

APLICAÇÃO DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NO TRATAMENTO DE SOLUÇÕES CONTENDO UM CORANTE ORGÂNICO

Data de submissão: 06/09/2024

Data de aceite: 01/10/2024

Leonardo Araújo Martins Titericz

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Departamento Acadêmico de Química e Biologia Curitiba-PR

Leonardo Alcântara Sperancetta

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Departamento Acadêmico de Química e Biologia Curitiba-PR

Palimécio Gimenes Guerrero Júnior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Departamento Acadêmico de Química e Biologia Curitiba-PR

Paulo Roberto de Oliveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Departamento Acadêmico de Química e Biologia Curitiba-PR

RESUMO: Neste trabalho, foram investigadas as melhores condições de tratamento do corante orgânico Vermelho Laca Manganês (VLM) via Processos Oxidativos Avançados (POAs). O corante foi solubilizado em solução alcalina (VLMpH).

Testes variando a condição de radiação UVA, e variando as concentrações de H_2O_2 , $K_2S_2O_8$ (KPS) e ZnO individualmente foram feitos para avaliar a concentração ótima de cada reagente, visando uma máxima degradação do corante em 60 minutos. Para os testes com VLMpH e UVA, os resultados indicaram que as concentrações ótimas para H_2O_2 , KPS e ZnO foram de 15,0; 11,0 e 2,0 mmol L⁻¹ respectivamente. Os sistemas UVA/ O_2 /ZnO e UVA/ O_2 /ZnO/KPS apresentaram taxas de degradação muito similares (97 e 96%) e maiores que a do sistema UVA/ O_2 /ZnO/ H_2O_2 (91%) para a banda em 491 nm. Com relação a banda em 314 nm pode-se observar que o processo heterogêneo que utiliza o sistema UVA/ O_2 /ZnO/KPS atingiu uma alta taxa de degradação em 30 minutos e após 60 min o sistema UVA/ O_2 /ZnO apresentou taxas de degradação (81%) semelhantes ao UVA/ O_2 /ZnO/KPS (83%). O sistema UVA/ O_2 /ZnO/ H_2O_2 apresentou taxas de degradação inferiores ao do sistema sem H_2O_2 (65%). Em geral, o estudo mostra que os POAs são eficazes no tratamento de soluções contendo corantes orgânicos.

PALAVRAS-CHAVE: POAs; KPS; Fotodegradação; UV; ZnO

APPLICATION OF ADVANCED OXIDATIVE PROCESSES IN THE TREATMENT OF SOLUTIONS CONTAINING AN ORGANIC DYE

ABSTRACT: In this work, the better conditions on treatment of the organic dye Vermelho Laca Manganês (VLM) by Advanced Oxidation Process (AOPs) were investigated. The dye was solubilized in alkaline solution (VLM_{pH}). Tests with different conditions of UVA radiation, and varying the concentrations of H₂O₂, K₂S₂O₈ (KPS) and ZnO were made individually to evaluate the optimal concentration of each reagent, seeking a maximum degradation of dye in 60 minutes. For the tests with VLM_{pH} and UVA, the results indicated that the optimal concentrations for H₂O₂, KPS and ZnO were respectively 15,0; 11,0 and 2,0 mmol L⁻¹. The UVA/O₂/ZnO and UVA/O₂/ZnO/KPS systems presented very similar degradation rates (97 and 96%) and higher than the UVA/O₂/ZnO/H₂O₂ system (91%) for the 491 nm band. Regarding the 314 nm band, it can be observed that the heterogeneous process using the UVA/O₂/ZnO/KPS system reached a high degradation rate in 30 minutes and after 60 min the UVA/O₂/ZnO system presented degradation rates (81%) similar to UVA/O₂/ZnO/KPS (83%). The UVA/O₂/ZnO/H₂O₂ system presented degradation rates lower than the system without H₂O₂ (65%). In general, the study shows that AOPs are effective by the treatment of solutions containing organic dyes.

KEYWORDS: AOPs; KPS; Photodegradation; UV; ZnO

1 | INTRODUÇÃO

O processo de industrialização no Brasil teve seu início com a indústria têxtil. Suas raízes precedem à chegada e a ocupação do País pelos portugueses porquanto os índios que aqui habitavam já exerciam atividades artesanais, utilizando-se de técnicas primitivas de entrelaçamento manual de fibras vegetais e produzindo telas grosseiras para várias finalidades, inclusive proteção corporal. Todavia, partindo-se do princípio de que tudo teria começado com a efetiva ocupação do território brasileiro, ocorrida em 1500, podem ser identificadas quatro etapas importantes para a definição da evolução histórica da indústria têxtil no país: a fase colonial, a fase de implantação, a fase de consolidação e a fase atual (RAMOS e QUADROS, 2021).

Desde então a instalação de indústrias com alto poder poluidor, tem se acentuado, e os problemas associados a elas vêm se somando. Dentre as contribuições negativas provenientes de suas atividades, destacam-se principalmente pela produção de grandes volumes de efluentes fortemente coloridos, contendo altas cargas de compostos orgânicos (VASCONCELOS et. al., 2022, PELEGRINI et. al., 1999). Um exemplo clássico se dá na própria indústria têxtil: cerca de 30% dos corantes consumidos nos processos são perdidos e não podem ser reaproveitados porque sofreram modificações químicas durante a etapa de tingimento. Vários corantes usados no processo de tingimento mostram-se altamente tóxicos à biota aquática podendo causar interferência no processo da fotossíntese natural do meio onde são descartados (SHARMA et. al., 2021). Além disso, há o agravante de ser uma atividade que gera rejeitos de composição extremamente variável em virtude da

diversidade de corantes que são processados durante o dia (GUARATINI e ZANONI, 2000).

De acordo com Guaratini e Zanoni (2000), até metade do século XIX, todos os corantes eram derivados de produtos naturais, como folhas, flores, frutos de várias plantas e substâncias extraídas de animais. Porém, em 1856, o químico inglês William Henry Perkin obteve, acidentalmente, o primeiro corante sintético, a mauveína, dando início à produção de novas matérias-primas. Imediatamente, Perkin patenteou sua descoberta, formou uma indústria e logo começou a produção de novos corantes artificiais.

A partir daí, com o desenvolvimento tecnológico, descobriu-se rotas para sintetizar e criar novos corantes sintéticos. Além disso, com a grande demanda e as novas necessidades, os químicos foram desafiados a produzir compostos com propriedades particulares tais como: estabilidade a luz e aos processos de lavagem, fixação uniforme, boa aderência na matriz, cores diferentes, etc. (ALEGBE e UTHMAN, 2024).

Geralmente os processos de tratamento de efluentes utilizados pelas indústrias consistem em tratamentos primários (físicos, químicos e físico-químicos) e secundários (tratamento biológico por sistemas de lodos ativados, lagoas aeradas, filtros biológicos) (FREIRE et. al., 2000).

Os processos físicos são caracterizados pela separação de fases (sedimentação, decantação, filtração, centrifugação e flotação), transição de fases (extração por solventes e adsorção), além de separação molecular, que utiliza membranas seletivas (hiperfiltração, ultrafiltração, osmose reversa e diálise) (SOUZA, 2006).

Dentre os processos químicos de tratamento pode-se citar a incineração e a precipitação, que são discutíveis, visto que a precipitação, assim como os métodos físicos, promove apenas uma mudança de fase do contaminante, não eliminando completamente o problema ambiental. Já a incineração, além de ser dispendiosa, pode levar a formação de compostos mais tóxicos (dioxinas e furanos) que o próprio efluente (SOUZA, 2006).

Os Processos Oxidativos Avançados (POA) (POAs) como H_2O_2/UV (HAMLAOUI et. al., 2023) e UV/ZnO (MOHAMMADI et. al., 2022) consistem em gerar, através de luz Ultravioleta (UV), radicais altamente oxidantes que tendem a degradar compostos orgânicos naturais ou sintéticos presente em solução, gerando CO_2 , H_2O e sais minerais (JAMIL, 2024). A fotocatalise heterogênea (que também pertence aos POAs) tem mostrado grande eficiência no tratamento de rejeitos industriais, promovendo a descoloração de efluentes e a descontaminação ambiental. Estes processos têm degradado compostos aromáticos coloridos e efluentes têxteis com muita eficiência (SU et. al., 2024).

2 | OBJETIVO

Verificar através dos POAs, as melhores condições para o tratamento do corante orgânico Vermelho Laca Manganês a fim de fornecer tratamentos para ajudar a reduzir a contaminação de ecossistemas aquáticos causada pelos efluentes industriais.

3 I METODOLOGIA

O Corante Vermelho Laca Manganês (VLM) é protegido por patente e foi cedido pela Indústria Nacional Pigmentos de Campina Grande do Sul-PR.

3.1 Preparo da solução alcalina de VLM (VLM_{pH})

Em um Erlenmeyer de 1000 mL, adicionou-se 50 mg de corante VLM e 800 mL de água deionizada. Em seguida adicionou-se, gota a gota, uma solução de NaOH 5 mol/L até pH 14. Deixou-se a solução sobre agitação por 40 minutos. Transferiu-se o conteúdo do béquer para um balão volumétrico de 1000 mL e completou-se o volume com água deionizada. Filtrou-se o conteúdo do balão em um papel filtro comum e transferiu-se o filtrado para um frasco âmbar. O papel filtro foi seco em estufa à 80° C por 1 hora e mantido em dessecador antes da pesagem. Para determinar a quantidade de corante que foi solubilizado, Retirou-se do cálculo de concentração a quantidade de corante que ficou retida no papel filtro. As soluções finais apresentaram concentração de aproximadamente 30 mg/L de corante VLM.

3.2 Sistemas utilizados para a degradação do VLM

O sistema fotocatalítico consistiu em uma caixa de madeira contendo um reator de borossilicato de 250 mL com circulação externa de água para resfriamento, agitador magnético, encanamento para gás O₂, suporte universal, garras e luz UV (lâmpada de imersão do tipo vapor de mercúrio de 125 W). A lâmpada foi isolada pelo bulbo de vidro (que simulou a radiação mais branda, UVA) (Figura 1).

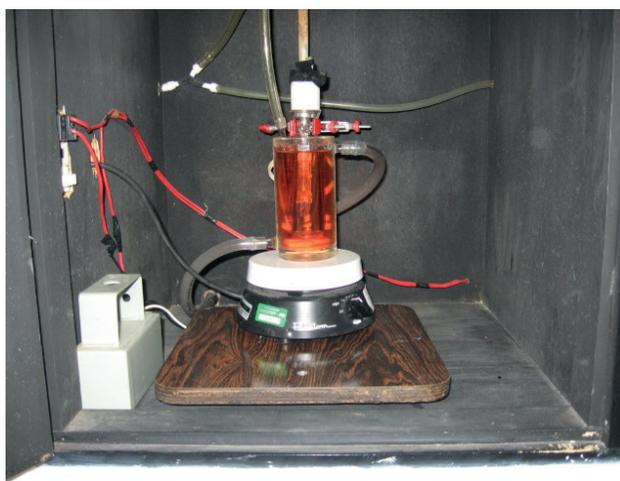


Figura 1 - Caixa de madeira com reator e luz UV submersa em solução de corante.

3.3 Coleta das alíquotas e do Controle analítico

Nos experimentos feitos por um período de 1 hora as amostras foram coletadas nos intervalos de tempo de 0; 15; 30; 45 e 60 minutos. Cada alíquota retirada foi submetida a refrigeração para evitar reações paralelas antes da análise no UV-Vis.

3.4 Experimentos utilizando VLM_{pH}

Nos experimentos com VLM_{pH} , os reagentes utilizados foram O_2 , ZnO, H_2O_2 20% e Persulfato de Potássio (KPS). Somente foi utilizada a circulação externa de água no reator, para resfriamento, quando havia a presença de luz UV. A remoção das partículas de ZnO foi realizada por centrifugação (3000 rpm por 10 minutos). Nos casos em que se utilizou luz UV, chamou-se de Ultravioleta A (UVA) porque o bulbo que revestiu a lâmpada era de vidro.

3.5 Experimentos sem luz UVA

Os experimentos sem luz UV foram realizados em um reator de 200 mL de solução de corante sob agitação. Os experimentos com gás O_2 foram realizados da mesma forma do anterior usando fluxo de ar comprimido. Nos experimentos com ZnO (2,5 mmol/L) adicionou-se 0,04 g de ZnO. Os experimentos com H_2O_2 (15,0 mmol/L) foram realizados utilizando 195 mL de solução de corante e 5 mL de solução estoque de H_2O_2 0,59 mol/L. Para o KPS (11,1 mmol/L) foram usados 188 mL de solução de corante e 12 mL de solução 0,17 mol/L de KPS. Os experimentos com ZnO (2,5 mmol/L) e com H_2O_2 (15,0 mmol/L) (H_2O_2 /ZnO) foram realizados utilizando 195 mL de solução de corante 0,04 g de ZnO e 5 mL de solução estoque de H_2O_2 0,59 mol/L. Os experimentos com ZnO (2,5 mmol/L) e KPS (11,1 mmol/L) (KPS/ZnO) foram realizados com 188 mL de solução de corante, 0,04 g de ZnO e 12 mL de solução 0,17 mol/L de KPS. Os experimentos com gás O_2 e ZnO (2,5 mmol/L) (O_2 /ZnO) foram realizados com 200 mL de solução de corante, 0,04 g de ZnO e fluxo de ar comprimido. Os Experimentos com gás O_2 , H_2O_2 (15,0 mmol/L) ou KPS (11,1 mmol/L) (O_2 / H_2O_2 ou O_2 /KPS) foram realizados com 195 mL de solução de corante, 5 mL de solução estoque de H_2O_2 0,59 mol/L (ou 188 ml de solução de corante para 12 mL de solução 0,17 mol/L de KPS) e fluxo de ar comprimido (gás O_2). Os experimentos com gás O_2 , H_2O_2 (15,0 mmol/L) e ZnO (2,5 mmol/L) (O_2 / H_2O_2 /ZnO) foram realizados com 195 mL de solução de corante, 0,04 g de ZnO, 5 mL de solução estoque de H_2O_2 0,59 mol/L e fluxo de ar comprimido. Os experimentos com gás O_2 , KPS (11,1 mmol/L) e ZnO (2,5 mmol/L) (O_2 /KPS/ZnO) foram realizados com 188 mL de solução de corante, 0,04 g de ZnO, 12 mL de solução de KPS 0,17 mol/L e fluxo de ar comprimido.

3.6 Experimentos com luz UVA

Os experimentos com luz UVA e sem reagentes foram realizados submergindo a lâmpada emitindo UVA na solução. Os experimentos com gás O_2 (UVA/ O_2) foram realizados em fluxo de ar comprimido. Os experimentos com ZnO 2,5 mmol/L (UVA/ZnO), com H_2O_2 (15,0 mmol/L) ou KPS (11,1 mmol/L) (UVA/ H_2O_2 ou UVA/KPS), com gás O_2 e ZnO (UVA/ O_2 /ZnO), com H_2O_2 (15,0 mmol/L) e ZnO (2,5 mmol/L) (UVA/ H_2O_2 /ZnO), com KPS (11,1 mmol/L) e ZnO (2,5 mmol/L) (UVA/KPS/ZnO), com gás O_2 , H_2O_2 (15,0 mmol/L) ou KPS (11,1 mmol/L) (UVA/ O_2 / H_2O_2 e UVA/ O_2 /KPS), com gás O_2 , H_2O_2 (15,0 mmol/L) e ZnO (2,5 mmol/L) (O_2 / H_2O_2 /ZnO), com gás O_2 , KPS (11,1 mmol/L) e ZnO (2,5 mmol/L) (UVA/ O_2 /KPS/ZnO) foram realizados nas mesmas quantidades dos experimentos sem luz UV. As soluções de todos estes experimentos foram homogeneizadas inicialmente por 30 segundos e foram realizados em um tempo de 1 hora.

As melhores concentrações de ZnO foram determinadas pela análise de variação da concentração de 1,2; 2,4; 6,1 e 12,2 mmol L⁻¹. Para determinar a concentração ideal de H_2O_2 , variou-se entre 3,0; 5,9; 8,8; 11,8; 14,7; 17,6; 23,5 e 30,0 mmol L⁻¹. O mesmo fez-se para o KPS, e as concentrações variaram entre 3,7; 7,4; 11,0 e 14,8 mmol L⁻¹.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Descoloração e Degradação

A influência da concentração dos reagentes e a eficiência dos processos de degradação e descoloração da solução contendo o corante VLM foram avaliadas através da redução da absorbância das bandas correspondentes a cor em $I_{\max} = 491$ nm (banda DC) e a de compostos aromáticos conjugados em $I_{\max} = 314$ nm (banda DG1) obtidas a partir do espectro de UV-Vis do corante VLM (Figura 2).

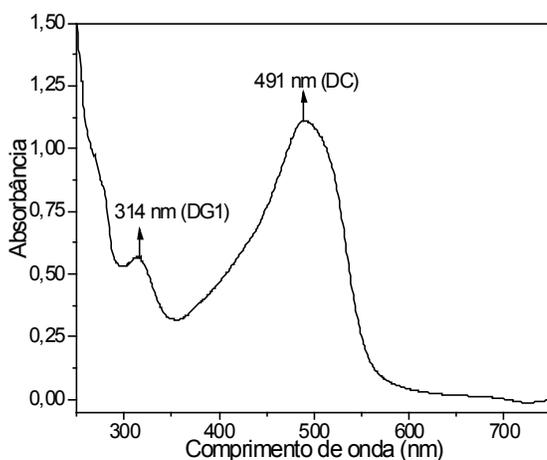


Figura 2 - Espectro na região do UV-Vis da solução VLM_{pH14}.

4.2 Resultados com luz UVA em sistemas homogêneos

A seguir são apresentados os resultados encontrados na otimização dos parâmetros ótimos para cada variável nos sistemas com pH 14 (VLM_{pH14}).

Na ausência dos agentes oxidantes H₂O₂ e KPS, o processo se mostrou ineficaz (Figura 3). As melhores taxas de degradação foram em 15,0 mmol L⁻¹ (Figura 3A) e 11,0 mmol L⁻¹ (Figura 3B), para H₂O₂ e KPS respectivamente.

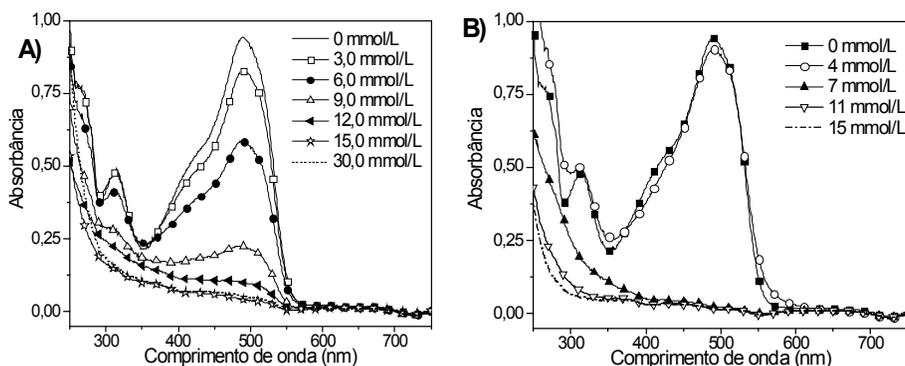


Figura 3 - Otimização das concentrações dos oxidantes H₂O₂ e KPS nos sistemas homogêneos. A) UVA/O₂/H₂O₂; B) UVA/O₂/KPS.

A Figura 4 mostra os resultados da redução das bandas DG1 e DC (Figura 2) com relação ao tempo, utilizando as melhores concentrações encontradas na Figura 3. Em 30 minutos ocorreu uma rápida redução na banda DC (Figura 4A). Após 60 minutos estas

soluções ficaram completamente incolores, ocorrendo uma maior redução da banda DC utilizando KPS como agente oxidante (97%) do que utilizando H_2O_2 (93%).

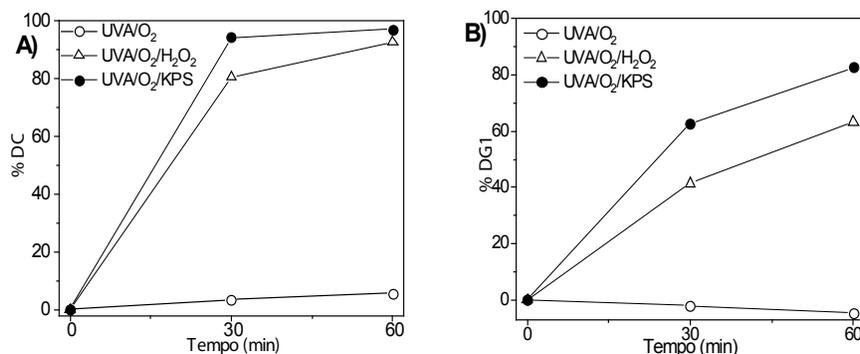


Figura 4 - Eficiência da decoloração e da mineralização nos sistemas homogêneos. A) DC e B) DG1.

O processo envolvendo o sistema $UVA/O_2/H_2O_2$ apresentou taxas de degradação razoáveis para as bandas DC (93%, Figura 4A) e DG1 (63%, Figura 4B). Já o sistema $UVA/O_2/KPS$ foi o mais eficiente porque apresentou as maiores diminuições na absorbância das bandas DC (97%, Figura 4A) e DG1 (83%, Figura 4B).

Estes resultados indicam que os radicais gerados pelo processo envolvendo o KPS foram mais eficientes do que os gerados pelo H_2O_2 .

4.3 Influência da luz UV em sistemas heterogêneos

A influência da concentração do fotocatalisador nas bandas DC e DG1 (Figura 2) foi investigada variando a concentração de ZnO em 1,0; 2,0 e 6,0 $mmol L^{-1}$. Os resultados estão apresentados na Figura 5. O melhor resultado de degradação foi na concentração de 2,0 $mmol L^{-1}$, alcançando valores de 97 e 81 para DC e DG1 respectivamente.

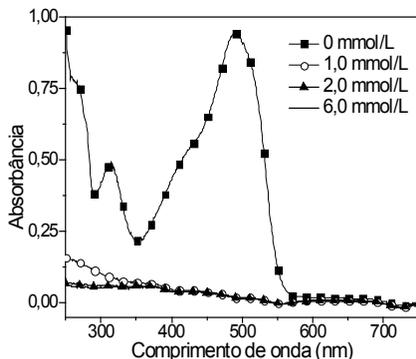


Figura 5 - Variação da concentração do semiconductor ZnO no sistema heterogêneo $VLM_{pH}/UVA/O_2/ZnO$.

Depois de obtido a concentração ótima de ZnO (Figura 5), realizou-se novos experimentos utilizando as condições ótimas dos oxidantes (H_2O_2 ou KPS) com ZnO. Os sistemas analisados foram UVA/ O_2 /ZnO/ H_2O_2 e UVA/ O_2 /ZnO/KPS, e os resultados estão apresentados na Figura 6.

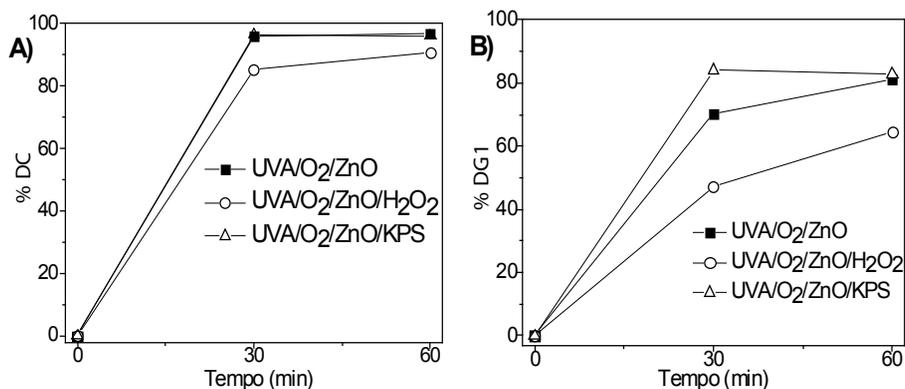


Figura 6 - Descoloração e Mineralização nos sistemas UVA/ O_2 /ZnO, UVA/ O_2 /ZnO/ H_2O_2 e UVA/ O_2 /ZnO/KPS nas bandas: A) DC e B) DG1.

De acordo com a Figura 6A, todos os procedimentos resultaram em uma rápida degradação na região do DC em 30 minutos e ainda maiores em 60 minutos. Os sistemas UVA/ O_2 /ZnO e UVA/ O_2 /ZnO/KPS apresentaram taxas de degradação muito similares (97 e 96%) e maiores que a do sistema UVA/ O_2 /ZnO/ H_2O_2 (91%). Segundo Mahmoodi et. al. (2005) o sítio responsável pela cor da molécula (ligações azo) é mais ativo frente ao ataque oxidativo, e por isso, é degradado mais facilmente.

Para a Figura 6B pode-se observar que o processo heterogêneo que utiliza o sistema UVA/ O_2 /ZnO/KPS atingiu uma alta taxa de degradação em 30 minutos e após 60 min o sistema UVA/ O_2 /ZnO apresentou taxas de degradação (81%) semelhantes ao UVA/ O_2 /ZnO/KPS (83%). O sistema UVA/ O_2 /ZnO/ H_2O_2 apresentou taxas de degradação inferiores ao do sistema sem H_2O_2 (65%) indicando que a adição deste agente oxidante interfere negativamente na degradação da solução contendo o corante orgânico.

A comparação entre os sistemas homogêneos (Figura 4) e heterogêneos (Figura 6) mostrou que a mistura dos agentes oxidantes com o semicondutor não apresentou mudanças significativas nas taxas de degradação da banda DG1 e apresentou resultados inferiores aos sistemas que utilizam os reagentes isoladamente. Portanto, os resultados apresentados nas Figuras 4 e 6 indicam que o sistema UVA/ O_2 /ZnO é mais eficiente que os demais sistemas homogêneos e heterogêneos.

4.4 Processos sem O₂

Neste estudo analisou-se a influência do gás O₂ no processo de degradação da solução de corante. A ausência do gás O₂ resultou em um decréscimo na degradação e descoloração em 12 e 18% respectivamente, na qual o experimento com UV/O₂/H₂O₂, resultou em 90 e 56% de degradação para as bandas DC e DG1 respectivamente e o experimento com UV/H₂O₂ resultando em 78 e 38% para DC e DG1 respectivamente (Figura 7A).

No processo com UVA/KPS, observou-se que a presença do gás O₂ interfere negativamente no processo de degradação. A remoção do gás O₂ resultou em uma boa diminuição da banda DG1 em 45 minutos. Porém, na análise da amostra em 60 minutos observou-se a formação de uma coloração amarela indicando a formação de algum subproduto intermediário que coloriu novamente a solução. O mesmo não ocorre quando o gás O₂ está presente (Figura 7B).

No processo com UVA/ZnO, a retirada do gás O₂ resultou em experimentos ligeiramente menos eficientes, diminuindo a descoloração e degradação em 3% e 17% respectivamente, sendo que o experimento com UVA/ZnO resultou em 94% para descoloração e 63% para degradação (Figura 7C).

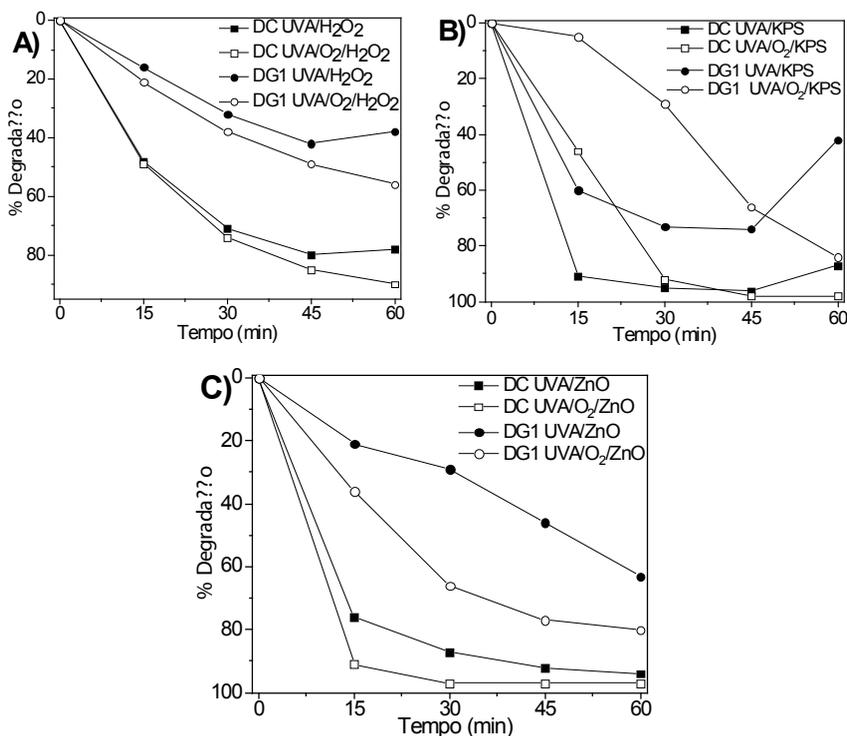


Figura 7 - Fotocatálise com e sem gás O₂ utilizando as concentrações ótimas de: (A) H₂O₂; (B) KPS e (C) ZnO.

Em todos os testes realizados, percebeu-se que ocorre uma maior diminuição da banda DC quando comparado com a banda DG1. Este resultado já é esperado, visto que a quebra das ligações azo são mais fáceis do que a quebra das ligações C-C de compostos aromáticos.

As altas taxas de degradação apresentadas nas Figuras 6 e 7, quando se utiliza ZnO, podem estar relacionadas com o fato que ao se adicionar ZnO no sistema, ocorre a formação de cargas negativas em volta do semiconductor, devido a adsorção dos íons OH⁻ na superfície do fotocatalisador. A adsorção destes íons favorece a formação de radicais •OH. Estes radicais sendo extremamente oxidantes, ajudavam na degradação do corante (MARTO et. al., 2009).

5 | CONCLUSÕES

Pode-se constatar que é necessária a presença do gás O₂ e da luz UV para se obter a máxima eficácia no tratamento.

Pode-se observar a necessidade da utilização de reagentes oxidantes e de semicondutores para a degradação da solução de VLM_{pH} quando se utilizou o bulbo de vidro (UVA).

Pode-se concluir que a eficiência dos sistemas quando se utilizou VLM_{pH} seguiu a seguinte ordem: UVA/O₂/ZnO > UVA/O₂/KPS ≈ UVA/O₂/ZnO/KPS > UVA/O₂/H₂O₂ ≈ UVA/O₂/ZnO/H₂O₂.

AGRADECIMENTOS

LAMAQ e UTFPR/DAQBI.

REFERÊNCIAS

ALEGBE, E. O.; UTHMAN, T. O. A review of history, properties, classification, applications and challenges of natural and synthetic dyes. **Heliyon**, v. 10, n. 3, p. e33646, 2024.

FREIRE, R. S.; PELEGRINI, R.; KUBOTA, L. T.; DURÁN, N.; ZAMORA, P. P. Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. **Quim. Nova**. n. 23, v.4, p. 504-511, 2000.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. Corantes têxteis. **Quim. Nova**. n. 23, v.1, p. 71-75, 2000.

HAMLAOUI, M.; SAHRAOUI, A.; BOULEBD, H.; ZERTAL, A. Kinetics of three commercial textile dyes decomposition by UV/H₂O₂ and UV/acetone processes: An experimental study and DFT calculations. **J. Mol. Liq.** v. 383, p. 122212, 2023.

JAMIL, T. Role of advance oxidation processes (AOPs) in textile wastewater treatment: A critical review. **Desalin. Water Treat.**, v. 318, p. 100387, 2024.

MAHMOODI, N. M.; ARAMI, M.; LIMAEE N. Y.; TABRIZI, N. S. Decolorization and aromatic ring degradation kinetics of Direct Red 80 by UV oxidation in the presence of hydrogen peroxide utilizing TiO₂ as a photocatalyst. **Chem. Eng. J.**, v. 112, n. 1-3, p. 191-196, 2005.

MARTO, J.; MARCOS, P. S.; TRINDADE, T.; LABRINCHA, J. A. Photocatalytic decolouration of Orange II by ZnO active layers screen-printed on ceramic tiles. **J. Haz. Mat.**, v. 163, n. 1, p. 36-42, abr. 2009.

MOHAMMADI, M. J.; FADAEI, A.; JALALI, S.; SHEKOOHMANDI, H.; KHANIABADI, Y. O.; KIANIZADEH, M. Benzo[a]pyrene Decomposition by UV/ZnO Process: Treatment Condition Optimization by Design of Experiments. *Polycyclic Aromat. Compd.*, v. 42, 6, p. 3253-3263, 2022.

PELEGRINI, R.; PERALTA-ZAMORA, P.; ANDRADE, A. R.; REYES, J.; DURAN, N. Electrochemically assisted photocatalytic degradation of reactive dyes. **Appl. Catal. B: Environ** n. 22, p. 83-90, 1999.

RAMOS, L. P. S.; QUADROS, T. S. Processo de Industrialização no Brasil: Uma abordagem histórica, **Administração: Princípios de Administração e suas Tendências**. v. 3, cap. 12, Editora Científica Digital Ltda, 2021.

SHARMA, J.; SHARMA, S.; SONI, V. Classification and impact of synthetic textile dyes on Aquatic Flora: A review. **Reg. Stud. Mar. Sci.** v. 45, p. 101802, 2021.

SOUZA, C. R. L. **Degradação de corantes reativos e remediação de efluentes têxteis por processos avançados envolvendo ferro metálico**. Dissertação (Mestrado em Química Analítica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SU, R.; ZHU, Y.; GAO, B.; LI, Q. Progress on mechanism and efficacy of heterogeneous photocatalysis coupled oxidant activation as an advanced oxidation process for water decontamination. **Water Res.**, v. 251, p. 121119, 2024.

VASCONCELOS, M. W.; GONÇALVES, S.; OLIVEIRA, E. C.; RUBERT, S.; GHISI, N. C. Textile effluent toxicity trend: A scientometric review. **J. Cleaner Prod.** v.366, p. 132756, 2022.