

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aluno:

MARLON LEMOS

Título:

INFLUÊNCIA DO pH E DA TEMPERATURA NA FORMAÇÃO DE
TRIALOMETANOS E ÁCIDOS HALOÁCETICOS EM PISCINAS CLORADAS

CETTAPI

CENTRO DE TREINAMENTO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS DE PISCINAS

Março 2025

RESUMO

A desinfecção da água de piscinas é fundamental para garantir a segurança dos banhistas, sendo o cloro o principal agente utilizado para sanitização da água. Porém, ao adicionar o elemento clorado a água (H_2O) em uma piscina e que seja capaz de liberar ácido hipocloroso ($HClO$) através do processo de hidrólise ao reagir com matéria orgânica dissolvida dentro dessa água e dependendo das características dessa água como pH e temperatura, pode resultar na formação de subprodutos halogenados, como trialometanos (THMs) e ácidos haloacéticos (HAAs), compostos que podem representar riscos à saúde humana. O objetivo deste estudo é analisar a influência do pH e da temperatura na formação desses subprodutos clorados em piscinas tratadas com cloro, tanto na forma convencional o cloro granulado (hipoclorito de sódio e cálcio) quanto em sistemas de geração de cloro por eletrólise de água salgada. A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica baseada em artigos científicos, livros e normas técnicas, com foco nos principais fatores que afetam a geração desses compostos. Os resultados demonstram que pH elevado favorece a formação de THMs, enquanto pH ácido intensifica a presença de HAAs. Além disso, temperaturas mais altas aumentam a velocidade das reações químicas, resultando em concentrações mais elevadas de subprodutos clorados. No caso da eletrólise salina (GERADOR DE CLORO), a presença de íons bromo na água pode intensificar a formação de trialometanos bromados, considerados extremamente tóxicos. Dessa forma, o controle rigoroso do pH e da temperatura da água de piscinas se mostra essencial para minimizar a formação desses compostos e garantir a qualidade da água.

Palavras-chave: Cloração, Subprodutos halogenados, pH, Temperatura, Piscinas, Eletrólise salina.

1. INTRODUÇÃO

A água de piscina deve ser purificada não só por motivos de segurança do usuário, mas também para prevenir o crescimento de compostos patogênicos. O cloro, que é uma substância para desinfecção eficaz e fácil de usar, é o agente desinfetante mais amplamente utilizado. No entanto ao ser adiciona a água (H_2O) e ser capaz de gerar ácido hipocloroso ($HClO$) através da hidrolise, existe a possibilidade dependendo como for a característica dessa água, como o nível de pH e temperatura e ao reagir com a matéria orgânica em suspensão pode levar a formação de subprodutos halogenados, como trialometanos (THMs) e ácidos haloacéticos (HAAs). O pH e a temperatura da água afetam diretamente a quantidades desses compostos da água. O pH regula o equilíbrio entre $HOCl$ e OCl^- íon hipoclorito, o que influencia a ação e na eficácia do cloro e o subproduto se forma. A temperatura pode acelerar as reações químicas que ocorrem entre o cloro e substâncias orgânicas, resultando em uma maior concentração dessas substâncias na água. Além da cloração convencional com hipoclorito de sódio ou cálcio, hoje em dia empregam a eletrólise de água salina para produzir cloro diretamente na piscina (Geradores de cloro). Essa abordagem diminui a necessidade de aplicação manual de desinfetantes, mas pode também levar à geração de subprodutos específicos, como os trialometanos bromados, especialmente na presença de íons bromo dissolvidos na água.

Considerando esses fatores, é fundamental compreender o papel do pH e da temperatura na criação de subprodutos clorados, a fim de elaborar táticas que reduzam sua presença e assegurem uma água mais segura. Esta pesquisa visa investigar como essas variáveis afetam a formação de THMs e HAAs, bem como examinar técnicas para diminuir sua concentração na água tratada.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Subprodutos da Cloração e Sua Formação

A desinfecção da água da piscina é essencial para conter o desenvolvimento de microrganismos. O cloro é o desinfetante mais comumente utilizado devido à sua eficiência e baixo custo e alto poder de oxidação, na forma de hipoclorito de sódio ($NaClO$) e cloro gás (PÉREZ-VIDAL, DÍAZ-GÓMEZ, SALAMANCA-ROJAS, ROJAS-

TORRES, 2016). No entanto, a ocorrência entre o cloro e a matéria orgânica dissolvida pode levar à formação de subprodutos halogenados, como trihalometanos (THMs) e ácidos haloacéticos (HAAs), que estão associados a possíveis efeitos negativos para a saúde (RICHARDSON et al., 2007).

Os trihalometanos (THMs) mais conhecidos incluem clorofórmio (CHCl_3), bromodicloroetano (CHBrCl_2), dibromocloroetano (CHBr_2Cl) e bromoformo (CHBr_3). Esses compostos são voláteis e são produzidos quando o cloro reage com a matéria orgânica na água (WHO, 2017). Enquanto isso, os ácidos haloacéticos (HAAs), como ácido monofluoroacético, ácido difluoroacético e ácido trifluoroacético, são subprodutos mais persistentes que representam riscos para a saúde, incluindo efeitos cancerígenos e mutagênicos (KOGEVINAS et al., 2010).

Nos últimos anos, as piscinas começaram a utilizar sistemas alternativos para gerar cloro por meio da eletrólise de água salgada como uma alternativa ao uso de hipocloritos de sódio ou cálcio. No entanto, esse método também pode ter um impacto na produção de subprodutos halogenados.

2.1.2 Trihalometanos

Trihalometanos (THMs) são os principais subprodutos de desinfecção resultantes da reação do cloro com material orgânico dissolvido na água. Os fatores que afetam a formação de THMs incluem a concentração de material orgânico dissolvido, tempo de contato, temperatura da água e pH (VON SPERLING, 2014). As principais espécies de THMs em piscinas cloradas são clorofórmio (CHCl_3), bromodiclorometano (CHBrCl_2), dibromoclorometano (CHBr_2Cl) e bromofórmio (CHBr_3) (BRAZ, 2018). Os íons brometo aumentam a formação das espécies de THM bromadas, que geralmente são mais tóxicas do que as cloradas (TSUTIYA, 2016). A exposição prolongada a trihalometanos pode causar resultados crônicos adversos à saúde devido à irritação da pele e do trato respiratório superior e potenciais efeitos cancerígenos de longo prazo (ANVISA, 2002). Trabalhadores e nadadores em piscinas cobertas e aquecidas podem ser expostos a esses compostos por meio da inalação dos vapores (CONAMA, 2005). Estratégias como controle de pH, controle de temperatura e manutenção da carga orgânica baixa por meio de filtragem são boas alternativas para manter os

níveis de THM baixos e, portanto, manter melhor qualidade da água para o consumidor.

2.1.3 Ácido Haloacéticos

Os ácidos haloacéticos (HAAs) são subprodutos formados durante a desinfecção e são reações entre o cloro com matéria de natureza orgânica presente na água. Na maioria das vezes, eles são medidos como tóxicos crônicos poluentes orgânicos de longa duração, pois sua presença na água potável continua em níveis que são uma preocupação para a saúde pública (VON SPERLING, 2014). Os HAAs mais detectados na água tratada são os ácidos tricloroacéticos e análogos bromados (TSUTITA, 2016). HAAs são formados sob tempo de contato com a concentração orgânica de matéria, pH e temperatura da água. Em contraste com THMs, HAAs são não voláteis e geralmente permanecerão em um estado dissolvido dentro da água, mas começarão a se acumular ao longo do tempo se não forem suficientemente tratados (BRAZ, 2018). A condição de pH dos compostos influencia muito significativamente. Estudos mostram que a degradação de HAAs pode resultar em valores de pH acima de 8,5 e, portanto, pouca persistência na água (CONAMA, 2005). Altas temperaturas também aceleram as reações químicas entre o cloro e os precursores orgânicos, impulsionando assim primeiro a realização de HAAs, mas também, ao mesmo tempo, tornando-os degradáveis em estágios subsequentes de sua formação (ANVISA, 2002). Alguns desses compostos têm sido associados a efeitos adversos à saúde, como danos ao fígado e potencial carcinogenicidade. Portanto, há limites regulatórios para sua concentração em água tratada (TSUTIYA, 2016). A outra maneira de garantir menos quantidades de HAAs é otimizar o pH da água, reduzir a carga orgânica na água por meio de processos de filtração eficazes e qualquer outra consideração para o uso de métodos alternativos de desinfecção.

2.2 Impacto do pH na Formação de Trihalometanos e Ácidos Haloacéticos

O fator mais significativo que afeta a formação de subprodutos da cloração é o pH da água. A pesquisa disponível favorece pH mais alto (acima de 7,5) em relação à formação de trihalometanos — pH alto aumenta a estabilidade do íon hipoclorito

(ClO⁻), que então se combina com material orgânico para produzir THMs. Além disso, o pH de um sistema pode regular a concentração de espécies cloradas na água. Por exemplo, o HClO ácido é mais útil para a dominância de desinfecção está aproximadamente entre pH 6,5 e 7,5, com OCl⁻ predominando acima de 7,5: o hipoclorito sendo muito mais lento do que o ácido hipocloroso na reação com orgânicos pode levar ao acúmulo relativamente lento de THMs ao longo do tempo (CONAMA, 2005). Os ácidos haloacéticos (HAAs) são mais sensíveis a extremos de pH em suas reações. Estudos sugerem que abaixo de pH 6,5, sua formação ocorre a partir da matéria orgânica em sua hiper solução, também maior reatividade do cloro com compostos orgânicos dispersos. Portanto, espera-se que o ajuste adequado do pH seja uma medida eficaz para diminuir a formação de subprodutos da cloração na água da piscina.

2.3 Impacto da Temperatura na Formação de Subprodutos Clorados

A temperatura da água influencia a formação de subprodutos clorados. Temperaturas mais altas estimulam a reação do cloro com a matéria orgânica, resultando em um aumento na produção de THMs e HAAs (ANVISA; 2002).

Pesquisas indicam que aumentar a temperatura da água de 20°C para 30°C pode resultar em um aumento de mais de duas vezes na concentração de trihalometanos devido à maior volatilização de compostos orgânicos e maior reatividade do cloro (RICHARDSON et al., 2007). Em piscinas aquecidas, a evaporação elevada da água pode concentrar constituintes orgânicos precursores, intensificando assim a formação de subprodutos halogenados.

Por outro lado, os ácidos haloacéticos são mais propensos a se degradar a temperaturas mais altas, mas a formação inicial desses compostos pode ser maior devido a taxas de reação mais altas (KOGEVINAS et al., 2010).

Dessa forma, manter a temperatura da água das piscinas mais baixa poderia ser um meio de controlar a concentração desses compostos.

2.4 Sistema de Geração de Cloro por Eletrolise de Água Salina e Produção de Subprodutos Clorados

A eletrólise da água salgada tem sido utilizada como uma alternativa para o fornecimento de cloro diretamente a piscina, que reduz a necessidade da boa adição manual de hipoclorito de sódio ou cálcio. Contudo, tal processo pode gerar também subprodutos halogenados, mais principalmente na presença de íons bromo dissolvidos na água, gerando produtores de trialometanos bromados.

O processo de eletrólise ocorre pela passagem de corrente elétrica por uma solução salina, gerando hipoclorito de sódio na própria água. Este método é considerado mais prático e seguro, pois elimina a necessidade de estocagem de produtos químicos concentrados. Entretanto, há estudos mostrando que a eletrólise poderá favorecer a formação de trialometanos e ácidos haloacéticos, especialmente quando há elevada concentração de matéria orgânica na água (TSUTIYA, 2016).

De acordo com VON SPERLING (2014), piscinas tratadas pela eletrólise salina poderiam apresentar maiores concentrações de subprodutos halogenados em relação à tratadas com hipoclorito líquido, principalmente a altas temperaturas e com valores de pH inadequados. Portanto, é necessário o monitoramento constante destes parâmetros para minimizar a formação de compostos que podem ser potencialmente prejudiciais à saúde.

3. CONCLUSÃO

Dado o exposto conclui-se que é crucial manter a água da piscina dentro dos padrões definidos para a segurança de todos, sendo o cloro o desinfetante mais comumente usados. Contudo, a interação do cloro com a matéria orgânica da água resulta na produção de compostos prejudiciais à saúde humana, tais como os trialometanos e os ácidos haloacéticos. O pH e a temperatura são dois dos principais elementos que influenciam na criação dessas substâncias. O pH modifica a ação do cloro em solução aquosa, impactando sua eficácia na desinfecção da água e a quantidade de subprodutos gerados. Por outro lado, a temperatura acelera as reações químicas, podendo, portanto, aumentar a produção desses compostos, particularmente em

ambientes de piscinas aquecidas. A produção de cloro a partir da eletrólise de água salgada pode ser uma opção viável, reduzindo a demanda por outros produtos químicos. Contudo, essa abordagem pode levar à criação de subprodutos específicos, particularmente quando há a presença de íons bromo. Assim, é crucial manter o equilíbrio do pH, manter a temperatura da água em níveis apropriados e supervisionar de perto os parâmetros químicos para minimizar a produção de subprodutos clorados e assegurar a qualidade da água das piscinas. Pesquisas futuras podem investigar técnicas de desinfecção mais eficazes que reduzam a produção desses compostos, proporcionando um ambiente mais seguro para os usuários da água.

4- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução RDC nº 275, de 2002.**

BRAZ, A. M. **Tratamento de Águas de Piscinas: Um Guia Prático para Profissionais.** São Paulo: BLUCHER. 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.**

KOGEVINAS, M., VILLANUEVA, C. M., FONT-RIBERA, L. Swimming Pools and Health Risks Related to Disinfection Byproducts. **Environmental Health Perspectives**, 2010.

PÉREZ-VIDAL, A.; DÍAZ-GÓMEZ, J.; SALAMANCA-ROJAS, K. L; ROJAS-TORRES, L. Y. Evaluation of drinking-water treatment by Lifestraw® and Ceramic-pot filters. **Revista de Salud Pública**. v.18. n.2. pp.275-289. 2016.

RICHARDSON, S. D., COLOMBO, M. J. Disinfection Byproducts and Human Health. **Environmental Science & Technology**. 2007.

TSUTIYA, M. T. **Tratamento de Água.** São Paulo: CETESB. 2016.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos.** 4ª ed. Belo Horizonte: UFMG. 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for Drinking-water Quality.** 4ª ed. WHO Press. 2017.