



DAIANY CECCON SIGNORELLI

**FILMES POLIMÉRICOS DOPADOS COM
SURFACTANTE E CORANTE COMO SENSORES DE
RADIÇÃO ULTRAVIOLETA**

**LAVRAS-MG
2023**

DAIANY CECCON SIGNORELLI

**FILMES POLIMÉRICOS DOPADOS COM SURFACTANTE E CORANTE
COMO SENSORES DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Química para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Guilherme Max Dias Ferreira
Orientador

**LAVRAS-MG
2023**

DAIANY CECCON SIGNORELLI

**FILMES POLIMÉRICOS DOPADOS COM SURFACTANTE E CORANTE
COMO SENSORES DE RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA**

**POLYMERIC FILMS DOPED WITH SURFACTANT AND DYE AS
ULTRAVIOLET RADIATION SENSORS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Química para obtenção do título de Bacharelado.

Aprovada em 27 de novembro de 2023
Dr. Cleber Paulo Andrada Anconi - DQI-UFLA
Dra. Maria Lucia Bianchi - DQI-UFLA

Prof. Dr. Guilherme Max Dias Ferreira
Orientador

**LAVRAS-MG
2023**

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso só foi possível ser realizado pela graça e misericórdia de Deus, que me possibilitou ter uma família e professores com que pude contar.

Aos meus pais, Jair Signorelli e Noemi Ceccon Signorelli, agradeço pelos conselhos, em tempos difíceis vocês estavam e estão sempre comigo, sempre sendo os meus primeiros ouvintes. Ao meu irmão, Jasiel Ceccon Signorelli, que foi minha primeira inspiração, que me ensinou a avaliar bem todas as possibilidades existentes.

Aos meus amigos, universitários ou não, agradeço pelos cafés compartilhados, momentos de fofocas e de ajuda com os estudos.

Ao meu orientador Guilherme Max Dias Ferreira, agradeço por ter me escolhido como sua orientada quando eu era apenas uma caloura, por ter sido o primeiro a depositar sua confiança em mim.

Ao meu professor de materiais poliméricos, Juliano Elvis Oliveira, agradeço por ter me dado a base que eu precisava para entrar no universo dos polímeros, que abriu minha mente através do conhecimento.

Aos professores do curso de Química, sou grata por cada aula lecionada e pela paciência que tiveram comigo ao responder tantas dúvidas que surgiam pela minha pessoa.

Ao Departamento de Química da Universidade Federal de Lavras e a Universidade Federal Lavras, bem como seus funcionários, que sempre estão disponíveis para auxiliar seus estudantes.

Às estimadas instituições de fomento, CNPq, Capes e Fapemig, por tornarem possível a concretização deste projeto.

Agradeço mais uma vez a Deus, pois Ele me mostrou que eu nunca estava sozinha, Ele estava lá em todos os momentos, desde os mais felizes até os de mais pura tristeza.

*“Lembre da minha ordem: “Seja forte e corajoso!
Não fique desanimado, nem tenha medo, porque eu,
o Senhor, seu Deus, estarei com você em qualquer
lugar para onde você for!””*

Josué 1:9

RESUMO

Os efeitos da radiação ultravioleta (R-UV) sobre os seres vivos dependem do tempo e da intensidade de exposição, sendo crucial monitorar os níveis de exposição para evitar danos à saúde e aproveitar seus benefícios. Ao mesmo tempo, dosar ou impedir a exposição à R-UV pode evitar processos indesejados de degradação em alimentos e superfícies em geral. Até o momento, os sensores existentes apresentam estruturas complexas e em geral não permitem modular seu tempo de resposta, muitas vezes dependendo de auxílio externo, como aplicativos em smartphones. Nesse contexto, neste trabalho foram desenvolvidos filmes poliméricos dopados com surfactante e corante, avaliando os efeitos das estruturas de cada composto formador do sensor sobre a resposta à R-UV. Os filmes foram sintetizados usando a técnica de "casting" a partir de uma solução filmogênica contendo um polímero como matriz do sensor (polivinil álcool carboxilado, P1, ou polivinil álcool hidroxilado, P2), um corante (verde de metila, MG, violeta de metila 10B, MV, ou pararosanilina, PRA), além de um surfactante, (cloreto de dodecilpiridínio, C12, cloreto de hexadecilpiridínio, C16 ou dodecil sulfato de sódio, S). Os sensores obtidos foram expostos à R-UV, emitida por lâmpadas UVA e UVB, por até 5 horas de exposição. Suas cores foram monitoradas usando sistema CIELab. Notavelmente, quando o corante MG e os surfactantes catiônicos foram usados, tanto para os filmes contendo P1 como P2, a mudança de cor de azul para levemente amarelado foi perceptível, sendo o tempo de mudança de cor menor à medida que a concentração do surfactante aumentou. Essa descoberta sugere que a interação relativa entre o polímero e o surfactante modulou a estabilidade do corante em relação à R-UV, determinando a sensibilidade do sensor à radiação. Isso representando um avanço significativo na área da fotossensibilidade devido a possibilidade de modulação do tempo de resposta do sensor por meio da composição do sensor.

Palavras-chave: Filmes poliméricos; Fotossensibilidade; Resposta colorimétrica; Fotodegradação.

ABSTRACT

The effects of ultraviolet radiation (UV-R) on living organisms depend on the duration and intensity of exposure, making it crucial to monitor exposure levels to prevent health damage and harness its benefits. At the same time, measuring or preventing UV-R exposure can prevent undesirable degradation processes in food and surfaces in general. Existing sensors have complex structures and generally do not allow for the modulation of their response time, often relying on external assistance, such as smartphone applications. In this context, this work developed polymeric films doped with surfactant and dye, evaluating the effects of the structures of each sensor component on the response to UV-R. The films were synthesized using the "casting" technique from a filmogenic solution containing a polymer as the sensor matrix (carboxylated polyvinyl alcohol, P1, or hydroxylated polyvinyl alcohol, P2), a dye (methyl green, MG, crystal violet 10B, MV, or pararosaniline, PRA), as well as a surfactant (dodecylpyridinium chloride, C12, hexadecylpyridinium chloride, C16, or sodium dodecyl sulfate, S). The obtained sensors were exposed to UV-R emitted by UVA and UVB lamps for up to 5 hours. Their colors were monitored using the CIELab system. Remarkably, when the MG dye and cationic surfactants were used, both for films containing P1 and P2, a noticeable color change from blue to slightly yellowish was observed, with a shorter time for the color change as the surfactant concentration increased. This discovery suggests that the relative interaction between the polymer and the surfactant modulated the dye's stability in response to UV-R, determining the sensor's sensitivity to radiation. This represents a significant advancement in the field of photosensitivity due to the possibility of modulating the sensor's response time through its composition.

Keywords: Polymeric films; Photosensitivity; Colorimetric response; Photodegradation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parte superior: estrutura química do P1; parte inferior: estrutura química do P2.	20
Figura 2 - Representação do modelo Lab*.....	26
Figura 3 - Avaliação inicial da concentração do corante MG: $5,453 \times 10^{-5}$, $1,09 \times 10^{-4}$, $2,18 \times 10^{-4}$, $5,45 \times 10^{-4}$, $1,09 \times 10^{-3} \text{ molL}^{-1}$, respectivamente, nos filmes com P1 e C16 após o processo de casting a 25°C	28
Figura 4 - Metodologia de preparo dos filmes a partir de uma solução filmogênica composta por um polímero (P), um surfactante (S) e um corante (C).....	29
Figura 5 - Caixa de madeira com lâmpadas UVA e UVB para descoloração dos filmes.	30
Figura 6 - Corante em diferentes meios em solução aquosa	31
Figura 7 - Em preto: Filmes sem surfactante; em verde: Filmes com surfactante. Parte superior: Parâmetro a^* e parâmetro b^* ; Parte inferior: Parâmetro L. A linha laranja nos gráficos destaca o valor zero.	34
Figura 8 - Parâmetros Lab* dos filmes com o P1 dopados com MV e PRA na presença ou ausência do C12 (concentração de 2 mmol L^{-1} na solução filmogênica) em função do tempo de exposição à R-UV.....	37
Figura 9 - Em preto: Filmes com C16; em vermelho: Filmes com S. Parte superior: Parâmetro a^* e parâmetro b^* ; Parte inferior: Parâmetro L. A linha laranja nos gráficos destaca o valor zero.	40
Figura 10 - Parâmetros Lab* dos filmes com o P1 dopados MG na presença dos surfactantes C12 ou C16 ao longo do tempo. A linha laranja nos gráficos destaca o valor zero.	45
Figura 11 - Filmes com o P2, dopados com o corante MG e o surfactante C12 em diferentes concentrações: À esquerda – parâmetro a^* ; ao meio – parâmetro b^* ; à direita – parâmetro L. A linha laranja nos gráficos destaca o valor zero.	48
Figura 12 - Absorbância em função do tempo de exposição para cada solução de corante.	50
Figura 13 – Espectros de FTIR dos filmes contendo P1, dopados com MG e surfactantes C12, C16 e S, pré e pós exposição à R-UV.....	52

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Estrutura química do verde de metila, violeta de metila 10B e da pararosanilina, respectivamente.	22
Tabela 2 - Estrutura química do cloreto de hexadecilpiridínio (C16), do dodecilpiridínio (C12) e do dodecil sulfato de sódio (S), respectivamente.	24
Tabela 3 - Reagentes empregados na fabricação dos filmes sensores. As siglas entre parênteses, após o sinal de igualdade, foram estabelecidas para composição da nomenclatura dos filmes produzidos.	27
Tabela 4 – Filmes, em duplicata, contendo P1 dopados com o surfactante C12 e corante MG em diferentes tempos de exposição à radiação UV. Concentração de surfactante na solução filmogênica igual a 2 mmolL ⁻¹	33
Tabela 5 - Filmes contendo P1 dopados ou não com o surfactante C12 e contendo o corante MV ou PRA após diferentes tempos de exposição à R-UV.	36
Tabela 6 - Filmes contendo P1 dopados com corante MG e com os surfactantes C16 e S após diferentes tempos de exposição à radiação UV.....	38
Tabela 7 - Variação de cor (ΔE) nos filmes com P1 na presença de C12, C16 ou S a 2,0 mmolL ⁻¹ na solução filmogênica em função do tempo de exposição.....	41
Tabela 8 - Filmes contendo o surfactante C12 com concentrações iguais a 0, 1, 2, 4 e 10 mmol L-1 na solução filmogênica após diferentes tempos de exposição à R-UV.....	43
Tabela 9 - Filmes com o surfactante C16 nas concentrações 0, 1, 2, 4 e 10 mmol L-1 em diferentes tempos de exposição à radiação UV.....	44
Tabela 10 - Filmes com o P2 dopados com MG e o C12 nas concentrações 0, 1, 2, 4 e 10 mmol L-1 em diferentes tempos de exposição à radiação UV.....	47
Tabela 11 - Variação de cor nos filmes com P1 e P2 na presença de C12 em diferentes concentrações ao longo do tempo de exposição, comparando com diferentes referenciais: em relação ao filme sem exposição (ΔE) e ao filme anterior (ΔE^*).	49
Tabela 12 - Média e desvio padrão dos parâmetros de cor dos filmes P1MGC12(2) e P1MG. Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independentes.	61
Tabela 13 - Média e desvio padrão dos parâmetros de cor dos filmes com o P1 dopados com os corantes MV e PRA na presença ou ausência do surfactante C12. Valores são	

reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independentes.	61
Tabela 14 - Filmes com P1 dopados com os surfactantes C16 e S e corante MG em diferentes tempos de exposição à radiação UV. Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independentes.....	62
Tabela 15 - Média e desvio padrão dos parâmetros de cor dos filmes com o P1 dopados com MG na presença do surfactante C12 nas concentrações 0, 1, 2, 4 e 10 mmol L ⁻¹ . Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independente.....	63
Tabela 16 - Média e desvio padrão dos parâmetros de cor dos filmes com o P1 dopados com MG na presença do surfactante C16 nas concentrações 0, 1, 2, 4 e 10 mmol L ⁻¹ . Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independente.....	63
Tabela 17 - Média e desvio padrão dos parâmetros de cor dos filmes com P2. Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independentes.	64

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1.	RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA.....	15
2.2.	SENSORES	15
2.2.1.	Filmes sensores poliméricos.....	16
2.2.2.	Sensores para monitoramento da R-UV	18
2.2.3.	Polivinil álcool.....	19
2.3.	ADITIVOS	20
2.3.1.	Corantes	21
2.3.2.	Surfactantes	23
2.3.2.1.	Surfactantes catiônicos.....	23
2.3.2.2.	Surfactantes aniônicos	24
2.4.	COLORIMETRIA	25
2.4.1.	Sistema CIELab.....	25
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1.	MATERIAIS	27
3.2.	PREPARO DA SOLUÇÃO FILMOGÊNICA.....	27
3.3.	PREPARO DOS FILMES SENSORES	29
3.4.	ENSAIOS DE DESCOLORAÇÃO.....	30
3.4.1.	Análise dos parâmetros Lab* dos filmes sensores.....	30
3.5.	ANÁLISE DO POTENCIAL DE DESCOLORAÇÃO DO CORANTE EM SOLUÇÃO AQUOSA	31
3.6.	ANÁLISES COM ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	31
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1.	RESPOSTA DOS FILMES À R-UV	33
4.1.1.	Efeito da estrutura do corante sobre as propriedades fotocromicas do sensor	35
4.1.2.	Efeito da estrutura do surfactante	38
4.1.2.1.	Efeito da concentração dos surfactantes	42
4.1.3.	Efeito da estrutura do polímero	46

4.2.	MECANISMOS DE DESCOLORAÇÃO DOS FILMES.....	50
4.2.1.	Avaliação do potencial de descoloração do corante em solução aquosa ...	50
4.2.2.	Análises por FTIR	51
4.2.3.	Possíveis mecanismos de fotodegradação.....	53
5.	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICE A – DADOS REFERENTES AS MÉDIAS E DESVIO PADRÕES	
	DOS PARÂMETROS LAB*	61

1. INTRODUÇÃO

Diariamente, estamos expostos à radiação ultravioleta (R-UV) proveniente da luz solar, uma exposição que pode ter efeitos benéficos, como a síntese de vitamina D em nosso organismo, mas também pode ser prejudicial, aumentando o risco de câncer de pele. De acordo com o Instituto Nacional de Câncer (INCA), o câncer de pele não melanoma é o tipo mais comum no Brasil, representando aproximadamente 30% de todos os tumores malignos registrados no país. Em 2017, houve 7,7 milhões de casos de câncer de pele não melanoma, resultando em 65.000 mortes em todo o mundo. Portanto, a exposição à R-UV é uma preocupação significativa devido aos seus potenciais efeitos nocivos para a saúde. (FITZMAURICE *et al.*, 2019; INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER, 2022).

Os impactos da radiação ultravioleta não afetam apenas os seres humanos, mas também objetos, alimentos e superfícies em geral, que podem sofrer degradação quando expostos de forma contínua à R-UV. Os efeitos benéficos ou prejudiciais da R-UV, entretanto, dependem do tempo e intensidade de exposição a ela. Portanto, é de extrema importância monitorar e controlar os níveis de exposição à R-UV, seja para prevenir danos à saúde e aproveitar os benefícios que ela pode oferecer ou evitar processos de degradação indesejados (SILVA, BERNARDO COUPÊE GONÇALVES DA *et al.*, 2022; WAJNSZTOK; QUEIROZ, 2022).

Sensores colorimétricos surgem como uma solução simples e acessível para indicar os níveis de exposição à R-UV, permitindo que pessoas não especialistas possam monitorar e controlar com mais precisão seu tempo de exposição. Entre as diversas classes de sensores, destacam-se aqueles baseados em polímeros, que podem agir como materiais sensíveis à R-UV ou como matrizes para a incorporação de moléculas sonda sensíveis a ela (HUANG; CHALMERS, 2021).

Polímeros biodegradáveis, como os baseados em polivinil álcool (PVA), têm se destacado nesse contexto, pois são considerados alternativas ecologicamente corretas aos polímeros sintéticos derivados do petróleo. Esses polímeros oferecem diversas características atrativas, incluindo a ausência de odor, baixa toxicidade, alta resistência mecânica, flexibilidade, transparência e resistência química. Neste trabalho, foram explorados dois polímeros: um PVA hidrolisado e outro carboxilado. Estes dois polímeros apresentam a capacidade de interagir com diferentes surfactantes. Nossa hipótese é de que essa interação polímero-surfactante pode permitir alterar a resposta de

fotodegradação de um corante frente à R-UV quando o surfactante e o corante são incorporados na matriz do filme polimérico (DE OLIVEIRA FARIA; VERCELHEZE; MALI, 2012; MARK, 1999; PATIÑO-AGUDELO *et al.*, 2022).

Neste trabalho, esforços foram concentrados em desenvolver um sensor colorimétrico versátil e de baixo impacto ambiental, utilizando filmes compostos por polímeros, diferentes surfactantes e corantes da classe do trifenilmetanos. A presença dos surfactantes nos filmes foi capaz de modular a cinética de fotodegradação de um corante sensíveis à R-UV, permitindo a criação de sensores capazes de atender a diversas aplicações que demandam o controle de exposição a essa radiação e expandindo a possibilidade de aplicações potenciais desses sensores (KURZ *et al.*, 2020).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Radiação ultravioleta

A radiação ultravioleta (R-UV) é categorizada em três tipos principais: UVA, UVB e UVC. Enquanto os raios UVA e UVB conseguem penetrar a atmosfera, os raios UVC são efetivamente bloqueados pela camada de ozônio. Esses raios UV que alcançam a superfície terrestre têm o potencial de afetar nosso organismo de maneira complexa. Por um lado, a exposição moderada pode ter efeitos benéficos, como a indução da produção de vitamina D em nosso corpo. Por outro lado, a exposição excessiva e a falta de proteção adequada podem resultar em efeitos prejudiciais, como danos à pele, degradação de alimentos e materiais, e o aumento do risco de câncer de pele (HUSSAIN *et al.*, 2023).

Além disso, os impactos resultantes da exposição aos raios UV na superfície da Terra, juntamente com as mudanças climáticas iminentes, têm o potencial de encurtar a vida útil de materiais e produtos. Nesse contexto, a implementação de medidas mais robustas e intervenções se torna crucial para preservar a durabilidade de objetos e alimentos, bem como a segurança (ANDRADY *et al.*, 2023).

Os efeitos da R-UV variam significativamente dependendo do tempo de exposição. Portanto, a implementação de um dispositivo capaz de ajudar a controlar o tempo de exposição, permitindo alertar sobre quando um indivíduo ou objeto deve interromper a exposição ou reaplicar o protetor solar, por exemplo, pode ser uma abordagem eficaz para otimizar os benefícios das propriedades positivas da R-UV, ao mesmo tempo que reduz os potenciais problemas associados a ela (LEE; ARMANI, 2016).

Soluções para lidar com essa questão têm surgido cada vez mais, que vão desde o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos e sensores, até aplicativos que oferecem informações sobre os níveis de exposição à radiação ultravioleta de maneira contínua e gradual (ARAKI *et al.*, 2017; ENFU, 2021; FENG; HU, 2019; KURZ *et al.*, 2020).

2.2. Sensores

Sensores são dispositivos projetados para coletar dados qualitativos ou quantitativos relacionados a fenômenos ou parâmetros específicos em locais determinados. Eles desempenham um papel vital na aquisição precisa e rápida de

informações em uma ampla variedade de aplicações. Os sensores podem ser portáteis, permitindo coletar informações de forma conveniente no local, eliminando a necessidade de transporte de amostras até um laboratório, o que resulta em maior eficiência e acessibilidade (SKOOG *et al.*, 2006).

Esses dispositivos são essenciais para detectar e medir alterações em diversas grandezas físicas, como luz, temperatura, pressão, umidade, entre outras. Eles desempenham um papel crucial em diversas áreas, desde a indústria até a vida cotidiana, fornecendo dados mais precisos para controle, monitoramento e tomada de decisões. A evolução das tecnologias de sensores tem sido impulsionada pelo desenvolvimento de novos materiais, resultando em um aumento significativo no uso de sensores em setores como saúde, meio ambiente, dispositivos vestíveis e muitos outros (YAMPOLSKY *et al.*, 2023).

Com o objetivo de reduzir despesas, têm ocorrido um aumento considerável em pesquisas voltadas para alternativas que permitam a implementação de sensores de forma mais econômica, eficiente e menos complexa. Dado que eles podem ser aplicados em diversas áreas, existe a possibilidade de torná-los acessíveis ao público em geral por meio de soluções simplificadas e de fácil utilização (FLOWERDAY *et al.*, 2023).

Esses instrumentos são capazes de detectar uma ampla gama de parâmetros por meio de diferentes abordagens, incluindo sensores colorimétricos, que identificam estímulos por meio de alterações de coloração originadas de reações químicas específicas; sensores eletroquímicos, que se valem de reações eletroquímicas para mensurar concentrações de analitos, com base nos potenciais elétricos gerados por reações redox; sensores ópticos, que exploram a interação da luz com a amostra, frequentemente empregando princípios de absorção, fluorescência ou refração luminosa para fins de medição, entre outros. Essa notável diversidade de sensores possibilita uma adaptação abrangente a uma extensa variedade de necessidades de medição em campos tão diversos quanto análise química e monitoramento ambiental e da saúde (FREIRE, 2023; ZULIANI; KHIAR; CARRILLO-CARRIÓN, 2023).

2.2.1. Filmes sensores poliméricos

Os sensores poliméricos têm atraído considerável atenção devido à capacidade dos polímeros de adaptarem suas propriedades com base em suas características

intrínsecas. Diversos polímeros podem ser empregados como sensores. Um exemplo notável é a polianilina. Esta substância é altamente eficaz na detecção de formaldeído, um composto frequentemente utilizado nas indústrias têxteis, de tintas e afins, e que apresenta riscos para o sistema respiratório quando inalado. Assim, é possível depositar fisicamente esse polímero em uma placa sensora, como evidenciado em um recente estudo sobre a deposição de materiais sensores poliméricos, para a detecção de vapores daquele contaminante (CHEN *et al.*, 2023; MAVANI *et al.*, 2023).

Na criação de filmes poliméricos, a capacidade de alcançar propriedades físico-químicas, como elevada flexibilidade, transparência e permeabilidade, abre um leque de oportunidades na aplicação de sensores baseados nesses materiais. Em um estudo recente, foram utilizados filmes sensíveis produzidos por meio da técnica de *sputtering* (deposição física por bombardeamento de íons) a partir de poli(éter-éter-cetona) (PEEK) como um substrato flexível. Esses filmes serviram como base para a incorporação de eletrodos interdigitais de grafeno induzidos por laser (LIG-IDE) com o objetivo de desenvolver sensores de umidade flexíveis em larga escala (WANG *et al.*, 2023).

A produção de filmes sensores sustentáveis também têm mostrado resultados importantes para a detecção de contaminantes. Um exemplo é a criação de um filme sensor de carboximetilcelulose (CMC) e amido, que incorpora antocianina de arroz preto. Esse filme sensor foi desenvolvido com o objetivo de detectar íons Al(III) em meio aquoso, sendo que suas mudanças de cor irreversíveis permitem uma detecção a olho nu. Quando exposto ao Al(III), o filme muda de vermelho para roxo (SILVA, HERIVELTOM MORAIS DA *et al.*, 2020).

A relevância das cores na área dos sensores ganha destaque, especialmente quando se considera a vantagem da percepção visual direta. Em um estudo recente, foi desenvolvida uma tinta fotoeletrocromica à base de água, composta pelo polímero polioxometalato e ácido láctico. Essa tinta foi aplicada em papel filtro, resultando na criação de sensores acessíveis e eficazes. Um aspecto notável desses sensores é sua capacidade de mudar de cor de forma visível em resposta à exposição à R-UV, tornando os resultados imediatamente perceptíveis a olho nu. Além disso, para ajustar o tempo de resposta do sensor em relação à intensidade da luz UV incidente, foram utilizados filtros ópticos transparentes, o que proporciona uma abordagem versátil (ZOU *et al.*, 2018).

Os exemplos acima demonstram a versatilidade e o potencial de filmes na criação de sensores inovadores para diferentes aplicações.

2.2.2. Sensores para monitoramento da R-UV

Sensores de resposta colorimétrica à R-UV oferecem uma alternativa acessível e prática para monitorar níveis de exposição à radiação, eliminando a necessidade de especialistas na interpretação dos resultados. Nesse contexto, os sensores poliméricos destacam-se como uma opção versátil, capaz de atuar como materiais sensíveis à radiação UV ou como plataformas para a incorporação de moléculas sonda específicas. Em um ambiente de crescente preocupação com os impactos da exposição à R-UV na saúde e no meio ambiente, esses sensores desempenham um papel fundamental, fornecendo uma solução acessível e prática. A simplicidade e o custo-benefício dessa abordagem têm o potencial de beneficiar a sociedade como um todo (HUANG; CHALMERS, 2021).

Nesse contexto, uma interessante inovação descreve um sensor de radiação UV vestível projetado para detectar doses específicas de radiação eletromagnética. Este sensor é composto por um substrato polimérico que inclui pelo menos um tipo de polímero e pelo menos um indicador de exposição à radiação UV, juntamente com um adesivo. Quando exposto a determinadas doses de radiação eletromagnética, o sensor UV vestível provoca uma mudança no fotocromismo presente no substrato polimérico (FENG; HU, 2019).

Em outro trabalho, um filme foi desenvolvido com uma camada de um polímero responsivo à radiação UV, especificamente o polimetilmetacrilato modificado com orto-nitrobenzil. Esta camada sensível foi encapsulada entre duas camadas protetoras transparentes de diferentes materiais: polidimetilsiloxano e polietileno naftalato. Como resultado, esse sensor demonstrou a capacidade de mudar de cor de maneira visível após a exposição à radiação UV. Entretanto, é válido observar que, devido à complexidade intrínseca de sua construção multicamadas, o processo de fabricação desse sensor se revela desafiador (LEE; ARMANI, 2016).

Um dos principais desafios na pesquisa de sensores colorimétricos de radiação UV é criar formulações que possam responder de maneira eficaz a diferentes níveis de exposição à radiação ultravioleta. Isso é especialmente importante ao monitorar como a pele humana reage à luz solar, pois a quantidade de radiação que causa vermelhidão na pele (conhecida como MED) varia de pessoa para pessoa. Muitos sensores descritos na literatura tentam resolver esse problema usando filtros transparentes para controlar a quantidade de radiação que chega ao sensor, o que afeta quanto tempo leva para a

mudança de cor ocorrer e ser detectada visualmente. No entanto, essa abordagem pode tornar o sensor menos confiável, já que depende de ajustes externos. Portanto, ainda há a necessidade de desenvolver sensores mais robustos e versáteis que possam ser usados em diferentes situações (FITZPATRICK, 1988; HUANG; CHALMERS, 2021; VEERALINGAM; PRIYA; BADHULIKA, 2020).

2.2.3. Polivinil álcool

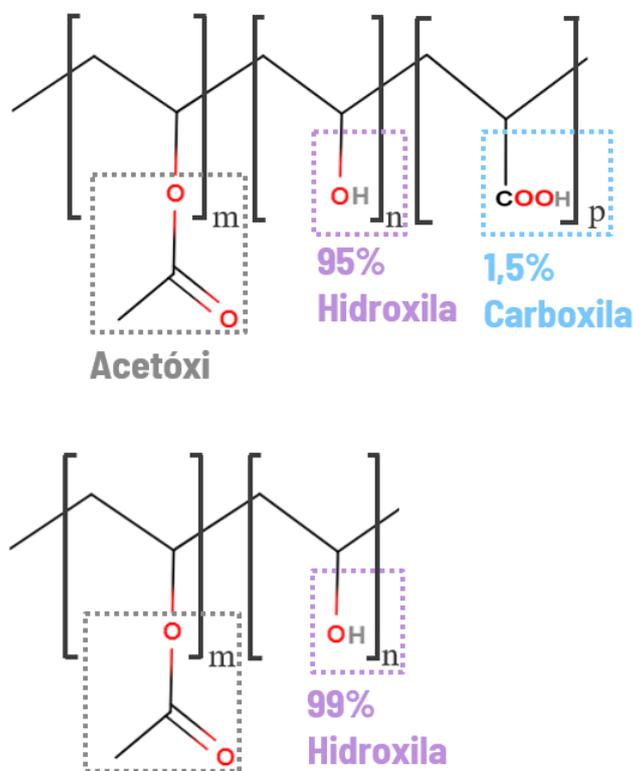
O polivinil álcool, PVA, possui notável capacidade de adaptação como material para produção de filmes e, assim como outros polímeros, pode ser empregado como matriz para o desenvolvimento de sensores para detecção de R-UV. De acordo com o *Polymer Data Handbook* de 1999, o PVA já é reconhecido por sua versatilidade, sendo empregado em aplicações variadas, como filmes resistentes ao oxigênio, emulsionantes, substrato e revestimento para filmes fotográficos, embalagens de alimentos, entre outras (MARK, 1999).

Em um estudo recente, o PVA desempenhou um papel essencial como componente-chave na criação de um sensor inovador para identificar a presença de cobre em cachaça. Os filmes poliméricos de amido e PVA, ofereceram um suporte sólido para a imobilização de antocianina (AN), revelando um sensor colorimétrico capaz de detectar Cu(II) na cachaça. Isso destaca a versatilidade e viabilidade comercial deste polímero como uma solução simples em diferentes aspectos (FIGUEIREDO *et al.*, 2022).

Neste trabalho, PVA na forma carboxilada (P1) e de elevado grau de hidrólise (P2) foram investigados. As estruturas desses polímeros são ilustradas na Figura 1. Ambas as variações são solúveis em água e compartilham semelhanças no processo de solubilização. O P2 utilizado possui uma porcentagem de hidrólise superior a 99%, um grau de polimerização de 1000 e uma massa molar (MM) de 45000 gmol^{-1} . Por outro lado, o P1 exibe uma taxa de hidrólise superior a 95%, um grau de polimerização de 1700 e uma massa molar de 77000 gmol^{-1} . Além disso, este último apresenta uma fração de grupos carboxílicos equivalente a 1,5% mol/mol em relação aos grupos hidroxila (PATIÑO-AGUDELO *et al.*, 2022).

A possibilidade de modulação de grupos funcionais na cadeia do polímero pode alterar a características dos sensores tri-componentes, visto que a interação entre os componentes da matriz pode afetar a estabilidade fotocromica do sensor, permitindo alteração no tempo de resposta resultado da exposição à R-UV

Figura 1 - Parte superior: estrutura química do P1; parte inferior: estrutura química do P2.



Fonte: Da autora (2023).

2.3. Aditivos

Aditivos são substâncias que podem ser introduzidas nas formulações de polímeros com o intuito de modificar suas propriedades ou conferir-lhes características adicionais (MALPASS, 2010). A incorporação de aditivos tem desempenhado um papel crucial em uma variedade de aplicações de polímeros, viabilizando possibilidades que de outra forma seriam inatingíveis. Dentre os diferentes tipos de aditivos disponíveis, destacam-se antioxidantes, agentes antiestáticos, lubrificantes, agentes antimicrobianos, agentes deslizantes, neutralizadores de ácido, retardadores de chama, agentes antiaderentes, corantes, entre outros. No âmbito deste trabalho, optou-se por incorporar corantes e agentes tensoativos (surfactantes) dentre a variedade de aditivos disponíveis, visando atender às necessidades específicas da aplicação em questão (PFAENDNER, 2019).

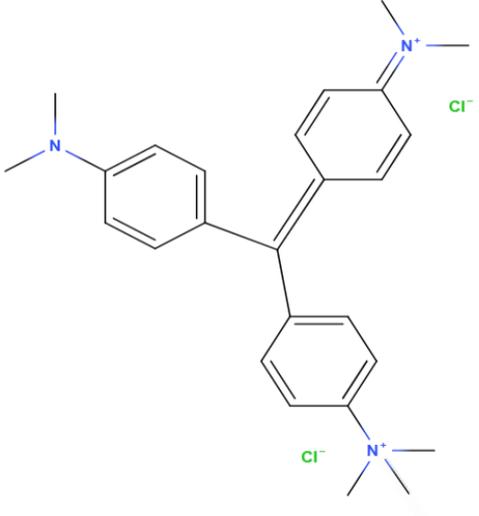
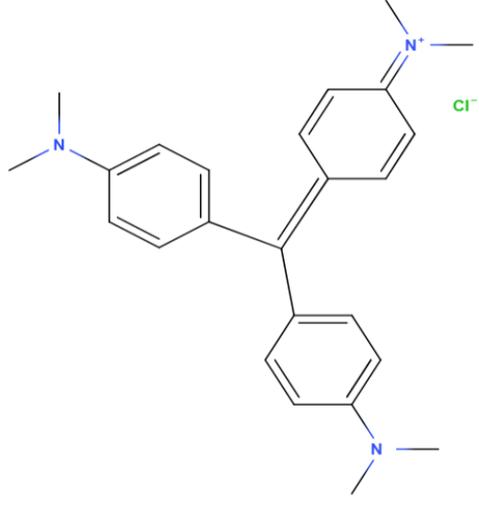
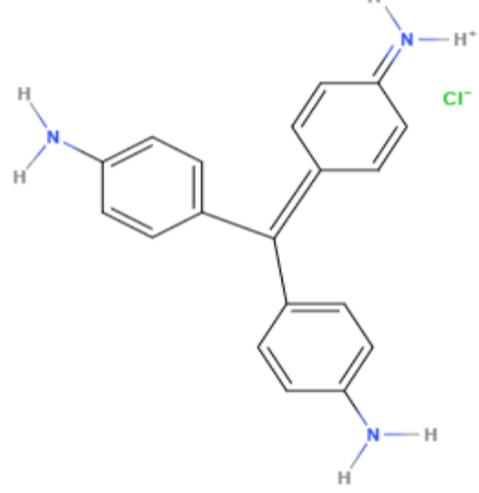
2.3.1. Corantes

Os corantes são aditivos que não apenas proporcionam coloração a diversos materiais, incluindo polímeros e, por extensão, filmes poliméricos, mas também podem atuar como agentes fotossensíveis. Sob a influência da R-UV, esses corantes têm a capacidade de modificar suas propriedades fotossensíveis, desencadeando, assim, mudanças de cor identificáveis a olho nu (KURZ *et al.*, 2020).

Dentre a ampla gama de corantes disponíveis, foram selecionados três - verde de metila, violeta de metila e pararosanilina - para serem incorporados individualmente na matriz polimérica, tanto na presença quanto na ausência de surfactante. Todos compartilham estruturas químicas semelhantes, conforme detalhado na Tabela 1 (AMORIM, 2023).

É importante ressaltar que as estruturas químicas aqui apresentadas são apenas representações, considerando que, com base em evidências, a carga líquida do átomo de nitrogênio é negativa. No entanto, por questões de conveniência, opta-se por representar as cargas formais em vez das cargas reais (MILNER-WHITE, 1997).

Tabela 1 - Estrutura química do verde de metila, violeta de metila 10B e da pararosanilina, respectivamente.

Corante	Estrutura
Verde de metila $C_{26}H_{33}N_3Cl_2$	
Violeta de metila 10B $C_{25}H_{30}N_3Cl$	
Pararosanilina $C_{19}H_{18}N_3Cl$	

Fonte: Da autora (2023)

2.3.2. Surfactantes

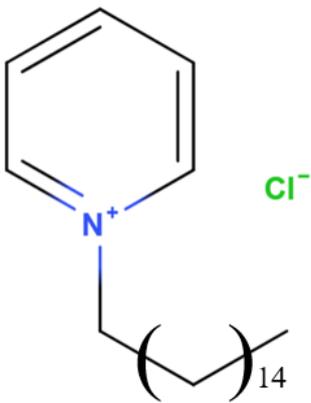
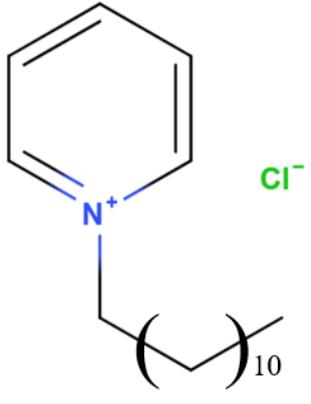
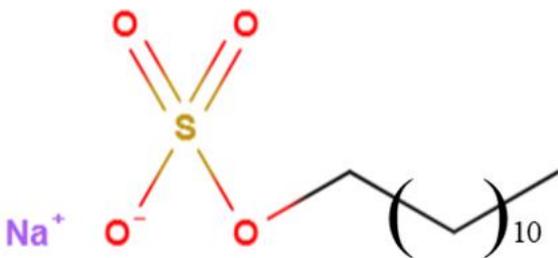
Surfactantes apresentam propriedades físico-químicas singulares devido à sua natureza anfifílica, que compreende partes hidrofílicas e hidrofóbicas. Eles desempenham um papel multifacetado, sendo empregados em várias soluções para reduzir a tensão interfacial, modificar propriedades e atuar como emulsificantes, formadores de espuma, entre outras funções. Eles são classificados pela sua cabeça polar, podendo ser não iônico (neutro), catiônico (positivo) ou aniônico (negativo) (HAMA; MANSHAD; ALI, 2023).

Os surfactantes representam um tipo de aditivo que tem sido objeto de estudos devido às suas interações intrigantes com polímeros. Sua relevância é notável no mercado, uma vez que desempenham um papel crucial em composições de produtos de higiene pessoal, desinfetantes e possuem diversas aplicações na indústria farmacêutica (CHOI *et al.*, 2023).

2.3.2.1. Surfactantes catiônicos

Os surfactantes catiônicos são caracterizados por possuírem carga total positiva em sua estrutura. Estudos recentes investigaram a interação entre o PVA e um desses surfactantes catiônicos, o cloreto de hexadecilpiridínio (C16), e demonstraram que essa interação é altamente favorável, especialmente quando se trata do P2. Essa interação é impulsionada por forças hidrofóbicas e eletrostáticas, resultando na formação de agregados macroscópicos entre o surfactante e o PVA carboxilado (PATIÑO-AGUDELO *et al.*, 2022). Além do C16, também foi utilizado o cloreto de dodecilpiridínio (C12), que possui uma cauda ligeiramente mais curta, com quatro carbonos a menos em sua estrutura. As estruturas químicas de ambos os surfactantes estão detalhadas na Tabela 2 (SANTOS, 2014).

Tabela 2 - Estrutura química do cloreto de hexadecilpiridínio (C16), do dodecilpiridínio (C12) e do dodecil sulfato de sódio (S), respectivamente.

Surfactante	Estrutura
<p>C16 C₂₁H₃₈ClN</p>	
<p>C12 C₁₇H₃₀ClN</p>	
<p>S NaC₁₂H₂₅SO₄</p>	

Fonte: Da autora (2023)

2.3.2.2. Surfactantes aniônicos

Os surfactantes aniônicos carregam uma carga negativa em sua estrutura. Eles possuem uma ampla gama de aplicações, desde o auxílio em processos de aceleração de hidratos gasosos até o uso na técnica de eletroforese. Dada a sua relevância, o dodecil sulfato de sódio (S), Tabela 2, foi submetido a avaliação como parte do processo de dopagem dos filmes (FARHADIAN *et al.*, 2023).

2.4. Colorimetria

A colorimetria é uma ciência que explora como a percepção humana atribui as cores e desempenha um papel fundamental ao associar cores a sensores, permitindo a distinção de propriedades em materiais com base nas mudanças de cor percebidas pelo olho humano. Para garantir maior confiabilidade nos resultados, é essencial quantificar as cores de forma precisa, assegurando que o sensor seja eficaz mesmo quando observado a olho nu (QIAN, 2022; ZOU *et al.*, 2018).

Ao lidar com sensores fotossensíveis, é fundamental considerar a influência das cores, especificamente no contexto da colorimetria. O estudo das cores nos torna conscientes do fenômeno de metamerismo, que pode levar à confusão de diferentes cores como sendo idênticas. Portanto, para abordar de maneira precisa questões relacionadas às cores e a outros aspectos, é importante empregar ferramentas que nos auxiliem, como sistemas de gerenciamento de cores (HILLER, 2019).

2.4.1. Sistema CIELab

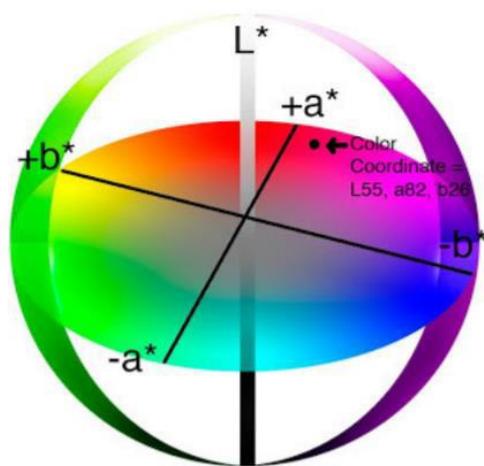
Além do sistema de cores RGB (*red, green, blue*), há uma variedade de sistemas de cores disponíveis. Neste trabalho, optou-se pelo sistema de cores CIELab, que utiliza o espaço de cores Lab*. Nesse espaço, o valor L corresponde à luminosidade, variando de branco (+) a preto (-), enquanto o valor a* abrange o espectro do vermelho (+) ao verde (-), e o valor b* varia do amarelo (+) ao azul (-), conforme ilustrado na Figura 2 (ADAMS; BARICHELLO, 2018).

É relevante enfatizar o parâmetro de variação de cor (ΔE) devido à sua importância na avaliação das diferenças de cores entre dois sistemas diferentes. Este parâmetro é definido por meio de uma análise numérica da comparação entre uma amostra e um padrão, revelando as discrepâncias absolutas nas coordenadas de cor entre ambos. O ΔE , portanto, representa a diferença global na cor, oferecendo informações sobre a magnitude dessas variações e pode ser calculada segundo a Equação 1:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^2 + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})} \quad (\text{Equação 1})$$

em que ΔE é a diferença total de cor, ΔL é a variação da luminosidade, Δa^* é a variação do parâmetro a^* e Δb^* do parâmetro b^* . Quando o valor obtido é inferior a 1, a diferença de cor não é visível a olho nu. No entanto, quando o valor excede 1, a diferença torna-se perceptível (HILLER, 2019; QIAN, 2022).

Figura 2 - Representação do modelo Lab*.



Fonte: (MOLINA, 2010).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Os reagentes empregados na condução deste estudo estão detalhados na Tabela 3, incluindo informações sobre seus fornecedores e graus de pureza. Água deionizada foi utilizada no preparo de todas as soluções.

Tabela 3 - Reagentes empregados na fabricação dos filmes sensores. As siglas entre parênteses, após o sinal de igualdade, foram estabelecidas para composição da nomenclatura dos filmes produzidos.

Reagentes	Fornecedor	Pureza
Polivinil álcool carboxilado (P1)	Kuraray	-
Polivinil álcool hidrolisado (P2)	Kuraray	-
Cloreto de dodecilpiridínio (C12)	Sigma	98%
Cloreto de hexadecilpiridínio (C16)	Sigma	99%
Dodecilsulfato de Sódio (S)	Sigma	99%
Pararosanilina (PRA)	Sigma	90%
Verde de metila (MG)	MERCK	-
Violeta de metila 10B (MV)	Sigma	98%

Fonte: Da autora (2023)

3.2. Preparo da solução filmogênica

O preparo dos filmes sensores requer uma solução filmogênica, que foi obtida pela mistura de três soluções estoques distintas: uma solução polimérica, uma de surfactante e outra de corante. O procedimento de preparo de cada solução é descrito a seguir:

Solução estoque de polímero (P1 ou P2) de concentração 2,00 % m/v: para cada experimento foram preparados 200 mL de solução, pesando-se 4,0000 g de polímero, P1 ou P2, que foi inicialmente solubilizado em água deionizada com auxílio de uma chapa agitadora, em uma temperatura de aproximadamente 90°C.

Solução estoque de surfactante de concentração 60,0 mmolL⁻¹: foram preparados 25,00 mL de solução. Isso foi alcançado mediante a dissolução de 0,5424 g do surfactante C16, 0,4345 g do C12 ou 0,4370 g do SDS em água deionizada, com auxílio de um bastão de vidro.

Solução estoque dos corantes de concentração $2,40 \times 10^{-3} \text{ molL}^{-1}$: foram preparados 250,00 mL de solução para o MG, pesando-se aproximadamente 0,2750 g do corante; 50,00 mL de solução para o MV e o PRA, pesando-se aproximadamente 0,0499 g do MV e 0,0431 g do PRA. Os corantes foram solubilizados em água sob agitação magnética por cerca de 24 horas, e então transferidos quantitativamente para balões volumétricos.

A partir da preparação das soluções estoque, determinaram-se as concentrações desejadas para obtenção das soluções filmogênicas, alcançadas por meio da mistura de volumes apropriados das soluções estoques preparadas. Na solução filmogênica, a concentração final do polímero (P1 ou P2) foi mantida em 1,00% (m/v), enquanto a concentração do corante (MG, MV ou PRA) foi de $5,45 \times 10^{-4} \text{ molL}^{-1}$. Essa concentração foi determinada após uma série de testes iniciais, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Avaliação inicial da concentração do corante MG: $5,453 \times 10^{-5}$, $1,09 \times 10^{-4}$, $2,18 \times 10^{-4}$, $5,45 \times 10^{-4}$, $1,09 \times 10^{-3} \text{ molL}^{-1}$, respectivamente, nos filmes com P1 e C16 após o processo de casting a 25°C .



Fonte: Da autora (2023)

As formulações dos sensores resultantes das soluções filmogênicas foram nomeadas como: P1MG, P1MGC12(1), P1MGC12(2), P1MGC12(4), P1MGC12(10), P1MVC12(2), P1PRAC12(2), P1MGC16(1), P1MGC16(2), P1MGC16(4), P1MGC16(10), P1MGS(2), P2MGC12(1), P2MGC12(2), P2MGC12(4), P2MGC12(10). Nessa nomenclatura, a presença de cada constituinte no sensor é dada pela sigla que o denota, como descrito na Tabela 3. O número entre parênteses na frente de cada formulação indica a concentração do surfactante em mmolL^{-1} , na solução filmogênica, ou seja, (1) representa 1 mmolL^{-1} , (2) 2 mmolL^{-1} , e assim por diante. Para as formulações

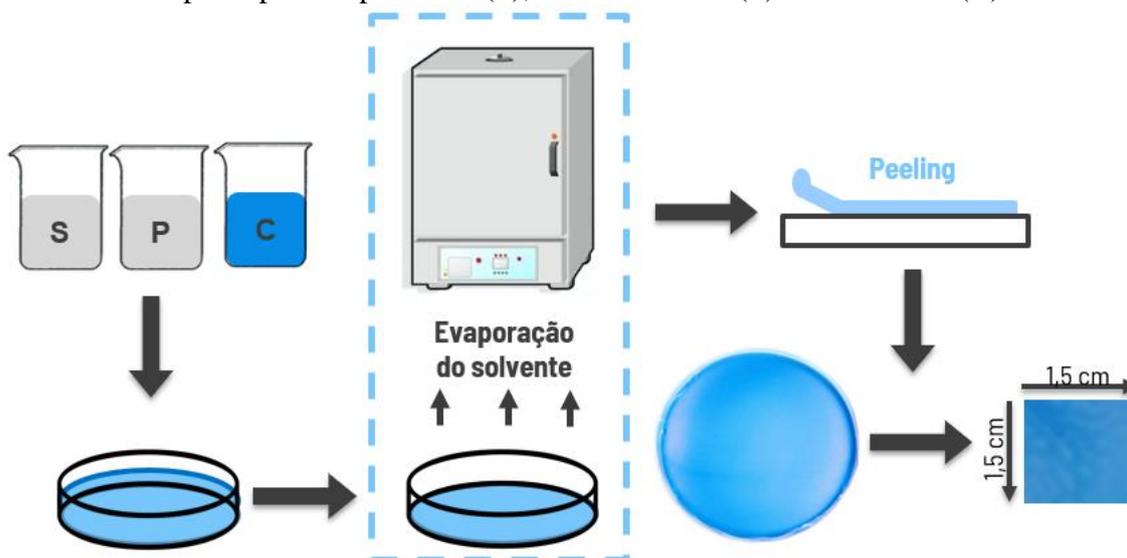
contendo MV ou PRA, a sigla desses corantes substituiu a sigla MG no nome do sensor obtido.

3.3. Preparo dos filmes sensores

As soluções filmogênicas, com volume total de 40,0 mL, foram dispostas em uma placa Petri de cerca de 50,0 mL e submetidas ao processo de *casting* em uma estufa de circulação de ar (Lucadema SS Dc – 85 L). Nela, os filmes foram posicionados sobre uma folha de papel alumínio para facilitar seu manuseio. Assim o solvente foi evaporado resultando na formação do filme polimérico sensor. A temperatura deste processo variou de acordo com cada tipo de polímero. Para o P1, a temperatura foi mantida a 45°C por aproximadamente 18 horas, enquanto para o P2, inicialmente variou entre 30 e 35°C durante aproximadamente 23 horas, seguido por uma variação entre 40 a 49°C por cerca de 5 horas.

Após a conclusão da síntese dos filmes, procedeu-se ao processo de *peeling*, ou seja, a remoção dos filmes da superfície de preparação, seguido do fracionamento destes em pequenos quadrados, com dimensões aproximadas de 1,5 x 1,5 cm². O procedimento de preparo dos filmes encontra-se na Figura 4.

Figura 4 - Metodologia de preparo dos filmes a partir de uma solução filmogênica composta por um polímero (P), um surfactante (S) e um corante (C).



Fonte: Da autora (2023)

3.4. Ensaio de descoloração

Os filmes sensores foram levados para o interior de uma caixa de exposição à radiação UV (Figura 5) contendo lâmpadas UVA e UVB posicionadas a uma distância de trabalho de 5 cm das amostras. A intensidade de incidência de radiação sobre os filmes foi aproximadamente de $0,766 \text{ mWcm}^{-2}$. Este procedimento foi adotado com o objetivo de simular as condições de radiação solar, conforme discutido no trabalho de Kurz e colaboradores (2020). Os tempos de exposição variaram num intervalo de 0 a 5 horas. Após remoção da caixa, seguiu-se com a análise colorimétrica dos filmes.

Figura 5 - Caixa de madeira com lâmpadas UVA e UVB para descoloração dos filmes.



Fonte: Da autora (2023)

3.4.1. Análise dos parâmetros Lab* dos filmes sensores

Após a exposição à radiação UV, as amostras foram submetidas à análise da coloração utilizando o colorímetro Color Muse, com a medição dos parâmetros de cor Lab*. Foram realizadas cinco medições em pontos distintos para cada recorte de filme, sendo posteriormente calculada a média e o desvio padrão. É relevante destacar que todos os experimentos foram executados em duplicata para garantir a confiabilidade e consistência dos resultados.

3.5. Análise do potencial de descoloração do corante em solução aquosa

Para avaliar a fotodegradação do corante em solução aquosa, foram preparadas quatro soluções diferentes, mantendo-se as concentrações das soluções filmogênicas mencionadas anteriormente, ou seja, o P1 foi mantido em 1,0% (m/v) e o corante MG em $5,45 \times 10^{-4} \text{ molL}^{-1}$, na ausência ou presença de $10,0 \text{ mmolL}^{-1}$ do C12. As composições das soluções são aquelas que geraram os filmes P1MG e P1MGC12(10). Um sistema contendo apenas o corante (MG) ou o corante e o surfactante (MGC12(10)) também foram preparados para análise. O volume total de solução em cada placa de Petri de vidro foi de 10,0 mL, conforme mostrado na Figura 6.



Fonte: Da autora (2023)

Em seguida, as soluções foram submetidas a um período de exposição de até cinco horas na caixa de radiação UV, mantendo uma distância de trabalho de 5,0 cm. Posteriormente, foram transferidas para frascos de vidro e diluídas 10 vezes com água deionizada. Após essa etapa, as soluções foram submetidas à análise utilizando um espectrofotômetro UV-vis, que operou a um comprimento de onda de 630,0 nm para a obtenção dos valores de absorbância.

3.6. Análises com espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR dos filmes sensores foram adquiridos antes e após a exposição à radiação UV para os filmes compostos P1MG, P1MGC12(2), P1MGC16(2) e P1MGS(2). A aquisição dos espectros foi realizada utilizando um espectrômetro

IRAffinity¹, operando no modo de reflexão total atenuada (ATR), na faixa de frequência entre 400 e 4000 cm^{-1} . Cada espectro foi obtido com uma resolução de 4 cm^{-1} , através de 32 varreduras da amostra. Todas as análises espectroscópicas foram conduzidas nas instalações da Central de Análise e Prospecção Química do Departamento de Química da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resposta dos filmes à R-UV

Para avaliar a hipótese deste trabalho, testes iniciais foram conduzidos com filmes sensores contendo ou não o surfactante sob exposição à R-UV. A Tabela 4 apresenta a análise do comportamento dos filmes, em duplicata, na ausência (P1MG) e na presença (P1MGC12(2)) do surfactante catiônico C12 após expostos à R-UV por um período de até cinco horas.

Tabela 4 – Filmes, em duplicata, contendo P1 dopados com o surfactante C12 e corante MG em diferentes tempos de exposição à radiação UV. Concentração de surfactante na solução filmogênica igual a 2 mmolL^{-1} .

Tempo (min)	P1MG		P1MGC12(2)	
0				
10				
30				
60				
120				
180				
240				
300				

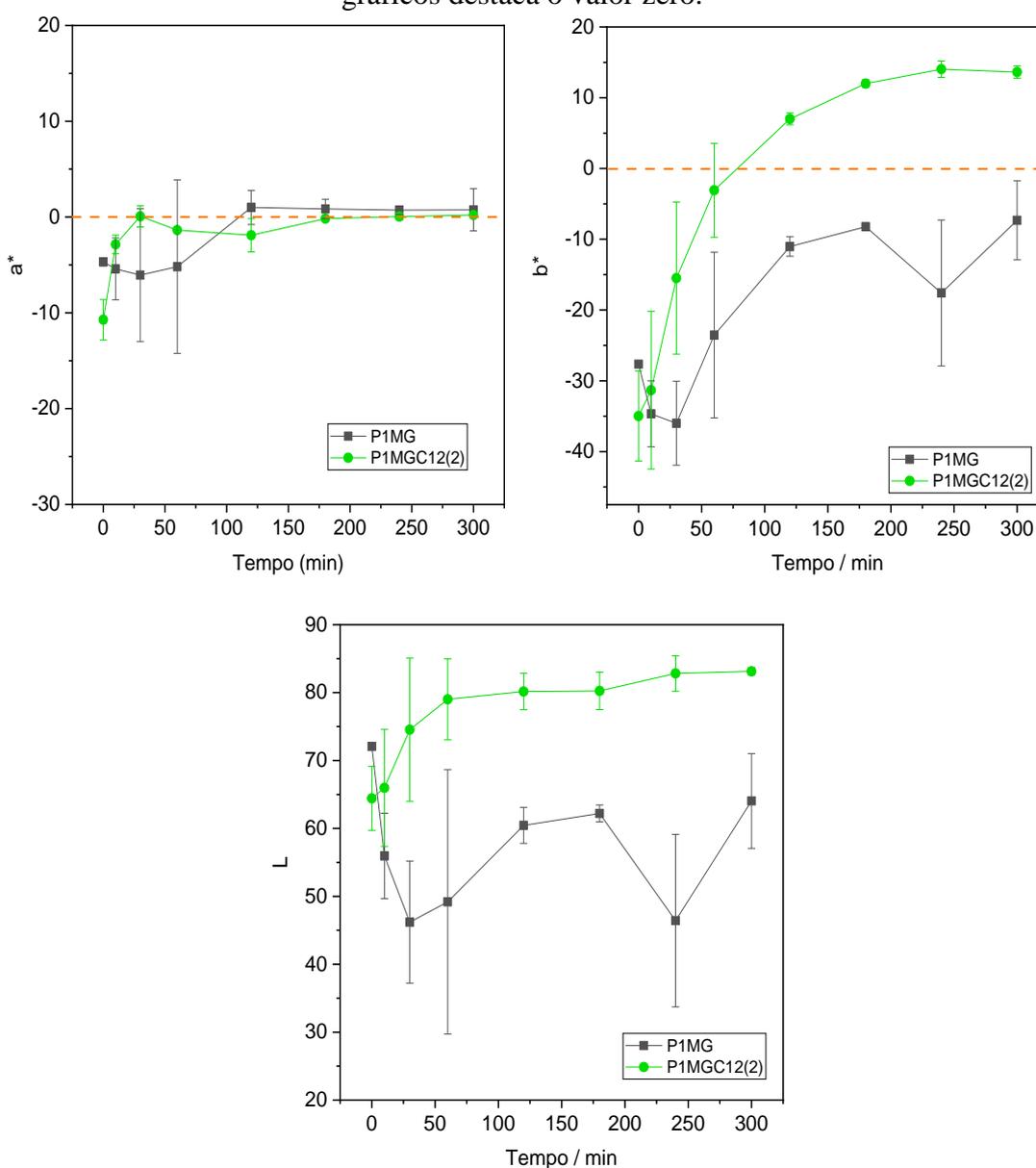
Fonte: Da autora (2023)

Foi observado que, quando os filmes são dopados com o surfactante, apresentam uma perda da coloração azul do filme à medida que são expostos à radiação, o que não

ocorre na ausência de surfactante, em que há apenas uma alteração na tonalidade da coloração azul, que se torna mais escura. Este resultado indica que a adição do surfactante ao sensor favorece a percepção visual de mudança da cor do filme induzida pela R-UV.

Os resultados das análises das cores de cada filme, utilizando o espaço de cores Lab* (L – luminosidade; a* – vermelho/verde; b* – amarelo/azul), são apresentados na Tabela 12 (Apêndice A). Com isso foram gerados os gráficos apresentados na Figura 7, exibindo a evolução dos parâmetros de cor ao longo do tempo.

Figura 7 - Em preto: Filmes sem surfactante; em verde: Filmes com surfactante. Parte superior: Parâmetro a* e parâmetro b*; Parte inferior: Parâmetro L. A linha laranja nos gráficos destaca o valor zero.



Fonte: Da autora (2023)

No que diz respeito ao parâmetro a^* (croma vermelho/verde), observou-se uma relativa estabilidade ao longo do tempo de exposição para os filmes, embora seja importante notar que os filmes com surfactante apresentaram aumento no valor deste parâmetro de -10,727 a 0,212 quando o tempo aumentou de 0 para 300 minutos. Para os filmes sem surfactante, essa variação foi de -4,68 a 0,751. Essa diferença sugere que os filmes com surfactante tiveram variações de cor mais acentuadas induzidas pela incidência da radiação.

Já em relação ao parâmetro b^* (croma amarelo/azul), notou-se um aumento na presença do surfactante, com valores variando de -34,979 a 13,631 à medida que os filmes foram expostos à R-UV por tempos de 0 a 300 minutos. Interessante que os valores de b^* mudaram de negativos para positivos em aproximadamente 60 minutos. Por outro lado, nos filmes sem surfactante, a variação também foi menor, variando de -24,648 a -7,319 no mesmo intervalo de tempo, permanecendo negativos em todo intervalo de tempo avaliado. Essa tendência indica que os filmes contendo o surfactante C12 podem ser promissores como sensores, pois demonstraram uma mudança de cor notável (de azul a amarelado) a olho nu (FIGUEIREDO *et al.*, 2022).

Quanto ao parâmetro L (luminosidade), embora não seja o parâmetro de maior relevância na validação da funcionalidade do sensor, é notável a diferença apresentada pelos filmes contendo os surfactantes. Nota-se que os filmes obtidos na ausência do C12 não tiveram sua luminosidade aumentada gradativamente como os que possuíam esse surfactante.

Diante da resposta positiva obtida para o teste realizado, a composição do sensor foi avaliada a fim de entender os mecanismos de funcionamento bem como modular as propriedades fotocromáticas do sensor para sua aplicação.

4.1.1. Efeito da estrutura do corante sobre as propriedades fotocromáticas do sensor

Dado o sucesso da validação do corante MG como sensor, decidiu-se explorar outras opções de corantes de estrutura similar na composição do filme polimérico. A Tabela 5 apresenta os recortes dos filmes, em duplicata, que foram dopados com os corantes violeta de metila (MV) e pararosanilina (PRA), juntamente com o polímero P1,

na ausência e na presença do surfactante C12 a uma concentração de 2 mmolL^{-1} na solução filmogênica.

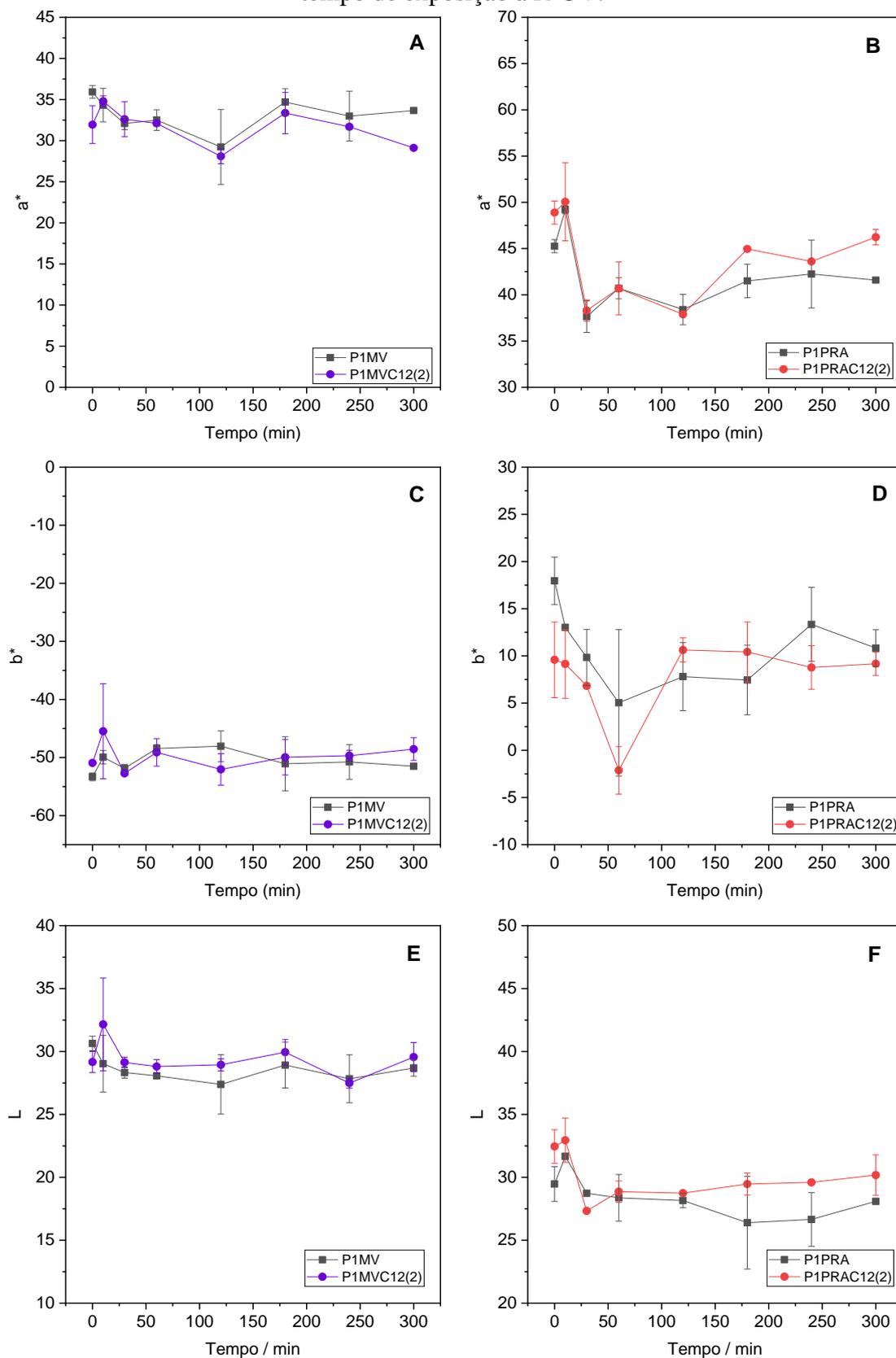
Tabela 5 - Filmes contendo P1 dopados ou não com o surfactante C12 e contendo o corante MV ou PRA após diferentes tempos de exposição à R-UV.

Tempo (min)	P1MV	P1MVC12(2)	P1PRA	P1PRAC12(2)
0				
10				
30				
60				
120				
180				
240				
300				

Fonte: Da autora (2023)

No aspecto visual, observou-se que mesmo após uma exposição de cinco horas à R-UV e na presença do surfactante C12, os filmes dopados tanto com o corante MV quanto com PRA não apresentaram resposta detectável a olho nu. A Figura 8 apresenta as curvas de parâmetros de cor dos filmes obtidos com VM e PRA nas diferentes condições analisadas. Os valores desses parâmetros estão detalhados na Tabela 13 (Apêndice A).

Figura 8 - Parâmetros Lab* dos filmes com o P1 dopados com MV e PRA na presença ou ausência do C12 (concentração de 2 mmol L⁻¹ na solução filmogênica) em função do tempo de exposição à R-UV.



Fonte: Da autora (2023)

Ao comparar os filmes com e sem o surfactante, uma notável sobreposição foi evidenciada, especialmente nos filmes dopados com o corante MV, que se mantiveram constantes ao longo do tempo. Esses resultados confirmam que tanto o corante violeta de metila quanto a pararosanilina não são adequados para a produção de filmes sensores, pois suas cores não se desestabilizam diante da exposição à R-UV.

4.1.2. Efeito da estrutura do surfactante

A fim de compreender o papel do surfactante na resposta colorimétrica do sensor, o efeito da estrutura do surfactante foi avaliado sobre as propriedades colorimétricas do filme formado por MG. A Tabela 6 apresenta os recortes dos filmes formados pelo polímero P1, em duplicata, que foram dopados com os surfactantes C16 e S, ambos a uma concentração de 2 mmolL^{-1} na solução filmogênica,

Tabela 6 - Filmes contendo P1 dopados com corante MG e com os surfactantes C16 e S após diferentes tempos de exposição à radiação UV.

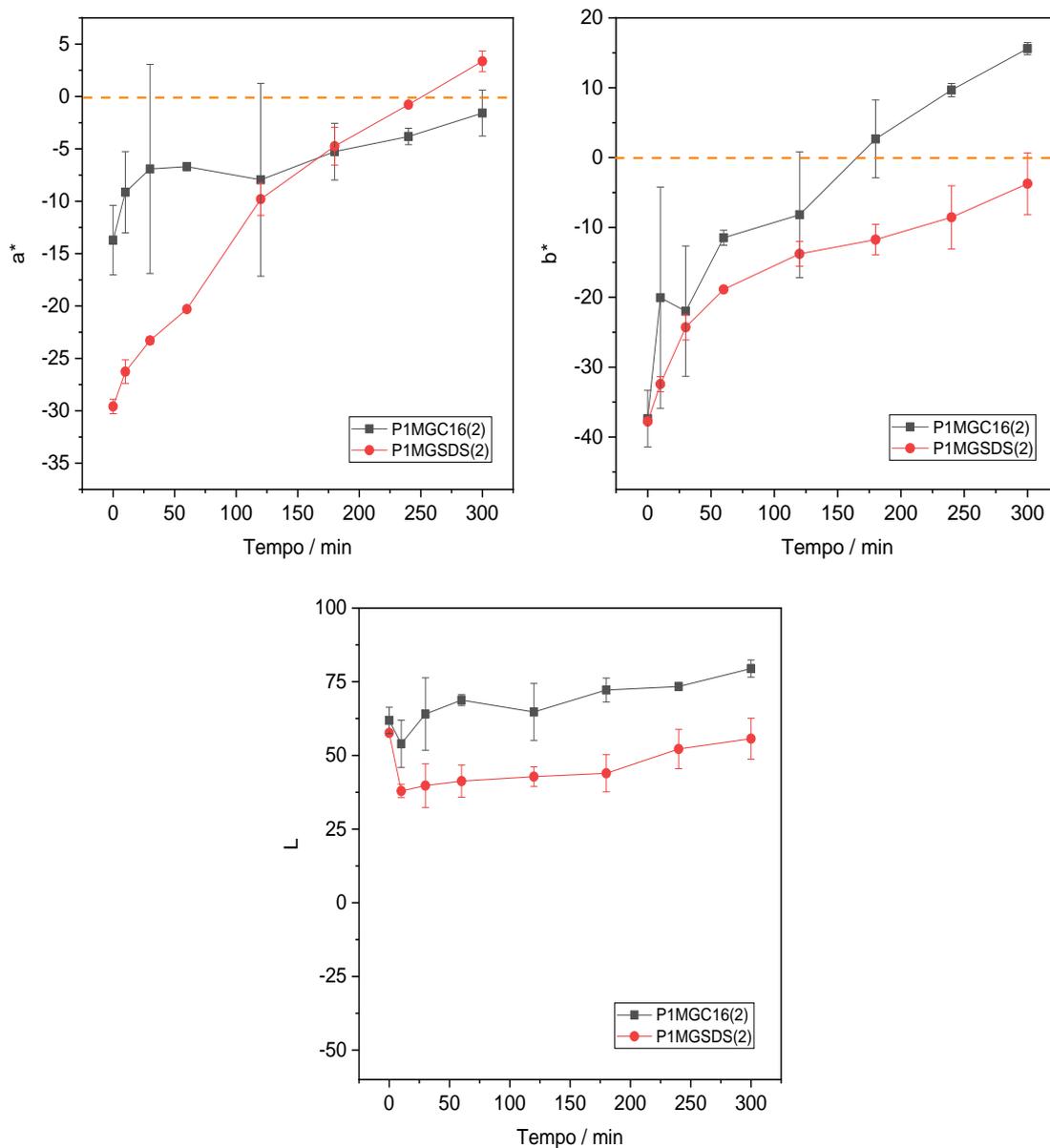
Tempo (min)	P1MGC16(2)	P1MGS(2)
0		
10		
30		
60		
120		
180		
240		
300		

Fonte: Da autora (2023)

Foi observado que, após uma exposição de cinco horas à radiação UV, os filmes contendo o surfactante C16, assim como C12, apresentaram uma resposta de mudança de cor. Para o surfactante S uma alteração na cor também é observada, que se tornou mais arroxeada após exposição longa à R-UV. Isso demonstrou uma resposta menos favorável do sensor contendo S para ser implementado na fabricação dos filmes sensores, dado uma observação visual a olho nu de mudança de cor ser menos pronunciada.

Para corroborar esses resultados e interpretar melhor essas alterações de cor, foram realizadas análises colorimétricas, cujas médias e desvios padrão estão apresentados na Tabela 14 do Apêndice A. Com base nesses dados, foram gerados os gráficos exibidos na Figura 9, que ilustram a variação dos parâmetros de cor ao longo do tempo para cada um dos surfactantes.

Figura 9 - Em preto: Filmes com C16; em vermelho: Filmes com S. Parte superior: Parâmetro a^* e parâmetro b^* ; Parte inferior: Parâmetro L. A linha laranja nos gráficos destaca o valor zero.



Fonte: Da autora (2023)

O aumento da cauda hidrofóbica dos surfactantes alterou os parâmetros de cor do filme. Em relação ao parâmetro a^* (croma vermelho/verde), o surfactante C16 apresentou uma variação de -13,72 a -1,58 quando o tempo variou de 0 a 300 minutos. Para o surfactante S, essa variação foi mais acentuada, aumentando de -29,6 a 3,36. Por outro lado, o parâmetro b^* (croma amarelo/azul) alcançou valores positivos de 15,6 em tempo de exposição de 300 minutos para o C16. O parâmetro L apresentou pouca variação com o aumento do tempo de exposição. Portanto, conclui-se que o surfactante C16 pode ser

adequado para a produção dos filmes sensores, enquanto o surfactante S não é tão indicado (FIGUEIREDO *et al.*, 2022).

Com intuito de analisar mais precisamente esses resultados, foi construído a Tabela 7. Nela, a variação de cor entre de ca filme após um dado tempo de exposição comparada ao filme sem exposição (ΔE) foi calculada de acordo com a Equação 1. Isso foi feito utilizando as médias dos parâmetros Lab* para os filmes na presença dos três surfactantes mencionados anteriormente. Esses valores representam a capacidade de detectar mudanças de cor nos filmes a olho nu, sendo que valores mais elevados indicam uma maior capacidade de percepção dessas mudanças

Tabela 7 - Variação de cor (ΔE) nos filmes com P1 na presença de C12, C16 ou S a 2,0 mmolL⁻¹ na solução filmogênica em função do tempo de exposição.

Filme	Tempo (min)	ΔE
P1MGC12(2)	0	0
	10	22,70
	30	26,45
	60	33,90
	120	44,69
	180	52,46
	240	55,85
	300	56,99
P1MGC16(2)	0	0
	10	22,69
	30	21,14
	60	32,51
	120	34,63
	180	47,12
	240	54,26
	300	62,0
P1MGS(2)	0	-
	10	28,33
	30	29,44
	60	31,03
	120	32,6
	180	34,21
	240	35,43
	300	40,75

Fonte: Da autora (2023)

Observou-se que tanto o C12 quanto o C16 apresentaram um aumento gradual no valor de ΔE à medida que o tempo de exposição aumentava. Isso resultou em valores significativamente mais altos, atingindo até 62,0, quando comparados com os filmes dopados com S, que alcançaram até 40,75. Apesar do valor elevado de ΔE elevado para os filmes contendo o surfactante S, visualmente nota-se que essa mudança de cor é percebida como um escurecimento do filme, alcançando coloração mais intensa, enquanto para os filmes contendo os surfactantes catiônicos, há uma perda da coloração azul. Além disso, a faixa de variação maior deste parâmetro de cor com o tempo para estes surfactantes os torna mais adequados para o desenvolvimento do sensor.

4.1.2.1. Efeito da concentração dos surfactantes

Considerando que o C12 e o C16 demonstraram uma variação de cor mais acentuada e perceptível visualmente, realizou-se uma análise para avaliar como a concentração desses surfactantes nos filmes poderia afetar o tempo de resposta do sensor. Os resultados do teste de descoloração de cada um dos filmes estão apresentados na Tabela 8 e na Tabela 9 para os surfactantes C12 e C16, respectivamente.

Tabela 8 - Filmes contendo o surfactante C12 com concentrações iguais a 0, 1, 2, 4 e 10 mmol L⁻¹ na solução filmogênica após diferentes tempos de exposição à R-UV.

P1MGC12					
Tempo (min)	(0)	(1)	(2)	(4)	(10)
0					
10					
30					
60					
120					
180					
240					
300					

Fonte: Da autora (2023)

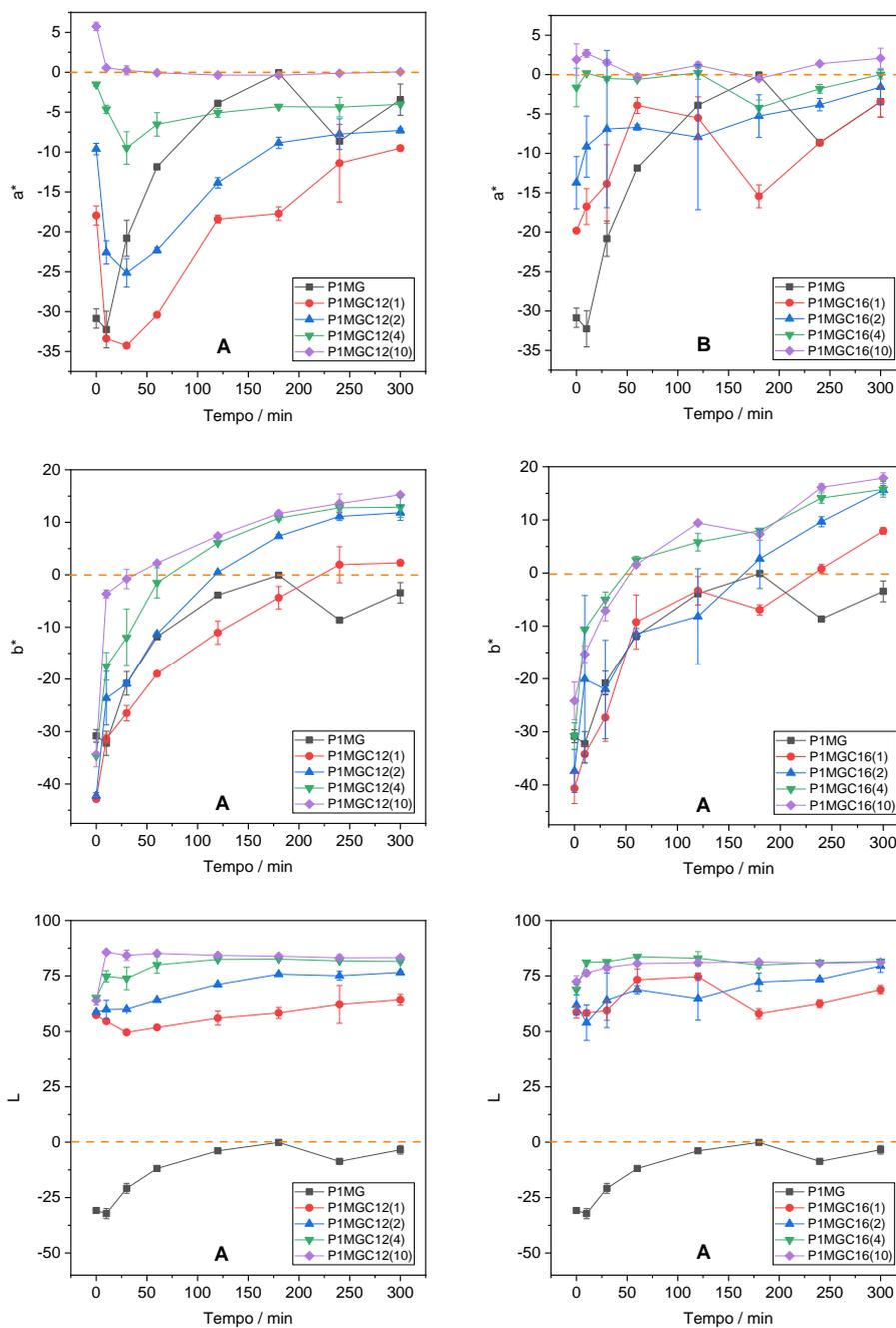
Tabela 9 - Filmes com o surfactante C16 nas concentrações 0, 1, 2, 4 e 10 mmol L⁻¹ em diferentes tempos de exposição à radiação UV.

PIMGC16					
Tempo (min)	(0)	(1)	(2)	(4)	(10)
0					
10					
30					
60					
120					
180					
240					
300					

Fonte: Da autora (2023)

Para validar qual dos surfactantes é mais eficaz, realizou-se uma análise colorimétrica. Segundo a Tabela 15 e a Tabela 16 do Apêndice A, as médias e os desvio padrões foram realizados e compilados na Figura 10 para elaboração dos gráficos. Em cada gráfico, as informações correspondentes a cada concentração de surfactante são apresentadas, com o filme de referência (sem surfactante) representado em preto.

Figura 10 - Parâmetros Lab* dos filmes com o P1 dopados MG na presença dos surfactantes C12 ou C16 ao longo do tempo. A linha laranja nos gráficos destaca o valor zero.



Fonte: Da autora (2023)

Observou-se um efeito notável no parâmetro a^* dos filmes P1MG, onde os valores aumentaram exponencialmente durante os primeiros 180 minutos de exposição à radiação UV. Em geral, na faixa de concentrações de surfactante avaliadas, as curvas apresentaram uma tendência de diminuição nos primeiros 30 minutos para o C12 e depois os valores de a^* aumentaram até ficarem constantes, onde esse patamar foi alcançado mais

rapidamente em concentração mais alta do C12. Quanto ao C16 (B), os valores de a^* aumentaram em geral, sem um tempo de exposição específico para esse comportamento. Os valores de a^* variaram de -19,808 a 2,688 para o C16. No entanto, para o C12, a variação foi de -34,256 a 5,738, indicando uma maior capacidade em modular esse parâmetro. Nas concentrações de $10,0 \text{ mmolL}^{-1}$, o parâmetro a^* permaneceu praticamente constante.

De maneira geral, com relação ao aumento do valor do parâmetro b^* , ambos os surfactantes apresentaram resultados semelhantes, variando de -40,64 a 17,862 para o C16 e de -42,879 a 15,238 para o C12. Essas mudanças estão alinhadas com a perda da coloração azul dos filmes quando expostos à radiação ultravioleta. Além disso, a transição de valores negativos para positivos em b^* ocorreu mais rapidamente à medida que a concentração dos surfactantes nos filmes aumentou. A uma concentração de $1,0 \text{ mmolL}^{-1}$, os filmes atingiram valores positivos após 240 minutos de exposição, enquanto na concentração de $10,0 \text{ mmolL}^{-1}$, isso ocorreu em apenas 10 minutos.

O parâmetro L^* exibiu pouca variação com o aumento do tempo de exposição, particularmente após 10 minutos de exposição na presença dos surfactantes. Um efeito significativo a ser destacado é que ambos os surfactantes aumentaram consideravelmente a luminosidade dos filmes, com um efeito relativamente pouco influenciado pela concentração utilizada.

Com base na análise de cada parâmetro, torna-se evidente que, embora o C16 tenha uma influência na mudança de coloração dos filmes, o C12 é mais promissor, uma vez que demonstrou uma perda de cor mais consistente e perceptível diante da exposição à R-UV.

4.1.3. Efeito da estrutura do polímero

Após investigar a promissora capacidade dos sensores produzidos com PVA carboxilado (P1), também avaliamos o potencial do PVA hidrolisado (P2) como matriz para o desenvolvimento do sensor UV. Para isso, utilizamos os aditivos mais promissores, o corante verde de metila (MG) e o surfactante C12 em diferentes concentrações (0, 1, 2, 4 e 10 mmol L^{-1}), na produção dos filmes, cujos recortes estão listados na Tabela 10.

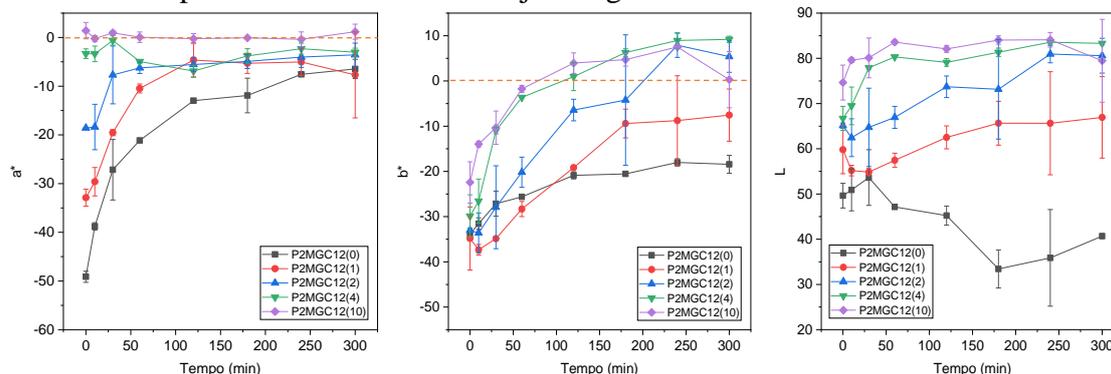
Tabela 10 - Filmes com o P2 dopados com MG e o C12 nas concentrações 0, 1, 2, 4 e 10 mmol L⁻¹ em diferentes tempos de exposição à radiação UV.

P2MGC12					
Tempo (min)	(0)	(1)	(2)	(4)	(10)
0					
10					
30					
60					
120					
180					
240					
300					

Fonte: Da autora (2023)

Foi evidenciado que, da mesma forma que o P1, o P2 também apresentou resultados positivos no que diz respeito à perda de coloração. Conseqüentemente, na Tabela 17, do Apêndice A, foram apresentados as médias e os desvios padrão das análises colorimétricas para validar esses resultados. Com base nessas informações, os gráficos representando os parâmetros do sistema de cor CIELab foram gerados e estão apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Filmes com o P2, dopados com o corante MG e o surfactante C12 em diferentes concentrações: À esquerda – parâmetro a^* ; ao meio – parâmetro b^* ; à direita – parâmetro L. A linha laranja nos gráficos destaca o valor zero.



Fonte: Da autora (2023)

Dado que o parâmetro a^* representa a variação de cor do vermelho (+) para o verde (-) no sistema CIELab, os valores começam em território negativo, uma vez que os filmes naturalmente possuem mais tonalidades de verde do que vermelho. À medida que são submetidos à radiação, esse parâmetro apresenta um aumento gradual em seu valor. No entanto, observou-se que, à medida que a concentração do surfactante aumentava, esses valores passaram a demonstrar maior constância ao longo do tempo.

No caso do parâmetro b^* , que varia de amarelo (+) a azul (-), observamos resultados significativos. Os filmes sem surfactante exibem uma baixa variação ao longo do tempo, enquanto os filmes com surfactante mostram variações mais expressivas, uma vez que inicialmente têm uma tonalidade azul e se tornam levemente amarelados.

O parâmetro L^* está relacionado à luminosidade e revela uma grande discrepância entre os filmes com e sem surfactante. Como os filmes sem surfactante tendem a escurecer com a exposição à radiação, é natural que esse parâmetro apresente valores mais baixos e, conseqüentemente, uma variação mais ampla em comparação com os outros parâmetros.

Para avaliar qual dos dois polímeros levou a uma maior capacidade de perceber a mudança de cor dos filmes a olho nu, a Tabela 11 apresenta o cálculo (segundo a Equação 1) da diferença de cor por meio do parâmetro ΔE , usando as médias dos parâmetros Lab* para os filmes que apresentaram perda de cor frente a R-UV.

Tabela 11 - Variação de cor nos filmes com P1 e P2 na presença de C12 em diferentes concentrações ao longo do tempo de exposição, comparando com diferentes referenciais: em relação ao filme sem exposição (ΔE) e ao filme anterior (ΔE^*).

Concentração de Surfactante (mmolL ⁻¹)	Tempo (min)	P1MGC12 ΔE	P1MGC12 ΔE^*	P2MGC12 ΔE	P2MGC12 ΔE^*
(1)	0	-	-	-	-
	10	19,42	19,42	6,19	6,19
	30	24,38	7,08	14,25	10,37
	60	27,52	8,75	23,46	11,48
	120	31,86	14,96	32,43	11,99
	180	38,51	7,10	37,97	10,27
	240	45,54	9,72	38,61	0,71
	300	46,45	2,85	37,83	3,21
(2)	0	-	-	-	-
	10	19,95	22,70	14,80	2,75
	30	23,31	3,78	26,59	12,32
	60	32,60	10,80	31,24	8,19
	120	45,66	16,07	41,80	15,34
	180	54,27	9,70	43,57	2,37
	240	57,74	3,98	55,73	14,43
	300	58,94	1,69	53,94	2,58
(4)	0	-	-	-	-
	10	33,54	19,93	32,16	4,33
	30	36,04	7,41	44,03	17,91
	60	48,49	12,46	46,64	8,85
	120	56,48	8,12	48,27	5,16
	180	60,88	4,79	54,77	6,54
	240	62,28	2,16	58,46	3,79
	300	62,37	0,44	58,16	0,80
(10)	0	-	-	-	-
	10	51,81	37,96	43,51	9,94
	30	53,17	3,19	46,45	3,87
	60	55,90	3,15	52,39	9,29
	120	59,69	5,26	55,36	5,91
	180	63,16	4,28	56,82	2,12
	240	64,62	2,06	58,67	2,83
	300	66,13	1,65	52,74	8,73

Fonte: Da autora (2023)

Os valores destacados em negrito correspondem aos filmes nos quais a mudança de cor não é perceptível a olho nu, uma vez que o valor de ΔE é inferior a um. Isso ocorreu

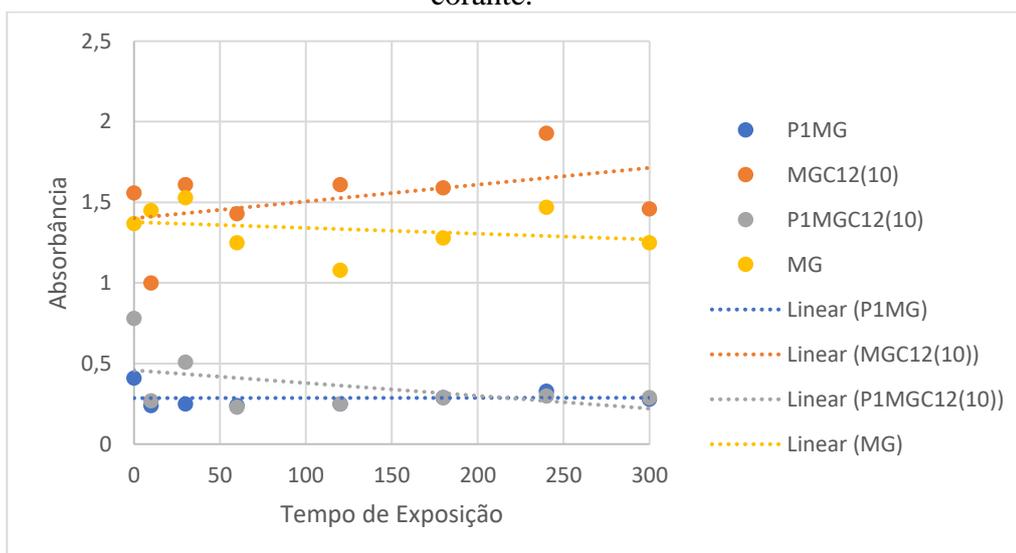
em poucos casos e apenas quando o filme foi comparado com o filme anterior (ΔE^*). Portanto, é possível concluir que na maioria dos casos, a perda de cor nos filmes sensores pode ser facilmente identificada a olho nu (QIAN, 2022).

4.2. Mecanismos de descoloração dos filmes

4.2.1. Avaliação do potencial de descoloração do corante em solução aquosa

Com base nas absorvâncias das soluções obtidas para os ensaios de descoloração conduzidos em meio aquosa, o gráfico de absorvância em função do tempo de exposição foi gerado, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Absorvância em função do tempo de exposição para cada solução de corante.



Fonte: Da autora (2023)

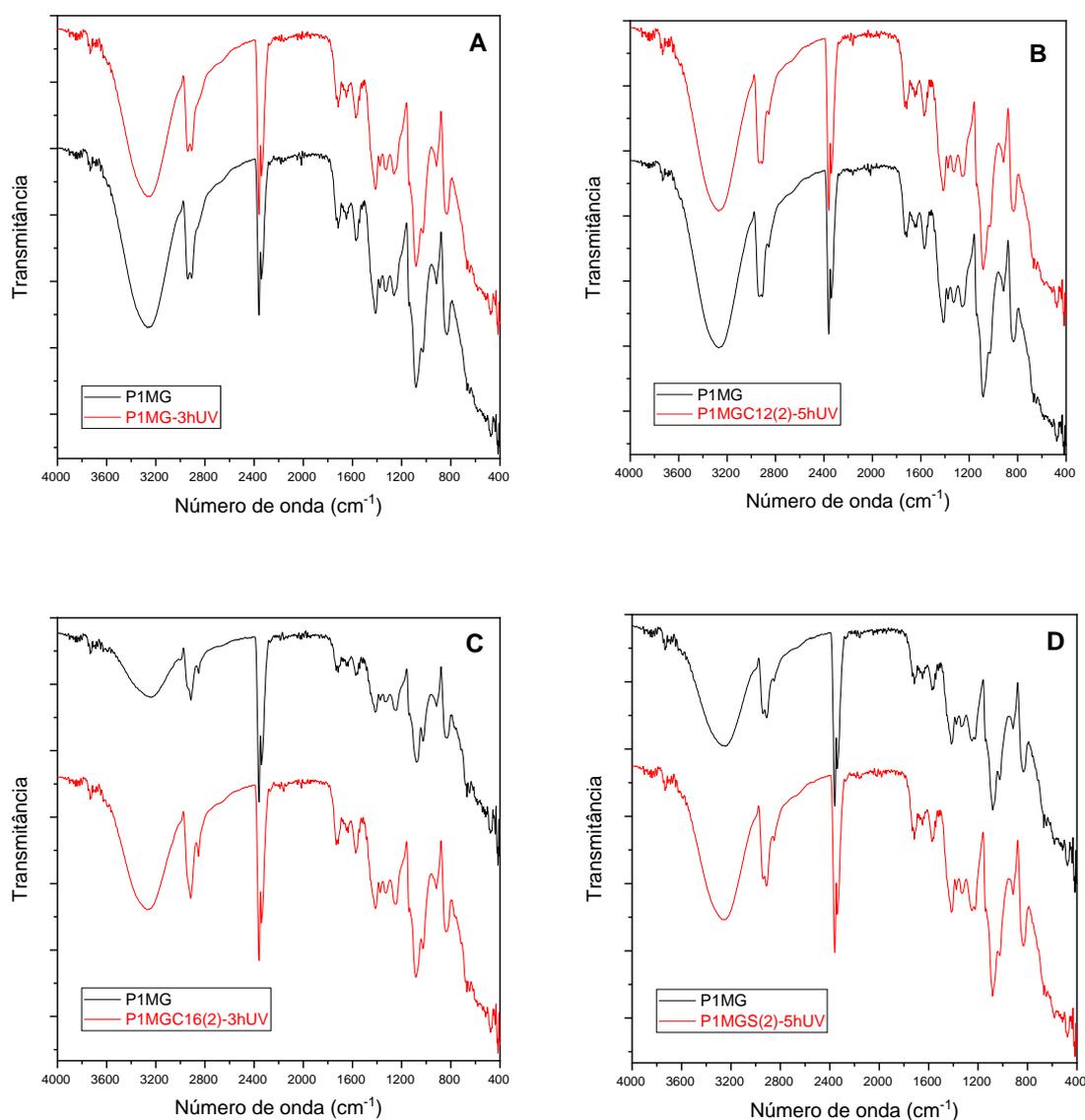
Com base nas absorvâncias analisadas no espectrofotômetro UV-vis e no gráfico gerado, observou-se que não apresentaram uma tendência de decaimento nos parâmetros de cor, indicando que quando inserido na matriz do filme polimérico P1 e este é dopado com um surfactante catiônico, C12 ou C16, a fotodegradação é mais facilmente modulada.

4.2.2. Análises por FTIR

A espectroscopia vibracional no infravermelho é uma poderosa técnica utilizada para a identificação e caracterização de compostos contendo ligações covalentes, tanto orgânicas quanto inorgânicas. Essa técnica se baseia no princípio de que átomos e moléculas possuem frequências naturais de vibração que correspondem a diferentes ligações químicas e grupos funcionais. Quando a radiação infravermelha incide sobre uma amostra, ocorre a absorção de energia em frequências específicas, resultando na formação de um espectro de absorção característico (RAJAGUKGUK *et al.*, 2023).

Por meio da análise de espectros de infravermelho, é possível identificar os grupos funcionais presentes em um material, bem como investigar as interações entre seus componentes. No contexto deste trabalho, o objetivo é compreender qual dos componentes (polímero, corante ou surfactante) influencia na desestabilização do corante quando exposto à radiação ultravioleta (R-UV). As análises de espectroscopia de infravermelho dos filmes, antes e após exposição à R-UV, foram conduzidas para investigar essas interações e os resultados estão apresentados na Figura 13.

Figura 13 – Espectros de FTIR dos filmes contendo P1, dopados com MG e surfactantes C12, C16 e S, pré e pós exposição à R-UV.



Fonte: Da autora (2023)

Através dos espectros verificou-se as principais bandas do PVA, localizadas aproximadamente na região de 3278 cm^{-1} para o estiramento O-H; em 2937 e 2914 cm^{-1} para o estiramento simétrico e assimétrico C-H; em 1417 cm^{-1} para o dobramento do CH-CH₂ da cadeia de carbono; em 1328 cm^{-1} para a deformação angular de C-H; em 1087 cm^{-1} para o estiramento de C-O (FIGUEIREDO *et al.*, 2022). Essas bandas não foram alteradas para os filmes na presença ou ausência dos surfactantes. Além disso, bandas associadas ao corante e aos surfactantes não foram observadas nos espectros. Isso pode

ser atribuído principalmente ao fato de que o sinal do polímero, uma macromolécula, predomina sobre os aditivos, que estão presentes em quantidades menores no filme.

Após três ou cinco horas de exposição à radiação UV, os espectros dos filmes não apresentaram modificações identificáveis. Como resultado, os picos nos gráficos permaneceram praticamente inalterados. Esse resultado sugere que o filme polimérico não foi degradado pela radiação mesmo com cinco horas de exposição, contendo ou não surfactante.

4.2.3. Possíveis mecanismos de fotodegradação

Os corantes da classe dos trifenilmetanos são estáveis à radiação ultravioleta (NEVES, 2020; OLIVEIRA, 2014). A degradação dos corantes aqui avaliados (MG, PRA e MV) sob radiação UV em solução, por exemplo, tem sido avaliada na presença de fotocatalisadores como os filmes finos de WO₃/SnO₂/CuO, conforme estudados por Rezende (2020), que demonstraram a capacidade de degradar corantes quando expostos a radiações UV e solares (REZENDE, 2020). Por outro lado, radicais trifenilmetanos são espécies estáveis que são rapidamente fotolisadas quando expostas à radiação ultravioleta (ALLEN; MCKELLAR; MOHAJERANI, 1980).

A incorporação dos corantes PRA e MV na matriz polimérica avaliada neste trabalho (filmes P1PRA e P1MV), na ausência dos surfactantes, não promoveu mudanças nos parâmetros de cor dos filmes após a incidência da radiação UV, enquanto na presença do MG (P1MG), os parâmetros de cor a* e b* aumentaram com o tempo de exposição à radiação, indicando que alterações na estrutura do MG ocorreram mesmo na ausência do surfactante. Esse resultado indica que este corante é mais suscetível a fotodegradação do que os demais corantes analisados. Apesar disso, a resistência à perda de cor do corante MG na matriz do polímero sugere que ele pode ser estabilizado nessa matriz, interagindo mais fortemente com ela por meio de ligações de hidrogênio e interações íon-dipolo.

No estudo *"Lightfastness and Spectroscopic Properties of Basic Triphenylmethane Dyes: Effect of the Substrate"*, realizado em 1980, discutiu-se sobre os agentes geradores de radicais, constatando que a radiação UV desempenhava um papel

significativo na rápida fotólise dos trifenilmetanos, resultando em sua degradação. O trabalho também observou que tanto a benzofenona quanto o benzidrol eram capazes de induzir a formação de radicais, acelerando assim a degradação dos corantes trifenilmetanos. Destaca-se que diferentes ambientes e substratos, incluindo polivinil álcool, exerceram influência no processo de fotólise e no comportamento fotoquímico dos corantes (Allen, McKellar, & Mohajerani, 1980).

No presente estudo, os surfactantes catiônicos provavelmente atuaram como iniciadores fotossensíveis para a reação de degradação do corante MG (Kurz et al., 2020), enquanto o polímero funciona como um substrato que interage de forma intensa com esse suposto iniciador. A presença desses surfactantes nos filmes pode desempenhar o papel de foto-indutores, gerando radicais capazes de atacar o corante MG e induzir a perda de cor nos filmes. Em contraste, em solução, esses surfactantes podem ser estabilizados, impedindo a geração desses radicais devido à solvatação pelas moléculas de água. A água atua como estabilizadora, dificultando a capacidade dos surfactantes de gerar iniciadores para a fotodegradação. Quando os componentes estão na matriz do filme, a concentração da radiação se intensifica em uma superfície fina. Nesse cenário, os surfactantes, não estabilizados pela água, podem gerar radicais, desencadeando a fotodegradação.

Em um estudo adicional, realizado para fins de comparação, investigou-se o mecanismo de descoloração de corantes através da interação com o C16 em um sistema de fases lamelares líquido-cristalinas (LLC). Nesse sistema, o anel piridínio presente na estrutura do C16 é excitado pela radiação ultravioleta (R-UV), promovendo a interação eletrostática entre o grupo NH do C16 e o grupo auxocromo da molécula corante. Esse processo resulta na quebra do grupo cromóforo do corante, conduzindo à sua degradação. (DUKLAN *et al.*, 2022).

É interessante notar que os surfactantes catiônicos, C16 e C12, são conhecidos por interagirem em solução aquosa tanto com P1 quanto com P2, sendo que P1, de carga negativa, interage mais fortemente com esses surfactantes de carga positiva (PATIÑO-AGUDELO *et al.*, 2022). Como resultado, esses surfactantes podem interagir com a matriz do polímero, deixando o corante mais suscetível à perda da coloração azul no filme. De fato, o sensor formado pelo polímero P1 tende a apresentar variações de cor mais intensas quando comparado ao sensor formado pelo P2, após exposição à radiação UV (ver Tabela 11). Essa explicação também esclarece por que o surfactante aniônico,

SDS, não provoca a perda de cor no filme, uma vez que, devido à sua carga negativa, ele não é capaz de estabelecer interações fortes com o P1.

5. CONCLUSÃO

A bem-sucedida produção de filmes à base de polímero dopado com surfactante e corante para sensoriamento de exposição à radiação ultravioleta (R-UV) representa um avanço significativo na área da fotossensibilidade. Os resultados obtidos claramente evidenciaram que a resposta dos filmes sensores está intrinsecamente ligada ao tipo e à concentração do surfactante empregado na formulação do sensor. Essa flexibilidade na composição dos filmes sensores permitiu a criação de sensores com diferentes tempos de resposta, possibilitando a identificação de diversos níveis de exposição à R-UV. Além disso, o sensor explorado demonstrou a capacidade de modular o tempo de resposta à radiação ultravioleta, dispensando a necessidade de filtros transparentes para controlar a dose de radiação.

A interação dos surfactantes catiônicos com o polímero da matriz do sensor desempenhou um papel fundamental na resposta dos filmes sensores. Essa interação liberou o corante para interagir com a radiação, resultando na perda de cor dos filmes. Esse processo possibilita a criação de filmes personalizáveis, uma vez que eles podem modular o tempo de resposta à radiação de acordo com as necessidades específicas.

Além disso, foi constatado que apenas o corante verde de metila (MG) apresentou resposta à R-UV, enquanto os corantes violeta de metila 10B (MV) e pararosanilina (PRA) não demonstraram a mesma capacidade, mesmo quando adicionados surfactante. Esse resultado enfatiza a importância da escolha adequada de corantes na produção de filmes sensores para exposição à radiação UV.

Por fim, ao avaliar o desempenho dos filmes sensores em diferentes tipos de polímeros, tanto o PVA carboxilado quanto o PVA clássico mostraram respostas à R-UV quando dopados com surfactante catiônico e o corante MG. Embora ambos os polímeros possam ser utilizados na produção de filmes sensores, o PVA carboxilado demonstrou ser ligeiramente mais favorável em termos de perda de cor e de abordagem metodológica mais simplificada, o que pode ser relevante na escolha do polímero para aplicações específicas.

Em suma, este trabalho abre perspectivas promissoras para o desenvolvimento de sensores UV personalizáveis e eficazes, contribuindo significativamente para a área de fotossensibilidade e suas aplicações em diversos campos, como proteção solar, monitoramento ambiental e saúde pública.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, Cristiane Rosa; BARICHELLO, Emanuele Carolina. Uso de smartphones como ferramenta de baixo custo na avaliação de cor em frutos. v. 15, p. 1543–1555, 2018.
- ALLEN, Norman S.; MCKELLAR, John F.; MOHAJERANI, Baghar. Lightfastness and spectroscopic properties of basic triphenylmethane dyes: Effect of the substrate. *Dyes and Pigments*, v. 1, n. 1, p. 49–57, 1980.
- AMORIM, Valcelene. *Cientistas da Uesb produzem corante natural raro a partir de jenipapo e mandioca*. Disponível em: <<http://www.uesb.br/noticias/cientistas-da-uesb-produzem-corante-natural-raro-a-partir-de-jenipapo-e-mandioca/>>. Acesso em: 3 maio 2023.
- ANDRADY, A. L. *et al.* Effects of UV radiation on natural and synthetic materials. *Photochemical & Photobiological Sciences* 2023 22:5, v. 22, n. 5, p. 1177–1202, 11 abr. 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s43630-023-00377-6>>. Acesso em: 11 out. 2023.
- ARAKI, Hitoshi *et al.* Materials and Device Designs for an Epidermal UV Colorimetric Dosimeter with Near Field Communication Capabilities. *Advanced Functional Materials*, v. 27, n. 2, p. 1604465, 1 jan. 2017. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adfm.201604465>>. Acesso em: 14 ago. 2023.
- CHEN, Jiaoyang *et al.* Ultra-strong, ultra-tough, and transparent polymer composite with excellent dynamic and biodegradable properties enabled by bicontinuous structure. *Polymer*, v. 283, p. 126220, 22 set. 2023.
- CHOI, Min Jong *et al.* Enhanced Oral Bioavailability of Rivaroxaban-Loaded Microspheres by Optimizing the Polymer and Surfactant Based on Molecular Interaction Mechanisms. *Molecular Pharmaceutics*, v. 20, p. 4153–4164, 7 ago. 2023. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.molpharmaceut.3c00281>>. Acesso em: 12 set. 2023.
- DE OLIVEIRA FARIA, Fernando; VERCELHEZE, Ana Elisa Stefani; MALI, Suzana. Propriedades físicas de filmes biodegradáveis à base de amido de mandioca, álcool polivinílico e montmorilonita. *Química Nova*, v. 35, n. 3, p. 487–492, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/qn/a/Bbs3dDc7zQCgpRr9wTGNBQQ/?lang=pt>>. Acesso em: 13 jun. 2022.
- DUKLAN, Neha *et al.* Photodegradation and electrolytic behaviour investigations of cationic amphiphiles based self-assembled non-aqueous layered lamellar interfaces. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, v. 33, n. 7, p. 4237–4254, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10854-021-07618-3>>.
- ENFU, LIU. *Ultraviolet detection method and device, wearable equipment and computer readable storage medium*. . China: [s.n.], 2021
- FARHADIAN, Abdolreza *et al.* Solidified Methane Storage Using an Efficient Class of Anionic Surfactants under Dynamic and Static Conditions: An Experimental and Computational Investigation. *ACS Applied Energy Materials*, v. 6, n. 8, p. 4119–4132,

24 abr. 2023. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsaem.2c03240>>. Acesso em: 12 set. 2023.

FENG, HUI; HU, SHENGGUI. *Wearable UV exposing sensor*. . China: [s.n.].

Disponível em:

<https://patentscope.wipo.int/search/pt/detail.jsf?docId=CN239321577&_cid=P11-LLCEMQ-03571-1>. , 2019

FIGUEIREDO, Matheus Torres Duarte *et al.* Immobilization of Anthocyanin in Polymeric Film to Obtain a Colorimetric Sensor for Detection of Copper in Cachaça. *Food Analytical Methods*, v. 15, n. 12, p. 3535–3553, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12161-022-02383-3>>.

FITZMAURICE, Christina *et al.* Global, Regional, and National Cancer Incidence, Mortality, Years of Life Lost, Years Lived With Disability, and Disability-Adjusted Life-Years for 29 Cancer Groups, 1990 to 2017: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study. *JAMA Oncology*, v. 5, n. 12, p. 1749–1768, 1 dez. 2019. Disponível em: <<https://jamanetwork.com/journals/jamaoncology/fullarticle/2752381>>. Acesso em: 29 out. 2023.

FITZPATRICK, T. B. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. *Archives of dermatology*, v. 124, n. 6, p. 869–871, 1 jun. 1988. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3377516/>>. Acesso em: 11 out. 2023.

FLOWERDAY, Callum E *et al.* Utilizing Low-Cost Sensors to Monitor Indoor Air Quality in Mongolian Gers. p. 1–10, 2023.

FREIRE, Luciana de Souza. Desenvolvimento de sensores amperométricos para detecção de imunoglobulinas contra a proteína Nucleocapsídica de SARS-CoV-2. 16 fev. 2023. Disponível em: <<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/9352>>. Acesso em: 11 out. 2023.

HAMA, Sarkar Muheedin; MANSHAD, Abbas Khaksar; ALI, Jagar A. Review of the Application of Natural Surfactants in Enhanced Oil Recovery: State-of-the-Art and Perspectives. *Energy and Fuels*, v. 37, n. 14, p. 10061–10086, 20 jul. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c01347>>. Acesso em: 12 out. 2023.

HILLER, Gabriele. *Princípios de gerenciamento de cores*. Datacolor, ed. [S.l.]: Datacolor, 2019.

HUANG, Xiyong; CHALMERS, Andrew N. Review of Wearable and Portable Sensors for Monitoring Personal Solar UV Exposure. *Annals of Biomedical Engineering*, v. 49, n. 3, p. 964–978, 2021.

HUSSAIN, Mohammed Bakr *et al.* Photodegradation and Its Effect on Plant Litter Decomposition in Terrestrial Ecosystems: A Systematic Review. *Soil Systems*, v. 7, n. 1, p. 6, 19 jan. 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2571-8789/7/1/6/html>>. Acesso em: 27 mar. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. *Câncer de pele não melanoma*. Disponível em: <<https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/cancer/tipos/pele-nao-melanoma>>. Acesso em: 29 out. 2023.

KURZ, Wolfgang *et al.* UV-Sensitive Wearable Devices for Colorimetric Monitoring of UV Exposure. *Advanced Optical Materials*, v. 8, n. 6, p. 1901969, mar. 2020.

- Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.201901969>>.
- LEE, Michele E.; ARMANI, Andrea M. Flexible UV Exposure Sensor Based on UV Responsive Polymer. *ACS Sensors*, v. 1, p. 1251–1255, 2016.
- MALPASS, Dennis B. *Introduction to Industrial Polyethylene: Properties, Catalysts and Processes*. [S.l.: s.n.], 2010.
- MARK, James E. *Polymer Data Handbook*. [S.l.]: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1999.
- MAVANI, Bhoomi H. *et al.* Deposition of polymeric sensing materials for gas detection. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 101, n. 9, p. 5034–5044, 1 set. 2023. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cjce.24866>>. Acesso em: 11 out. 2023.
- MILNER-WHITE, E. James. The partial charge of the nitrogen atom in peptide bonds. *Protein Science*, v. 6, n. 11, p. 2477–2482, nov. 1997. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pro.5560061125>>.
- MOLINA, Luis. *Modo de color Lab*. Disponível em: <<https://sobrecolors.blogspot.com/2010/03/modo-de-color-lab.html>>. Acesso em: 26 abr. 2021.
- NEVES, Anna Gabrielly Duarte. *SELEÇÃO DE FUNGOS FILAMENTOSOS DO GÊNERO Aspergillus COM POTENCIALIDADE PARA A BIORREMEDIAÇÃO DE EFLUENTES CONTAMINADOS COM CORANTES TÊXTEIS*. 2020. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2020.
- OLIVEIRA, Leilany Silva. *Desenvolvimento de catalisadores alternativos para degradação de corantes orgânicos em meio aquoso*. 2014. UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA, 2014.
- PATIÑO-AGUDELO, Álvaro Javier *et al.* Thermodynamics of Aggregation between the Cationic Surfactant and Polymer Based on Biodegradable Poly(vinyl Alcohol). *Journal of Physical Chemistry B*, v. 126, n. 45, p. 9424–9434, 17 nov. 2022. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jpcc.2c05054>>. Acesso em: 3 ago. 2023.
- PFAENDNER, Rudolf. Plastic Additives. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, p. 1–38, 16 dez. 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/0471238961.koe00051>>. Acesso em: 11 set. 2023.
- QIAN, Jinkai. *CIE ΔE* (Color Difference) Equations*. Disponível em: <https://techkonusa.com/cie-δe-color-difference-equations/?inf_contact_key=8f09e03d37e59ad3c16f81d68338c68e680f8914173f9191b1c0223e68310bb1>. Acesso em: 24 out. 2023.
- RAJAGUKGUK, Yolanda Victoria *et al.* Thermal and spectroscopic profiles variation of cold-pressed raspberry seed oil studied by DSC, UV/VIS, and FTIR techniques. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 124, p. 105723, 2023. Disponível em: <<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>. Acesso em: 7 out. 2023.
- REZENDE, Thyalle Trindade de Araújo. *Estudo da degradação fotocatalítica do azul de metileno na presença de filmes finos de WO3/SnO2/CuO obtidos via Dip Coating*.

2020. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/46455>>. Acesso em: 17 nov. 2023.
- SANTOS, Mirella Simões. *Teoria de micelização: propriedades de soluções de surfactantes via minimização da energia livre de gibbs*. 2014. UFRJ, 2014.
- SILVA, Bernardo Coupêe Gonçalves Da *et al.* Skin cancer and the dangers of UV rays. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 11, p. e135111133557–e135111133557, 18 ago. 2022. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/33557>>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- SILVA, Herivelto Morais Da *et al.* Anthocyanin immobilization in carboxymethylcellulose/starch films: A sustainable sensor for the detection of Al(III) ions in aqueous matrices. *Carbohydrate Polymers*, v. 230, p. 115679, 15 fev. 2020.
- SKOOG *et al.* *Fundamentos de Química Analítica*. 8. ed. São Paulo: Editora Thomson, 2006.
- VEERALINGAM, Sushmitha; PRIYA, Shuruthi; BADHULIKA, Sushmee. NiO nanofibers interspersed sponge based low cost, multifunctional platform for broadband UV protection, ultrasensitive strain and robust finger-tip skin inspired pressure sensor. *Chemical Engineering Journal*, v. 389, p. 124415, 1 jun. 2020.
- WAJNSZTOK, KAREN EDELMAN; QUEIROZ, MARIANA SANTOS. *Mapeamento tecnológico de embalagens biodegradáveis contendo polilactato ou amido aplicadas no setor de alimentos*. 2022. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<http://pantheon.ufrj.br/handle/11422/16712>>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- WANG, Junjie *et al.* Flexible humidity sensors composed with electrodes of laser induced graphene and sputtered sensitive films derived from poly(ether-ether-ketone). *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 375, p. 132846, 15 jan. 2023.
- YAMPOLSKY, Michael *et al.* High-Sensitivity CMOS-Integrated Floating Gate-Based UVC Sensors. *Sensors*, v. 23, n. 5, 2023.
- ZOU, Wenyue *et al.* Skin color-specific and spectrally-selective naked-eye dosimetry of UVA, B and C radiations. *Nature Communications*, v. 9, n. 1, p. 1–10, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-06273-3>>.
- ZULIANI, Alessio; KHIAR, Nouredine; CARRILLO-CARRIÓN, Carolina. Recent progress of metal–organic frameworks as sensors in (bio)analytical fields: towards real-world applications. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 2023 415:11, v. 415, n. 11, p. 2005–2023, 4 jan. 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00216-022-04493-7>>. Acesso em: 11 out. 2023.

APÊNDICE A – Dados referentes as médias e desvio padrões dos parâmetros Lab*

Tabela 12 - Média e desvio padrão dos parâmetros de cor dos filmes P1MGC12(2) e P1MG. Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independentes.

Filmes	Tempo (min)	L	a*	b*
P1MGC12(2)	0	64,4±4,7	-10,7±2,1	-35±6,3
	10	66±8,6	-2,85±0,96	-31,3±11,2
	30	74,5±10,5	0,1±1,1	-15,5±10,7
	60	79,01±5,95	-1,4±0,1	-3,1±6,6
	120	80,2±2,7	-1,9±1,7	7±0,8
	180	80,2±2,8	-0,2±0,2	12±0,5
	240	82,8±2,6	0,1±0,4	14±1,2
	300	83,1±0,6	0,2±0,1	13,6±0,9
P1MG	0	72,1±0,4	-4,7±0,4	-27,6±0,3
	10	56±6,3	-5,4±3,2	-34,7±4,7
	30	46,21±9,003	-6,1±6,9	-36±5,9
	60	49,2±19,5	-5,2±9,1	-23,5±11,7
	120	60,5±2,6	1±1,8	-11±1,4
	180	62,2±1,2	0,843±0,997	-8,2±0,4
	240	46,4±12,7	0,7±0,4	-17,6±10,3
	300	64,05±6,97	0,8±2,2	-7,3±5,6

Fonte: Da autora (2023)

Tabela 13 - Média e desvio padrão dos parâmetros de cor dos filmes com o P1 dopados com os corantes MV e PRA na presença ou ausência do surfactante C12. Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independentes.

Filmes	Tempo (min)	L	a*	b*
P1MVC12(2)	0	29,2±0,8	31,9±2,3	-50,9±0,1
	10	32,2±3,7	34,8±0,6	-45,5±8,2
	30	29,1±0,4	32,6±2,1	-52,7±0,3
	60	28,8±0,6	32,1±0,3	-49,1±2,4
	120	28,9±0,5	28,1±0,9	-52±2,7
	180	29,95±1	33,4±2,5	-49,9±3,1
	240	27,5±0,4	31,7±0,3	-49,7±0,9
	300	29,6±1,2	29,12±0,04	-48,55±1,96
P1MV	0	30,6±0,6	35,9±0,8	-53,3±0,7
	10	29±2,3	34,32±2,04	-49,9±1,1
	30	28,3±0,4	32,1±0,7	-51,9±0,6
	60	28,1±0,2	32,5±1,3	-48,4±0,7
	120	27,4±2,4	29,2±4,6	-48,04±2,65
	180	28,9±1,8	34,7±1,6	-51,1±4,6
	240	27,8±1,9	32,98±3,03	-50,75±3
	300	28,7±0,7	33,7±0,1	-51,5±0,1

PIPRAC12(2)	0	32,5±1,3	48,9±1,3	9,6±4
	10	32,9±1,8	50,1±4,2	9,1±3,6
	30	27,3±0,1	38,3±1,2	6,8±0,3
	60	28,9±0,8	40,7±2,9	-2,1±2,5
	120	28,7±0,1	37,9±0,1	10,6±1,3
	180	29,5±0,9	45±0,2	10,4±3,2
	240	29,6±0,1	43,6±0,2	8,8±2,3
	300	30,2±1,6	46,2±0,8	9,2±1,2
	PIPRA	0	29±1,4	45,3±0,7
10		31,7±0,1	49,2±0,4	13±0,1
30		28,7±0,2	37,6±1,7	9,83±2,97
60		28,4±1,9	40,7±1,1	5,03±7,75
120		28,2±0,6	38,4±1,6	7,8±3,6
180		26,4±3,7	41,5±1,8	7,4±3,7
240		26,7±2,1	42,2±3,7	13,3±3,9
300		28,09±0,04	41,59±0,03	10,8±1,9

Fonte: Da autora (2023)

Tabela 14 - Filmes com P1 dopados com os surfactantes C16 e S e corante MG em diferentes tempos de exposição à radiação UV. Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independentes.

Filmes	Tempo (min)	L	a*	b*
P1MGC16(2)	0	62±4,5	-14±3	-37±4
	10	54±8	-9±4	-20±16
	30	64±12,3	-7±10	-22±9
	60	69±2	-6,7±0,3	-11±1
	120	65±10	-8±9	-8±9
	180	72±4	-5±3	3±6
	240	73,4±0,8	-3,8±0,8	9,7±0,9
	300	79,5±3	-2±2	15,6±0,9
	P1MGS(2)	0	58±1	-29,6±0,7
10		38±2	-26±1	-32±1
30		40±7	-23,3±0,3	-24±2
60		41±5	-20,29±0,06	-18,9±0,2
120		43±3	-10±2	-14±2
180		44±6	-5±2	-12±2
240		52±7	-0,8±0,1	-9±5
300		56±7	3,4±1	-4±4

Fonte: Da autora (2023)

Tabela 15 - Média e desvio padrão dos parâmetros de cor dos filmes com o P1 dopados com MG na presença do surfactante C12 nas concentrações 0, 1, 2, 4 e 10 mmol L⁻¹. Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independente.

Filmes	Tempo (min)	L	a*	b*
P1MGC12(1)	0	57±1	-18±1	-43±0,5
	10	55±1	-33,4±0,1	-31,4±0,8
	30	50±1	-34,3±0,3	-27±1
	60	51,8±0,3	-30,4±0,02	-19±0,4
	120	56±3	-18,4±0,5	-11±2
	180	58±2	-17,7±0,9	-4±2
	240	62±9	-11±5	2±3
	300	64±2	-9,5±0,3	2,3±0,5
P1MGC12(2)	0	59±0,7	-9,6±0,7	-42,2±0,6
	10	60±4	-23±1	-24±5
	30	60,01±0,03	-25±2	-20,9±0,5
	60	64,14±0,07	-22,3±0,4	-11,3±0,3
	120	71,09±0,04	-13,9±0,7	0,5±0,2
	180	75,8±0,6	-8,9±0,7	7,3±0,4
	240	75±2	-8±2	11,1±0,8
	300	76,5±0,5	-7,3±0,3	12±1
P1MGC12(4)	0	65,2±0,1	-1,5±0,3	-34,69±0,07
	10	75±3	-4,7±0,5	-18±3
	30	74±5	-9±2	-12±5
	60	80±4	-7±1	-2±3
	120	82,4±0,5	-5,1±0,6	6,07±0,09
	180	82,6±0,4	-4,3±0,07	10,8±0,4
	240	81,77±0,04	-4±1	12,8±0,6
	300	81,5±0,5	-4,02±0,03	13±2
P1MGC12(10)	0	64±2	5,7±0,5	-34±2
	10	85,7±0,7	0,55±0,02	-3,7±0,8
	30	84±2	0,2±0,6	-1±2
	60	85,1±0,6	-0,07±0,01	2,2±0,1
	120	84,3±0,6	-0,3±0,2	7,4±0,3
	180	83,9±0,2	-0,4±0,2	11,7±0,5
	240	83±1	-0,1±0,1	14±2
	300	83,2±0,6	0,04±0,21	15,2±0,3

Fonte: Da autora (2023)

Tabela 16 - Média e desvio padrão dos parâmetros de cor dos filmes com o P1 dopados com MG na presença do surfactante C16 nas concentrações 0, 1, 2, 4 e 10 mmol L⁻¹. Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independente.

Filmes	Tempo (min)	L	a*	b*
P1MGC16(1)	0	58,7±2,7	-19,81±0,08	-41±3
	10	58,3±1,3	-17±2	-34±2
	30	59,4±4,4	-14±5	-27±4

	60	73,2±5	-4±1	-9±5
	120	74,6±1,7	-6±3	-3±3
	180	58±2,3	-15±1	-6,9±1
	240	62,5±2	-8,64±0,04	0,8±0,8
	300	69±2	-3±2	7,9±0,6
P1MGC16(2)	0	62±4,5	-14±3	-37±4
	10	54±8	-9±4	-20±16
	30	64±12,3	-7±10	-22±9
	60	69±2	-6,7±0,3	-11±1
	120	65±10	-8±9	-8±9
	180	72±4	-5±3	3±6
	240	73,4±0,8	-3,8±0,8	9,7±0,9
	300	79,5±3	-2±2	15,6±0,9
P1MGC16(4)	0	69±2	-2±2	-31±3
	10	81,12±0,06	0,2±0,2	-10,6±0,2
	30	81,3±0,1	-0,5±0,2	-5±1
	60	83,6±0,7	-0,6±0,2	2,5±0,7
	120	83±3	0,2±0,8	6±2
	180	80±1	-4,2±1	8±0,4
	240	81±1	-1,8±0,6	14,1±1
	300	81,5±0,8	0±0,6	16±1
P1MGC16(10)	0	72±3	2±2	-24±4
	10	76±1	2,7±0,5	-15±2
	30	79±1	1,6±0,4	-7±2
	60	80,6±0,5	-0,3±0,4	1,6±0,3
	120	81±2	1,2±0,4	9,4±0,3
	180	81,3±0,2	-0,51±0,01	7±1
	240	80,7±0,1	1,37±0	16,1±0,7
	300	81,2±0,4	2±1	18±1

Fonte: Da autora (2023)

Tabela 17 - Média e desvio padrão dos parâmetros de cor dos filmes com P2. Valores são reportados como médias e os desvios padrão para 5 medidas de duas réplicas independentes.

Filmes	Tempo (min)	L	a*	b*
P2MGC12(0)	0	49,6±2,7	-49,1±1,1	-33,8±0,2
	10	50,9±4,6	-38,8±0,8	-31,5±1,3
	30	53,6±6,2	-27,2±6,2	-27,1±2,8
	60	47,1±0,1	-21,14±0,02	-25,6±0,1
	120	45,2±2,1	-12,968±0,003	-20,9±0,8
	180	33,4±4,2	-11,9±3,6	-20,5±0,4
	240	35,9±10,7	-7,6±0,3	-18±0,8
	300	40,7±0,1	-6,46±1,97	-18,43±1,99
P2MGC12(1)	0	59,8±5,3	-32,9±1,7	-34,83±6,98
	10	55,2±1,2	-29,6±2,9	-37,3±1,2
	30	54,8±0,8	-19,5±0,6	-34,9±0,4

	60	57,5±1,6	-10,5±0,9	-28,3±1,7
	120	62,5±2,5	-4,6±3,5	-19,2±0,1
	180	65,7±4,8	-5,3±2,1	-9,4±3,2
	240	65,6±11,4	-5,02±2,77	-8,8±9,9
	300	66,95±9,01	-7,7±8,8	-7,5±5,8
	0	65,1±0,6	-18,6±0,1	-33±0,4
	10	62,5±4,2	-18,4±4,7	-33,6±4,4
C12(2)	30	64,7±8,7	-7,7±5,9	-27,9±9,2
	60	66,9±2,4	-6,2±1,2	-20,2±3,3
	120	73,7±2,4	-5,6±1,5	-6,4±2,4
	180	73,16±11,03	-4,9±1,5	-4,2±14,4
	240	80,9±1,9	-4±2,1	7,9±2,7
	300	80,6±3,8	-3,6±2,4	5,4±3,5
	0	66,7±2,7	-3,32±0,99	-29,9±4,7
	10	69,5±4,2	-3,4±1,6	-26,6±4,9
C12(4)	30	77,9±0,2	-0,6±0,97	-11±0,7
	60	80,31±0,05	-4,9±0,4	-3,6±0,1
	120	79,1±0,8	-6,9±1,2	1±3,1
	180	81,3±0,9	-3,8±1,5	6,3±0,8
	240	83,6±0,4	-2,3±1,1	9±1,7
	300	83,3±0,3	-3±0,8	9,2±0,7
	0	74,6±3,9	1,4±1,7	-22,4±4,6
	10	79,6±0,5	-0,2±0,6	-14±0,6
C12(10)	30	80,1±4,4	1±0,4	-10,3±3,7
	60	83,6±0,4	0,06±1,07	-1,8±0,8
	120	82,1±0,8	-0,25±1,05	3,9±2,3
	180	84±0,9	-0,1±0,1	4,7±1,4
	240	84,1±1,6	-0,37±1,51	7,53±0,05
	300	79,5±9,2	1,2±1,5	0,3±6,2

Fonte: Da autora (2023)