

Nota Técnica 4 – Surfactantes em esgoto sanitário e no meio ambiente: presença, remoção e toxicidade

Technical Note 4 – Surfactants in domestic sewage and in the environment: presence, removal and toxicity

Luiz Galdino da Silva¹, Shyrlane Torres Soares Veras², Emmanuelle Machado Maia Nogueira³, Rafael Pessoa Santos Brochado⁴, Idayana da Costa Marinho⁵, Danúbia Maria da Silva Freitas⁶, Fabrício Motteran⁷, Paula Loureiro Paulo⁸, Mário Takayuki Kato^{9*}

RESUMO

Os surfactantes ou tensoativos sintéticos estão entre os principais componentes dos produtos de limpeza doméstica, como detergentes e sabões, como também de alguns produtos de cuidado pessoal. Eles têm um alto consumo mundial, fazendo parte da composição do esgoto sanitário. A eficiência de remoção dos surfactantes sintéticos nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) pode chegar a até mais de 90%, seja por biodegradação em unidades aeróbias ou por adsorção ao lodo em tanques anaeróbios. A sua toxicidade depende muito da concentração e de uma combinação de diversos fatores. O impacto ambiental mais conhecido, devido à sua visibilidade, é a formação de espumas, tanto em ETEs como em corpos receptores. Elas são formadas devido ao contato do ar com a interface água/surfactante, principalmente sob turbulência. Entretanto, as espumas podem também ser formadas por surfactantes naturais, como por exemplo, os produzidos por certas algas e bactérias, que podem proliferar em ETEs ou em ambientes naturais. Medidas mitigadoras e preventivas, bem como a adequada operação de ETEs, podem eliminar ou minimizar os surfactantes e as espumas.

Palavras-chave: adsorção; biodegradação; detergentes; espumas; poluição de rios.

ABSTRACT

Synthetic surfactants are among the main components of household cleaning products, such as detergents and soaps, as well as some personal care products. They have a high worldwide consumption, being part of the composition of sanitary sewage. The removal efficiency of synthetic surfactants in sewage treatment plants (STP) can reach up to more than 90%, either by biodegradation in aerobic units or by adsorption to sludge in anaerobic tanks. Its toxicity depends largely on the concentration and on a combination of several factors. The best-known environmental impact, due to its visibility, is the formation of foam, both in STP and in receiving bodies. They are formed due to the contact of air with the water/surfactant interface, mainly under turbulence. However, foams can also be formed by natural surfactants, such as those produced by certain algae and bacteria, which can proliferate in STP or in natural environments. Mitigating and preventive measures, as well as the proper operation of STP, can eliminate or minimize surfactants and foams.

Keywords: adsorption; biodegradation; foam; detergent; rivers' pollution.

¹Químico pela Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). Técnico Químico em cromatografia do Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

²Engenheira Química e Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos pela UFPE. Especialista em Gestão Ambiental pelo Centro Universitário de Juazeiro do Norte (FJN). Doutora em Tecnologia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE e em Microbiologia pela Universidade Autônoma de Madri, Espanha. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

³Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestranda do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Hidráulica e Saneamento da Universidade de São Paulo (EESC-USP).

⁴Engenheiro Ambiental pela UFMG. Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁵Engenheira Química pela UFPE. Mestre em Tecnologia Ambiental pela UFPE. Auna de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE.

⁶Química pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela UFPE. Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE. Técnica Química do Laboratório de Saneamento Ambiental da UFPE.

⁷Biólogo pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG). Gestor Ambiental pela Universidade FUMEC. Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (EESC-USP). Pós-doutorado na EESC-USP e Universidade de Cádiz, Espanha. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPE.

⁸Engenheira Química pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Doutora em Ciências Ambientais pela Universidade de Wageningen, Holanda. Professora Associada da Universidade Federal do Mato do Grosso do Sul (UFMS). Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁹Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Doutor em Tecnologia Ambiental e Ciências da Agricultura pela Universidade de Wageningen, Holanda. Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPE. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

***Endereço para correspondência:** Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Laboratório de Saneamento Ambiental. Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/n. Cidade Universitária, Recife PE. CEP: 50740-530. e-mail: mario.kato@ufpe.br

1. INTRODUÇÃO

Os detergentes, sabões em pó, desinfetantes e amaciantes de roupas são essenciais para a limpeza doméstica, comercial, industrial e/ou institucional; e os xampus, condicionadores de cabelo, sabonetes e cremes dentais, para a higiene e cuidados pessoais. Esses produtos contêm em suas formulações os surfactantes, também chamados de tensoativos, que são substâncias anfífilas, ou seja, possuem uma parte hidrofóbica (não polar) e outra hidrofílica (polar). A parte hidrofóbica de um surfactante é composta por uma cadeia alquílica e a hidrofílica por um íon (Figura 1) (FELIPE e DIAS, 2017; PALMER e HATLEY, 2018).

A principal propriedade dos surfactantes é sua capacidade de quebrar a tensão superficial e interfacial entre líquidos imiscíveis, favorecendo a miscibilidade de compostos polares e não polares, por exemplo, água e óleo,



Figura 1 – Estrutura geral da molécula de surfactante.

facilitando atividades de limpeza. Na Figura 2 é apresentado como o surfactante quebra a tensão superficial da água (Figura 2a) e sua atuação na remoção da sujeira de superfícies em geral (Figura 2b) (FELIPE e DIAS, 2017).

As principais classes de surfactantes, as quais são definidas com base na carga elétrica que apresentam na parte hidrofílica, são as dos surfactantes aniônicos (possuem carga negativa) (Figura 3a), catiônicos (possuem carga positiva) (Figura 3b), não iônicos (não possuem carga aparente) (Figura 3c) e anfotéricos (apresentam carga negativa e positiva) (Figura 3d). Dependendo do pH do meio, podem atuar como surfactantes aniônicos (pH ácido), catiônicos (pH básico) ou não iônicos (pH neutro) (FELIPE e DIAS, 2017).

Nesta nota técnica (NT-5), são abordadas a presença e remoção dos surfactantes sintéticos mais utilizados em produtos de limpeza doméstica, das classes aniônica, não iônica e catiônica, por sistemas de tratamento de esgoto sanitário aeróbio e anaeróbio convencionais; bem como alguns valores de concentrações limites de toxicidade em ETEs, matrizes aquáticas e terrestres. No que se refere aos surfactantes e os produtos de cuidado pessoal (PCPs), em especial os sabonetes, estes são apresentados e discutidos de forma mais ampla na NT-4 desta coletânea (PAULO et al., 2022).

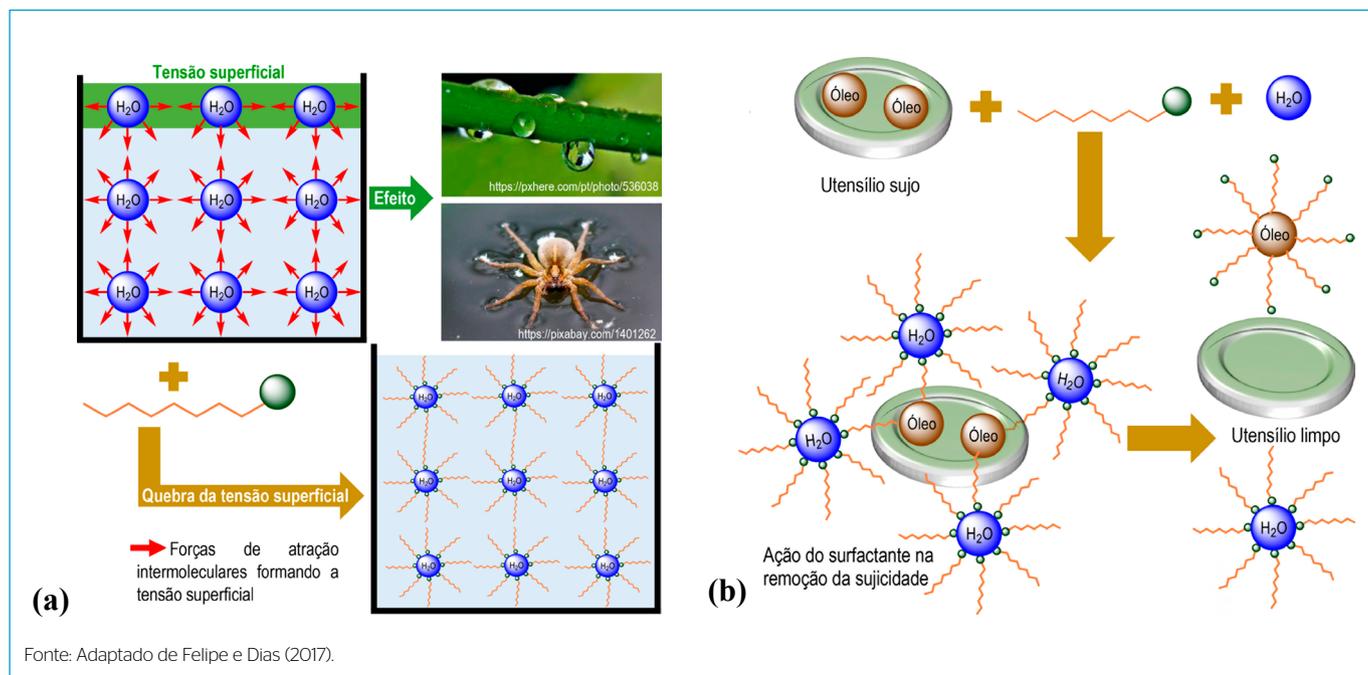


Figura 2 – Efeito do surfactante: (a) na tensão superficial da água; e (b) na remoção de sujeira.

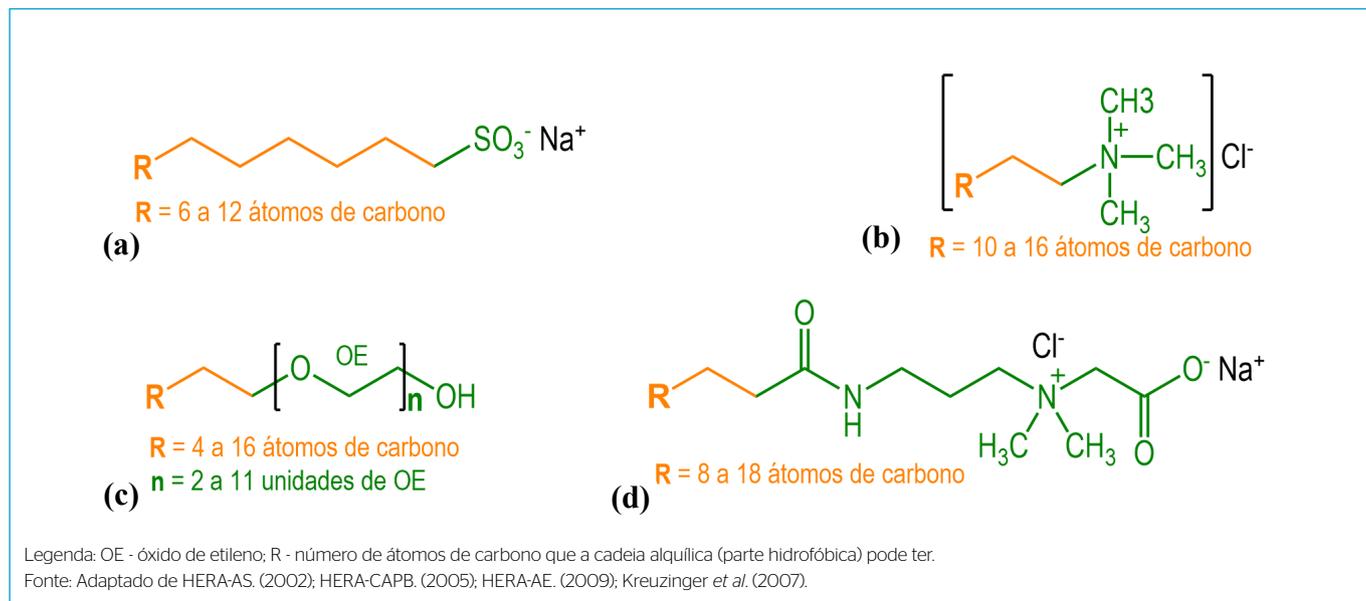


Figura 3 – Fórmulas estruturais dos surfactantes: (a) aniônicos; (b) catiônicos; (c) não iônicos; e (d) anfotéricos.

2. PRESENÇA DOS SURFACTANTES NO MEIO AMBIENTE

A ampla utilização de surfactantes nas atividades de limpeza ao longo dos anos, fez deste composto químico um dos mais estudados nos efluentes domésticos, industriais e em corpos hídricos (água e sedimento). Estes são o seu destino final, seja por via indireta, após o lançamento de efluentes de estações de tratamento, ou direta, pelo lançamento de esgoto bruto (BONFIM *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2017; PALMER e HATLEY, 2018). Na **Figura 4** é apresentado o caminho por qual os surfactantes, em esgoto sanitário, alcançam diferentes matrizes ambientais.

3. IMPACTOS DOS SURFACTANTES NO MEIO AMBIENTE

3.1. Impactos na biota aquática e terrestre

Aos surfactantes em geral, são creditados vários impactos ao ecossistema aquático e terrestre. Destes, são comumente citados o aumento da solubilidade de poluentes recalcitrantes, como petroderivados e pesticidas, que passam a ficar biodisponíveis para a biota aquática e terrestre; danos às brânquias dos peixes e diminuição da taxa de crescimento de organismos invertebrados do solo (MUNGRAY e KUMAR, 2009).

Os surfactantes, quando se ligam às proteínas e membranas fosfolipídicas dos micro-organismos, aumentam a permeabilidade das membranas e vesículas biológicas, causando a perda de compostos de baixa massa molecular, resultando na morte celular ou dano por perda de íons ou aminoácidos. Eles também se ligam à membrana plasmática e a macromoléculas (peptídeos, enzimas, DNA etc), alterando a morfologia, estrutura fosfolipídica e função biológica dos micro-organismos (CSERHÁTI *et al.*, 2002; LIWARSKA-BIZUKOJC e BIZUKOJC, 2007).

3.2. Espumas na superfície aquática

O efeito ambiental de maior destaque dos surfactantes, devido à sua visibilidade, é a formação de espumas na superfície aquática. Estas, além de impactarem negativamente a paisagem de rios e ETes, diminuem a permeabilidade da luz solar na superfície aquática, comprometendo o processo de fotossíntese do fitoplâncton; e a dispersão de patógenos, gases e outros poluentes, que quando confinados no interior das espumas, são carregados pelos ventos por longas distâncias. No entanto, uma das características intrínsecas dos surfactantes sintéticos ou os produzidos naturalmente por bactéria, é a sua detergência, ou seja, que formam espumas. Estas se formam pelo contato do ar com a interface água/surfactante sob alguma forma de agitação (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2020).



Figura 4 – Caminho e presença dos surfactantes até as matrizes ambientais.

Um conhecido caso de espumas no Brasil é a do Rio Tietê em Pirapora do Bom Jesus (SP), com imagens altamente impactantes pelas suas dimensões e bastante divulgadas pela mídia (**Figura 5a**). Outros casos similares divulgados são as dos rios Santiago no México (**Figura 5b**), Balsillas na Colômbia (**Figura 5c**), Yamuna, (Nova Delhi, Índia) (**Figura 5d**) e na praia de Marina Beach, Chennai (Índia) (**Figura 5e**). Esta ocorrência também é observada em ETEs, principalmente as que utilizam tratamento aeróbio (**Figura 5f**) (ETE Málaga, Espanha), mas também nas anaeróbias.

A principal causa das espumas nos rios e ETEs é sem dúvida devido à presença de surfactantes, mas não apenas a dos sintéticos utilizados em produtos de limpeza, devendo os impactos serem avaliados criteriosamente e considerando todos os possíveis contaminantes. Estudos realizados desde o final da década de 1960, apontam uma considerável contribuição dos surfactantes naturais, sintetizados por bactérias, microalgas e plantas aquáticas (CAPODICI *et al.*, 2015; COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2020). No entanto, é importante ressaltar que a presença de surfactantes sintéticos, assim como outros poluentes (nutrientes, matéria orgânica, fármacos, hormônios etc) em rios, deve-se, principalmente, à falta de tratamento adequado dos esgotos domésticos e industriais. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) traz um panorama do tratamento de esgoto no Brasil em 2017: diariamente, eram produzidos 9,1 milhões de toneladas de esgoto, dos quais 43% eram coletados e tratados, 18% coletados e não tratados, 12% coletados em fossas sépticas e 27% não coletados (ANA, 2017).

Com relação ainda às espumas em rios, mesmo com concentrações de surfactantes aniônicos muito baixas, associadas à pequena turbulência do esgoto em contato com o ar, já causam a sua formação. No caso do rio Tietê, na região que se estende de Pirapora do Bom Jesus até Botucatu (SP), onde se observa anualmente a formação de grandes quantidades de espumas (**Figura 5a**), os parâmetros físico-químicos são típicos de um corpo receptor que recebe efluente não tratado, com concentrações de oxigênio dissolvido em torno de $0,4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e de surfactantes aniônicos totais de $4,2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (CETESB, 2008). A espuma começa a ser formada a partir da barragem da usina São Pedro (SP), o que aumenta a turbulência das águas e o contato com o oxigênio na desembocadura, favorecendo a sua formação (ESTADO DE MINAS, 2019). Vale salientar que efluentes sem tratamento adequado quando lançados nos rios, também causam um desequilíbrio nas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, favorecendo a proliferação de diversos organismos e micro-organismos, inclusive os capazes de sintetizar naturalmente surfactantes.

Em ETEs que utilizam sistemas de aeração, é comum a presença de espumas, sendo duas as fontes principais, os surfactantes sintéticos e os biológicos. Estes últimos são produzidos e excretados por bactérias filamentosas, também chamadas de formadoras de espumas (*Gordonia* e *Nocardia amarae*, *Microthrix parvicella*, *Mycolata* e *Nostocoida limicola* III). As relações entre matéria orgânica e nutrientes (DBO:N:P), diferentes da proporção 100:5:1, favorecem o crescimento acentuado de bactérias filamentosas e, conseqüentemente, a produção de surfactantes biológicos (CAPODICI *et al.*, 2015).



Figura 5 – Espumas no Rio Tiête, Pirapora de Bom Jesus (SP) (a); Rio Santiago, México (b); Rio Balsillas, Colômbia (c); Rio Yamuna, Nova Delhi, Índia (d); praia Marina Beach, Chennai, Índia (e); e ETE de lodos ativados Málaga, Espanha (f).

Ademais, a degradação de substratos, decomposição de biomassa, desprendimento de material polimérico da superfície celular, hidrólise bacteriana de polímeros extracelulares e condições de estresse bacteriano (p. ex.: deficiência de nutrientes e idade elevada do lodo), são outros fatores biológicos que contribuem para a formação de espumas nas ETEs (CAPODICI *et al.*, 2015; COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2020).

4. REMOÇÃO DE SURFACTANTES EM ETES

ETEs convencionais (aeróbias ou anaeróbias com pós-tratamento aeróbio) removem, por biodegradação e adsorção ao lodo, mais de 90% dos surfactantes em geral. Por exemplo, concentrações de alquilbenzeno linear sulfonado (LAS), que é o surfactante de maior consumo mundial, variam de 0,3 a 15 mg·L⁻¹ em efluente doméstico bruto e de 0,008 a 2,8 mg·L⁻¹ no tratado, e no lodo de 100 a 30200 mg·kg⁻¹ de sólidos totais (HERA-CAPB, 2005; HERA-SAS, 2005; YING, 2006; HERA-AE, 2009; HERA-LAS, 2013; BONFIM *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2017). Logo, os efeitos negativos relacionados à presença dos surfactantes na biota aquática e terrestre de corpos hídricos, devido à não remoção de tais compostos do esgoto, poderiam ser minimizados a partir de sistemas adequados e eficientes de tratamento para os esgotos gerados pela população e indústrias.

Em ETEs, as espumas podem ser removidas através da utilização de antiespumantes; entretanto, são relatados

efeitos negativos, como a redução da transferência de massa, inibição da nitrificação e remoção de matéria orgânica, quebra dos flocos do lodo e produção de lodo quimicamente tóxico, devido ao aumento da concentração de cloro (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2020). Outras soluções são a remoção do lodo com idade elevada; e para evitar possível formação de espumas em rios, realizar o lançamento do efluente de ETEs através de emissários submersos, evitando quedas livres e em trechos não turbulentos. Uma medida preventiva, mas não isoladamente, é o uso consciente dos produtos de limpeza; a qual, pode inicialmente, ser alcançada seguindo as indicações de uso dos fabricantes, principalmente dos produtos de limpeza que indicam que são concentrados, os quais podem ser diluídos.

5. PRODUÇÃO E CONSUMO DE SURFACTANTES

Em 30 anos, o consumo mundial de surfactantes passou de 1.700 megakilogramas (Mkg) para 15.930 Mkg (1984-2014), com uma estimativa de consumo de 24.200 Mkg em 2022 (PALMER e HATLEY, 2018). Os surfactantes, além dos produtos de limpeza doméstica e de cuidados pessoais, também estão presentes nos produtos do ramo farmacêutico, alimentício, de cosméticos e processos industriais (PALMER e HATLEY, 2018; COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2020).

No cenário mundial, os surfactantes mais utilizados são os sintéticos. Destes, considerando apenas os produtos

de limpeza doméstica, os mais consumidos são os aniônicos, respondendo por cerca de 60% do consumo mundial, seguido pelos não iônicos (30%) e os catiônicos e anfotéricos (10%) (PALMER e HATLEY, 2018). Na área industrial e institucional, os mais utilizados são os não iônicos e catiônicos, devido suas propriedades biocidas (BNDES, 2014).

Na Europa ocidental no ano de 2008, o consumo de surfactantes em geral, na forma de produtos de limpeza, foi de 2.980 Mkg. No entanto, 1.413 Mkg foram de não iônicos, 1.222 Mkg de aniônicos, 254 Mkg de catiônicos e 93 Mkg de anfotéricos (GOMEZ et al., 2011). Isto é resultado da sua ação biocida, menor formação de espumas, menores riscos de efeitos alérgicos, maior eficiência em águas duras e versatilidade de aplicações; pois, podem ser utilizados conjuntamente com surfactantes aniônicos ou catiônicos (BNDES, 2014).

Em 2012, o consumo total de surfactantes no mundo e no Brasil foi de 14.630 Mkg e 522 Mkg, respectivamente (BNDES, 2014). Destes totais, respectivamente, 42% e 61% representaram o consumo de produtos de limpeza doméstica. Além destes, 39% e 22% representaram o uso de surfactantes no sistema produtivo, limpeza industrial, institucional e comercial. O uso em formulações têxteis e na indústria de petróleo e gás foi responsável por 6% e 4% do consumo mundial e nacional, respectivamente. Enquanto 13% foram consumidos na forma de produtos de higiene pessoal e cosméticos. Na **Figura 6** são apresentados o consumo de surfactantes por área de aplicação no Brasil e no mundo (**Figura 5a**), e apenas no Brasil por área de aplicação (**Figura 5b**), produto (**Figura 5c**) e surfactante (**Figura 5d**) (BNDES, 2014).

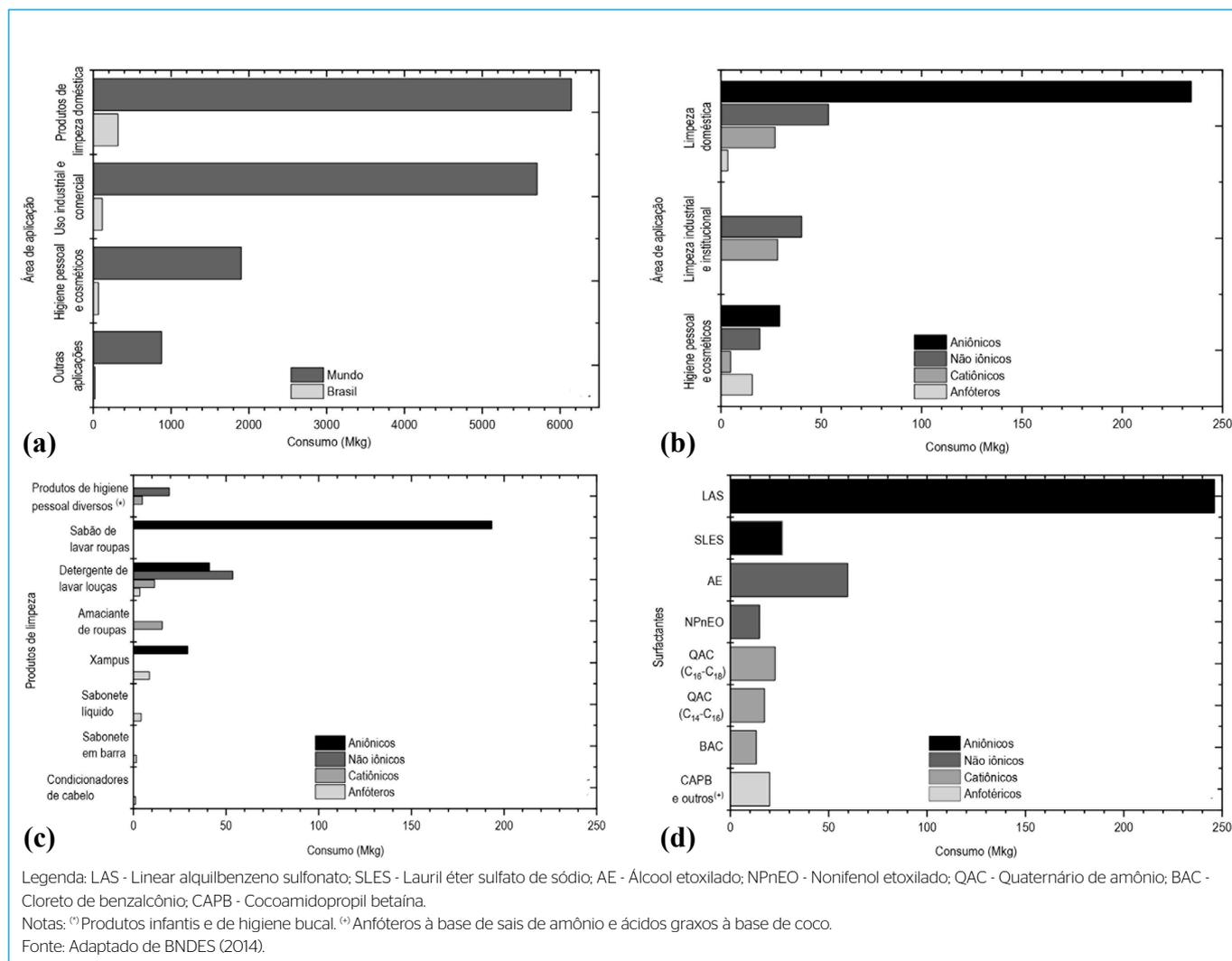


Figura 6 – Consumo de surfactantes: no Brasil e no mundo por aplicação (a), e no Brasil por aplicação (b); produto (c) e classe (d).

6. TIPOS DE SURFACTANTES: APLICAÇÃO, TOXICIDADE, TRATAMENTO E REMOÇÃO

6.1. Surfactantes aniônicos

O alquilbenzeno linear sulfonato (LAS) (**Figura 7a**) é o surfactante aniônico sintético mais consumido na forma de produtos de limpeza doméstica (330 Mkg na Europa em 2000), e representa 45% do consumo mundial dos sintéticos em geral. Ele foi introduzido no mercado de surfactantes em 1964, como substituto biodegradável do surfactante aniônico alquilbenzeno sulfonado ramificado (ABS) (**Figura 7b**), que não era biodegradável em sistemas de tratamento de esgoto sanitário, devido à sua cadeia alquílica extremamente ramificada (HERA-LAS, 2013). No Brasil, a exigência com relação à comercialização somente de surfactantes biodegradáveis ocorreu apenas em 1985 (BRASIL, 1985). O maior consumo do LAS é devido à sua boa biodegradabilidade biológica, detergência em águas duras e ácidas, e menores custos de produção e comercialização (BNDES, 2014). Isto faz dele um produto com boa relação custo-benefício, tanto para o fabricante, como para o consumidor de produtos de limpeza doméstica sem ação biocida.

Os álcoois etoxisulfatados (AES) (**Figura 8a**) foram o segundo grupo de surfactantes aniônicos mais consumidos na forma de produtos de limpeza doméstica na Europa, seguido pelos alquilsulfatados (AS) (**Figura 8b**) e os alcanos secundários sulfatados (SAS) (**Figura 7c**), com 108 (2000), 65 (1999) e 48 Mkg (2001), respectivamente (HERA-AS, 2002; HERA-AES, 2003; HERA-SAS, 2005).

Na **Tabela 1** são apresentadas algumas das principais aplicações dos surfactantes LAS, AES, AS e SAS (HERA-AS, 2002; HERA-AES, 2003; HERA-SAS, 2005; HERA-LAS, 2013).

6.1.1. Toxicidade dos surfactantes aniônicos

Na **Tabela 2** tem-se os valores estimados, pela União Europeia, para a concentração sem efeitos prevista (PNEC) para os surfactantes aniônicos AES, AS, SAS e LAS em ETes, águas superficiais, solo e sedimento (HERA-AS, 2002; HERA-AES, 2003; HERA-SAS, 2005; HERA-LAS, 2013). A PNEC é o valor máximo de concentração de um composto químico, determinada a partir de dados de ecotoxicidade crônica, que não causa efeito tóxico para a biota aquática e terrestre de matrizes ambientais; logo, concentrações acima da PNEC podem ser consideradas tóxicas. A PNEC é também utilizada para a elaboração de legislações ambientais, auxiliando na determinação da concentração máxima sem efeito tóxico (valor padrão) para um composto químico no ambiente.

6.1.2. Biodegradação de surfactantes aniônicos

Na **Tabela 3** são apresentados os percentuais estimados, a partir de testes laboratoriais, da biodegradação total (mineralização) dos AES, AS, SAS e LAS em ETes aeróbias e anaeróbias; e, adicionalmente, os seus tempos de meia vida ($t_{1/2}$) em águas superficiais de rios (corpos receptores) (MADSEN *et al.*, 2001; HERA-AS, 2002; HERA-AES, 2003; HERA-SAS, 2005; HERA-LAS, 2013).

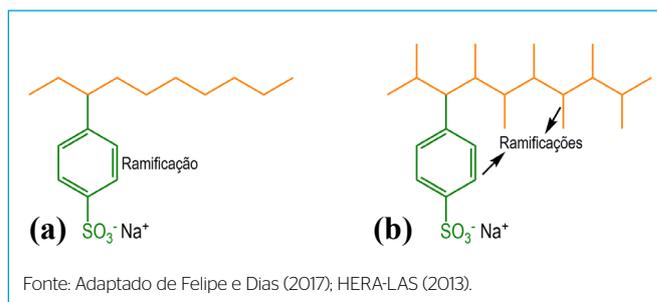


Figura 7 – Fórmula estrutural: (a) LAS; e (b) ABS.

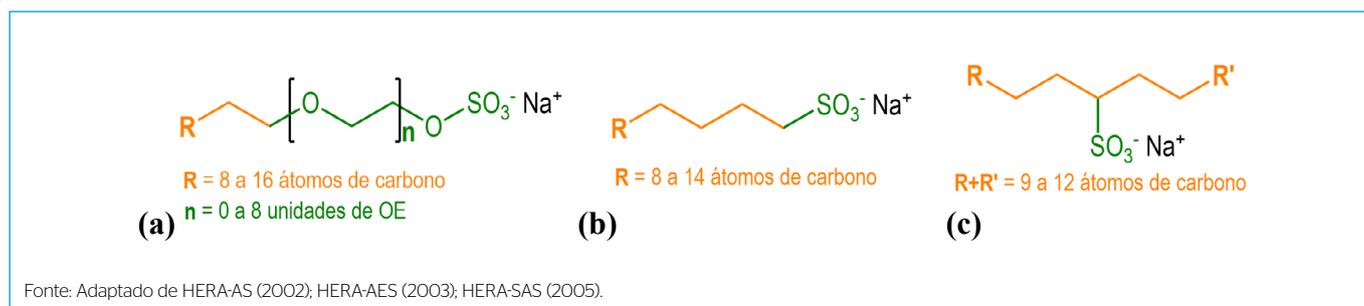


Figura 8 – Fórmula estrutural dos surfactantes aniônicos: (a) AES; (b) AS; e (c) SAS.

A biodegradação total (mineralização) corresponde à conversão total da molécula de surfactante a dióxido de carbono (aeróbio) e/ou metano (anaeróbio), água e sais minerais; e, o $t_{1/2}$, é o tempo que leva para o decaimento/biodegradação de 50% do surfactante em águas naturais. Os $t_{1/2}$ apresentados na Tabela 2, para águas de rios, correspondem à biodegradação primária.

A biodegradação primária corresponde à formação de intermediários que não o dióxido de carbono, água e sais minerais; que são os compostos que caracterizam a biodegradação total de um composto químico orgânico em ambiente aeróbio (MADSEN *et al.*, 2001; HERA-AS, 2002; HERA-AES, 2003; HERA-SAS, 2005; HERA-LAS, 2013). Vale salientar que a biodegradação primária destes surfactantes em ambiente aeróbio supera os 90%, e ocorrem entre 1 e 24 horas. No caso de ambiente anaeróbio, a biodegradação primária produz metano como intermediário da mineralização de compostos orgânicos. O metano pode ser utilizado como combustível, que após sua utilização, forma dióxido de carbono e água, caracterizando sua mineralização de fato.

6.1.3. Concentrações e remoção de surfactantes aniônicos em ETEs convencionais

No Brasil, o número de ETEs com tratamento anaeróbio é significativo, embora em geral as unidades estejam associadas a outras unidades de pós-tratamento aeróbio. Até o ano de 2017, existiam em todo o Brasil, 3.668 ETEs, das quais 37% utilizavam alguma unidade anaeróbia, como reatores anaeróbios (505), lagoas anaeróbias (360) e filtros anaeróbios (215) (ANA, 2017).

Os valores padrão para a concentração de surfactantes aniônicos totais (AES + AS + SAS + LAS etc), definidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), não devem ser maiores que 0,5 mg·L⁻¹ de LAS em águas superficiais doces de classes 1 e 2, e 0,2 mg·L⁻¹ para águas salinas e salobras de classe 1 (BRASIL, 2005). O CONAMA não definiu um valor padrão de concentração de surfactantes aniônicos totais em efluentes para lançamento em corpos receptores; entretanto, a legislação de alguns estados estabeleceu a concentração de 2 mg·L⁻¹ de LAS (Norma Técnica da

Tabela 1 – Principais aplicações do LAS, AES, AS e SAS.

Surfactante	Principais aplicações
LAS	Detergentes de lavar louças e sabões de lavar roupas.
AES	Sabonetes líquidos, xampus, processos industriais, limpeza industrial e mecânica ⁽¹⁾ .
AS ⁽²⁾	Sabões de lavar roupas, sabonetes líquidos e em barras, xampus e cremes dentais.
SAS ⁽²⁾	Detergentes de lavar louças, xampus, sabonetes líquidos e em barra.

Notas: ⁽¹⁾Remoção de graxas e óleos de tecidos, ferramentas e máquinas industriais. ⁽²⁾Utilizado em conjunto com surfactantes não iônicos e outros surfactantes aniônicos, por exemplo, o LAS.

Tabela 2 – Valores limites de concentrações dos surfactantes AES, AS, SAS e LAS que não causam efeitos tóxicos (PNEC) à biota.

Surfactante	PNEC (mg·L ⁻¹)		PNEC (mg·kg ⁻¹)	
	ETEs	Águas superficiais	Solo	Sedimento
LAS	3,5	0,25 a 0,27	4,6 a 35,6	8,1
AES	16	0,038 a 0,89	0,0053 a 0,16	-
AS	2,4	0,005 a 0,09	0,361 a 1	0,02 a 8,4
SAS	70	0,37	1,3	0,6

Tabela 3 – Percentuais de biodegradação dos AES, AS, SAS e LAS em ETEs e $t_{1/2}$ em águas superficiais.

Surfactante ⁽¹⁾	Biodegradação total (%) / tempo (dias)				$t_{1/2}$ rio (dias)
	Aeróbia	Tempo	Anaeróbia	Tempo	
LAS	45 a 76	28	30 a 93 ⁽²⁾	90 a 250	0,75 ⁽²⁾
AES	65 a 83	28	64 ⁽²⁾	28	1,4 a 15 ⁽²⁾
AS	64 a 96	28	> 90	28	0,75 a 14 ⁽²⁾
SAS	56 a 91	28	persistente	-	0,06 a 0,25 ⁽²⁾

Notas: ⁽¹⁾Concentração dos surfactantes nos testes de biodegradabilidade: 20 mg CL⁻¹. ⁽²⁾Biodegradação primária.

Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente 202.R-10 - RIO DE JANEIRO, 1986) nesses efluentes. Vale destacar que as concentrações dos surfactantes aniônicos totais, expressas em unidades de mg·L⁻¹ de LAS, deve-se ao fato dele ser considerado o padrão de biodegradabilidade dos surfactantes aniônicos e o de maior consumo mundial.

Na **Tabela 4** são apresentadas as concentrações dos surfactantes aniônicos LAS, AES, AS e SAS no afluente e efluente de ETEs convencionais e suas respectivas eficiências de remoção.

6.2. Surfactantes não iônicos

Os surfactantes não iônicos são a segunda classe de maior consumo mundial. Eles são mais eficientes em águas duras, produzem menos espumas, causam menor irritabilidade à pele e olhos que os aniônicos; entretanto, possuem menor poder de detergência. São geralmente utilizados em produtos de limpeza doméstica combinado com algum aniônico ou catiônico, o que intensifica as propriedades de limpeza e diminui o risco de possíveis efeitos alérgicos causados pelos aniônicos ou catiônicos (BNDES, 2014). Dos surfactantes não iônicos, os álcoois etoxilados (AE) (**Figura 9**) são os mais consumidos na forma de produtos de limpeza doméstica (220 Mkg em 2002 na Europa) (HERA-AE, 2009).

Os alquilfenóis etoxilados (APEO) (**Figura 10a**), são o segundo grupo de surfactantes não iônicos mais consumidos no mundo. Em 1997, foram produzidos cerca de 500 Mkg de APEO no mundo, e deste montante, 75 Mkg foram utilizados em formulações de limpeza doméstica e 150 Mkg em formulações de limpeza institucional e industrial (YING, 2002). Entretanto, alguns países da União Europeia e da América do Norte, aboliram a utilização deste grupo de surfactantes em produtos de limpeza doméstica desde 1995, substituindo-os pelos álcoois etoxilados (AE). As evidências científicas mostraram um elevado efeito

tóxico do nonilfenol (NP) (**Figura 10b**), principal sub-produto da biodegradação dos APEO. É relatado que os NP causam alterações no sistema nervoso e reprodutivo dos organismos e micro-organismos da biota aquática e terrestre de rios e mares (ROBERT-PEILLARD *et al.*, 2015).

Na **Tabela 5** são apresentadas algumas das principais aplicações dos AE e APEO (YING, 2002; HERA-AE, 2009).

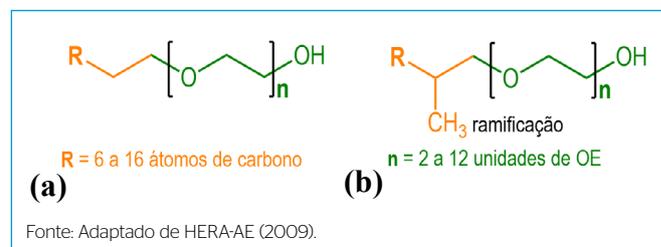


Figura 9 – Fórmula estrutural dos AE (C₈E₀) de cadeia: (a) linear; e (b) ramificada.

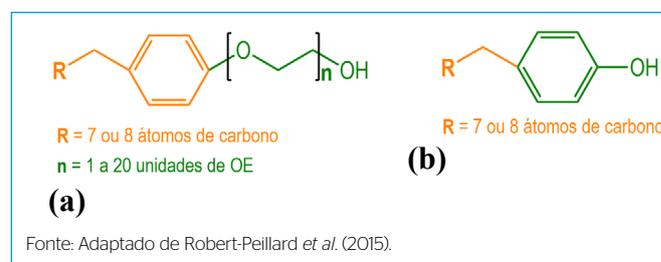


Figura 10 – Fórmula estrutural do: (a) APEO; e (b) NP.

Tabela 4 – Concentração e remoção em ETEs convencionais dos 4 surfactantes aniônicos mais consumidos.

Surfactante	Tratamento	Concentrações (mg·L ⁻¹)		Remoção (%)	Referências
		Afluente	Efluente		
LAS	LA	3,4 a 8,9	0,019 a 0,071	98,0 a 99,6	Matthijs <i>et al.</i> (1999)
		3,8 a 5,4	0,01 a 0,04	99,3 a 99,9	McAvoy <i>et al.</i> (1998)
		0,3 a 3,8	0,02 a 0,73	62,0 a 92,2	Gomez <i>et al.</i> (2011)
	FG	1,8 a 6,1	0,07 a 1,50	76,8 a 98,6	McAvoy <i>et al.</i> (1998)
		UASB + LP	2,6 a 6,4	0,1 a 0,6	80,0 a 98,0
4,4 a 6,5	1,3 a 2,8		56,0 a 78,0	Silva <i>et al.</i> (2017)	
AES	LA	1,2 a 6,0	0,003 a 0,012	99,3 a 99,9	Matthijs <i>et al.</i> (1999)
		0,16 a 1	0,004 a 0,018	97,7 a 98,2	McAvoy <i>et al.</i> (1998)
		32,4 a 42	0,12 a 1,20	92,6 a 99,4	Gomez <i>et al.</i> (2011)
	FG	0,11 a 2,18	0,0320 a 0,164	69,7 a 96,7	McAvoy <i>et al.</i> (1998)
AS	LA	0,1 a 1,3	0,0012 a 0,012	99,0 a 99,6	Matthijs <i>et al.</i> (1999)
		2,5 a 3,7	0,008 a 0,24	98,1 a 99,7	McAvoy <i>et al.</i> (1998)
	FG	0,69 a 3,4	0,049 a 0,51	79,4 a 96,5	McAvoy <i>et al.</i> (1998)
SAS	LA	0,60 a 0,99	0,001 a 0,014	98,6 a 99,9	Field <i>et al.</i> (1995)

Legenda: LA - Lodos ativados; FG - Filtro de gotejamento (filtro biológico); UASB - Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente; LP - Lagoa de polimento.

Tabela 5 – Principais aplicações dos AE e APEO.

Surfactante	Principais aplicações
AE	São utilizados principalmente em sabões de lavar roupas e detergentes de lavar louças, comumente associado a um surfactante aniônico. Ele também é utilizado na fabricação de cosméticos, na agricultura, e na indústria de papel, têxtil, petróleo etc.
APEO	São empregados principalmente como auxiliares de processos industriais, agente dispersante na produção de papel e celulose, emulsificantes na fabricação de tintas látex, formulações de pesticidas, agentes de limpeza de superfícies metálicas e secundariamente em produtos de limpeza doméstica industrial e institucional.

6.2.1. Toxicidade dos surfactantes não iônicos

Na **Tabela 6** tem-se os valores da concentração sem efeitos prevista (PNEC) para os AE e APEO em ETEs, águas superficiais (rio), solo e sedimento (HERA-AE, 2009; S.C.A., 2013).

6.2.2. Biodegradação de surfactantes não iônicos

Na **Tabela 7** são apresentados os percentuais estimados para a biodegradação total dos AE e APEO em ambiente aeróbio e anaeróbio a partir de testes laboratoriais. Adicionalmente, também são apresentados os tempos de meia vida ($t_{1/2}$) para sua biodegradação em águas superficiais. Os APEO em ambiente anaeróbio sofrem biodegradação primária, na qual forma-se os NP, que são persistentes em ambiente anaeróbio (MADSEN *et al.*, 2001; HERA-AE, 2009; S.C.A, 2013).

Tabela 6 – Valores estimados da PNEC para os AE e APEO.

Surfactante	PNEC (mg·L ⁻¹)		PNEC (mg·kg ⁻¹)	
	ETEs	Águas superficiais	Solo	Sedimento
AE	1,4	0,035 a 0,17	0,54 a 4786	1,46 a 4.740
APEO	9,5	0,000039 a 0,00075	1,2 a 3,2	1,23 a 4,62

Tabela 7 – Percentuais de biodegradação em ETEs e $t_{1/2}$ em águas superficiais.

Surfactantes ⁽¹⁾	Biodegradação total (%) / tempo de experimento (dias)				$t_{1/2}$ (dias)
	Aeróbia	Tempo	Anaeróbia	Tempo	
AE	64 a 82	28	84	28	1 a 2,5
APEO	87 a 97	128	persistente	154	16,3 a 40

Nota: ⁽¹⁾Concentração de cada surfactante nos testes de biodegradabilidade: 2 a 100 mg·L⁻¹

6.2.3. Concentrações e remoção de surfactantes não iônicos em ETEs convencionais

Na **Tabela 8** são apresentadas as concentrações e remoção do surfactante não iônico AE no afluente e efluente de ETEs convencionais e suas respectivas eficiências de remoção.

6.3. Surfactantes catiônicos

Os surfactantes catiônicos são a terceira classe de maior consumo mundial. Destes, os sais quaternários de amônio (QAC) são os mais consumidos em produtos de limpeza doméstica e de cuidado pessoal. Na Europa, no ano de 1998, 17 Mkg de QAC foram utilizados em produtos industriais e de limpeza institucionais, e 98 Mkg em produtos de limpeza doméstica, cuidado pessoal e cosméticos (KREUZINGER *et al.*, 2007). Os QAC de maior consumo mundial são os cloretos de dialquil-dimetil-amônio (DDAC) (**Figura 11a**), os cloretos de alquil-trimetil-amônio (ATAC) (**Figura 11b**) e os benzalquil-dimetil-amônio (BAC) (**Figura 11c**) (MARTÍNEZ-CARBALLO *et al.*, 2007).

Na **Tabela 9** são apresentadas algumas das principais aplicações dos três surfactantes catiônicos mais consumidos mundialmente (MARTÍNEZ-CARBALLO *et al.*, 2007).

6.3.1. Biodegradação de surfactantes catiônicos

Na **Tabela 10** são apresentados os percentuais estimados para a biodegradação total dos principais QAC em ambiente aeróbio e anaeróbio a partir de testes laboratoriais (MADSEN *et al.*, 2001).

6.3.2. Concentração e remoção de surfactantes catiônicos em ETEs

Na **Tabela 11** são apresentadas as concentrações de DDAC, ATAC e BAC no afluente e efluente de ETEs convencionais e sua remoção (MARTÍNEZ-CARBALLO *et al.*, 2007). Testes laboratoriais mostraram que os surfactantes catiônicos são biodegradáveis em ambiente aeróbio, podendo ocorrer em 24 horas; entretanto, em ambiente anaeróbio, eles são tidos como persistentes (YING, 2006).

Tabela 8 – Concentração e remoção de AE em ETEs convencionais.

Surfactante	Tratamento	Concentração (mg·L ⁻¹)		Remoção (%)	Referências
		Afluente	Efluente		
AE	LA	2,5 a 3,7	0,008 a 0,24	90,4 a 99,7	McAvoy <i>et al.</i> (1998)
		0,009 a 0,034	0,006 a 0,007	33,1 a 97,9	Gomez <i>et al.</i> (2011)
		0,66 a 0,72	0,00092 a 0,0019	99,7 a 99,9	Morrall <i>et al.</i> (2006)
		1,2 a 4,8	0,0043 a 0,0066	99,8 a 99,9	Matthijs <i>et al.</i> (1999)
	FG	0,69 a 3,4	0,049 a 0,51	79,4 a 96,5	McAvoy <i>et al.</i> (1998)
		2,3 a 2,7	0,012 a 0,016	99,4 a 99,6	Morrall <i>et al.</i> (2006)
	TA	1,7 a 5,5	0,0018 a 0,010	99,1 a 99,9	Matthijs <i>et al.</i> (1999)
	LG	0,31 a 1,9	0,0084 a 0,010	97,3 a 99,4	Morrall <i>et al.</i> (2006)

Legenda: LA - Lodos ativados; FG - Filtro de gotejamento; TA - Tanque aerado; LG - Lagoa.

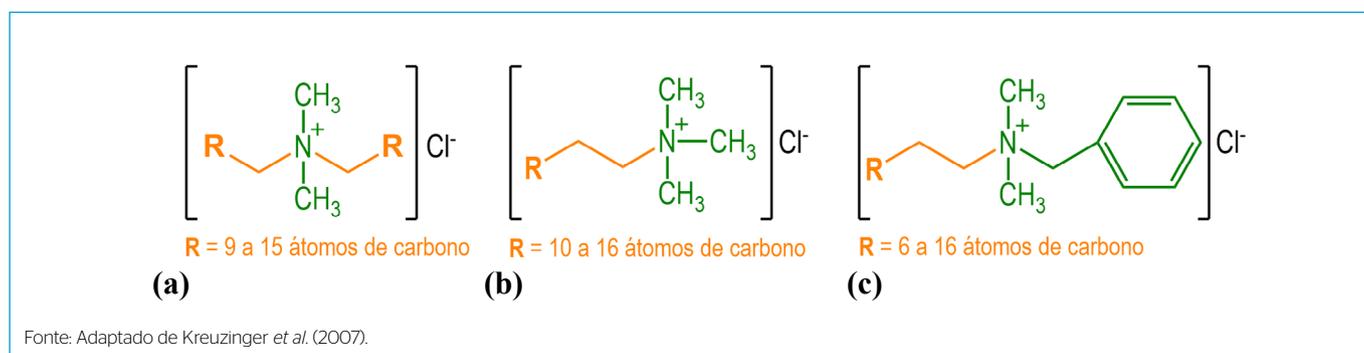


Figura 11 – Fórmula estrutural dos sais quaternários de amônio: (a) DDAC; (b) ATAC; e (c) BAC.

Tabela 9 – Principais aplicações dos QAC mais consumidos

Surfactante	Principais aplicações
DDAC	Desinfetantes domésticos, amaciantes de roupas e sanitizantes de bacias sanitárias.
ATAC	Xampus, condicionadores e tintura de cabelo.
BAC	Formulações farmacêuticas, desinfetantes e sanitizantes domésticos, comerciais e industriais, além de conservantes de alimentos.

Tabela 10 – Percentuais de biodegradação em ETEs e $t_{1/2}$ em águas superficiais.

Surfactante ⁽¹⁾	Biodegradação total (%) / tempo de experimento (dias)				$t_{1/2}$ (dias)
	Aeróbia	Tempo	Anaeróbia	Tempo	
DDAC	4	33	persistente	-	-
ATAC	81	28	persistente	-	-
BAC ⁽²⁾	63 a 72	36	persistente	-	-

Notas: ⁽¹⁾Concentração dos surfactantes nos testes de biodegradabilidade: 20 mg·L⁻¹.

⁽²⁾Biodegradação primária.

7. MÉTODOS ANALÍTICOS DE DETERMINAÇÃO DE SURFACTANTES

A técnica da espectrofotometria ultravioleta-visível (UV-vis) é utilizada para determinar a concentração total de surfactantes, seja da classe aniônica, não iônica ou catiônica. Entretanto, este método não distingue os diferentes surfactantes de cada classe; e, também, é muito susceptível a interferentes, os quais podem subestimar ou sobrestimar as concentrações dos surfactantes na amostra (SILVA *et al.*, 2017). Os surfactantes aniônicos totais são determinados pelo método das substâncias ativas ao azul de metileno (MBAS); os não iônicos, pelo método das substâncias ativas ao tiocianato de cobalto (CTAS); e os catiônicos, pelo método das substâncias ativas ao azul de disulfina (DBAS) (APHA, 2017).

A determinação de surfactantes específicos, é realizada por técnicas analíticas seletivas, ou seja, que sejam capazes de identificar inequivocamente apenas o(s) composto(s)

Tabela 11 – Concentrações de QAC no afluente e efluente de ETEs convencionais e suas respectivas eficiências de remoção.

Surfactante	Tratamento	Concentração ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		Remoção (%)	Referências
		Afluente	Efluente		
DDAC	Aeróbio (sistema não especificado)	13,8 a 34,4	0,1 a 0,4	96,9 a 99,7	Martínez-Carballo <i>et al.</i> (2007)
		12,7 a 23,5	0,6 a 1,1	90,5 a 97,4	
		8,9 a 45,9	0,4 a 1,1	94,6 a 98,1	
		10,7 a 9,3	- 0	99,8 a -100	
	DP + DA + LAE	-41	~ 0 a 0,2	99,5 a -100	Kreuzinger <i>et al.</i> (2007)
DP + LAE	-41	- 0	-100		
ATAC	Aeróbio (sistema não especificado)	2,2 a 6,0	~ 0 a 0,1	98,5 a -100	Martínez-Carballo <i>et al.</i> (2007)
		3,0 a 11,1	0,2 a 0,5	91,7 a 98	
		1,6 a 7,1	~ 0 a 0,2	84,6 a 99,2	
		6,9 a 7,1	~ 0,1	99,1 a 99,5	
BAC	DP + DA + LAE	-170	0,1 a 4,1	97,6 a 99,9	Kreuzinger <i>et al.</i> (2007)
	DP + LAE	-170	0,1 a 0,9	99,5 a 99,9	
	DP + A/O	1,5	0,006	99,6	Zhu <i>et al.</i> (2018)
	HAc + LA + REC	2,4	-0	-100	

Legenda: DP - Decantador primário; DA - Digestão anaeróbia; LAE - Lagoa aerada; A/O - Oxidação anaeróbia; HAc - Hidrólise ácida; LA - Lodos ativados; REC - Recirculação.

de interesse. Destas, destaca-se a técnica de cromatografia líquida acoplada a detectores de fluorescência, UV-vis e espectrometria de massas, amplamente utilizadas para a determinação de surfactantes específicos (McAVOY *et al.*, 1998; KREUZINGER *et al.*, 2007; MARTÍNEZ-CARBALLO *et al.*, 2007; GOMEZ *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2017). Embora de alta precisão, para estas técnicas são necessários equipamentos de grande porte e valor, além de pessoal especializado, nem sempre disponíveis em laboratórios de controle de qualidade das águas.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os surfactantes ou tensoativos estão inequivocamente entre os componentes do esgoto sanitário e em muitos efluentes industriais, e, portanto, pelos seus efeitos intrínsecos quando lançados em corpos de água sem o devido tratamento, causam grandes impactos ambientais, dos quais a formação de espumas é a mais visível e conhecida. Entretanto, em geral eles podem ser eficientemente removidos em ETEs convencionais, com eficiências de remoção superiores a até 90%. Vários estudos demonstraram que a degradação biológica de surfactantes, sejam aniônicos, catiônicos ou não iônicos, apresenta maior eficiência com o uso de sistemas aeróbios (p. ex.: lodos ativados, sistemas combinados aeróbio-anaeróbio).

Com o uso somente de processos anaeróbios, as eficiências são satisfatórias, mas a remoção é predominantemente através de mecanismos de sua adsorção ao lodo.

A toxicidade dos surfactantes sobre micro-organismos aeróbios e anaeróbios, de fato ocorre, mas somente em caso de altas concentrações e dependendo da combinação de vários fatores. Entretanto na prática, a remoção biológica de matéria orgânica não sofre alterações significativas nas ETEs, devido às baixas concentrações em geral no afluente. Em caso de ETEs anaeróbias, isso foi comprovado a partir de medidas da produção de biogás ou remoção satisfatória de matéria orgânica.

Com relação a formação de espumas nas ETEs e rios, uma parcela é devida aos surfactantes sintéticos, embora eles sejam satisfatoriamente removidos nas ETEs convencionais; entretanto, as concentrações remanescentes no efluente de ETEs são suficientes para formar espumas, necessitando algumas medidas preventivas. Existem também outras causas, como os surfactantes biológicos devido às bactérias filamentosas. Vale salientar que a formação de espumas está intrinsecamente ligada ao contato do ar com a interface água/surfactante sob condições de turbulência. Nas ETEs, as espumas são removidas comumente dosando-se antiespumantes, mas que trazem efeitos negativos para

a biota e, também, pelo descarte do lodo com idade avançada. Entretanto, diminuir a turbulência e o contato dos efluentes com o ar, é uma boa alternativa; e para o caso de rios, realizar o lançamento do efluente por emissários submersos, sem quedas de água e em trechos não turbulentos.

Portanto, os efeitos negativos associados aos surfactantes sintéticos, que são biodegradáveis, no ambiente têm forte relação com a inexistência ou falta de tratamento adequado do esgoto sanitários e efluentes industriais. Entretanto, não se pode deixar de reconhecer que os surfactantes continuarão a impactar, já que a sua formulação química é própria para formar espumas, para auxiliar no processo de limpeza. Logo, como outros componentes do esgoto sanitário, a sua remoção ou os problemas ambientais, devem estar associadas a uma política de ampliar os serviços de coleta e tratamento de esgoto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE, da Companhia Pernambuco de Saneamento – COMPESA, da BRK Ambiental, da DETEN Química (Camaçari, BA) e da Fibra Ambiental e Engenharia.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas*. Brasília, Brasil: ANA, 2017. 88 p.
- APHA/AWWA/WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, USA: APHA/AWWA/WPCF, 2017. 1973 p.
- BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. *Potencial de diversificação da indústria química brasileira: Relatório 4 – Tensoativos*. 2014. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/arquivos/chamada_publica_FEPprospec0311_Quimicos_Relat4_tensoativos.pdf. Acesso em: 06 de outubro de 2020.
- BONFIM, J. H.; SILVA, L. G.; GAVAZZA, S.; FLORÊNCIO, L.; KATO, M. T. Remoção de alquilbenzeno linear sulfonato em esgoto doméstico tratado em reator UASB e lagoa de polimento. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, p. 397-406, 2016.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Lei nº 7.365, de 13 de setembro de 1985. Dispõe sobre a fabricação de detergentes não-biodegradáveis. Brasília, DF, 1985.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005.
- CAPODICI, M.; BELLA, G. D.; NICOSIA, S.; TORREGROSSA, M. Effect of chemical biological surfactants on activated sludge of MBR system: microscopic analysis and foam test. *Bioresource Technology*, v. 177, p. 80-86, 2015.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo – 2003 a 2007*. 2008. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/publicacoes.asp>. Acesso em: 03 de agosto de 2022.
- COLLIVIGNARELLI, M. C.; BALDI, M.; ABBÀ, A.; CACCAMO, F. M.; MIINO, M. C.; RADA, E. C.; TORRETTA, V. Foams in wastewater treatment plants: from causes to control methods. *Applied Sciences*, v. 10, p. 1-21, 2020.
- CSEHÁTI, T.; FORGÁCS, E.; OROS, G. Biological activity and environmental impact of anionic surfactants. *Environmental International*, v. 28, p. 337-348, 2002.
- ESTADO DE MINAS. *Camada de espuma branca e tóxica cobre trecho do rio Tiête em Salto*. 2019. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/nacional/2019/06/22/internacional,1063813/camada-de-espuma-branca-e-toxica-cobre-trecho-do-rio-tiete-em-salto.shtml>. Acesso em: agosto de 2022.

- FELIPE, L. O.; DIAS, S. C. Surfactantes sintéticos e biossurfactantes: vantagens e desvantagens. *Química Nova na Escola*, v. 39, p. 228-236, 2017.
- FIELD, J. A.; FIELD, T. M.; POIGER, T.; SIEGRIST, H.; GIGER, W. Fate secondary alkane sulfonate surfactants during municipal wastewater treatment. *Water Research*, v. 29, p. 1301-1307, 1995.
- GOMEZ, V.; FERRERES, L.; POCURULL, E.; BORRULL, F. Determination of non-ionic and anionic surfactants in environmental water matrices. *Talanta*, v. 84, p. 859-866, 2011.
- HERA-AE. Human and Environmental Risk Assessment on ingredients of European household cleaning products. *Alcohol ethoxylates*, 2009. Disponível em: <https://www.heraproject.com/files/34-F-09%20HERA%20AE%20Report%20Version%20%20-%203%20Sept%2009.pdf>. Acesso em: 27 de outubro de 2020.
- HERA-AES. Human and Environmental Risk Assessment on ingredients of European household cleaning products. *Alcohol ethoxysulphates*, 2003. Disponível em: <https://www.heraproject.com/files/1-HH-04-HERA%20AES%20HH%20web%20wd.pdf>. Acesso em: 27 de outubro de 2020.
- HERA-AS. Human and Environmental Risk Assessment on ingredients of European household cleaning products. *Alkyl sulphates*, 2002. Disponível em: <https://www.heraproject.com/files/3-E-417F36A9-DB35-F780-97A4CF8B60763C35.pdf>. Acesso em: 27 de outubro de 2020.
- HERA-CAPB. Human and Environmental Risk Assessment on ingredients of European household cleaning products. *Cocamidopropyl Betaine (CAPB)*. CAS n° 61789-40-0, 70851-07-9, 4292-10-8, 2005. Disponível em: <https://www.heraproject.com/files/45-HH-E101023F-D12F-6A30-DEB0770E9BF8E4D0.pdf>. Acesso em: 20 de junho de 2022.
- HERA-LAS. Human and Environmental Risk Assessment. *Linear Alkylbenzene Sulphonate*, LAS. CAS n° 68411-30-3, 2013. Disponível em: <https://www.heraproject.com/files/HERA-LAS%20revised%20April%202013%20Final.pdf>. Acesso em: 21 de setembro de 2020.
- HERA-SAS. Human and Environmental Risk Assessment on ingredients of European household cleaning products. *Secondary alkane sulfonate*. SAS. CAS n° 68037-49-0, 2005. Disponível em: https://www.heraproject.com/files/44-F-SAS_HERA_RA_Version1_2005MarchNrev.pdf. Acesso em: 27 de outubro de 2020.
- KREUZINGER, N.; FUERHACKER, M.; SCHARF, S.; UHL, M.; GANS, O.; GRILLITSCH, B. Methodological approach towards the environmental significance of uncharacterized substances - quaternary ammonium compounds as an example. *Desalination*, v. 215, p. 209-222, 2007.
- LIWARSKA-BIZUKOJC, E.; BIZUKOJC, M. The influence of the selected nonionic surfactants on the activated sludge morphology and kinetics of the organic matter removal in the flow system. *Enzyme Microbial Technologies*, v. 41, p. 26-34, 2007.
- MADSEN, T.; BOYD, H. B.; NYLÉN, D.; PEDERSEN, A. R.; PETERSEN, G. I.; SIMONSEN, F. Assessment of substances in household detergents and cosmetic detergent products. *Environmental Project no. 615*, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/264868866_Environmental_and_Health_Assessment_of_Substances_in_Household_Detergents_and_Cosmetic_Detergent_Products. Acesso em: 20 de junho de 2022.
- MARTÍNEZ-CARBALLO, E.; SITIKA, A.; GONZÁLEZ-BARREIRO, C.; KREUZINGER, N.; SCHARF, S.; GANS, O. Determination of select quaternary ammonium compounds by liquid chromatography with mass spectrometry. Part I. Application to surface, waste and indirect discharge water samples in Austria. *Environmental Pollution*, v. 145, p. 489-496, 2007.
- MATTHIJS, E.; HOLT, M.S.; KIEWIET, A.; RIJS, G. B. J. Environmental monitoring for linear alkylbenzene sulfonate, alcohol ethoxylate, alcohol ethoxy sulfate, alcohol sulfate, and soap. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 18, p. 2634-2644, 1999.
- McAVOY, D. C.; DYER, S. D.; FENDINGER, N. J.; ECKHOFF, W. S.; LAWRENCE, D. L.; BEGLEY, W. M. Removal of alcohol ethoxylates, alkyl ethoxilate sulfates, and linear alkylbenzene sulfonates in wastewater treatment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 17, p. 1705-1711, 1998.
- MORRALL, S.W.; DUNPHY, J.C.; CANO, M.L.; EVANS, A.; McAVOY, D.C.; PRICE, B.P.; ECKHOFF, W.S. Removal and environmental exposure of alcohol ethoxylates in US sewage treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 64, p. 3-13, 2006.
- MUNGRAY, A. K.; KUMAR, P. Fate of linear alkylbenzene sulfonates in the environment: A review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, v. 63, p. 981-987, 2009.
- PALMER, M.; HATLEY, H. The role of surfactants in wastewaters treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review. *Water Research*, v. 147, p. 60-72, 2018.
- PAULO, P. L.; MAMEDES, I. M.; KATO, M. T.; BONCZ, M. A. Caracterização quantitativa e qualitativa de esgoto. Nota Técnica 4 - Produtos de cuidado pessoal. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 3, n. 4, p. 29-35, 2023.
- RIO DE JANEIRO. Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA). *Norma Técnica 202.R-10*. Estabelece critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos, como parte integrante do Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras

(SLAP). Rio de Janeiro, 1986. Disponível em: http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/@inter_pres_aspres/documents/document/zwff/mda2/-edisp/inea_006744.pdf. Acesso em: 10 de junho de 2022.

ROBERT-PEILLARD, F.; SYAKTI, A. D.; COULOMB, B.; DOUMENQ, P.; MALLERET, L.; ASIA, L.; BOUDENNE, J.L. Occurrence and fate of selected surfactants in seawater at the outfall of the Marseille urban sewerage system. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 12, p. 1527-1538, 2015.

SILVA, L. G.; GAVAZZA, S.; FLORENCIO, L.; KATO, M. T. Quantificação de alquilbenzeno linear sulfonato em estação de tratamento de efluentes e rios por cromatografia líquida de alta eficiência e extração em fase sólida. *Química Nova*, v. 40, p. 334-341, 2017.

S.C.A. Swedish Chemicals Agency. *ANNEX XV Restriction report proposal for a restriction - Nonylphenol and nonylphenolethoxylates*

in textiles, p. 1-372, 2013. Disponível em: <https://www.echa.europa.eu/documents/10162/f28b5c79-11e0-4ce2-91db-e53f7daa4d5a>. Acesso em: 20 de junho de 2022.

YING, G. G.; WILLIAMS, B.; KOOKANA, R. Environmental fate of alkylphenols and alkylphenol ethoxylates - a review. *Environmental International*, v. 28, p. 215-226, 2002.

YING, G. G. Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment. *Environmental International*, v. 32, p. 417-431, 2006.

ZHU, F. J.; MA, W. L.; XU, T. F.; DING, Y.; ZHAO, X.; LI, W. L.; LIU, L. Y.; SONG, W. W.; LI, Y. F.; ZHANG, Z. F. Removal characteristic of surfactants in typical industrial and domestic treatment plants in Northeast China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 53, p. 84-90, 2018.