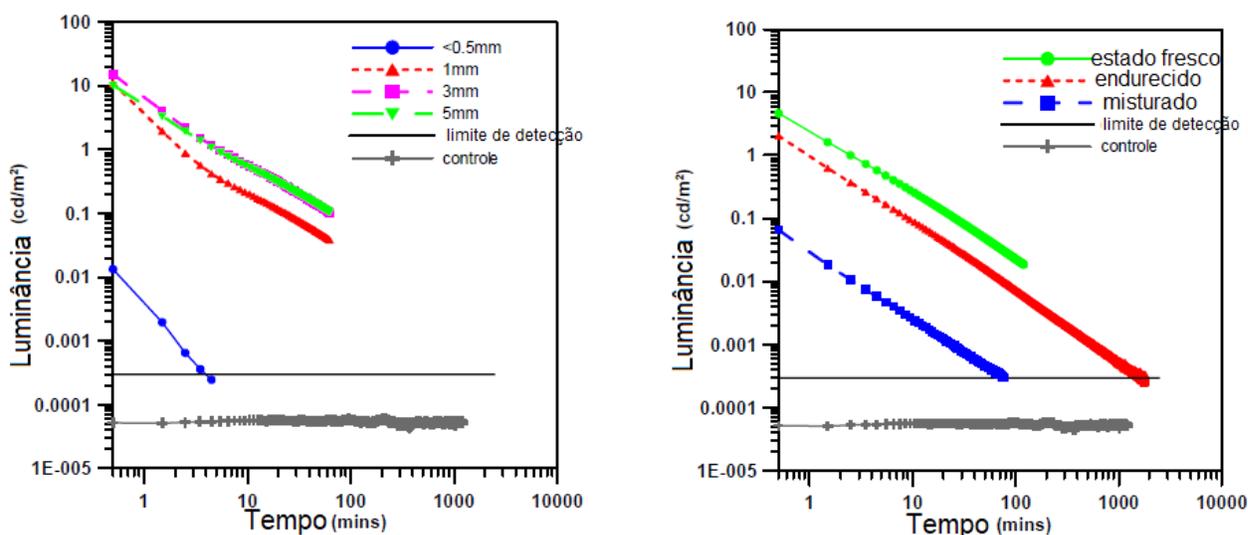
Fonte: Adaptado de Gao *et al.* (2018).

As concentrações de material adicionadas à mistura de concreto por Gao *et al.* (2018) são bastante elevadas, variando entre 10 e 40% da massa de cimento em aluminato de estrôncio e dióxido de silício. As diferentes concentrações utilizadas causaram variação nas resistências mecânicas dos corpos de prova.

Ademais, Wiese *et al.* (2015) afirmam que a adição de pós luminescentes diretamente à mistura de concreto como um aditivo seco é prejudicial à trabalhabilidade da mistura, além de representar o desperdício do material que fica no interior do concreto, pois o mesmo não terá efeito luminescente que possa ser aproveitado. Como

solução, propôs o desenvolvimento de um selante polimérico com o pó luminescente adicionado ao mesmo. Dessa forma, o selante pode ser aplicado apenas na camada superficial do concreto que receberá luz solar direta. Foram feitos testes com diferentes espessuras de selante aplicadas ao concreto, em diferentes tempos de cura (estado plástico e estado endurecido) como mostra a Figura 7. Foi descoberto que pós luminescentes com maior tamanho médio de grãos apresentaram tempo de brilho com duração mais longa do que os diâmetros menores. Foram conduzidos testes de abrasão simulando chuva leve, chuva intensa e esmerilhamento através de uma retificadora. Os resultados obtidos demonstraram que o selante perdeu em torno de 33% de capacidade de luminescência quando exposto à chuva leve, e perdeu totalmente a luminescência quando exposto à chuva intensa e abrasão da superfície. Porém, nenhum desses testes foi realizado em conformidade às normas vigentes (ASTM – *American Society for Testing and Materials*), e não foram apresentados resultados quanto à resistência mecânica de tração e compressão.

Figura 7 – Resultados de luminescência para selante polimérico a) com diferentes espessuras e b) em diferentes estágios de cura do concreto



Fonte: Adaptado de Wiese *et al.* (2015).

O método de aplicação de um selante no concreto pode ser uma solução viável não só para tornar-se luminescente, como também para uma proteção adicional das

peças. Conforme cita Safiuddin (2017), selantes são um tipo de tratamento da superfície que protegem o concreto da penetração de água, dióxido de carbono e sais minerais. Essas substâncias podem causar a carbonatação do concreto – alteração de pH que pode atingir o aço no concreto armado e causar corrosão da armadura – ou eflorescências, quando os sais minerais reagem com a umidade e formam depósitos na superfície do concreto, resultando em prejuízo estético e alterando a durabilidade da estrutura.

Um método mais pontual foi proposto por Kozak e Bartholomew (1996) que desenvolveram esferas de vidro e plástico com material luminescente que foram inseridas pontualmente em pavimentos. Não foi proposto um pavimento fosforescente como um todo, mas sim a inserção das esferas apenas em locais estratégicos que necessitam de iluminação, tais como faixas e letreiros pintados em estradas. No entanto, não foram apresentados resultados quanto à resistência mecânica ou resistência à abrasão do pavimento.

Por fim, Bacero *et al.* (2015) testou a adição de aluminato de estrôncio a tintas usadas em pavimentos, com testes de luminescência, abrasão e análise de custo-benefício. A massa de pó luminescente variou entre 15 e 70% por litro de tinta. Assim como nas outras pesquisas mencionadas, os resultados de luminescência possuem decaimento exponencial, e foi constatado que quanto mais tempo a tinta é excitada pela luz solar, por mais tempo emitirá luz visível. As tintas com maior concentração de aluminato de estrôncio adicionada foram as que apresentaram maior luminescência. Os testes de abrasão conduzidos constataram que em geral, para cada concentração de aluminato de estrôncio adicionado à tinta, $4 \cdot 10^{-4}$ mm de tinta são removidos, o que representa uma fração muito pequena quando comparada à tinta normal para pavimentos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo, são apresentados todos os materiais e técnicas de caracterização utilizados no projeto. Além disso, são apresentados os métodos, ensaios e testes realizados.

3.1 MATERIAIS

Por disponibilidade de materiais, em vez de corpos de prova de concreto, foi escolhido trabalhar com uma argamassa de concreto convencional para realização de moldagens e ensaios em menor escala.

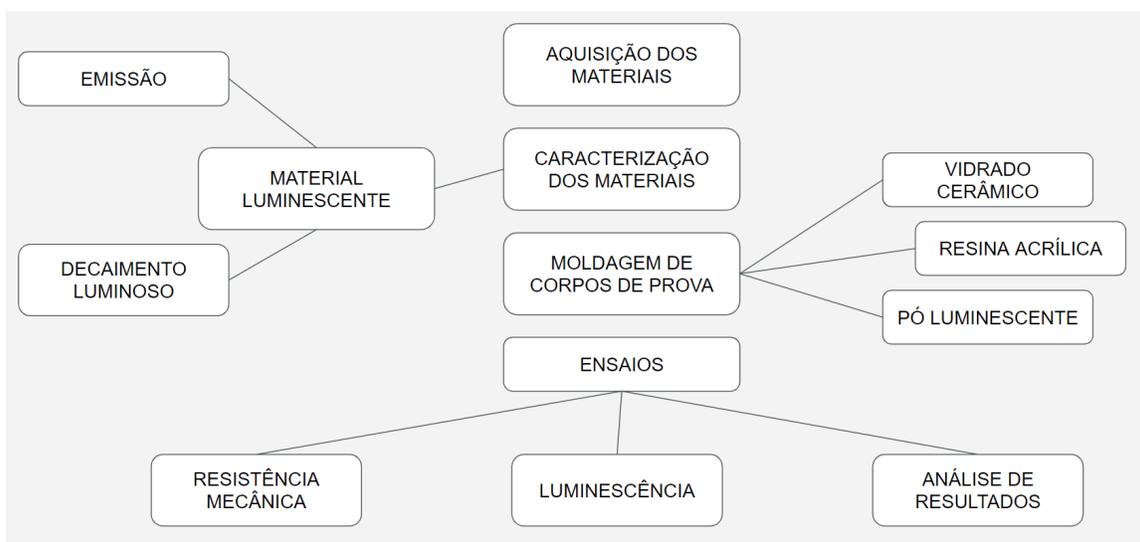
Os materiais utilizados para análises e confecção dos diferentes tipos de corpos de prova foram:

1. Cimento CPIV – 32 do fornecedor Votoran, com módulo de finura de 0,38 e massa específica de 2,64 g/cm³;
2. Areia fina com módulo de finura 0,31 e massa específica de 2,63 g/cm³;
3. Areia média com módulo de finura 2,40 e massa específica de 2,54 g/cm³;
4. Sulfeto de zinco dopado com cobre (ZnS:Cu), do fornecedor Luminstant, nas cores verde, azul, vermelho e laranja;
5. Aluminato de estrôncio dopado com európio e disprósio (SrAl₂O₄:Eu, Dy), do fornecedor Luminstant, nas cores verde e azul;
6. Vidrado cerâmico transparente do fornecedor Minatto Glass, de código CF-002;
7. Resina acrílica transparente do fornecedor Minatto Glass, de código ES-01.

3.2 MÉTODOS

Para o projeto, foram listados ensaios e caracterizações necessários para obtenção dos resultados. Os métodos seguirão o esquema mostrado no fluxograma representado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma de atividades



Fonte: A Autora (2019).

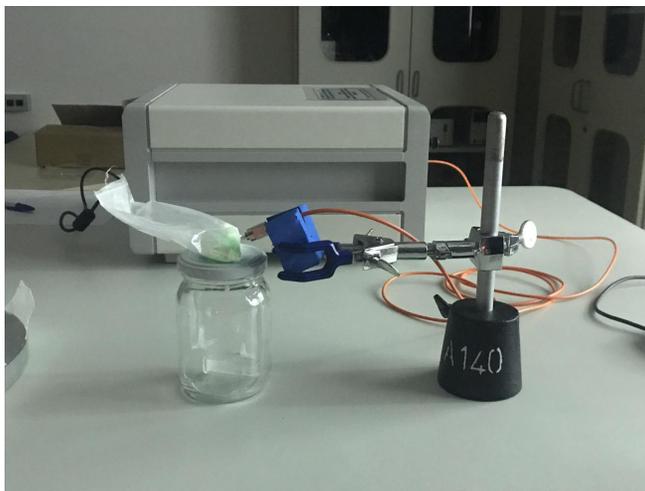
3.2.1 Caracterização dos materiais luminescentes

3.2.1.1 Espectrofotometria

Foi realizado um ensaio utilizando um espectrofotômetro convencional da marca SPID, com o objetivo de verificar quais comprimentos de onda são emitidos com maior intensidade por cada material, visando identificar as emissões de luz na faixa do visível responsáveis pelas colorações características. No espectrofotômetro, foram analisadas todas as amostras disponíveis de sulfeto de zinco (verde, azul, vermelho e laranja) e aluminato de estrôncio (azul e verde). Esse ensaio não segue nenhuma normatização vigente.

Para realização do ensaio foi necessário estimular os materiais utilizando um feixe de led-UV que também foi analisado, visando identificar possíveis interferências da luz emitida pela lâmpada led no ensaio de cada material. Foi necessário aproximar cada amostra de um cabo de fibra óptica que é responsável pelas medidas de luz emitida, conforme Figura 9.

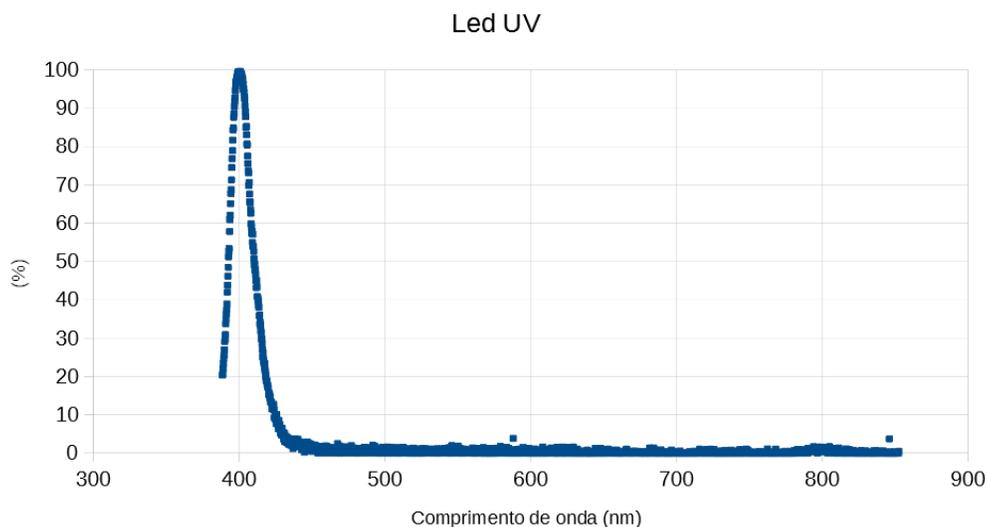
Figura 9 – Ensaio de espectrofotometria



Fonte: A Autora (2019).

Para todos os gráficos de espectrofotometria, o eixo das ordenadas representa a porcentagem de emissão e o eixo das abcissas representa o comprimento de onda em nanômetros que está sendo emitido. No primeiro momento do ensaio de espectrofotometria, foi realizada a medição para a lâmpada de led-UV (Figura 10) utilizada para estimular os demais materiais luminescentes.

Figura 10 – Espectrofotometria para lâmpada de led-UV

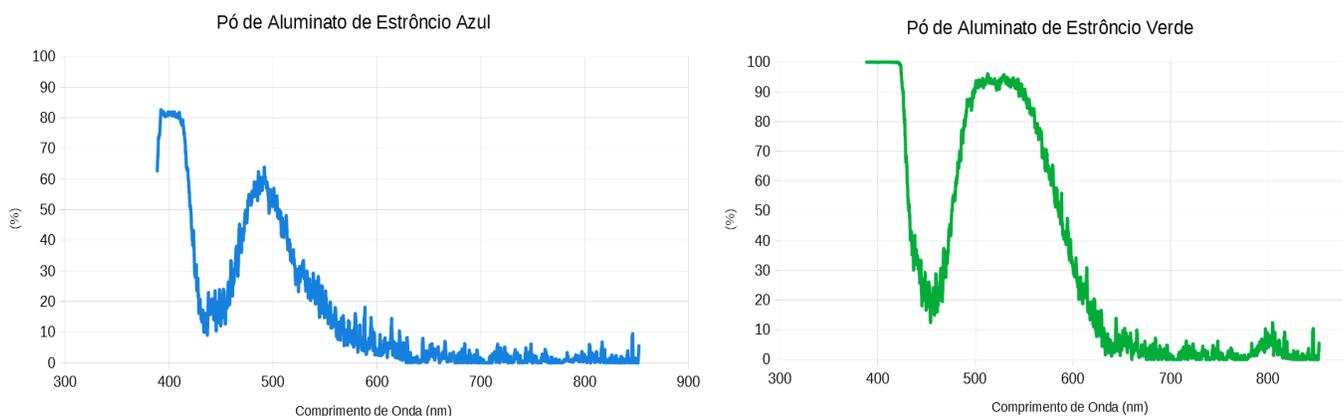


Fonte: A Autora (2019).

A lâmpada de led-UV tem seu pico de emissão no comprimento de 400 nm, caracterizando uma emissão tendendo ao espectro do ultravioleta. Visto que o led-UV é utilizado para estimular todos os materiais luminescentes enquanto o ensaio de espectrofotometria é realizado, seu pico de 400 nm será identificado em todos os demais gráficos.

Para os aluminatos de estrôncio (Figura 11), é possível identificar que o aluminato de estrôncio azul apresentou picos de emissão na faixa de 500 nm, que caracteriza uma coloração azul esverdeada. Já o pico do aluminato de estrôncio verde se estende dos 500 aos 600nm, estendendo-se para a cor amarela, caracterizando uma coloração verde amarelada. Os picos em 400 nm para ambos os materiais são justificados pela interferência da lâmpada led-UV.

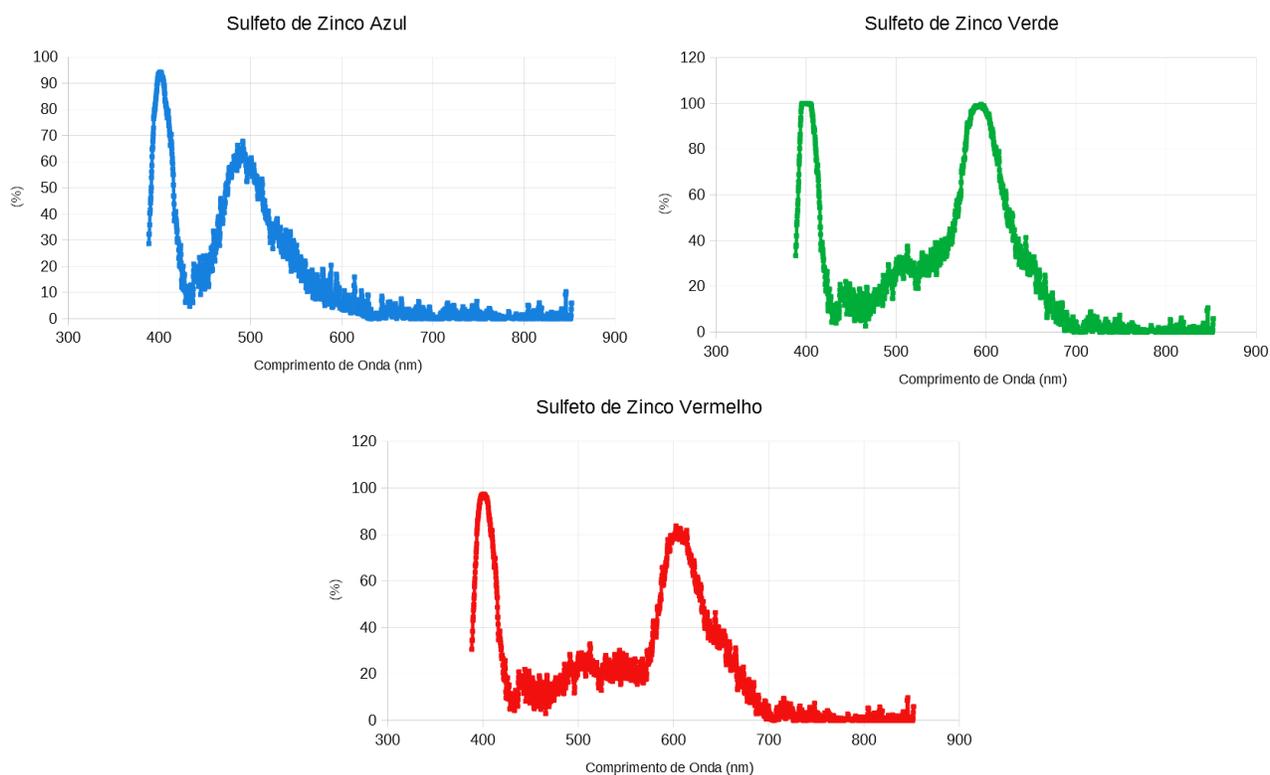
Figura 11 – Espectrofotometria para aluminatos de estrôncio



Fonte: A Autora (2019).

Por fim, os ensaios para os sulfetos de zinco (Figura 12) identifica-se que o sulfeto de zinco azul também apresentou pico de emissão em 500 nm, semelhante ao aluminato de estrôncio azul. Já o sulfeto de zinco verde mostrou o maior pico de emissão encaminhando-se para a faixa de 600 nm, caracterizando-o com uma coloração muito mais amarelada que o aluminato de estrôncio verde. O sulfeto de zinco vermelho apresenta maior emissão na faixa de 600 nm até a região próxima de 700 nm, que lhe confere uma coloração laranja avermelhada.

Figura 12 – Espectrofotometria para sulfetos de zinco



Fonte: A Autora (2019).

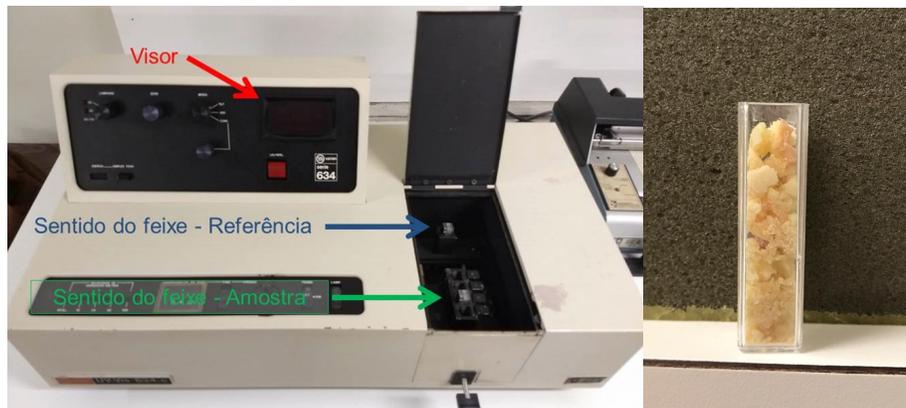
Também para os sulfetos de zinco, os picos em 400 nm são justificados pela interferência da lâmpada led-UV.

3.2.1.2 Ensaios de luminescência

Para identificar o material que produz maior luminescência, foram realizados ensaios de decaimento luminoso. O aparelho utilizado foi o Varian UV-VIS série 64, com o material luminescente em pó inserido dentro das cubetas de teste (Figura 13). A cubeta de 12 x 12 mm de largura foi preenchida com o material testado e inserida no local da amostra, e os valores mostrados no visor foram anotados para confecção dos gráficos. Cada material foi estimulado por 10 segundos com o led-UV antes da

realização do ensaio, e foi medido o decaimento luminoso durante 1000 segundos (aproximadamente 17 minutos).

Figura 13 - Aparelho Varian para ensaio de decaimento luminoso e cubeta para testes



Fonte: Martins, V. G. (2019) e A Autora (2019) respectivamente.

Os gráficos de luminescência foram ajustados a um modelo matemático citado por Lisensky, Patel e Reich (1996). Para esse ajuste, considera-se que o material pode ter taxa de decaimento de luminescência simples ou dupla, dependendo do número de equações que a descreve. Os materiais luminescentes estudados encaixaram-se no ajuste matemático de decaimento simples, que é descrito pela equação 1:

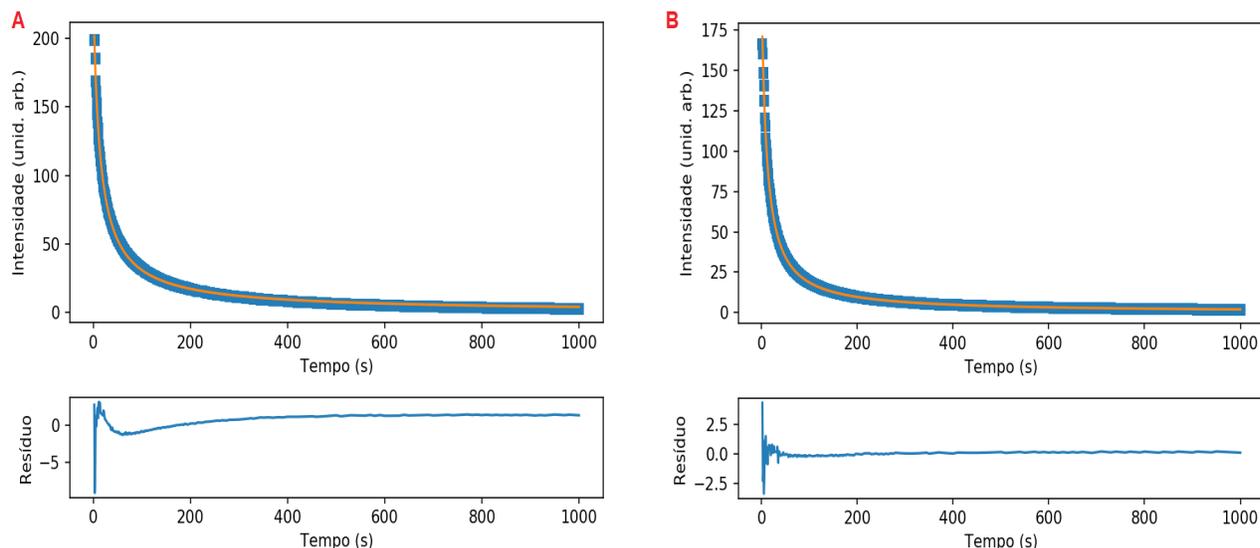
$$I = \frac{a}{(t+t_0)^b} \quad (1)$$

A equação caracteriza um decaimento inicial abrupto seguido por um decaimento mais lento. Os valores de a e b são ajustados para cada curva, e a intensidade depende significativamente do tempo inicial (t_0). A intensidade é medida em uma unidade arbitrária, e os gráficos em cor laranja representam o ajuste matemático. O gráfico de resíduo apresentado mostra a diferença entre o ajuste matemático e os valores experimentais encontrados.

Para os aluminatos de estrôncio testados, os gráficos de ajuste são apresentados na Figura 14. Para o aluminato de estrôncio azul (Figura 14a) percebemos que a intensidade inicia-se aproximadamente em 200 e o decaimento

inicial é relativamente menos abrupto que o do aluminato de estrôncio verde (Figura 14b), em que a intensidade inicia-se um pouco abaixo de 175.

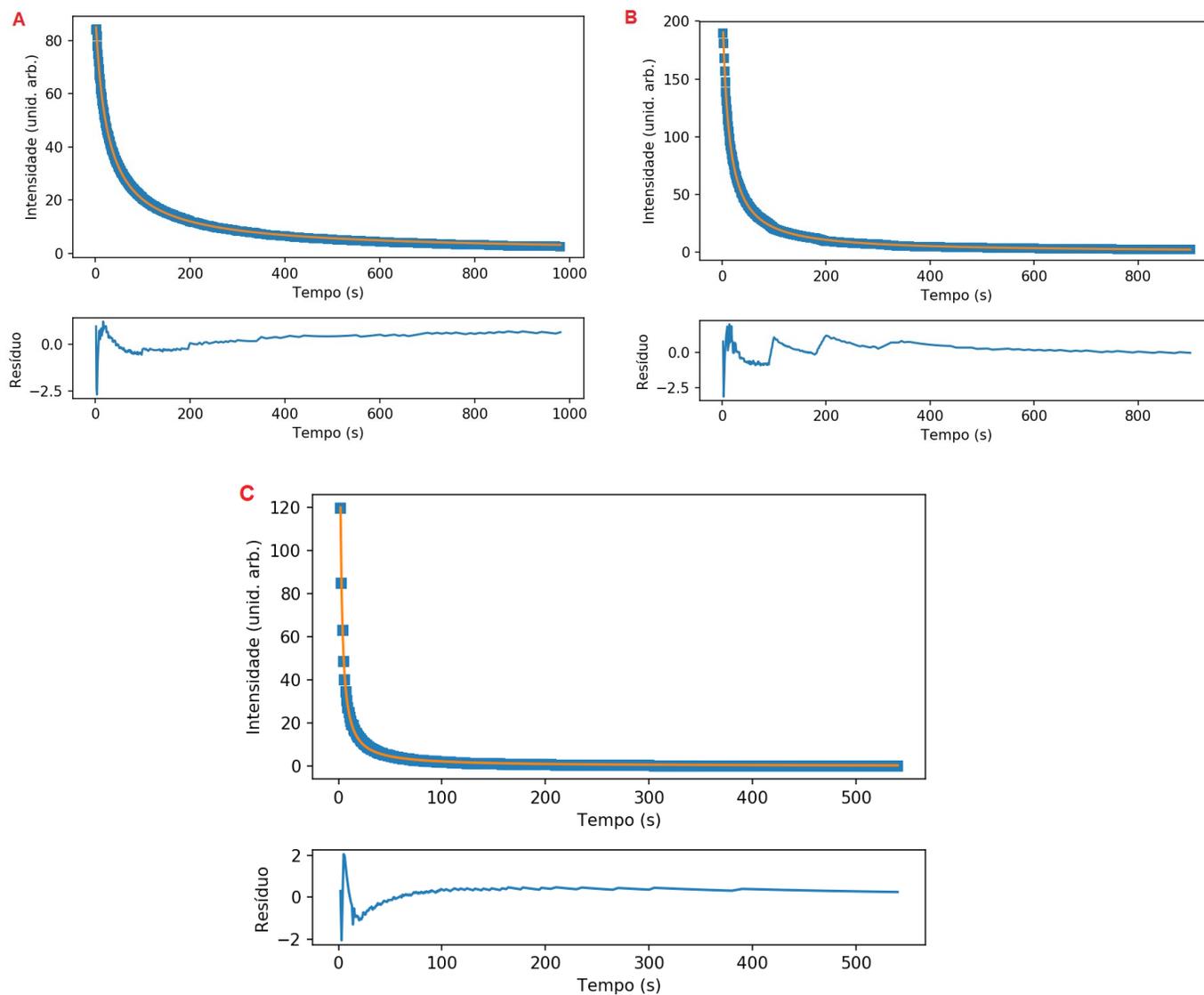
Figura 14 – Gráficos de luminescência para aluminatos de estrôncio



Fonte: A Autora (2019).

Para os sulfetos de zinco podemos observar os gráficos na Figura 15. O sulfeto de zinco azul (Figura 15a) foi o que apresentou menor intensidade inicial, porém foi o que apresentou decaimento menos abrupto e produziu luminescência durante todos os 1000 segundos de teste. O sulfeto de zinco verde (Figura 15b) apresentou intensidade inicial próxima a 200, a maior dos sulfetos e comparável com a do aluminato de estrôncio azul. Porém, teve decaimento bastante abrupto e deixou de produzir luminescência ao se aproximar dos 900 segundos de teste. Por fim, o sulfeto de zinco vermelho (Figura 15c) foi o que apresentou decaimento mais abrupto dentre todos os materiais, e menor tempo de luminescência, em torno de apenas 500 segundos.

Figura 15 - Gráficos de luminescência para sulfetos de zinco



Fonte: A Autora (2019).

Com os dados dos ensaios de luminescência, foi possível calcular o tempo de meia vida dos materiais, ou seja, o tempo que cada material leva para diminuir sua intensidade de brilho em 50%. O tempo da meia vida é definido pela equação 2:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} \quad (2)$$

Sendo o valor de I definido pela equação 1, podemos realizar a substituição e obter a equação 3 como:

$$t_{1/2} = t_0 \cdot (2^{1/c} - 1) \quad (3)$$

Como os aluminatos apresentaram intensidades de brilho superiores e taxas de decaimentos menores, foi calculada a meia vida desses materiais para fins de comparação entre as cores, visto que as intensidades entre cores foram semelhantes. Além disso, também foi calculado o tempo que o material leva para cair a 1/10 de sua intensidade inicial, valor esse que é definido pela equação 4.

$$t_{1/10} = t_0 \cdot (10^{-1/c} - 1) \quad (4)$$

Os dados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tempos de decaimentos para aluminatos

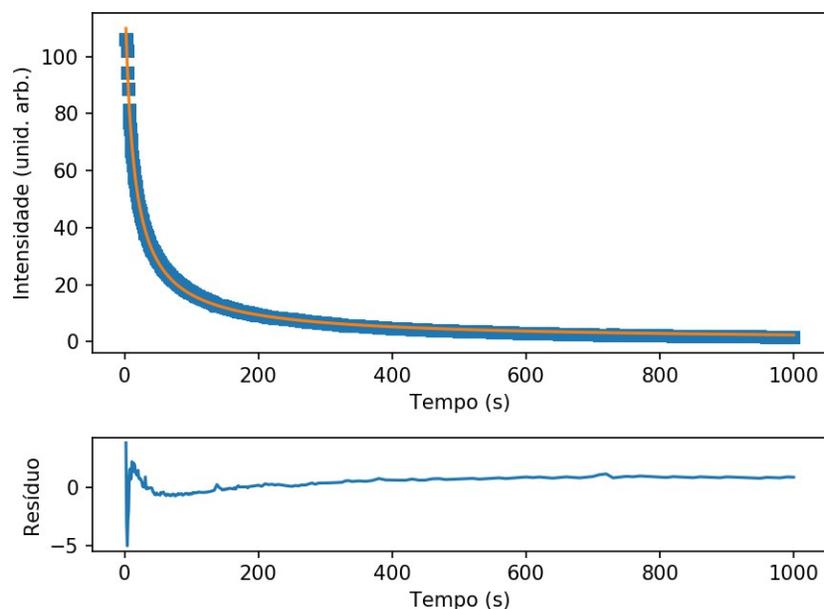
Material	Tempo de meia vida (s)	Tempo para atingir 1/10 da intensidade (s)
Aluminato de estrôncio verde	10,37 +/- 0,12	90,8 +/- 1,3
Aluminato de estrôncio azul	14,16 +/- 0,34	143 +/- 4,0

Fonte: A Autora (2019).

Dentre todos os materiais testados, o aluminato de estrôncio azul foi o que apresentou maior intensidade de brilho pela maior quantidade de tempo, e não teve decaimento de luminescência tão abrupto. Além disso, apresentou tempo de meia vida maior que a cor verde. Portanto, os testes subsequentes foram feitos utilizando apenas esse material. O pó de vidro cerâmico foi preparado com o aluminato azul, e o gráfico pode ser visto na Figura 16.

A mistura entre o aluminato de estrôncio azul e o vidro cerâmico fez com que a intensidade inicial de brilho caísse de 200 para aproximadamente 100 unidades. O material continua apresentando o mesmo comportamento de decaimento e também tempo similar de brilho ao pó virgem.

Figura 16 – Gráfico de luminescência para pó de vidro cerâmico com aluminato de estrôncio azul



Fonte: A Autora (2019).

Calculou-se também o tempo de meia vida e o tempo para atingir 1/10 da intensidade do vidro cerâmico com aluminato de estrôncio azul, vide Tabela 2.

Tabela 2 - Tempos de decaimentos para vidro cerâmico com aluminato de estrôncio azul

Material	Tempo de meia vida (s)	Tempo para atingir 1/10 da intensidade (s)
Vidrado cerâmico com aluminato de estrôncio azul	13,0 +/- 0,4	138 +/- 5,0

Fonte: A Autora (2019).

O tempo de meia vida do vidro com aluminato de estrôncio azul não é tão baixo quando comparado com o material virgem, o que nos mostra que o aluminato de estrôncio azul suportou bem o processo de fundição em temperatura elevada e não

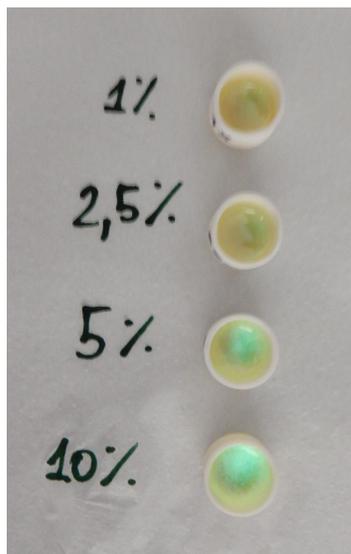
perdeu tanto sua capacidade de perduração de brilho, apesar da intensidade inicial mais baixa.

3.2.2 Preparação dos corpos de prova

3.2.2.1 Preparação do vidro cerâmico com material luminescente

O vidro cerâmico utilizado é um material em pó de cor branca, que é fundido em temperatura de aproximadamente 700°C e torna-se transparente. Foram preparadas misturas de vidro cerâmico nas proporções de 1, 2,5, 5 e 10% em massa de material luminescente, vide Figura 17, e essas proporções foram escolhidas devido à quantidade de material luminescente disponível. Ambos os materiais em pó foram pesados e misturados em um cadinho, e levados ao forno por 2 horas.

Figura 17 – Vidrado cerâmico com material luminescente

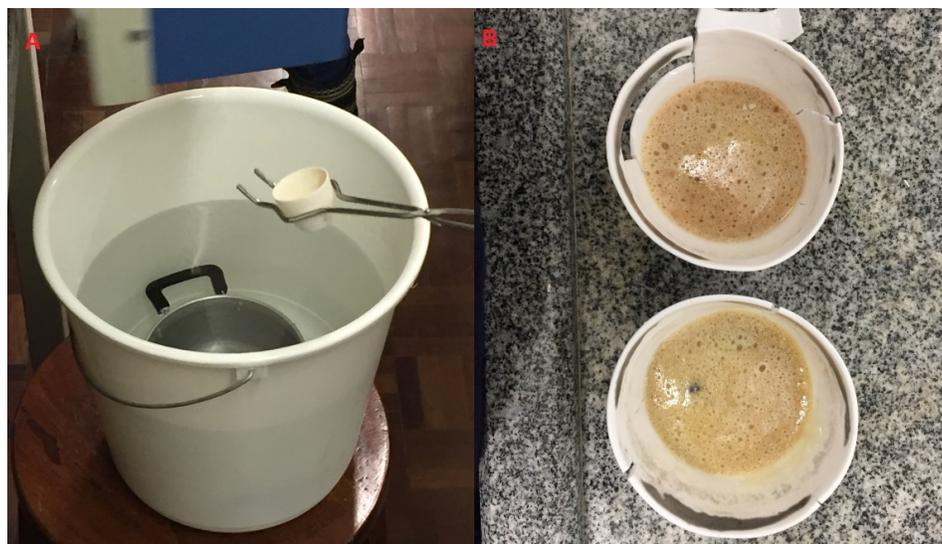


Fonte: A Autora (2019).

Como verificado na Figura 17, a concentração de 10% é a que apresenta maior luminescência, portanto foram repetidos os procedimentos utilizando apenas essa concentração. Visto que o material resfriado após ser fundido fica completamente solidificado e aderido ao recipiente, foi necessário realizar um choque térmico para remover o material. Para isso, o cadinho com material fundido foi retirado do forno à

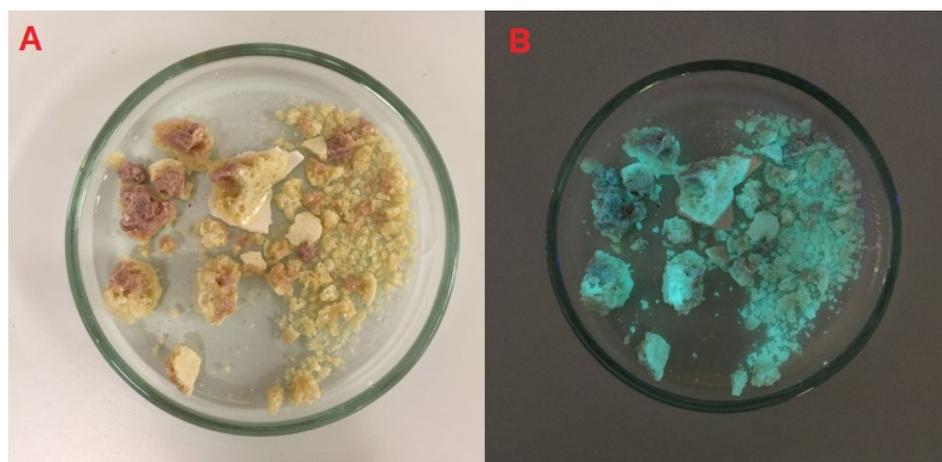
700°C e colocado em um recipiente metálico com água à temperatura ambiente, causando o choque térmico (Figura 18). Isso causou uma fragilização do sistema cadinho-material fundido, que foi martelado com martelo de borracha para remoção dos cacos de porcelana do cadinho e obtenção do pó de vidroado cerâmico (Figura 19).

Figura 18 – Choque térmico em material fundido



Fonte: A Autora (2019).

Figura 19 – Pó de vidroado cerâmico com material luminescente



Fonte: A Autora (2019).

3.2.2.2 Definição do traço e caracterização da argamassa

Selecionou-se um traço padrão² para pisos de concreto de 30 MPa e adaptado para uma argamassa de concreto, ou seja, foram utilizadas apenas as massas (kg) de cimento, agregado miúdo e água, descartando-se a massa de agregado graúdo, vide Tabela 3.

Tabela 3 – Traço de argamassa utilizado

Material	Massa (kg)
Cimento	1,0
Areia fina	0,85
Areia média	1,28
Água	0,55

Fonte: A Autora (2019).

A argamassa resultante foi caracterizada através da mesa de consistência de argamassas, segundo instruções da NBR13276:2016, que é uma característica do estado plástico, e essencial para garantir as características da mesma no estado endurecido.

Para esse ensaio, o cone metálico foi preenchido com 3 camadas, recebendo 15, 10 e 5 golpes respectivamente em cada camada. Após, o excesso de argamassa foi rasado com uma régua e o cone foi removido na vertical. Por fim, foram aplicados 30 golpes com a mesa giratória, e feitas 3 medidas de diâmetro de espalhamento da argamassa (Figura 20).

² <http://www.geocities.ws/andrepcgeo/tabelatracos8B.htm>

Figura 20 – Ensaio de consistência de argamassa



Fonte: A Autora (2019).

Os resultados das medições da consistência da argamassa estão apresentados na Tabela 4. O índice de consistência dessa argamassa indica que houve um espalhamento elevado segundo a NBR13276:2016, visto que a relação a/c é bastante elevada, caracterizando uma argamassa mais fluida.

Tabela 4 – Medições de consistência de argamassa

Medição	Valor (cm)
1	32,5
2	33,0
3	31,5
Valor médio	32,3 +/- 0,03

Fonte: A Autora (2019).

3.2.2.3 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova de diferentes tipos para os ensaios de caracterização, e todos foram moldados em temperatura ambiente. A mistura de argamassa de concreto convencional foi preparada conforme instruções da NBR 16541:2016, e os corpos de prova foram moldados conforme necessidade e

procedimento dos aparelhos adaptados, pois determinados ensaios não possuem normas vigentes.

Para o ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova foram moldados conforme instruções da NBR7215:1996. Para tal, foram utilizados moldes cilíndricos de 5 x 10cm com aplicação de óleo desmoldante, e o preenchimento foi realizado com 4 camadas iguais de argamassa e 30 golpes de soquete metálico em cada camada (Figura 21).

A desmoldagem dos corpos de prova foi realizada no dia útil seguinte. Para a cura do concreto, que é uma técnica que previne a evaporação excessiva de água, foi utilizada a técnica de cura úmida, mantendo as superfícies sempre hidratadas.

Figura 21 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: A Autora (2019).

Os corpos de prova restantes foram moldados em moldes de silicones (12 x 3 x 100mm) adaptados para os aparelhos, e não seguiram nenhuma norma vigente. Para cada tipo de moldagem foi feito um corpo de prova de argamassa de concreto convencional para ser utilizado como referência.

Durante e após as moldagens dos corpos de prova, foram testados os diferentes métodos de adição do material luminescente à argamassa de concreto, sendo eles:

1. Aplicação de resina acrílica com material luminescente no estado fresco, através de pincelamento da superfície;

2. Aplicação de resina acrílica com material luminescente no estado endurecido, através de pincelamento da superfície;
3. Aplicação de vidro cerâmico com material luminescente no estado endurecido, através de inserção manual e pontual;

Para as moldagens com resina acrílica, foi preparada uma mistura de resina com 10% em massa de material luminescente. No estado fresco, a mistura foi pincelada na superfície do corpo de prova ainda dentro do molde metálico (Figura 22a), criando uma camada fina e o mais uniforme possível.

No estado endurecido (Figura 22b), foi utilizada a mesma técnica após a desmoldagem dos corpos de prova. Notou-se que após o pincelamento de resina tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, uma pequena parte foi absorvida pela argamassa.

Figura 22 – Corpos de prova com aplicação de resina acrílica com material luminescente



Fonte: A Autora (2019).

Para a aplicação do vidro cerâmico (Figura 23), foi escolhido utilizar uma inserção pontual do material apenas na superfície do corpo de prova. Isso se justifica pelo fato de Gao *et al.* (2018) apresentar resultados de experimentos em que o material é utilizado como uma adição em concretos convencionais, porém o material que fica no interior do concreto não recebe estímulos e não emite luz, desperdiçando a maior parte

do material luminescente utilizado. Dessa forma, através da inserção manual na superfície da amostra é garantida a exposição à luz solar ou lâmpadas, que estimulariam o material a brilhar.

Na moldagem dos corpos de prova com vidro cerâmico, foi tomado o cuidado de inserir o material também um pouco abaixo da camada superficial, para o caso de ser necessário retificar o corpo de prova para rompimentos e verificação da resistência mecânica. Dessa forma, o vidro cerâmico estará presente na nova camada superficial após a retifica.

Figura 23 - Corpo de prova com aplicação de vidro cerâmico com material luminescente



Fonte: A Autora (2019).

3.2.3 Caracterização dos corpos de prova

3.2.3.1 Luminescência

Os ensaios de luminescência nos corpos de argamassa de concreto foram realizados no aparelho Varian UV-VIS série 64 com o mesmo procedimento dos ensaios realizados nos materiais luminescentes. Para esse ensaio, foram utilizados corpos de prova de 12mm (tamanho da cubeta de testes) feitos em molde de silicone. Para esse ensaio, não houve moldagem de um corpo de prova para referência, visto que uma argamassa não emite nenhum tipo de luz.

3.2.3.2 Resistência à compressão

Nesse ensaio, visa-se comparar um corpo de prova referência e os corpos de prova com os diferentes métodos de aplicação dos materiais luminescentes, verificando-se se esses métodos causam variações consideráveis na resistência mecânica.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados através de uma deformação sob compressão, onde o corpo de prova é submetido a um carregamento que aumenta progressivamente até a sua ruptura. O valor da força indica a resistência à compressão que o corpo de prova possui, e está diretamente ligado à estabilidade estrutural e segurança.

O ensaio foi realizado conforme instruções da NBR 13279:1995 para argamassas, em corpos de prova cilíndricos de diâmetro igual a 5 cm e altura de 10 cm (Figura 24).

Figura 24 – Corpos de prova cilíndricos para ensaio de resistência à compressão



Fonte: A Autora (2019).

A resistência à compressão foi avaliada em 7 e 21 dias de idade do corpo de prova. O rompimento dos corpos de prova foi realizado pelo técnico de laboratório responsável de acordo com a NBR 7215:1996, e os resultados apresentados em forma de tabelas. Não foram realizados rompimentos aos 28 dias de idade por limitação de tempo.

3.2.4 Verificação de viabilidade econômica

Foi realizado um breve cálculo de viabilidade econômica da produção de uma argamassa luminescente com os 3 métodos estudados. O cálculo foi realizado utilizando apenas os valores dos materiais, não sendo considerada a mão de obra necessária para viabilização dessa argamassa.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste Capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos testes realizados durante o projeto. Os resultados são comparados com dados obtidos da literatura, e analisados para posterior conclusão do projeto.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.1.1 Ensaios de luminescência nas argamassas

Seguindo os moldes anteriores, o ensaio de luminescência no Varian foi repetido para corpos de prova de argamassa de 12 x 3 x 100 mm de resina acrílica luminescente aplicada no estado fresco e no estado endurecido, e com aplicação de vidro cerâmico luminescente (Figura 25). Os corpos de prova foram estimulados por 10 segundos cada, utilizando a lâmpada de led-UV.

Figura 25 – Corpo de prova de argamassa com vidro cerâmico luminescente

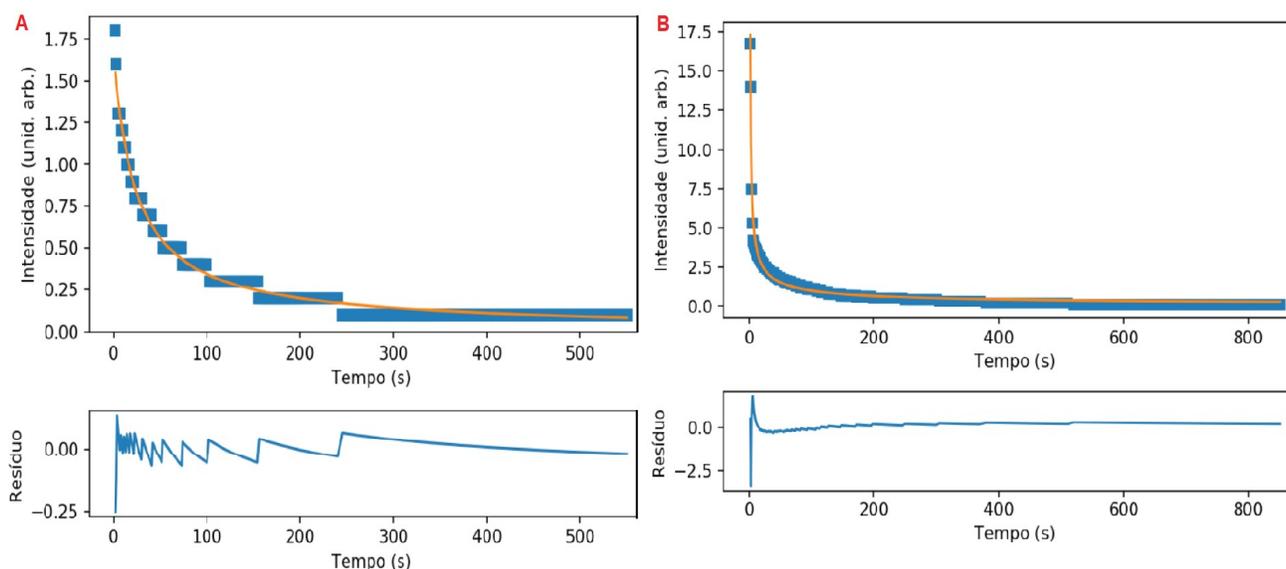


Fonte: A Autora (2019).

Para os corpos de prova com aplicação de resina, os resultados de luminescência encontram-se na Figura 26. A resina no estado fresco (Figura 26a) apresentou taxa de decaimento menos abrupta do que a resina aplicada no estado endurecido (Figura 26b), apesar da diferença entre intensidades iniciais. Porém, o

ensaio da resina luminescente perdurou por mais tempo, ultrapassando os 800 segundos.

Figura 26– Resultados de luminescência para corpos de prova com aplicação de resina acrílica luminescente nos estados fresco e endurecido

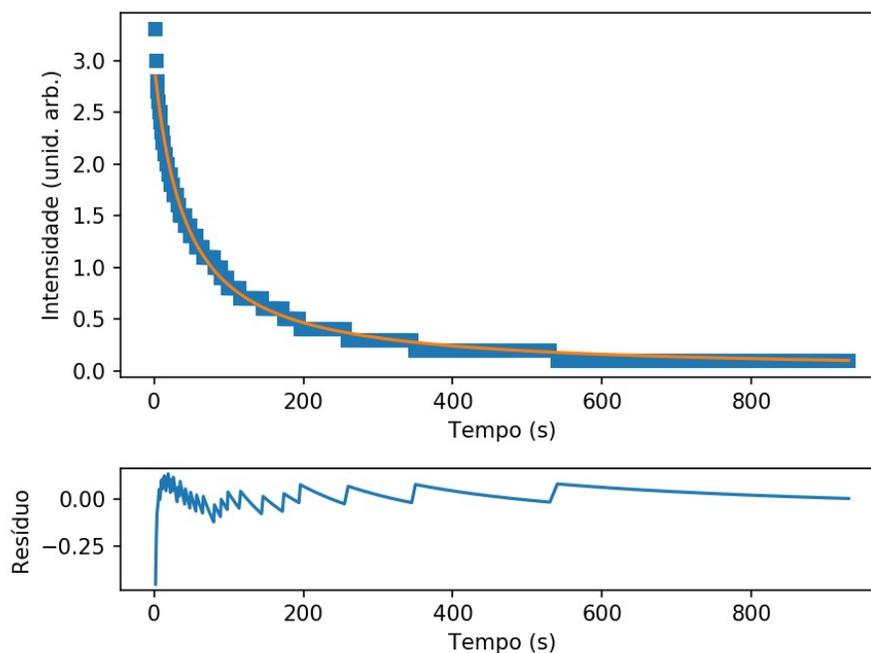


Fonte: A Autora (2019).

Já para o corpo de prova com aplicação de vidro cerâmico com aluminato de estrôncio azul, o resultado do teste (Figura 27) apresentou comportamento similar ao da resina no estado fresco: a taxa de decaimento foi sutil, apesar da intensidade inicial ser mais baixa. Porém, o brilho do vidro cerâmico luminescente perdurou por mais tempo, ultrapassando os 800 segundos, enquanto a resina luminescente no estado fresco ficou inferior aos 600 segundos.

Para esses corpos de prova, também foram calculados os tempos de meia vida e os tempos para atingir 1/10 da intensidade luminosa inicial. Os resultados são apresentados na Tabela 5. O vidro cerâmico luminescente foi o que apresentou maior duração de brilho. Apesar de todas as intensidades terem valores iniciais significativamente menores que o pó virgem, o brilho perdura por tempo considerável.

Figura 27 - Resultado de luminescência para corpo de prova com aplicação de vidro cerâmico luminescente



Fonte: A Autora (2019).

Tabela 5 - Tempos de decaimentos para argamassas com aplicação de material luminescente

Material	Tempo de meia vida (s)	Tempo para atingir 1/10 da intensidade (s)
Vidrado cerâmico	39,9 +/- 2,6	323 +/- 27
Resina acrílica aplicada no estado fresco	24,6 +/- 2,2	246 +/- 29
Resina acrílica aplicada no estado endurecido	2,73 +/- 0,19	59 +/- 6

Fonte: A Autora (2019).

4.1.2 Resistência à compressão

Os corpos de prova moldados para o ensaio de resistência à compressão foram rompidos aos 7 e 21 dias de idade. Não foram realizados rompimentos aos 28 dias de idade por limitação de tempo.

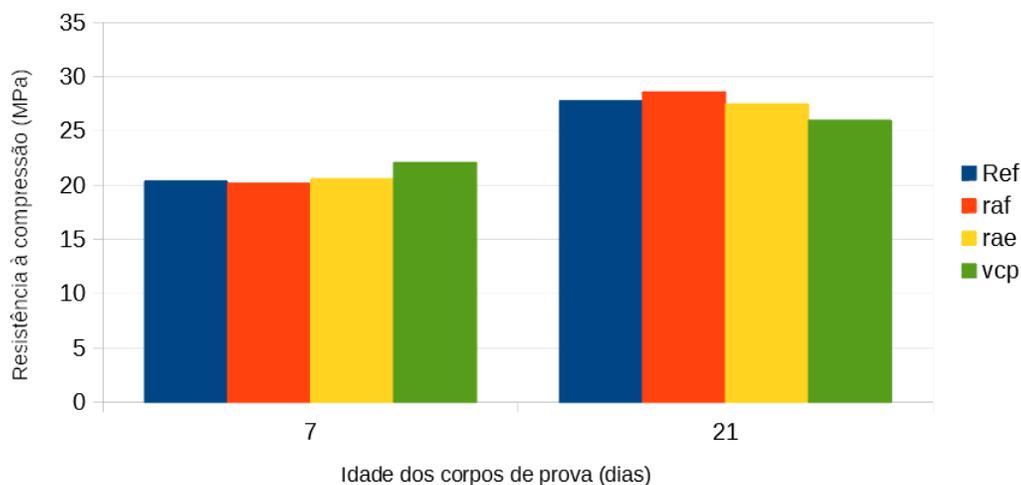
Para identificação dos diferentes corpos de prova e métodos de aplicação dos materiais luminescentes, foi criado um sistema de códigos, sendo:

- REF: referência – corpo de prova de argamassa de concreto convencional;
- RAF: resina a fresco – corpo de prova de argamassa de concreto com pincelamento de resina acrílica com aluminato de estrôncio azul no estado fresco;
- RAE: resina acrílica endurecido – corpo de prova de argamassa de concreto com pincelamento de resina acrílica com aluminato de estrôncio azul no estado endurecido;
- VCP: vidro cerâmico em pó – corpo de prova de argamassa de concreto com inserção pontual de vidro cerâmico com aluminato de estrôncio azul no estado fresco.

O resultado da tensão de ruptura em MPa é o valor máximo de tensão que cada corpo de prova suportou até o seu rompimento. Para cada categoria de corpo de prova ensaiado, estão apresentados na Figura 28 os resultados de médias para 7 e 21 dias de idade, respectivamente.

É possível perceber uma pequena variação entre tensões dentro de cada categoria, possivelmente devido a falhas na moldagem e adensamento dos corpos de prova. No entanto, os valores médios de cada categoria aos 7 e aos 21 dias de idade são bastante similares, ou seja, os métodos de adição dos materiais luminescentes não reduziram drasticamente a resistência à compressão.

Figura 28 – Resistências à compressão aos 7 e 21 dias de idade



Fonte: A Autora (2019).

Aos 21 dias, é possível notar que os corpos de prova com resina acrílica aplicada no estado fresco apresentaram um valor médio mais alto que as outras categorias.

Aos 21 dias, os corpos de prova com adição do vidro cerâmico foram os que apresentaram menor valor médio de resistência. Por ter sido realizada uma inserção pontual de vidro na superfície do corpo de prova, é possível que isso possa ter causado uma fragilização em certos pontos, principalmente em lugares onde o vidro apresentava uma granulometria maior. A inconsistência na moldagem desses corpos de prova também pode ter sido responsável pelos valores de resistência encontrados.

4.2 VERIFICAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a moldagem de 8 corpos de prova (5 x 10 cm) de área equivalente a 0,016 m² com resina acrílica luminescente no estado fresco, foram utilizados aproximadamente 10 g de resina acrílica e 1 g de aluminato de estrôncio azul. Já para a moldagem de 8 corpos de prova com vidro cerâmico luminescente, foram

espalhados aproximadamente 16 g do vidrado luminescente pela mesma superfície de argamassa.

Visto que os métodos de aplicação de materiais luminescente estudados são todos superficiais e com o intuito de aplicação em pisos, calçadas, dentre outros, será calculado preço de material utilizado para fabricação de um piso de concreto com área de 1 m² e 5 cm de espessura. A Tabela 6 apresenta o valor de todos os insumos e referentes cálculos.

Tabela 6 – Valores de insumos

Material		Unidade	Valor unitário (R\$)	Quantidade utilizada	Valor total (R\$)
Resina acrílica luminescente	Resina acrílica	kg	24,00	0,625	15,00
	Aluminato de estrôncio	kg	450,00	0,063	28,35
				Valor total	39,35
Vidrado cerâmico luminescente	Vidrado cerâmico	kg	38,00	0,91	34,58
	Aluminato de estrôncio	kg	450,00	0,09	40,50
				Valor total	75,08

Fonte: A Autora (2019).

Analisando os valores de cada método de aplicação, o método da resina acrílica luminescente custa quase a metade do preço da aplicação do vidrado cerâmico luminescente. A quantidade de aluminato de estrôncio usada para preparo do vidrado cerâmico em 1 m² é bem maior do que a quantidade para a resina acrílica, e o preço do kg de vidrado também é mais elevado, justificando o valor final.

Os valores calculados consideram que não há perdas no processo de preparo do vidrado cerâmico luminescente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em se tratando dos materiais luminescentes, fica claro pelos ensaios de luminescência no Varian que a família dos aluminatos de estrôncio apresenta brilho mais intenso e durável que os sulfetos de zinco. Além disso, também é possível identificar que a cor azul tem um desempenho melhor que a cor verde, portanto o aluminato de estrôncio azul foi o pó luminescente com a melhor performance, e o escolhido para a sequência de ensaios do presente projeto.

Ao analisar os diferentes métodos de aplicação, o vidrado cerâmico luminescente foi o que apresentou melhores resultados de luminescência, porém o que apresentou os resultados mais baixos de resistência à compressão aos 21 dias de idade. A resina acrílica luminescente aplicada no estado fresco apresentou resultados de luminescência semelhantes aos do vidrado cerâmico, e a duração de brilho foi satisfatória. Porém, a resina não foi responsável por uma diminuição considerável na resistência, e os valores se mantiveram similares aos dos corpos de prova referência. Como os dados de resistência apresentaram algumas variações, possivelmente devido a problemas na moldagem ou no assentamento dos corpos de prova, seria interessante a realização de uma repetição desses testes para comparação de valores.

Em relação a viabilização de produção, todos os métodos de aplicação tem valores elevados. São valores comparáveis ao m² de pastilhas ou porcelanatos encontrados atualmente no mercado. O aluminato de estrôncio adquirido tem preço muito elevado, mas pode sofrer alterações quando comprado em maior quantidade do mesmo fornecedor. A síntese desse material poderia ser uma opção para diminuição de custos, porém não se aplica para produções em larga escala, visto que para produção de um piso ou uma calçada luminescente, esse material seria comprado de um fornecedor.

Apesar de ser idealizada para fins de projetos inovadores, estéticos ou de segurança luminosa, e não fins estruturais, uma argamassa ou um concreto luminescente ideal deve levar em consideração as características de brilho, resistência mecânica e custo benefício. Portanto, pode ser concluído que o melhor método

estudado é o da aplicação de resina acrílica luminescente no estado fresco, visto que atende satisfatoriamente todos os requisitos previamente mencionados.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

Como sugestão para futuros estudos, os custos de produção de argamassas ou concretos luminescente poderiam ser reduzidos com a busca por diferentes fornecedores dos insumos. Com relação a ensaios e testes, seria interessante realizar ensaios de desgaste para aplicação de argamassa ou concreto luminescente em calçadas e pisos. Além disso, podem ser estudadas diferentes espessuras de aplicação da resina luminescente para verificação da intensidade de brilho, visto que no presente projeto foi realizada apenas o pincelamento de uma fina camada, sem avaliação de espessuras diversas.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR13276**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e teto – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR13279**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e teto – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR16541**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e teto – Preparo da mistura para realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996. 8 p.

BACERO, Riches et al. Evaluation of strontium aluminate in traffic paint pavement markings for rural and unilluminated roads. **Journal of the Eastern Asia Society For Transportation Studies**, [s.l.], v. 11, p.1726-1744, dez. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.11175/easts.11.1726>>. Acesso em: 14 set. 2018.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais**. LTC, 9° ed, 2016. 912 p.

Kozak, E. M.; Bartholomew, C. S. **Spherodized fluorescent beads for improved roadway pavement marker visibility**. US patent nº 5516227, 07 jul. 1994, 14 maio 1996.

GAO, Yingli *et al.* Study on properties and mechanisms of luminescent cement-based pavement materials with super-hydrophobic function. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 165, p.548-559, mar. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.231>>. Acesso em: 07 set. 2018.

GETZ, William A. *et al.* Erasing the glow in the dark: controlling the trap and release of electrons in phosphorescent materials. **Journal of Chemical Education**, [s.l.], v. 95, n. 2, p.295-299, 17 nov. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00744>>. Acesso em: 29 ago. 2018.

HOLANDA inaugura ciclovia que brilha no escuro. 2014. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/11/141113_ciclovia_holanda_brilhass>. Acesso em: 14 set. 2018.

HU, Xiaowu *et al.* Preparation and properties of Eu and Dy co-doped strontium aluminate long afterglow nanomaterials. **Ceramics International**, [s.l.], v. 44, n. 7, p.7535-7544, maio 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.157>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

LISENSKY, George C.; PATEL, Manish N.; REICH, Megan L.. Experiments with glow-in-the-dark toys: kinetics of doped zns phosphorescence. **Journal of Chemical**

Education, [s.l.], v. 73, n. 11, p.1048-1051, nov. 1996. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/ed073p1048>>. Acesso em: 27 set. 2018.

MARTINS, Vitor Gomes. **Influência da moagem de alta energia na translucidez e algumas propriedades mecânicas de uma porcelana de ossos**. 2019. 107 p. Qualificação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2019.

ROJAS-HERNANDEZ, Rocío Estefanía *et al.* Long lasting phosphors: SrAl₂O₄. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 81, p.2759-2770, jan. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.081>>. Acesso em: 22 set. 2018.

SAFIUDDIN, Md. Concrete damage in field conditions and protective sealer and coating systems. **Coatings**, [s.l.], v. 7, n. 7, p.90-112, 29 jun. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/coatings7070090>>. Acesso em: 14 set. 2018.

SMITH, W. F., HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. AMGH, 5ª ed, 2012. 734 p.

TABELA PRÁTICA 8 - DE TRAÇOS DE CONCRETO PARA USO EM OBRAS. 2002. Disponível em: <<http://www.geocities.ws/andrepcgeo/tabelatracos8B.htm>>. Acesso em: 05 mar. 2019.

WIESE, Andrew *et al.* Assessing performance of glow-in-the-dark concrete. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, [s.l.], v. 2508, p.31-38, nov. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3141/2508-04>>. Acesso em: 15 set. 2018.

ZHAO, Su; LI, Ya Qing; WANG, Qian. On the preparation and properties of luminous concrete. **Advanced Materials Research**, [s.l.], v. 724-725, p.1654-1658, ago. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.724-725.1654>>. Acesso em: 14 set. 2018.