



A cavitação hidrodinâmica na decomposição do azul de metileno

Palavras-chave: Cavitação, Degradação, Azul de metileno

Sophia Freire Haddad, FECFAU - Unicamp

Prof. Dr. José Gilberto Dalfré Filho, (orientador), FECFAU - Unicamp

INTRODUÇÃO

O acesso à água de qualidade ainda não é uma realidade para grande parte da população mundial, sendo um dos maiores desafios técnicos da atualidade. Tal problema é agravado dentro do cenário do aumento populacional, escassez hídrica, contaminação dos mananciais, introdução de novas substâncias no mercado, entre outros. Dessa forma, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de novas tecnologias eficientes e não custosas que visam a obtenção de água de boa qualidade, assegurando à toda população o direito fundamental de acesso à água.

O Brasil possui vantagens devido à quantidade de recursos hídricos disponíveis, do qual detém cerca de 12% das reservas de água doce do planeta (Governo Brasileiro, 2022). No entanto, tal condição privilegiada levou durante muitos anos ao uso abusivo de rios e lagos, principalmente quanto a captar água bruta e devolver efluentes para os corpos hídricos sem tratamento adequado. Atualmente, mais de 35 milhões de brasileiros não têm acesso à água tratada (BRANCO, 2020), fenômeno que foi agravado durante o cenário pandêmico do COVID-19, onde a escassez de saneamento aumentou as desigualdades sociais e urbanas.

Das principais substâncias tóxicas causadoras da contaminação da água, destacam-se os corantes industriais, e dentro dessa categoria, o azul de metileno. O azul de metileno (AM) é um corante usado principalmente na indústria têxtil, presente também na indústria farmacêutica, alimentícia, de cosméticos, entre outras. Quando aplicado ao tecido, o corante deve ser muito resistente, pois deve aguentar lavagens, água clorada, luz, entre outros fatores (SILVA, 2005); por isso suas moléculas são muito estáveis, característica que atribui ao AM difícil degradação em solução aquosa. O AM é classificado como um corante do tipo básico e serve de modelo para testar a remoção de corantes e contaminantes orgânicos em corpos aquosos, sendo usualmente empregado em testes de adsorção e em diversos ensaios presentes na literatura.

Nesse contexto, surge a ideia de empregar o fenômeno da cavitação com o equipamento tipo jato cavitante, que se trata de um processo físico de tratamento, diminuindo o uso de reagentes químicos adicionais. O colapso das cavidades formadas pelo jato gera ondas de alta pressão e micro jatos de altíssima velocidade (acima de 100 m/s) que têm efeito na inativação de bactérias (Assis, Dalfré Filho e Genovez, 2013 e Dalfré Filho, Assis e Genovez, 2015). Estes mesmos efeitos devem ser os responsáveis pela degradação dos compostos presentes na água.

OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo deste trabalho é identificar se o equipamento tipo jato cavitante pode atuar na decomposição de corantes resultantes de efluentes de indústrias, sobretudo têxteis, usando para isto o azul de metileno. Para tanto, pressupõe-se ensaios curtos e simples.

METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados com o equipamento tipo jato cavitante, na instalação que se encontra no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp. Um esquema da instalação pode ser visualizado na *Figura 1* (Patente: privilégio de Inovação. Número do registro: BR10201501304). O reservatório do equipamento é cilíndrico, com diâmetro de 0,68 m e 0,75 m de altura, e apresenta janelas de vidro para visualização dos jatos. Foi confeccionado em aço inox e tem uma capacidade de 0,225 m³. Uma bomba de deslocamento positivo de alta pressão (Prominas, BPS-328-025-MP) recircula a água. Uma bomba centrífuga (atuando como “booster”) garante a pressão mínima de operação na entrada da tubulação de sucção da bomba de deslocamento positivo e encontra-se entre o reservatório e a bomba de deslocamento positivo. No reservatório está o composto a ser testado, que circula pelo equipamento. A tubulação de recalque possui uma válvula reguladora de pressão, para regular as pressões dos testes, um manômetro e uma válvula de alívio para garantir a segurança da operação, caso ocorra um aumento súbito da pressão da bomba de deslocamento direto. Esses equipamentos foram adquiridos e construídos com o auxílio da FAPESP, dos processos 2009/54278-4, 2012/09843-8 e 2019/12166-7. Uma foto do equipamento pode ser vista na *Figura 2*.

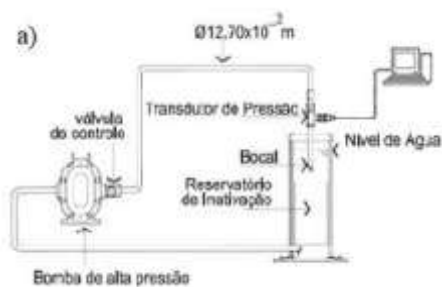


Fig 1: Esquema do equipamento tipo jato cavitante (Fonte: Dalfré Filho et al., 2015)



Fig 2: Foto do equipamento tipo jato cavitante (Fonte: autoral)

Na saída da tubulação de recalque e dentro do reservatório, encontram-se os bocais em aço inox. A configuração do bocal único pode ser vista na *Figura 3*. Na configuração bocal único possui diâmetro de orifício de 1,5mm, que permanece imerso no reservatório, sem causar desgaste de nenhum componente da instalação.

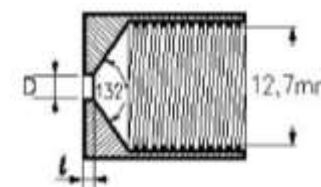


Fig 3: Esquema do bocal único (Fonte: autoral)

Inicialmente, no Laboratório de Saneamento (LABSAN) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, foi pesado 1,64 g de azul de metileno e então diluído em um balão volumétrico para preparar a solução, que então foi levada para o LHMf e despejada no reservatório. Antes do início dos testes, foi ligado o misturador acoplado ao equipamento durante 20 minutos, para garantir que o azul de metileno seja homogêneo na água do reservatório. Em seguida, antes de aplicar as pressões dos ensaios, foram feitos testes com a recirculação da solução com o bocal único durante 10 minutos, sem pressão, para garantir ainda mais a homogeneização do azul de metileno. Nota-se que, inicialmente, o misturador não havia sido utilizado, porém notou-se que a solução ainda estava heterogênea ao realizar os ensaios, por isso adotou-se essa nova etapa.

A pressão de ensaio foi variada, sendo que, para a configuração de bocal único, foram testadas as pressões de 5, 15 e 25 MPa. Este é o ponto de partida para se conhecer o comportamento dos ensaios. A partir daí, os tempos de ensaios e as ótimas condições de operação frente ao consumo energético foram otimizadas, elegendo-se a combinação ótima. Os tempos de ensaio foram 0, 15, 30, 45 e 60 minutos, sendo t=0 a solução após os 30 minutos de homogeneização e antes do início do teste de degradação por cavitação. O tempo total de ensaio foi uma variável definida nos testes, assim como os intervalos de tempo em que as amostras foram coletadas. O equipamento também apresenta uma serpentina de resfriamento em aço inox, acoplada à tampa do reservatório. A serpentina mantém a temperatura constante para evitar a influência da temperatura nos testes.

As amostras foram analisadas no LABSAN. A degradação do composto azul de metileno foi observada através da varredura espectrofotométrica (UV-VIS) com o espectrofotômetro (Hach DR/4000U Spectrophotometer). Gerou-se, então, um gráfico que relaciona a absorbância e o comprimento de onda. Após os ensaios no equipamento jato cavitante, os resultados foram observados perfazendo-se a varredura na faixa de comprimento na faixa visível (400nm-800nm) e na faixa Ultravioleta (200nm-400nm). Além disso, foram analisados parâmetros físico-químicos da solução ao longo dos ensaios, sendo eles turbidez (UT), pH e condutibilidade ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados gerados pelo espectrofotômetro foram importados para o Excel, onde foi possível gerar gráficos da absorbância em função do comprimento de onda para as pressões de 5, 15 e 25 MPa para os tempos T0, T15, T30, T45 e T60, conforme os *Gráficos 1, 2 e 3* abaixo.



Gráfico 1: Degradação do azul de metileno a 5 MPa



Gráfico 2: Degradação do azul de metileno a 15 MPa



Gráfico 3: Degradação do azul de metileno a 25 MPa

Para os ensaios realizados a 5 MPa, o maior valor de absorbância encontrado foi a 664 WL/nm, na faixa visível do comprimento de onda. A absorbância inicial foi de 0,797 e, após 60 minutos, 0,851, o que indica um aumento de 6,34%. Na faixa ultravioleta, a maior absorbância ocorreu no comprimento de onda de 292 WL/nm, onde para $t=0$ foi encontrada uma absorbância de 0,441 e para $t=60$, 0,481, o que indica um aumento de 8,32%.

Para os ensaios realizados a 15 MPa, o maior valor de absorbância encontrado foi a 664 WL/nm, na faixa visível do comprimento de onda. A absorbância inicial foi de 0,757 e, após 60 minutos, 0,817, o que indica um aumento de 7,34%. Na faixa ultravioleta, a maior absorbância ocorreu no comprimento de onda de 292 WL/nm, onde para $t=0$ foi encontrada uma absorbância de 0,426 e para $t=60$, 0,464, o que indica um aumento de 8,19%.

Para os ensaios realizados a 25 MPa, o maior valor de absorbância encontrado foi a 664 WL/nm, na faixa visível do comprimento de onda. A absorbância inicial foi de 0,905 e, após 60 minutos, 1,004, o que indica um aumento de 0,90%. Na faixa ultravioleta, a maior absorbância ocorreu no comprimento de onda de 292 WL/nm, onde para $t=0$ foi encontrada uma absorbância de 0,504 e para $t=60$, 0,574, o que indica um aumento de 12,20%.

Os resultados dos parâmetros físico-químicos finais dos ensaios de inativação, bem como a variação desses foram expressos nas *Tabelas 1 e 2* abaixo.

Final (t=60)	Pressões			Média
	5 MPa	15 MPa	25 MPa	
Turbidez (UT)	6,46	7,16	8,62	7,16
pH	7,40	7,78	7,68	7,68
Condutibilidade (µS/cm)	227,00	292,00	290,00	290,00

Tabela 1: Resultados físico-químicos finais dos ensaios de inativação

Variação (Δ)	Pressões			Média
	5 MPa	15 MPa	25 MPa	
Turbidez (UT)	0,31	-0,64	0,96	0,31
pH	-0,06	0,02	0,00	0,00
Condutibilidade (µS/cm)	9,00	36,00	57,00	36,00

Tabela 2: Variação dos parâmetros físico-químicos resultantes dos ensaios de inativação

Não foi possível relacionar a turbidez com o aumento de pressão, visto que a 5 MPa e 25 MPa a turbidez aumentou, enquanto a 15 MPa diminuiu. Ao final do ensaio a menor turbidez foi de 6,46 UT e a maior de 8,62 UT, sendo a média de 7,16 UT.

Assim, como a turbidez, não foi possível assimilar a variação do pH à pressão empregada, visto que ao longo dos 60 minutos, na pressão de 5 MPa o pH diminuiu, a 15 MPa aumentou ligeiramente e a 25 MPa a variação foi nula.

A condutibilidade apresentou aumento em todas as pressões ensaiadas, e conforme o aumento da pressão, maior foi essa variação. Esse fenômeno pode ser explicado pelo contato com o material do equipamento e do reservatório de reação que é composto de aço inox. Os parâmetros de condutibilidade não se enquadraram naqueles da legislação, cuja condutibilidade máxima é de 100 µS/cm, e o valor médio apresentado nos ensaios foi de 290 µS/cm.

CONCLUSÕES

Apesar da implementação do misturador antes de realizar os ensaios ser essencial para garantir a homogeneização da solução e aumentar a eficiência do equipamento do jato cavitante, a cavitação hidrodinâmica com a configuração de bocal único não mostrou eficiência na degradação da molécula do azul de metileno.

O t=0 referente ao maior valor de absorvância encontrado para as pressões de 5 e 15 MPa foram próximos entre si, 0,797 e 0,757 respectivamente, enquanto para 25 MPa o valor encontrado foi de 0,905. Esse valor destoa daquele esperado visto que, para t=0, ainda não havia sido aplicada nenhuma pressão no equipamento, logo o valor deveria ser próximo aos demais visto que foi apenas utilizado o misturador durante 20 minutos e a circulação sem pressão durante 10 minutos.

BIBLIOGRAFIA

- AGARWAL, A.; NG, W. J.; LIU, Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere* 84 p. 1175–1180. 2011.
- ALMEIDA, T. S. REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO UTILIZANDO UM COMPÓSITO MAGNÉTICO. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.
- ASSIS, M. P. Avaliação de equipamento tipo jato cavitante para inativação de *Escherichia coli* empregando múltiplos jatos. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. 2014.
- ASSIS, M. P.; DALFRÉ FILHO, J. G.; GENOVEZ, A. I. B. Equipamento tipo jato cavitante para desinfecção de água. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

ASSIS, M. P.; DALFRÉ FILHO, J. G.; GENOVEZ, A. I. B. Equipamento tipo jato cavitante para degradação de compostos persistentes. XXIV Congresso Latinoamericano De Hidráulica, Punta del Este. 2010.

BRANCO FILHO, T. C. T., MALHEIROS, T. F. Desafios da Universalização do Saneamento, no contexto do Novo Marco Legal. NUPS, EESC, USP. 2020.

BRASIL. [Ministério das Relações Exteriores](https://www.gov.br/mre/pt-br/assuntos/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/meio-ambiente-e-mudanca-do-clima/recursos-hidricos). "Recursos Hídricos". Publicado em 2014 e atualizado em 2022. Disponível em <<https://www.gov.br/mre/pt-br/assuntos/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/meio-ambiente-e-mudanca-do-clima/recursos-hidricos>>

CANELA, M. C.; JARDIM, W. F.; SODRÉ, F. F.; GRASSI, M. T. Cafeína em águas de abastecimento público no Brasil. 1. ed. São Carlos: Editora Cubo, 2014. v. 1. 96p.

DALFRÉ FILHO, J. G.; GENOVEZ, A. I. B.; ASSIS, M.P. Equipamento tipo jato cavitante para inativação/desinfecção de bactérias empregando único ou múltiplos jatos. 2015, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR10201501304, título: "Equipamento tipo jato cavitante para inativação/desinfecção de bactérias empregando único ou múltiplos jatos" , Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 03/06/2015

DALFRÉ FILHO, J.G.; ASSIS, M.P.; GENOVEZ, A.I.B. Bacterial inactivation in artificially and naturally contaminated water using a cavitating jet apparatus. Journal of Hydro-Environment Research, v. 9, n. 2, p 259-267. 2015.

DELAZARE, T.; NEU R. S.; RIBEIRO, E. S. Degradação do corante azul de metileno por Nb2O5 suportado em SiO2. As engenharias e seu papel no desenvolvimento autossustentado [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta, Viviane Teleginski Mazur. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.

ENELTON FAGNANI, REGIANE APARECIDA GUADAGNINI, GLENDA ARAÚJO SILVA, JOSÉ ROBERTO GUIMARÃES. Degradação de cafeína e azul de metileno por processos oxidativos avançados (POA). Holos Environment, 2013.

FAGNANI, E.; GUADAGNINI, R.A.; SILVA, G.A.; GUIMARÃES, J.R. Degradação de cafeína e azul de metileno por processos oxidativos avançados (POA). Holos Environment, v. 13 n. 1, p. 85, 2013.

GRATIERI, M.P.A.; OMIDO, T. V.; GENOVEZ, A. I. B.; DALFRE FILHO, J. G. A inativação de Echerichia Coli e o comportamento físico-químico da água em um equipamento tipo jato cavitante. In: XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 2018, Buenos Aires. XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 2018.

JORGE, I. R., TAVARES, F. P., SANTOS, K. G. REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES POR ADSORÇÃO EM BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR. XXXVII ENEMP Universidade Federal de São Carlos, 2015.

JYOTTI, K.K. AND PANDIT A.B. (2001) "Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation". Biochemical Engineering Journal. vol 7, p.201-212.

KALUMUCK, K.M.; CHAHINE, G.L.; HISIAO, C. T. E CHIO, J. K. (2003) "Remediation and disinfection of water using jet generated cavitation." Proc., In: 5th International Symposium on Cavitation, Osaka, Japan, 2003.

KUMAR, M. S.; SONAWANE, S. H.; PANDIT, A. B. Degradation of methylene blue dye in aqueous solution using hydrodynamic cavitation based hybrid advanced oxidation processes. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2017.

LOPES, C. W., SCHWANKE, A., PERGHER, S. B. C., PENHA, F. G. APLICAÇÃO DE UMA ARGILA ORGANOFÍLICA NA REMOÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO DE SOLUÇÕES AQUOSAS. PERSPECTIVA, Erechim. v.34, n.127, p. 85-90, setembro/2010.

MUHAMMAD, A.; SHAFEEQ, A.; BUTT, M. A.; RIZVI, Z. H.; CHUGHTAI, M. A.; REHMAN, S. (2008) "Decolorization and removal of COD and BOD from raw and biotreated textile dye bath effluent through advanced oxidation processes (AOPS)." Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 25, n. 3, p. 453 – 459, 2008.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. E-book. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária. 2020.

RAMOS, U., MACHADO, C.C.C., PESTANA, P.M., ROSENO, K.T.C. Degradação do corante azul de metileno pelo processo de fotólise em um reator tubular de fluxo contínuo utilizando radiação artificial. Anais do Encontro Nacional de Pós-Graduação – VI ENPG Vol.1 (2017).

RUTHVEN, D. M. Principles of Adsorption and Adsorption processes. New York: John Wiley & Sons, 1984. 432 p.

SCODCHE, R.M., GARCIA, L.V., REIS, M.P., KLAMT, EVORA, P.R.B. (2004) "Uso do Azul de Metileno no Tratamento de Choque Anafilático durante Anestesia. Relato de Caso." Revista Brasileira de Anestesiologia, v. 54, n. 6, p. 809-815, 2004.

SILVA, A.T. Influência da temperatura na adsorção do corante azul de metileno utilizando serragem de *Pinus elliottii* como um adsorvente alternativo: um modelo para o tratamento de efluentes têxteis. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

TULLIS, J.P. (1989) Hydraulics of pipelines - pumps, valves, cavitation, transients. 1. ed. Ed. John Wiley and Sons. 266p.

TONG, YANQUN AND JIANG, BIN AND CHEN, XIN AND REN, XUDONG AND LU, JIANGYI AND DING, LIUXIN. Synergistic Degradation of Methylene Blue by Laser Cavitation and Activated Carbon Fiber. SSRN, 2022.

WANG, BAOWEI; WANG, TINGTING; SU, HUIJUAN. A dye-methylene blue (MB)- degraded by hydrodynamic cavitation (HC) and combined with other oxidants. Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 10, Issue 3, 2022.