

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**RAFAEL LAMOUNIER ALVES MACHADO**

**QUÍMICA VERDE VERSUS ESPUMAS RETARDANTES DE INCÊNDIO: UMA  
REVISÃO CRÍTICA**

**Belo Horizonte**

**2025**

**RAFAEL LAMOUNIER ALVES MACHADO**

**QUÍMICA VERDE VERSUS ESPUMAS RETARDANTES DE INCÊNDIO: UMA  
REVISÃO CRÍTICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Química do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Nova Suíça, como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Química Tecnológica.

Orientadora: Adriana Akemi Okuma.

**Belo Horizonte**

**2025**

**Inserir aqui a folha da ficha catalográfica**

**RAFAEL LAMOUNIER ALVES MACHADO**

**QUÍMICA VERDE VERSUS ESPUMAS RETARDANTES DE INCÊNDIO: UMA  
REVISÃO CRÍTICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Química do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Nova Suíça, como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Química Tecnológica.

Orientadora: Adriana Akemi Okuma.

Aprovado em 24 de julho de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Adriana Akemi Okuma – Orientador  
CEFET-MG

Prof. Dra. Lucilaine Valéria de Souza Santos  
CEFET-MG

Prof. Dr. Leonel da Silva Teixeira  
CEFET-MG

**Belo Horizonte**

**2025**

A Deus, por ser a fonte de toda sabedoria, força e propósito na minha vida. Sem Sua graça e direção, nada disso seria possível. Aos meus pais, Marley e Cleide, pelo amor incondicional, pelo exemplo de integridade e pelo apoio em todos os momentos da caminhada. À minha irmã Ingrid, ao meu cunhado Marcos e ao meu sobrinho Eduardo, por estarem sempre ao meu lado, torcendo e acreditando em mim. À minha noiva Ingrid, por seu companheirismo, paciência, encorajamento e amor constante durante essa jornada. A cada um de vocês, minha eterna gratidão. Este trabalho também é de vocês.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Marley e Cleide, por todo o apoio, amor e dedicação ao longo da minha formação. Seus exemplos de esforço e perseverança foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. À minha avó Dora, sou profundamente grato por suas orações constantes, que me sustentaram nos momentos de dificuldade e me lembraram da importância da fé.

Expresso também minha sincera gratidão à minha orientadora, Adriana Akemi Okuma, pela orientação técnica, pela paciência e pela confiança no desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi essencial para a construção deste projeto e para o meu crescimento acadêmico e profissional.

*“Há um tempo determinado para todas as coisas; há um tempo para todo propósito debaixo  
do céu.”*

Eclesiastes 3:1.

# QUÍMICA VERDE VERSUS ESPUMAS RETARDANTES DE INCÊNDIO: UMA REVISÃO CRÍTICA

Rafael Lamounier Alves Machado

Adriana Akemi Okuma

## RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão crítica sobre a aplicação dos princípios da Química Verde na substituição de surfactantes tóxicos utilizados em espumas retardantes de incêndio, com ênfase na busca por alternativas sustentáveis que promovam a proteção ambiental e a saúde humana. As espumas formadoras de película aquosa (AFFF), amplamente empregadas no combate a incêndios envolvendo líquidos inflamáveis, contêm compostos perfluoroalquilados (PFAS), reconhecidos por sua persistência no ambiente e pelos riscos toxicológicos que oferecem à biota e à saúde humana. A revisão discute os principais desafios e avanços na adoção de formulações alternativas, com destaque para os surfactantes livres de flúor, como as espumas F3, que demonstram maior potencial de biodegradabilidade e menor bioacumulação. Além disso, explora-se o uso da ferramenta ToxPi como abordagem integrativa para avaliação de risco e priorização de formulações mais seguras. Os dados analisados indicam que, embora as espumas F3 representem um avanço relevante em termos de sustentabilidade, ainda persistem incertezas quanto ao seu desempenho operacional e aos perfis toxicológicos, especialmente sob os critérios de classificação do Sistema Globalmente Harmonizado (GHS), o que evidencia a necessidade de estudos complementares.

**Palavras-chave:** AFFF (espumas formadoras de película aquosa); PFAS (substâncias perfluoroalquiladas); surfactantes livres de flúor; avaliação de risco químico; biodegradabilidade.

# GREEN CHEMISTRY VERSUS FIRE-FIGHTING FOAMS: A CRITICAL REVIEW

Rafael Lamounier Alves Machado

Adriana Akemi Okuma

## ABSTRACT

This work presents a critical review of the application of Green Chemistry principles in replacing toxic surfactants used in fire-fighting foams, with an emphasis on the search for sustainable alternatives that protect both the environment and human health. Aqueous film-forming foams (AFFF), widely employed in combating flammable liquid fires, contain per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), which are known for their environmental persistence and significant toxicological risks to both ecosystems and human health. This review discusses the main challenges and advances in the adoption of alternative formulations, particularly fluorine-free surfactants such as F3 foams, which show greater biodegradability and lower bioaccumulation potential. Additionally, it explores the use of the ToxPi tool as an integrative approach for risk assessment and the prioritization of safer formulations. The analyzed data indicate that, although F3 foams represent a relevant advancement in terms of sustainability, uncertainties remain regarding their operational performance and toxicological profiles, especially under the classification criteria of the Globally Harmonized System (GHS), highlighting the need for further studies.

**Keywords:** AFFF (aqueous film-forming foams). PFAS (per- and polyfluoroalkyl substances). Fluorine-free surfactants. Chemical risk assessment. Biodegradability.

**TERMO DE RESPONSABILIDADE POR AUTORIA DO TRABALHO DE  
CONCLUSÃO DE CURSO**

Eu, **RAFAEL LAMOUNIER ALVES MACHADO**, matrícula **201712410164**, discente do Curso de Química Tecnológica, declaro para os devidos fins, que o presente Trabalho de Conclusão de Curso, de título **QUÍMICA VERDE VERSUS ESPUMAS RETARDANTES DE INCÊNDIO: UMA REVISÃO CRÍTICA**, é de minha autoria e que estou ciente dos:

- Artigos 297 a 299 do Código Penal;
- Decreto-Lei n 2.848 de 7 de dezembro de 1940;
- Lei no 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, sobre os Direitos Autorais;
- Regulamento Disciplinar Discente do CEFET-MG;
- E que plágio consiste na reprodução de obra alheia e submissão dela como trabalho próprio ou na inclusão, em trabalho próprio, de ideias, textos, tabelas ou ilustrações (quadros, figuras, gráficos, fotografias, retratos, lâminas, desenhos, organogramas, fluxogramas, plantas, mapas e outros) transcritos de obras de terceiros sem a devida e correta citação da referência.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração, isentando o(a) professor(a) orientador(a) **ADRIANA AKEMI OKUMA**, os membros da banca examinadora e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Nova Suíça, de qualquer responsabilidade.

Belo Horizonte 24 de julho de 2025.



Assinatura do Discente

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - a) Quantidade de artigos publicados sobre o assunto “AFFF” no período de 1973 a 2025 e b) Artigos nacionais e internacionais sobre o mesmo assunto.....	17
Figura 2- Fluorosurfactante .....	20
Figura 3 - Dodecilbenzenosulfonato de Sódio.....	20
Figura 4 - a) Alinhamento dos surfactantes de hidrocarbonetos na lamela da bolha de espuma. b) Alinhamento entre surfactantes hidrocarbonados e fluorosurfactantes para formação da película aquosa; .....	21
Figura 5– Diagramas ToxPi dos perfis de risco integrados para AVIO F3, BIOEX ECOPOL A3+, SOLBERG Re-Healing Foam RF3 e LIOVAC AFFF HC-AR 3-3. ....	28
Figura 6 – Classificação, com sistema de cores, dos produtos e ingredientes .....	30

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas e toxicocinéticas de PFAS selecionados .....	22
Tabela 2 – Sistema de cores e categorias GHS .....	29
Tabela 3 – DQS e DAS para espumas F3 e AFFF .....	32
Tabela 4 - Custos (20 L) e desempenho relativo em UL 162.....	32
Tabela 5 – Comparação de FDS segundo GHS e Química Verde .....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFFF	Aqueous Film-Forming Foam (Espuma formadora de película aquosa)
AR-AFFF	Alcohol-Resistant Aqueous Film-Forming Foam (Espuma formadora de película aquosa resistente ao álcool)
CBMMG	Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DOD	Department of Defense (Departamento de Defesa dos EUA)
ECHA	European Chemicals Agency (Agência Europeia dos Produtos Químicos)
EPA	Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)
F3	Fluorine-Free Foam (Espuma livre de flúor)
FDS	Fichas de Dados de Segurança
FFF	Fluorine-Free Foam (sinônimo de F3)
FFFP	Film-Forming Fluoroprotein Foam (Espuma fluoroproteica formadora de película)
FTCA	Fluorotelomer Carboxylic Acid (Ácido carboxílico fluortelômero)
FTOH	Fluorotelomer Alcohol (Álcool fluortelômero)
GHS	Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos
HepG2	Linha celular humana derivada de carcinoma hepatocelular, usada em estudos toxicológicos
IARC	International Agency for Research on Cancer (Agência Internacional para Pesquisa sobre o Câncer)
ICAO	International Civil Aviation Organization (Organização da Aviação Civil Internacional)
ITRC	Interstate Technology & Regulatory Council
LGE	Líquido Gerador de Espuma
MIL-F-24385	Norma militar para espumas contra incêndio (relacionada ao teor de flúor em F3)

Nrf2-ARE	Nuclear factor (erythroid-derived 2)-like 2 - Antioxidant Response Element: via de sinalização antioxidante
PFAS	Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances (Substâncias perfluoroalquil e polifluoroalquil)
PFOA	Perfluorooctanoic Acid (Ácido perfluorooctanoico)
PFHxA	Perfluorohexanoic Acid (Ácido perfluorohexanoico)
PFOS	Perfluorooctanesulfonic Acid (Ácido perfluorooctanossulfônico)
PFPeA	Perfluoropentanoic Acid (Ácido perfluoropentanoico)
PGCC	Presidential Green Chemistry Challenge (Desafio Presidencial de Química Verde)
POPs	Poluentes Orgânicos Persistentes
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (Regulamento da União Europeia)
ToxPi	Toxicological Priority Index (Índice de Prioridade Toxicológica)
UL	Underwriters Laboratories
UL 162	Norma da Underwriters Laboratories para desempenho de espumas antichama
WD881	Nome comercial de espuma sintética

# SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Contextualização sobre o uso de espumas no combate a incêndio.....	16
1.2 Relevância ambiental e toxicidade de formulações convencionais.....	16
1.3 Justificativa do estudo à luz da química verde .....	16
<b>2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1.Princípios da Química Verde.....	18
2.2.Classificação, Propriedades e Aplicações das Espumas Retardantes de Incêndio .....	19
2.3.Composição Química dos Agentes Espumígenos: Estrutura, Função e Implicações Ambientais.....	20
2.4.Espumas Fluoradas: História, Propriedades Físico-Químicas e Toxicidade.....	22
2.5.Espumas Fluorine-Free e Tensoativos de Silicone: Propriedades, Certificações e Perfis de Toxicidade.....	23
2.6.Restrições legais internacionais.....	24
2.7.Global Harmonized System (GHS) .....	25
2.8.Data Assurance Score (DAS) e Data Quality Score (DQS) .....	25
2.9.Software ToxPi.....	25
<b>3.OBJETIVOS .....</b>	<b>25</b>
3.1.Objetivo Geral .....	26
3.2.Objetivos Específicos .....	26
<b>4.METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
<b>5.RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
5.1.Perfil toxicológico e ambiental integrado (ToxPi) .....	28
5.2.Sistema de Cores baseado no Global Harmonized System .....	29
5.3.Data Assurance Score e Data Quality Score .....	31
5.4.Comparação de Custos e Desempenho.....	32

5.5.Avaliação das Fichas de Segurança segundo Global Harmonized System e Química Verde .....	33
<b>6.DISSCUSSÕES .....</b>	<b>33</b>
6.1.Desempenho versus sustentabilidade .....	34
6.2.Impactos Persistentes dos Perfluoroalquilsulfonatos: Mobilidade, Bioacumulação e Riscos à Saúde.....	34
6.3.Espumas Fluorine-Free: Alternativas Sustentáveis e Perfis Toxicológicos .....	35
6.4.Limitações metodológicas e lacunas de dados .....	36
6.5.Implicações para normatização e adoção de alternativas .....	37
<b>7.CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>37</b>
7.1.Conclusões.....	37
7.2.Trabalhos futuros .....	38
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de espumas retardantes de incêndio, especialmente as do tipo AFFF (*Aqueous Film-Forming Foams*), tem sido central na supressão de incêndios classe B, notadamente aqueles envolvendo combustíveis líquidos. Entretanto, essa alta eficácia vem acompanhada de graves consequências ambientais e à saúde humana: o uso contínuo de AFFF, principalmente em ambientes militares e aeroportuários, desencadeia significativa contaminação ambiental devido à baixa degradabilidade e elevada solubilidade em água dos compostos perfluoroalquilados (PFAS), que se acumulam em tecidos humanos como rins e pulmões e são amplamente detectados no solo, águas subterrâneas e fontes de abastecimento próximas a áreas de uso frequente (ITRC, 2022; Pérez et al., 2013; Tickner, 2022).

A reconhecida persistência e potencial bioacumulativo dos PFAS motivou crescentes preocupações regulatórias e científicas, resultando, por exemplo, na determinação federal dos Estados Unidos pela eliminação dos estoques de AFFF até 2024 e no incentivo ao uso de alternativas como as espumas *fluorine-free* (F3) (Tickner, 2022). Apesar da proposta de substituição por tecnologias mais sustentáveis, enfatiza-se a necessidade de avaliação criteriosa dos riscos toxicológicos das novas formulações para evitar trocas que possam gerar outros prejuízos à saúde humana ou ambiental (Holden et al., 2023).

Neste contexto, soma-se a importância de ferramentas como o GHS (Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos), que padroniza a comunicação de perigos por meio de categorias, pictogramas e frases H/P, permitindo análise comparativa de toxicidade e segurança dos agentes extintores (ABNT, 2009; GHS, 2023). Complementarmente, o software ToxPi foi utilizado para integrar dados multidimensionais de toxicidade, ecotoxicidade, persistência e transparência das formulações, possibilitando uma avaliação gráfica e integrativa dos perfis de risco dos produtos analisados (Holden et al., 2023).

Assim, a revisão sistemática realizada contemplou: catálogo de agentes alternativos aos AFFF disponíveis globalmente, exame das fichas de dados de segurança (FDS), avaliações de toxicidade aguda e crônica em diferentes modelos biológicos e ensaios de eficácia seguindo parâmetros técnicos da UL 162 (*Underwriters Laboratories*) (ITRC, 2022; UL 162, 2025). O objetivo é identificar formulações que conciliem desempenho operacional com menor impacto

ambiental, em consonância com os princípios da química verde e rigor nas avaliações regulatórias.

### **1.1 Contextualização sobre o uso de espumas no combate a incêndio**

As espumas formadoras de película aquosa (AFFF), desenvolvidas nos anos 1970, tornaram-se padrão no combate a incêndios classe B, especialmente líquidos inflamáveis derivados de petróleo, devido à sua eficiência na formação de uma manta que suprime vapores e isola o combustível do oxigênio (TUREKOVÁ; BALOG, 2010; FIGUEREDO et al., 1999). Sua ampla adoção por forças militares, aeroportos e bombeiros, em contextos de treinamento e simulações de incêndio, se deve, em grande parte, à presença de compostos perfluorados (PFAS), que conferem elevada performance operacional (JAHURA et al., 2024). No entanto, o uso intensivo dessas formulações resultou em ampla contaminação ambiental, com detecção de PFAS em solos e águas subterrâneas, devido à sua persistência e mobilidade (ITRC, 2022; TICKNER, 2022). Esse cenário tem impulsionado a busca por alternativas alinhadas à química verde e à sustentabilidade

### **1.2 Relevância ambiental e toxicidade de formulações convencionais**

As espumas tradicionais AFFF contêm substâncias persistentes como PFOS e PFOA, que resistem à degradação natural e se acumulam em organismos, prejudicando ecossistemas e a saúde humana (Seow, 2025). A má disposição dessas espumas durante incêndios contamina águas superficiais e subterrâneas, agravado pela alta mobilidade dos PFAS, que se dispersam facilmente devido à sua estrutura anfifílica e resistência química, afetando até regiões remotas (Seow, 2025). Jahura et al. (2024) destacam que fluorotelômeros presentes nas AFFF podem se transformar em PFAAs, ainda mais tóxicos e persistentes, dificultando a remoção ambiental. Cousins et al. (2020) alertam que os PFAS podem desregular sistemas endócrinos, prejudicar o fígado, o sistema imunológico e aumentar o risco de câncer, indicando que o uso contínuo dessas espumas representa uma séria ameaça à saúde pública e ao meio ambiente.

### **1.3 Justificativa do estudo à luz da química verde**

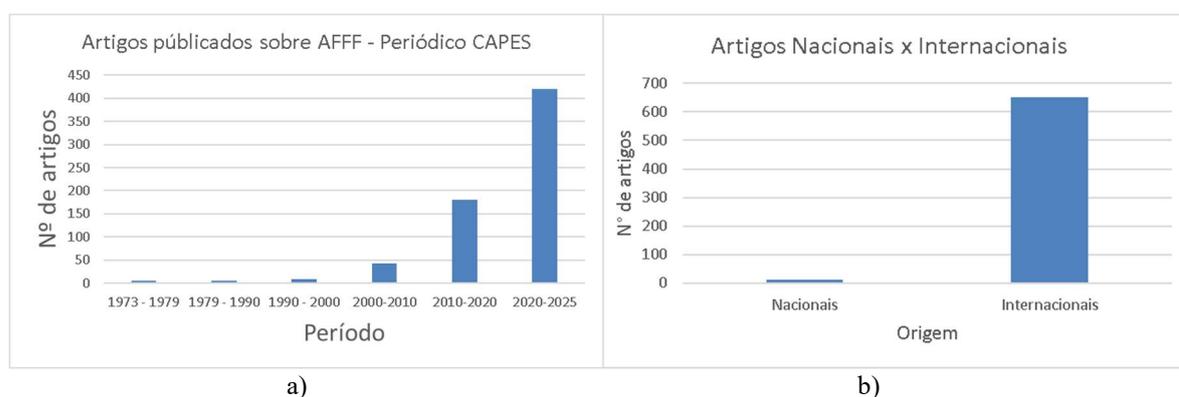
Devido à persistência, toxicidade e bioacumulação dos compostos fluorados nas espumas AFFF, é fundamental a transição para espumas F3 (*Fluorine-Free Foam*), com foco na inovação sustentável. A Química Verde orienta essa mudança, promovendo a substituição

racional de substâncias perigosas por alternativas menos nocivas, integrando segurança e redução de impactos desde as etapas iniciais do processo químico, alinhada aos objetivos de desenvolvimento sustentável (Naz et al., 2024). Serrano (2009) reforça que a Química Verde representa uma mudança ética e sociopolítica, que vê a substituição por espumas F3 como um compromisso institucional para preservar o meio ambiente e a saúde pública a longo prazo.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção expande os conceitos principais que sustentam a pesquisa, abordando os fundamentos da química verde e a química dos surfactantes. Os periódicos utilizados para pesquisa foram: SciELO, Portal de periódicos da Capes, e Google Acadêmico. No portal de periódicos da Capes, como exemplo, foram encontrados 518 resultados quando se pesquisou a palavra “AFFF *foam*” (Portal de Periódicos CAPES, 2025) Destes apenas 8 possuíam publicação nacional e a primeira publicação nacional apenas em 2015, que evidencia a carência de pesquisas brasileiras sobre o assunto. A escassez de pesquisas brasileiras sobre espumas AFFF se deve à falta de infraestrutura laboratorial avançada, altos custos e complexidade dos testes exigidos e baixa demanda interna concentrada em poucos setores, o que desestimula o investimento em pesquisa nacional. O periódico contém artigos desde 1973 até 2015 sobre o assunto. A Figura 1A e Figura 1B exemplificam os dados pesquisados.

Figura 1 - a) Quantidade de artigos publicados sobre o assunto “AFFF” no período de 1973 a 2025 e b) Artigos nacionais e internacionais sobre o mesmo assunto.



Fonte: O autor, 2025.

No mesmo periódico também pesquisou sobre o assunto “F3- *fluorine free foam*” para encontrar pesquisas sobre o assunto. Encontrou-se apenas 5 artigos sobre o tema, e nenhum

com publicação nacional. Destes 5, apenas 3 com acesso aberto. O primeiro artigo sobre o assunto é datado de 2021. A quantidade reduzida de artigos sobre “F3- *fluorine free foam*” se deve ao fato de ser uma tecnologia recente, com pouco tempo de desenvolvimento e adoção global, associada à escassez de grupos de pesquisa atuando nacionalmente na área. Além disso, a substituição dos AFFF por espumas F3 só ganhou força após regulações internacionais mais recentes, refletindo o baixo histórico de publicações sobre o tema. No portal SciELO não foram encontrados resultados ao pesquisar as palavras “AFFF foam” e “F3 *fluorine free foam*”

## 2.1.Princípios da Química Verde

A química verde propõe uma abordagem preventiva e sustentável para minimizar os impactos ambientais da atividade química, priorizando a redução do uso de substâncias perigosas e a geração de resíduos. Em vez de tratar os poluentes após sua formação, busca evitar sua produção desde o início, por meio do uso de matérias-primas renováveis, eficiência energética e substituição de compostos tóxicos, promovendo segurança e sustentabilidade ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos químicos (LENARDÃO et al., 2003).

Os 12 princípios da química verde orientam o desenvolvimento de processos e produtos químicos mais seguros, eficientes e sustentáveis, desde a seleção das matérias-primas até o descarte final. Formalizados por Anastas e Warner em 1998, eles promovem práticas como a prevenção da geração de resíduos, o uso de matérias-primas renováveis, a economia de energia, o uso de catalisadores seletivos, a substituição de substâncias tóxicas e o desenho de produtos que se degradem em compostos inofensivos. Esses princípios ganharam destaque a partir de iniciativas como o programa da EPA em 1991 e vêm sendo aplicados em diversas áreas da pesquisa química, visando reduzir os riscos à saúde e ao meio ambiente (FARIAS; FÁVARO, 2011; SERRANO, 2009; LENARDÃO et al., 2003).

- 1. Prevenção. Evitar a produção do resíduo é melhor do que tratá-lo ou “limpá-lo” após sua geração.*
- 2. Economia de Átomos. Deve-se procurar desenhar metodologias sintéticas que possam maximizar a incorporação de todos os materiais de partida no produto final.*
- 3. Síntese de Produtos Menos Perigosos. Sempre que praticável, a síntese de um produto químico deve utilizar e gerar substâncias que possuam pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao ambiente.*
- 4. Desenho de Produtos Seguros. Os produtos químicos devem ser desenhados de tal modo que realizem a função desejada e ao mesmo tempo não sejam tóxicos.*
- 5. Solventes e Auxiliares mais seguros. O uso de substâncias auxiliares (solventes,*

*agentes de separação, secantes, etc.) precisa, sempre que possível, tornar-se desnecessário e, quando utilizadas, estas substâncias devem ser inócuas.*

*6. Busca pela eficiência energética. A utilização de energia pelos processos químicos precisa ser reconhecida pelos seus impactos ambientais e econômicos e deve ser minimizada. Se possível, os processos químicos devem ser conduzidos à temperatura e pressão ambientes.*

*7. Uso de Fontes Renováveis de Matéria-Prima. Sempre que técnica- e economicamente viável, a utilização de matérias-primas renováveis deve ser escolhida em detrimento de fontes não renováveis.*

*8. Evitar a Formação de Derivados. A derivatização desnecessária (uso de grupos bloqueadores, proteção/desproteção, modificação temporária por processos físicos e químicos) deve ser minimizada ou, se possível, evitada, porque estas etapas requerem reagentes adicionais e podem gerar resíduos.*

*9. Catálise. Reagentes catalíticos (tão seletivos quanto possível) são melhores que reagentes estequiométricos.*

*10. Desenho para a Degradação. Os produtos químicos precisam ser desenhados de tal modo que, ao final de sua função, se fragmentem em produtos de degradação inócuos e não persistam no ambiente.*

*11. Análise em Tempo Real para a Prevenção da Poluição. Será necessário o desenvolvimento futuro de metodologias analíticas que viabilizem um monitoramento e controle dentro do processo, em tempo real, antes da formação de substâncias nocivas.*

*12. Química Intrinsecamente Segura para a Prevenção de Acidentes. As substâncias, bem como a maneira pela qual uma substância é utilizada em um processo químico, devem ser escolhidas a fim de minimizar o potencial para acidentes químicos, incluindo vazamentos, explosões e incêndios.*

Com base nesses fundamentos da Química Verde, torna-se essencial analisar como os princípios de sustentabilidade e prevenção podem ser aplicados no desenvolvimento, classificação e uso das espumas retardantes de incêndio, tema abordado a seguir.

## **2.2. Classificação, Propriedades e Aplicações das Espumas Retardantes de Incêndio**

Diversos agentes espumantes são utilizados na supressão de incêndios, com formulações específicas que os tornam adequados a diferentes contextos operacionais. Entre as principais classes destacam-se as espumas proteicas, fluoroproteicas, sintéticas, resistentes a álcool (AR), AFFF e FFFP, variando quanto à estabilidade térmica, supressão de vapores e adesividade ao combustível (TUREKOVÁ; BALOG, 2010).

Para incêndios Classe B, as espumas se dividem entre as fluoradas, que contêm PFAS, e as *fluorine-free foams* (F3), que excluem esses compostos. As F3 têm ganhado destaque por apresentarem menor toxicidade e impacto ambiental, em consonância com os princípios da

Química Verde (ITRC, 2023).

As espumas mecânicas são classificadas conforme sua taxa de expansão: baixa (até 20:1), para incêndios líquidos com cobertura superficial eficaz; média (20:1 a 200:1), para geometrias complexas; e alta (acima de 200:1), indicada para saturação de grandes volumes (YBIRMA, 2022).

A reologia - que é o estudo do fluxo e da deformação dos materiais sob a ação de forças, incluindo líquidos, sólidos e substâncias complexas - também interfere no desempenho: espumas newtonianas, como AFFF, mantêm viscosidade constante; espumas pseudoplásticas exigem maior energia inicial e cuidado com a dosagem (BIOEX, 2025). Propriedades como fluidez, resistência térmica e química, e capacidade de supressão de vapores são cruciais para a eficiência extintora (JAHURA et al., 2024).

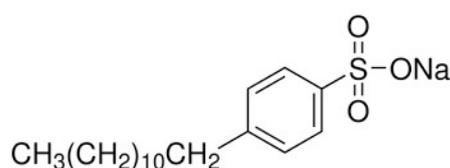
### 2.3. Composição Química dos Agentes Espumígenos: Estrutura, Função e Implicações Ambientais

As formulações espumígenas usadas na supressão de incêndios, especialmente as do tipo AFFF (*Aqueous Film Forming Foam*), são complexas e focadas em garantir estabilidade interfacial e rápida extinção de vapores inflamáveis. Elas combinam solventes orgânicos, surfactantes hidrocarbonados, polímeros e fluorossurfactantes, estes últimos representando menos de 3% da composição, mas com impacto significativo em toxicidade e persistência ambiental (ITRC, 2023, p. 3.1). Os fluorossurfactantes de cadeia longa, como PFOS e PFOA (Figura 2), proporcionam grande estabilidade térmica e química devido à forte ligação C-F, permitindo a formação de filmes aquosos sobre o combustível que bloqueiam a liberação de vapores e diminuem a chance de reignição (Figueredo; Ribeiro; Sabadini, 1999, p. 129). Apesar da migração para compostos de cadeia curta, como PFHxA e 6:2 FTOH, estes ainda apresentam toxicidade e mobilidade ambiental relevantes (Russell; Himmelstein; Buck, 2015).



**Figura 2-** Fluorosurfactante

Fonte: Wikipedia, 2024.

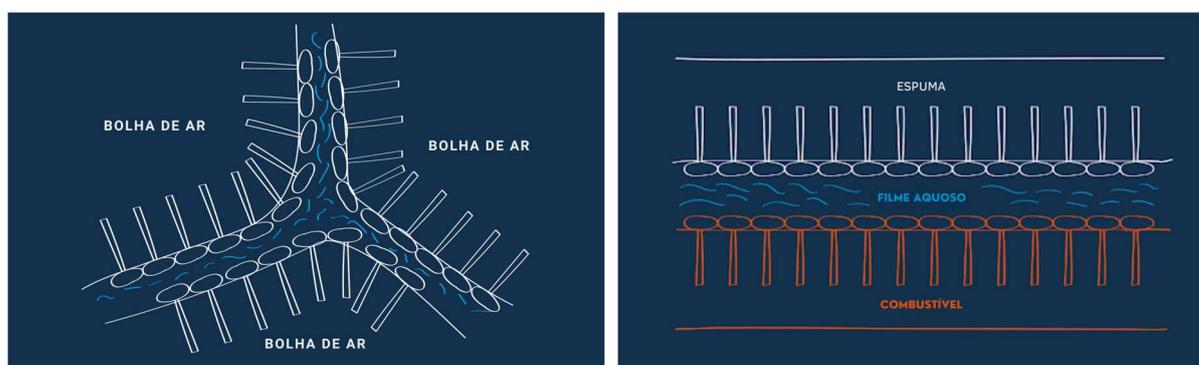


**Figura 3 -** Dodecilbenzenosulfonato de Sódio

Já os surfactantes hidrocarbonados (Figura 3), por outro lado, possuem uma longa cadeia carbônica com ligações C-H, com uma extremidade contendo um grupo sulfonato, geralmente ocorrendo na forma de sais. Estes possuem menos resistência no meio ambiente, comparados aos surfactantes fluorados.

As formulações fluoroproteicas combinam proteínas hidrolisadas com surfactantes fluorados para maior aderência e estabilidade, enquanto as AR-AFFF incorporam polímeros hidrofílicos que protegem a espuma contra solventes polares (Ybirma, 2022). A espuma é produzida pela diluição do concentrado em água (1% a 6%) seguida por aeração, sendo composta principalmente por água (>60%), surfactantes (15–18%), solventes miscíveis e aditivos que fornecem propriedades reológicas e resistência térmica (Chemguard, 2005). As AFFF convencionais usam misturas de surfactantes iônicos, com fluorossurfactantes representando menos de 2% em massa, essenciais para a formação do filme aquoso e supressão rápida dos vapores (Zhang et al., 2024). As espumas F3 (*Fluorine-Free Foams*) substituem completamente os fluorossurfactantes por tensoativos hidrocarbonados, reduzindo os riscos ambientais associados (Peltzer, 2023).

**Figura 4** - a) Alinhamento dos surfactantes de hidrocarbonetos na lamela da bolha de espuma. b) Alinhamento entre surfactantes hidrocarbonados e fluorossurfactantes para formação da película aquosa;



a)

b)

Fonte: Adaptado de Peltzer, 2023.

A formação da película aquosa ocorre pela orientação das moléculas surfactantes na interface água/combustível/ar: surfactantes hidrocarbonados alinham suas caudas hidrofóbicas para o combustível e cabeças hidrofílicas para a água, enquanto os fluorossurfactantes apresentam extremidades lipofóbicas voltadas para o ar (Figuras 4a e 4b). Essa estrutura molecular produz uma película ultrafina e estável que permanece sobre o combustível, bloqueando vapores inflamáveis e conferindo alto desempenho às espumas AFFF, apesar dos impactos ambientais pelos PFAS.

## 2.4. Espumas Fluoradas: História, Propriedades Físico-Químicas e Toxicidade

Os primeiros testes de desempenho de veículos de resgate aeroportuário, publicados em 1970, já realçavam a necessidade de descargas súbitas de até 22 700 L min<sup>-1</sup> de espuma para conter incêndios em combustíveis de aviação (Medley & Hardt, 1970). Nesse cenário, a 3M lançou as espumas AFFF “*Lightwater*”, produzidas entre as décadas de 1960 e 2002, cuja eficácia provinha de perfluoroalquil sulfonatos de cadeia longa — sobretudo PFOS — obtidos por fluoração eletroquímica (3FFF, s.d.). As formulações continham ainda PFOA, PFHxS e precursores, chegando a representar um terço do total de PFAS presentes.

**Tabela 1** – Propriedades físico-químicas e toxicocinéticas de PFAS selecionados

PFAS	Solubilidade em água (mg L <sup>-1</sup> , 25 °C)	Pressão de vapor (Pa, 25 °C)	Meia-vida em humanos	log K <sub>oc</sub>
PFOA	9 500 mg L <sup>-1</sup> [1]	0,525 mm Hg ≈ 70 Pa [1]	2,3 anos (média) [2][3]	2,06 [4] [5]
PFOS	680 mg L <sup>-1</sup> [1]	0,002 mm Hg ≈ 0,27 Pa [1]	7,5 anos (média) [2]	2,57 [4]
PFHxS	1 400 mg L <sup>-1</sup> [6]	0,0046 mm Hg ≈ 0,6 Pa [6]	5,4 anos (média) [2]	1,9 [7]
PFHxA	15 700 mg L <sup>-1</sup> [8]	log P = 1,49 ⇒ ≈ 31 Pa [9]	32 dias ≈ 0,09 anos [10]	1,9 [11]

Fonte: Dados compilados de [1]: EPA (2017); [2] Batzella et al. (2024); [3] Rosato et al. (2024); [4] EPA (2014); [5] EPA (2016); [6] CSWAB (2018); [7] Schedin 2013); [8] NCBI (2025); [9] Zhang et al., (2020); [10] Russel et al., (2013) e [11] Geosyntec Consultants (2019).

Esses compostos são hoje classificados como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) devido à sua elevada persistência ambiental, toxicidade e capacidade de bioacumulação (CETESB, s.d.). Conforme resumido na Tabela 1, tais PFAS apresentam meia-vida longa em humanos, baixa pressão de vapor, alta solubilidade em água e valores de log K<sub>oc</sub> compatíveis com acumulação em sedimentos e organismos, características que satisfazem os critérios de

persistência, mobilidade e bioacumulação usados internacionalmente para definir POPs.

A partir de 2002, a indústria migrou para o processo de telomerização, gerando fluorotelômeros (padrão n:x) que, embora de cadeia mais curta, podem degradar-se em ácidos perfluorocarboxílicos como PFHxA e PFPeA (ITRC, 2023). Após 2015, os AFFF “modernos” passaram a empregar exclusivamente telômeros C6 para atender ao Programa Voluntário de Eliminação do PFOA da USEPA, mas ainda podem conter impurezas de PFOS/PFOA e formar subprodutos tóxicos, como o 5:3 FTCA (Liu et al., 2023; Dickman & Aga, 2023; Eberle, 2024).

Além dos AFFF convencionais, destacam-se:

- AR-AFFF, formuladas com polímeros hidrofílicos que criam membranas protetoras frente a solventes polares (Jahura et al., 2024);
- Espumas FP/FFFP e AR-FFFP, que combinam proteínas hidrolisadas e fluorossurfactantes para maior aderência.

A crescente preocupação com a toxicidade e persistência dos PFAS levou a avanços regulatórios em diversos países. Nos EUA, a 3M iniciou a retirada voluntária do PFOS entre 2000 e 2002, e a EPA estabeleceu a eliminação do PFOA até 2015 (COUSINS et al., 2020). A Austrália proibiu o uso de espumas com PFAS em treinamentos desde 2021 e impôs restrições severas a partir de 2022 (EPA NSW, 2024). O Departamento de Defesa dos EUA determinou a eliminação das AFFF até 2024 (MIL-PRF-32725), e países como Suécia, Dinamarca, Canadá e União Europeia seguem o mesmo caminho (ATEIA et al., 2023).

No Brasil, entretanto, a regulamentação ainda é incipiente. Não há normas específicas sobre o uso ou descarte de espumas contendo PFAS, nem valores orientadores para esses compostos (KEFFER et al., 2021; SILVA et al., 2018; PERSON, 2022). Já foram detectadas contaminações em rios e animais marinhos, mas as análises laboratoriais são limitadas. Essa lacuna regulatória expõe o país a riscos evitáveis e reforça a necessidade de alinhamento com práticas globais e com os princípios da Química Verde.

O histórico dessas espumas evidencia a urgência de migrar para alternativas realmente *fluorine-free*, tema abordado nos tópicos seguintes.

## **2.5. Espumas Fluorine-Free e Tensoativos de Silicone: Propriedades, Certificações e Perfis de Toxicidade**

As espumas F3 (*Fluorine-Free Foams*) surgem como alternativas mais sustentáveis às tradicionais espumas AFFF, por eliminarem quase completamente compostos fluorados. Segundo a BIOEX (2025), sua formulação baseia-se em três componentes principais: surfactantes de hidrocarbonetos (que reduzem a tensão superficial e formam a espuma), glicóis (reguladores de viscosidade e aditivos de desempenho), e polímeros (usados em versões AR-FFF com resistência ao álcool). Essa composição torna as espumas F3 mais biodegradáveis e com impacto ambiental significativamente reduzido quando comparadas às AFFF.

As espumas sem flúor (FFF ou F3) substituem os PFAS das AFFF por tensoativos de silicone e surfactantes não iônicos ou aniônicos, obedecendo a critérios de certificação que variam de <1 ppm de flúor orgânico total (*GreenScreen*, 2024) a <1 ppb em normas militares (MIL-F-24385; DOD, 2023). Originárias dos anos 1930, as espumas proteicas misturam proteínas hidrolisadas, bactericidas, inibidores de corrosão e solventes, enquanto as SF3 e AR-F3 fazem uso de siloxanos (D4, D5, D6) e carbossiloxanos em lugar dos fluorossurfactantes.

Entre os produtos identificados, destacam-se a BIOEX ECOPOL A3+ Mil-Spec *Synthetic Fluorine-Free Foam*, a AvioF3 Green Mil 3% *Fluorine-Free Foam Concentrate*, da *National Foam*, e a Solberg *Re-Healing Foam* RF3, fornecida pela empresa PacFire. Essas formulações *fluorine-free* têm se consolidado como alternativas promissoras às espumas tradicionais contendo PFAS, sendo projetadas para aplicações em incêndios Classe B, com foco na redução de impactos ambientais e toxicológicos, sem comprometer a eficiência extintora.

## 2.6. Restrições legais internacionais

A crescente preocupação com a toxicidade e persistência dos PFAS levou a avanços regulatórios em diversos países. Nos EUA, a 3M iniciou a retirada voluntária do PFOS entre 2000 e 2002, e a EPA estabeleceu a eliminação do PFOA até 2015 (COUSINS et al., 2020). A Austrália proibiu o uso de espumas com PFAS em treinamentos desde 2021 e impôs restrições severas a partir de 2022 (EPA NSW, 2024). O Departamento de Defesa dos EUA determinou a eliminação das AFFF até 2024 (MIL-PRF-32725), e países como Suécia, Dinamarca, Canadá e União Europeia seguem o mesmo caminho (ATEIA et al., 2023).

No Brasil, entretanto, a regulamentação ainda é incipiente. Não há normas específicas sobre o uso ou descarte de espumas contendo PFAS, nem valores orientadores para esses compostos (KEFFER et al., 2021; SILVA et al., 2018; PERSON, 2022). Já foram detectadas

contaminações em rios e animais marinhos, mas as análises laboratoriais são limitadas. Essa lacuna regulatória expõe o país a riscos evitáveis e reforça a necessidade de alinhamento com práticas globais e com os princípios da Química Verde

### **2.7. Global Harmonized System (GHS)**

O Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS) é um padrão internacional acordado pelas Nações Unidas que unifica critérios para classificar perigos físicos, à saúde e ao meio ambiente, além de padronizar elementos de comunicação como pictogramas, palavras de advertência e fichas de dados de segurança, com o objetivo de proteger a saúde humana e o ambiente (UNECE, 2023).

### **2.8. Data Assurance Score (DAS) e Data Quality Score (DQS)**

O *Data Quality Score (DQS)* mensura a proporção de parâmetros disponíveis em relação ao total de critérios avaliados, refletindo a cobertura de dados de classificação de perigo nas Fichas de de Segurança. Já o *Data Assurance Score (DAS)* combina o DQS com a transparência do produto (proporção de dados divulgados experimentalmente), ponderando a confiabilidade das informações. Valores mais altos de DQS e DAS indicam maior completude e robustez dos dados. A fórmula de DQS é a soma das proporções de dados gerais, específicos e experimentais, enquanto o DAS multiplica o DQS pelo fator de *disclosure* máximo observado (Holden et al., 2023).

### **2.9. Software ToxPi**

O ToxPi (*Toxicological Priority Index*) é um software de análise visual e decisão que integra dados de múltiplas fontes, transformando variáveis heterogêneas em “fatias” ponderadas de um diagrama polar. Cada fatia representa uma categoria de informação (por exemplo, toxicidade, persistência, exposição), cujos índices normalizados são combinados em uma pontuação total para facilitar a comparação e ranking de riscos entre substâncias ou locais (MARVEL et al, 2018).

## **3. OBJETIVOS**

Este trabalho de conclusão de curso tem como propósito avaliar criticamente as espumas

retardantes de incêndio, comparando formulações AFFF e F3 sob os prismas da química verde e da classificação de riscos pelo GHS, bem como integrar dados de segurança e toxicidade por meio do modelo ToxPi para subsidiar recomendações de substituição e normas brasileiras mais sustentáveis.

### **3.1. Objetivo Geral**

Analisar e comparar a performance técnico-ambiental de espumas AFFF e F3, aplicando os 12 princípios da química verde, os critérios de classificação do GHS e o software ToxPi, a fim de identificar agentes extintores que aliem eficácia operacional a menor impacto ambiental.

### **3.2. Objetivos Específicos**

- Levantar e categorizar, a partir de fichas de dados de segurança (FDS) e literatura, os parâmetros GHS aplicáveis às espumas AFFF e F3;
- Converter indicadores de risco de cada espuma em pontuações normalizadas e representar seus perfis de perigo no ToxPi;
- Avaliar a qualidade e a completude dos dados disponíveis (*Data Quality Score e Data Assurance Score*) para cada produto;
- Sugerir critérios de seleção e substituição de espumas com base em desempenho extintor, toxicidade e aderência aos princípios da química verde.

## **4. METODOLOGIA**

A seção de Metodologia descreve as etapas e procedimentos adotados para alcançar os objetivos propostos:

- Levantamento bibliográfico

Foram consultadas bases de dados científicas (SciELO, CAPES, PubMed, ScienceDirect) para coletar artigos, normas e fichas de dados de segurança (FDS) referentes a espumas AFFF e F3.

- Extração e categorização de parâmetros GHS

De cada FDS foram extraídos até 22 parâmetros de classificação de perigo segundo o GHS (p. ex., toxicidade oral aguda, mutagenicidade, biodegradabilidade), categorizados numericamente (0–5) e associados às cores do sistema de semáforo.

- Complementação de dados

Parâmetros ausentes nas FDS foram complementados com informações das bases ECHA, PubChem e CompTox, garantindo a cobertura mínima para aplicação do ToxPi.

- Conversão em notas normalizadas

Cada parâmetro foi convertido em escala de 0 (risco desconhecido) a 5 (risco mínimo) conforme critérios pré-definidos de cada categoria de perigo.

- Cálculo do *Data Quality Score (DQS)* e *Data Assurance Score (DAS)*

Para cada produto foram computados indicadores de qualidade e transparência dos dados, seguindo a metodologia de Holden et al. (2023).

- Aplicação do modelo ToxPi

As pontuações normalizadas foram importadas no software ToxPi v2.0 [Marvel et al., 2018], gerando diagramas polares de avaliação integrada dos perfis de risco de cada espuma.

- Análise comparativa

Com base nos scores e nos gráficos ToxPi, os produtos foram comparados quanto à performance extintora, toxicidade e aderência aos princípios da Química Verde.

- Elaboração de tabela de custos e desempenho

Foram coletados preços de mercado (fabricantes e CBMMG) e dados de eficácia para elaborar comparação de custo-benefício entre AFFF e F3.

- Síntese e discussão

Os resultados foram interpretados à luz dos princípios da Química Verde, normas GHS e literatura sobre PFAS, propondo critérios de seleção e substituição.

## 5. RESULTADOS

Nesta seção apresentam-se de forma sintética os principais achados deste estudo, incluindo (i) os perfis de risco integrados por meio do modelo ToxPi, (ii) os indicadores de qualidade e transparência dos dados (DQS/DAS), (iii) a comparação entre custos e desempenho em ensaios UL 162, e (iv) a avaliação das Fichas de Dados de Segurança segundo os critérios do GHS e os princípios da Química Verde. Cada tópico é ilustrado por figuras e tabelas correspondentes, visando fornecer uma visão clara e objetiva dos resultados obtidos.

### 5.1. Perfil toxicológico e ambiental integrado (ToxPi)

A avaliação integrada pelo modelo ToxPi revelou diferentes perfis de risco entre as espumas analisadas. Os diagramas mostrados na Figura 6 apresentam quatro “fatias” de igual peso, correspondentes a Saúde Ocupacional, Toxicidade Sistêmica, Ecotoxicidade Aquática e Comportamento Ambiental.

**Figura 5**– Diagramas ToxPi dos perfis de risco integrados para AVIO F3, BIOEX ECOPOL A3+, SOLBERG Re-Healing Foam RF3 e LIOVAC AFFF HC-AR 3-3.



Fonte: O autor, 2025;

A espuma AVIO F3 exibiu fatias mais completas, indicando menor risco e maior transparência de dados, ao passo que LIOVAC AFFF apresentou lacunas significativas (áreas em branco) em todas as categorias, refletindo ausência de informações e potenciais riscos não documentados. As espumas BIOEX e SOLBERG F3 apresentaram perfis intermediários, com

boa cobertura em Saúde Ocupacional e Toxicidade Sistêmica, mas riscos moderados em Ecotoxicidade Aquática e Comportamento Ambiental

## 5.2. Sistema de Cores baseado no Global Harmonized System

A análise comparativa das formulações de espumas extintoras foi conduzida com base na integração de informações toxicológicas e ambientais extraídas de duas fontes principais: (i) as Fichas de Dados de Segurança (FDS) dos produtos AVIO F3 GREEN MIL 3%, BIOEX ECOPOL A3, SOLBERG RE-HEALING FOAM 3% e LIOVAC AFFF HC/AR 3%, e (ii) dados experimentais obtidos do estudo independente publicado pelo programa SERDP (2022), que avaliou biodegradabilidade e parâmetros ecotoxicológicos de seis formulações *fluorine-free*. Não foram encontrados na literatura estudos científicos sobre o LIOVAC.

Os dados foram organizados em uma matriz contendo 22 parâmetros, selecionados conforme os critérios do Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS) e adaptados pelo modelo integrativo de Holden et al. (2023). Esses parâmetros foram agrupados em quatro categorias principais: Saúde Ocupacional, Toxicidade Sistêmica em Mamíferos, Ecotoxicidade Aquática e Comportamento Ambiental (PBFT – *Persistence, Bioaccumulation, Fate & Transport*).

**Tabela 2** – Sistema de cores e categorias GHS

Nota	Cor	Exemplo de Categoria GHS
5		Biodegradabilidade: rápida
4		Mutagenicidade, Categoria 2
3		Irritação aos olhos: Categoria 2A
2		Toxicidade Oral Aguda: Categoria 2
1		Tox. Dérmica Aguda: Categoria 1
0		Sem dados em FDS e literatura.

Fonte: O autor, 2025.

Cada parâmetro foi classificado com uma pontuação de 0 a 5 (Tabela 2), com base direta na categoria GHS correspondente:

- Nota 5: indica ausência de toxicidade (ex: "não classificado" ou "não aplicável" pelo GHS);
- Nota 4 a 2: indicam toxicidade crescente conforme a categoria GHS (ex: Categoria 4 = nota 4, Categoria 2 = nota 2);
- Nota 1: indica a classificação mais severa no GHS (Categoria 1, como "tóxico fatal" ou "carcinogênico conhecido");
- Nota 0: indica ausência total de dados (nem na FDS nem em literatura científica).

Essa conversão foi aplicada para cada parâmetro individual, respeitando os códigos de perigo (*H-codes*) e as descrições técnicas do GHS. Em casos de discrepância entre a FDS e dados experimentais, foi adotada a pontuação mais conservadora (a mais tóxica), seguindo o princípio da precaução. A Figura 6 ilustra os resultados obtidos.

**Figura 6** – Classificação, com sistema de cores, dos produtos e ingredientes

NOME/CAS	Dano/Irritação Ocular	Corrosão/Irritação Cutânea	Sensibilização Cutânea	Toxicidade a Órgão-Alvo (Exposição Única)	Toxicidade a Órgão-Alvo (Exposição Repetida)	Carcinogenicidade	Mutagenicidade em Células Germinativas	Toxicidade Reprodutiva	Toxicidade Oral Aguda (DL <sub>50</sub> )	Toxicidade Dérmica Aguda (DL <sub>50</sub> )	Toxicidade Inalatória Aguda	Sensibilização Respiratória	Toxicidade Aquática Aguda	Toxicidade Aquática Crônica	CL <sub>50</sub> (Peixe)	CE <sub>50</sub> Daphnia (48h)	CE <sub>50</sub> Daphnia magna (24h)	CE <sub>50</sub> (Alga)	NOEC (Peixe Crônico)	Mobilidade no Solo	Biodegradação	Potencial de Bioacumulação
BIOEX ECDPOL PREMIUM																						
112-34-5																						
Etileno Glicol																						
Sulfato de Alquila (1)																						
Sulfato de Alquila (2)																						
AVIO F3 GREEN MIL 3%																						
112-34-5																						
68439-57-6																						
4292-108																						
90583-18-9																						
142-31-4																						
1643-205																						
64665-57-2																						
SOLBERG RE-HEALING FOAM 3%																						
61789-40-0																						
112-34-5																						
Surfactante Aniônico																						
Surfactante Anfótero																						
58846-77-8																						
2634-33-5/2682-20-4																						

Fonte: O autor, 2025.

Posteriormente, os dados foram tratados em planilha compatível com o software ToxPi

GUI, no qual os 22 parâmetros foram agrupados em quatro fatias (*slices*) de peso igual (25% cada), permitindo a visualização gráfica integrada dos perfis toxicológicos e ambientais de cada produto.

### 5.3.Data Assurance Score e Data Quality Score

Além da pontuação individual, foi calculado o *Data Quality Score (DQS)* e *Data Assurance Score (DAS)*, conforme proposto por Holden et al., (2023), utilizando a fórmula:

$$DQS = a + b + c \quad (1)$$

$$DAS = DAS \times d \quad (2)$$

Em que:

a = quantidade de parâmetros avaliados / quantidade total de parâmetros (representa a proporção geral de dados disponíveis, considerando todos os parâmetros possíveis);

b = quantidade de parâmetros em nível de produto / quantidade total de parâmetros avaliados (mede a proporção dos dados que são específicos do produto, em relação ao total de dados disponíveis;

c = quantidade de parâmetros experimentais em nível de produto / quantidade de parâmetros em nível de produto (indica a qualidade da informação do produto, mostrando o quanto dela é baseada em dados experimentais reais não estimativas, literatura ou extrapolações);

d = proporção máxima de divulgação do produto (Corresponde à maior fração de dados divulgados para um produto em relação à totalidade dos parâmetros, ou seja, o produto mais transparente do grupo).

A Tabela 3 apresenta os indicadores DQS e DAS calculados para cada produto. O *Data Quality Score (DQS)* expressa a proporção de parâmetros informados, enquanto o *Data Assurance Score (DAS)* combina cobertura de dados e transparência. O produto com maior transparência foi AVIO F3 (DAS = 1,34), seguida por SOLBERG (0,90) e BIOEX (0,72). LIOVAC AFFF obteve DAS = 0,00, evidenciando ausência quase total de dados críticos.

**Tabela 3** – DQS e DAS para espumas F3 e AFFF

<b>Produto</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>DQS</b>	<b>DAS</b>
AVIO F3	0,636	0,636	0,071	1,000	1,344	1,34
BIOEX	0,682	0,683	0,067	0,500	1,430	0,72
SOLBERG	0,636	0,636	0,071	0,677	1,344	0,90
LIOVAC	0,045	0,045	1,000	0,000	1,091	0,00

Fonte: O autor, 2025.

#### 5.4.Comparação de Custos e Desempenho

A Tabela 4 compara custos unitários (20 L) e desempenho relativo conforme ensaios UL 162. As espumas F3 apresentam valores entre R\$ 1 165,00 e R\$ 1 570,00, frente a R\$ 648,00 das AFFF atuais. Embora todas as F3 obtenham desempenho equivalente em UL 162, o custo mais alto pode ser compensado por benefícios ambientais e de saúde pública.

**Tabela 4** - Custos (20 L) e desempenho relativo em UL 162

<b>Produto</b>	<b>Custo (20 L)</b>	<b>Desempenho vs AFFF</b>
LIOVAC	R\$ 648,00	–
BIOEX	R\$ 1570,00	Equiparável
AVIO F3	R\$ 1230,00	Equiparável
SOLBERG	R\$ 1 165,00	Equiparável

Produto	Custo (20 L)	Desempenho vs AFFF
---------	--------------	--------------------

Fontes: BIOEX (2025); National Foam (2025); PacFire (2025); CBMMG (2025).

### 5.5. Avaliação das Fichas de Segurança segundo o Global Harmonized System e Química Verde

A Tabela 2 sintetiza a conformidade das Fichas de Dados de Segurança (FDS) com critérios do GHS e princípios da Química Verde. As FDS de F3 (AVIO, BIOEX, SOLBERG) atendem integralmente aos requisitos de classificação GHS, pictogramas, frases H/P e palavra-sinal, além de estarem alinhadas aos princípios de redução de toxicidade e prevenção de poluição. Em contraste, LIOVAC AFFF não apresenta classificação GHS, pictogramas, frases H/P nem palavra-sinal, violando requisitos de transparência e impedindo gestão adequada de riscos.

**Tabela 5** – Comparação de FDS segundo GHS e Química Verde

Produto	GHS	Pictogramas	Frases H/P	Palavra-sinal	GHS atendido	Alinhado à Química Verde
LIOVAC	✗	✗	✗	✗	⚠	✗
AVIO F3	✓	✓	✓	✓	✓	✓
BIOEX	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SOLBERG	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Análise das FDS pelos critérios do GHS (ABNT NBR 14725-4:2009) e princípios da Química Verde (Anastas & Warner, 1998). Os símbolos ✓ = Presente/Atende Integralmente; ⚠ = Presente parcialmente e ✗ = Ausente/Não atende

## 6. DISCUSSÕES

Apresentados os resultados da análise comparativa na seção anterior, esta seção se aprofunda na discussão dos achados. O objetivo é interpretar as implicações dos perfis de risco gerados pelo software ToxPi, dos indicadores de qualidade de dados (DQS/DAS) e da avaliação de custo-desempenho, contextualizando-os com a literatura científica pertinente. A discussão abordará o balanço entre eficiência extintora e sustentabilidade, as limitações metodológicas do estudo e as implicações dos resultados para a normatização e adoção de espumas F3 no Brasil.

### **6.1. Desempenho versus sustentabilidade**

A adoção de espumas F3 resulta em tempo de extinção superior ao das AFFF convencionais (até 90 s para F3 vs. 45 s para AFFF) (Ateia et al., 2023). No entanto, ao considerar os perfis de risco integrados pelo ToxPi (Figura 6) e os escores DQS/DAS (Tabela 3), observa-se que as F3 apresentam fatias mais completas nas categorias de Saúde Ocupacional e Toxicidade Sistêmica, refletindo menor incerteza e menor potencial de risco. Em contraste, as AFFF, embora mais rápidas, exibem perfis com lacunas informacionais expressivas (LIOVAC) e maiores riscos em Ecotoxicidade Aquática e Comportamento Ambiental. Assim, o trade-off entre rapidez de ação e menor impacto ambiental torna-se explícito: a maior robustez de dados e menor toxicidade das F3 compensam o tempo de extinção mais longo, especialmente em cenários onde a saúde humana e a preservação ambiental são prioridades (Figura 6; Tabela 3).

### **6.2. Impactos Persistentes dos Perfluoroalquilsulfonatos: Mobilidade, Bioacumulação e Riscos à Saúde**

Devido à sua baixa volatilidade e alta solubilidade aquosa, os PFAS são transportados por longas distâncias em ambientes aquáticos, acumulando-se em solos, sedimentos e biota, sendo os de cadeia longa mais adsorvidos ao carbono orgânico do solo, o que retarda parcialmente sua mobilidade ambiental (Person, 2022). Essas características, associadas à alta solubilidade em água e à inacessibilidade a tratamentos convencionais, permitem que permaneçam ativos por décadas em solos e lençóis freáticos, configurando-os como Poluentes Orgânicos Persistentes (ITRC, 2023, p. 3.4). Além disso, os fluorotelômeros das AFFF continuam a gerar PFAS estáveis por degradação aeróbica em solos e lodos (Jahura et al., 2024), e seus moieties perfluoroalquílicos e perfluoroéteres resistem à degradação ambiental (Cousins et al., 2020), levando à classificação regulatória de alta prioridade na Europa (REACH).

Essa persistência técnica impõe riscos de longo prazo aos recursos hídricos e à saúde pública, pois PFOS e PFOA atravessam a barreira placentária, excretam-se no leite materno e estão associados a hipertensão gestacional, disfunções tireoidianas, aumento do colesterol, imunotoxicidade e câncer renal e testicular (Person, 2022). Bombeiros expostos a AFFF apresentam níveis elevados de PFAS no sangue, correlacionados a distúrbios hormonais e doenças hepáticas (Jahura et al., 2024). PFAS e derivados aderem a aerossóis, acumulam-se em solos e tecidos e disseminam-se globalmente, dificultando a remediação (CETESB, 2025; Seow, 2025).

Além disso, surfactantes sintéticos como o Phos-Chek WD881® causam necrose e anomalias em plântulas tropicais mesmo em baixas concentrações (Keffer et al., 2021). In vitro, as espumas 3M Light Water e Ansolite mostraram citotoxicidade em < 3%, aumento de ROS e ativação de Nrf2-ARE em células HepG2, com danos ao DNA observados apenas na Light Water a 0,038%, evidenciando riscos toxicológicos agudos e genotóxicos das AFFF (Ojo et al., 2022).

### **6.3. Espumas Fluorine-Free: Alternativas Sustentáveis e Perfis Toxicológicos**

Embora livres de PFAS, os siloxanos cíclicos D4, D5 e D6 são classificados pela ECHA como substâncias altamente persistentes, bioacumulativas e tóxicas, apresentando LC50 na faixa de  $\mu\text{g L}^{-1}$  para *Daphnia magna* (Chemsafe Consulting, 2024; SGS, 2024; NILU, 2015; Ecomundo, 2024) e efeitos hepáticos e reprodutivos em ratas (Siddiqui et al., 2006; DENMARK, 2014), além de serem encontrados em mel de lichia (ZHANG et al., 2025). Já os carbossiloxanos exibem maior hidrofiliabilidade e  $\text{LC}_{50} > 10 \text{ mg L}^{-1}$  em peixes ou algas, mas carecem de estudos sobre persistência e metabólitos, havendo sinais de possíveis efeitos endócrinos e bioacumulação (SSRN, 2023; DENMARK, 2014)

Em contraste, os surfactantes clorados quaternários de amônio (QACs) — como benzalcônio — apresentam toxicidade aguda mais elevada, com  $\text{EC}_{50}$  de 0,13–0,38  $\text{mg L}^{-1}$  para *D. magna* em 24 h (KAJ; WALLBERG; BRORSTRÖM-LUNDÉN, 2014),  $\text{LC}_{50} = 0,16$  ppm para *D. magna* em 48h ((TAMBORAN B2 PTY LTD, 2024) e  $\text{LC}_{50} \approx 70$  ppm em 96 h para peixes juvenis de *Oreochromis niloticus*, causando lesões branquiais e 100% de mortalidade em apenas 202 ppm (IKISA; BABATUNDE; HART, 2019), além de contribuir para resistência microbiana e formação de poliaminas (PENA et al., 2024; (PEREIRA; TAGKOPOULOS, 2019).

Em relação a análise do sistema de cores baseado no sistema GHS, a nível de

ingrediente, observa-se que as três cores predominantes são o verde e o amarelo, seguidos de pequenas manchas laranja. Isso indica que, individualmente, a maioria dos componentes possui classificações de risco baixo ou muito baixo, com poucos casos de toxicidade moderada. As células brancas – ainda presentes, mas em número reduzido – apontam lacunas pontuais para parâmetros específicos, mostrando que a cobertura de dados para ingredientes é relativamente razoável, embora não completa.

Em contraste, no nível de produto a quantidade de células brancas aumenta drasticamente. As espumas AFFF apresentam extensas áreas em branco, refletindo a ausência de dados críticos em sua FDS, especialmente para parâmetros de Toxicidade Sistêmica e Persistência Ambiental. Além disso, manchas roxas e vermelhas – associadas a ingredientes como PFOS e PFOA – indicam alto e muito alto risco em categorias-chave (por exemplo, carcinogenicidade e toxicidade aguda). As F3, embora exibam mais células verdes e amarelas do que as AFFF, também apresentam células brancas em parâmetros como Persistência Ambiental e alguns itens de Ecotoxicidade, evidenciando lacunas de informação que devem ser supridas.

Assim, enquanto ao nível de ingrediente a matriz de cores demonstra, em sua maior parte, baixo risco e boa cobertura de dados, ao nível de produto fica claro que a maior parte das brancas se concentra em formulações AFFF, mas também não é negligenciável nas F3. Essa disparidade ressalta a necessidade urgente de:

- Preenchimento das lacunas informacionais nas FDS (redução das células brancas);
- Priorização de ingredientes que tenham perfil verde/amarelo, evitando aqueles com manchas laranja/vermelha/roxo;
- Adoção de políticas que exijam transparência total (eliminação de células brancas) antes da aprovação de qualquer espuma retardante de incêndio.

#### **6.4. Limitações metodológicas e lacunas de dados**

Embora as FDS forneçam base para a avaliação, há restrições significativas de *disclosure*: o produto LIOVAC AFFF obteve DAS = 0,00, indicando ausência de dados críticos. Além disso, há escassez de estudos crônicos envolvendo F3, visto que muitas avaliações priorizam apenas toxicidade aguda ou testes de desempenho de curto prazo. Recomenda-se a realização de testes de biodegradação em longo prazo e ecotoxicidade crônica, bem como

estudos de bioacumulação e efeitos subletais em organismos aquáticos para preencher essas lacunas e fortalecer a robustez dos perfis de risco.

### **6.5. Implicações para normatização e adoção de alternativas**

Os resultados corroboram diretrizes internacionais: a EPA NSW (2024) e a norma MIL-PRF-32725 exigem certificação rigorosa de F3 (< 1 ppm de flúor) e eliminação de PFAS até 2024, enquanto o Brasil carece de normas específicas (Keffer et al., 2021; Person, 2022). Propõe-se incluir critérios de Química Verde (princípios de Anastas & Warner, 1998) e requisitos do GHS (ABNT NBR 14725-4:2009; UNECE, 2023) em editais de compras públicas e revisões normativas, garantindo que FDS contemplem todos os 22 parâmetros GHS e que produtos alternativos sejam avaliados pelo ToxPi e escores DQS/DAS antes da aprovação. Essa integração fortalecerá a transição para espumas realmente seguras e sustentáveis.

## **7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

Neste capítulo, são sistematizados os principais achados desta revisão crítica, destacando-se as contribuições e limitações do estudo, seguidas das reflexões finais sobre o desenvolvimento do trabalho e, fim, das recomendações para pesquisas e ações futuras.

### **7.1. Conclusões**

Os resultados desta revisão crítica demonstram que a adoção de espumas F3 (*Fluorine-Free Foam*) representa avanço significativo frente às espumas AFFF tradicionais, comprovando a hipótese de que formulações livres de PFAS podem conciliar desempenho extintor e menor impacto ambiental. A aplicação integrada dos 12 princípios da Química Verde, dos parâmetros do GHS e do modelo ToxPi permitiu:

- Confirmação dos objetivos geral e específicos

a) O Objetivo Geral — comparar performance técnico-ambiental de AFFF e F3 — foi atendido ao mostrar que as F3, apesar de levarem até o dobro do tempo para extinguir incêndios (45 s vs. 90 s), apresentam perfis de risco mais completos e transparentes no ToxPi (Figura 6) e escores DQS/DAS superiores (Tabela 3).

b) Os Objetivos Específicos foram cumpridos ao categorizar 22 parâmetros GHS, normalizá-los em pontuações para ToxPi e calcular DQS/DAS, revelando lacunas de dados nas FDS de AFFF (LIOVAC AFFF DAS=0) e alta cobertura nas F3 (AVIO F3 DAS=1,34).

- Contribuições ao tema

a) Demonstração de trade-off entre rapidez de ação e sustentabilidade, evidenciando que o pequeno acréscimo no tempo de extinção das F3 é compensado por menor toxicidade aguda e crônica, menor persistência ambiental e maior transparência de dados.

b) Validação do uso do ToxPi como ferramenta decisória para seleção de espumas, integrando toxicidade, ecotoxicidade e parâmetros ambientais em um único diagrama polar.

c) Identificação de necessidades de aprimoramento das FDS brasileiras, recomendando inclusão dos 22 parâmetros GHS e adesão aos princípios da Química Verde.

d) Elaboração de recomendações regulatórias, sugerindo a incorporação de selos de certificação (*GreenScreen*<sup>TM</sup>), limites máximos de fluoreto (<1 ppb MIL-F-24385; <1 ppm *GreenScreen*) e requisitos de transparência em editais de compras públicas.

- Confirmação das hipóteses

a) A hipótese de que espumas F3 poderiam oferecer segurança equivalente, com impactos ambientais reduzidos, foi parcialmente validada pelos perfis integrados de risco e pelos scores DQS/DAS ausentes para o LIOVAC.

b) A hipótese de que FDS de AFFF carecem de informações críticas foi confirmada pelo DAS nulo para o produto LIOVAC AFFF.

Em síntese, este trabalho apresenta subsídios técnico-científicos e práticos para orientar órgãos reguladores, corporações de bombeiros e indústrias na transição de espumas AFFF para F3, alinhando eficiência extintora aos princípios da Química Verde e às melhores práticas internacionais de classificação de riscos. As contribuições metodológicas — sobretudo a adaptação do modelo ToxPi a espumas retardantes — abrem caminho para futuros estudos de ciclo de vida e avaliação de alternativas emergentes.

## 7.2. Trabalhos futuros

Em face dos achados desta revisão e considerando tanto o arcabouço teórico-metodológico quanto os resultados práticos das duas fontes, sugerem-se as seguintes diretrizes para aprofundar e ampliar o conhecimento sobre espumas retardantes de incêndio:

- Estudos de toxicidade crônica e subletal

Investigar os efeitos de longo prazo das espumas F3 em organismos aquáticos e terrestres, incluindo bioacumulação e disfunções endócrinas, por meio de ensaios crônicos (28–90 dias) em *Daphnia magna*, peixes e comunitários microbianos em solo, seguindo protocolos OECD e ISO.

- Avaliação de biodegradabilidade em condições reais

Realizar testes de biodegradação simulando cenários de descarte em estações de tratamento de efluentes e solos contaminados por PFAS e siloxanos, aplicando métodos respirométricos e cromatográficos (HPLC-MS/MS) para monitorar degradantes intermediários e PFAAs gerados.

- Ensaios de ecotoxicidade multigeração

Desenvolver estudos multigeração em espécies-chave (peixes, anfíbios e invertebrados) para avaliar efeitos reprodutivos, de desenvolvimento e de comportamento sob exposição contínua a concentrações representativas de F3 e vestígios de fluorotelômeros, conforme recomendações de Jahura et al. (2024).

- Testes de compatibilidade operacional

Avaliar desempenho de espumas F3 em diferentes sistemas de aplicação (aspersão de ar, espuma aspirada, sistemas fixos) e climas brasileiros variados, medindo parâmetros como tempo de extinção (UL 162), penetração de espuma e manutenção de estabilidade em temperatura e pressão ambientes.

- Desenvolvimento de biossurfactantes

Investigar surfactantes de origem vegetal (biossurfactantes), como saponinas e rhamnolipídios, para formulações F3, testando suas propriedades espumantes, toxicidade aguda e persistência, de modo a avançar nos princípios de uso de matérias-primas renováveis e design para degradação (Princípios 7 e 10 de Anastas & Warner, 1998).

- Atualização normativa nacional

Propor ao INMETRO e à ANP que incorporem, em normas brasileiras, limites máximos de flúor orgânico total (< 1 ppm conforme GreenScreen™) e certificação militar (< 1 ppb MIL-F-24385), além de exigir nas Fichas de Dados de Segurança a inclusão dos 22 parâmetros GHS e indicadores de transparência (DQS/DAS).

- Implementação de selos de certificação e compras públicas sustentáveis

Recomendar a adoção obrigatória de certificações reconhecidas (GreenScreen Certified™, ECHA) em aquisições governamentais e públicas, com editais que ponderem não apenas custo e desempenho técnico, mas também scores ToxPi e índices de qualidade de dados (Holden et al., 2023).

- Estudos de ciclo de vida (LCA) comparativo

Conduzir análise de ciclo de vida completo para AFFF e F3, avaliando emissões de GEE, consumo de água e energia, geração de resíduos e custos ambientais, de forma a fundamentar decisões estratégicas e políticas de substituição.

- Criação de um banco de dados nacional de PFAS e alternativas

Desenvolver plataforma colaborativa no âmbito do CBMMG e universidades, reunindo dados experimentais, perfis ToxPi e updates normativos, para suporte contínuo a pesquisadores, reguladores e agentes operacionais.

Essas recomendações visam fortalecer a base científico-técnica, operacional e regulatória necessária para consolidar a transição segura e sustentável de espumas AFFF para F3, alinhando-se aos princípios da Química Verde e às melhores práticas internacionais.

## REFERÊNCIAS

3F. **De AFFF a F3 (Parte 1): História.** [S.l.]: 3FFF, 2023. Disponível em: <https://www.3fff.co.uk/es/actualidades/de-afff-a-f3-parte-1-historia/>. Acesso em: 10 maio 2025.

ATEIA, Mohamed; VAN BUREN, Jean; BARRETT, William; MARTIN, Todd; BACK, Gerard G. **Sunrise of PFAS Replacements: A Perspective on Fluorine-Free Foams.** ACS Sustainable Chemistry & Engineering, [s.l.], v. 11, n. 21, p. 7986–7996, 2023. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acssuschemeng.3c01124>. Acesso em: 7 maio 2025.

BATZELLA, Erich; ROSATO, Isabella; PITTER, Gisella; DA RE, Filippo; RUSSO, Francesca; CANOVA, Cristina; FLETCHER, Tony. **Determinants of PFOA serum half-life after end of exposure: a longitudinal study on highly exposed subjects in the Veneto Region**. *Environmental Health Perspectives*, [s.l.], v. 132, n. 7, p. 77001-1–77001-9, jul. 2024. DOI: 10.1289/EHP13152. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/EHP13152>. Acesso em: 21 jul. 2025.

BIOEX. **Differences between AFFF and FFF**. BIOEX, 2025. Disponível em: <https://www.bio-ex.com/en/our-expertises/aff-vs-fluorine-free-foam/>. Acesso em: 8 maio 2025.

BIOEX. **Firefighting foam viscosity**. BIOEX, 2025. Disponível em: <https://www.bio-ex.com/en/our-expertises/firefighting-foam-viscosity/>. Acesso em: 8 maio 2025.

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Portal de Periódicos da CAPES. **Busca por “AFFF”**. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/busador.html?q=AFFF>. Acesso em: 2 jul. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Poluentes Orgânicos Persistentes – POPs**. [s.d.]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/centroregional/a-convencao/poluentes-organicos-persistentes-pops/>. Acesso em: 13 maio 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **PFAS, PFOA, PFOS, PFOSF, PFBS e outros**. São Paulo: CETESB, 2025. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2025/03/PFAS-PFOA-PFOS-PFOSF-PFBS-e-outras.pdf>. Acesso em: 13 maio 2025.

CHEM GUARD. **General Foam Information**. 2005. Disponível em: <https://www.chemguard.com/pdf/General-Foam-Information.pdf>. Acesso em: 13 maio 2025.

CHEMSAFE CONSULTING. **New REACH restriction of D4, D5 and D6 substances**. Chemsafe Consulting, 18 jun. 2024. Disponível em: <https://www.chemsafe-consulting.com/2024/06/18/new-reach-restriction-of-d4-d5-and-d6-substances/>. Acesso em: 21 jul. 2025.

COUSINS, Ian T.; DEWITT, Jamie C.; GLÜGE, Juliane; GOLDENMAN, Gretta; HERZKE, Dorte; LOHMANN, Rainer; MILLER, Mark; NG, Carla A.; SCHERINGER, Martin; VIERKE, Lena; WANG, Zhanyun. **Strategies for grouping per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) to protect human and environmental health**. *Environmental Science: Processes & Impacts*, [s.l.], v. 22, p. 1444–1460, 2020. Acesso em: 7 maio 2025.

CSWAB. **Perfluorohexane sulfonic acid (PFHxS), its salts and PFHxS-related compounds – Draft Risk Profile**. April 2018. Disponível em: <https://cswab.org/wp-content/uploads/2018/09/PFHxS-POPs-Review-Committee-Risk-Profile-Draft-April-2018-1.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

DENMARK. **Evaluation of health hazards by exposure to siloxanes (D3, D4, D5, D6, HMDS): proposal of a health-based quality criterion for ambient air**. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency, 2014. Environmental Project No. 1531. Disponível em:

<<https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2014/01/978-87-93026-85-8.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2025.

DOD – U.S. Department of Defense. **MIL-PRF-32725: Performance Specification – Fire Extinguishing Agent, Fluorine-Free Foam (F3) Liquid Concentrate, for Land-Based, Fresh Water Applications.** 6 jan. 2023. Disponível em: <https://www.acq.osd.mil/eie/eer/ecc/pfas/docs/news/MIL-PRF-32725.pdf>. Acesso em: 8 maio 2025.

EBERLE, Michael. **PFAS forensics: best practices for unwinding complex PFAS sources.** [S.l.]: TRC Companies, 28 ago. 2024. Disponível em: <https://www.newmoa.org/wp-content/uploads/2024/07/EberleForensicsAugust2024.pdf>. Acesso em: 8 maio 2025.

ECOMUNDO. **EU bans D5/D6 in cosmetics: New regulations explained.** Ecomundo, 2024. Disponível em: <https://www.ecomundo.eu/en/blog/eu-bans-d5-d6-cosmetics-new-regulations-explained>. Acesso em: 21 jul. 2025.

EPA. **Fact Sheet: 2010/2015 PFOA Stewardship Program. 2023.** Disponível em: <https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/fact-sheet-20102015-pfoa-stewardship-program#what>. Acesso em: 10 maio 2025.

EPA. **Emerging Contaminants – Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and Perfluorooctanoic Acid (PFOA).** Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, mar. 2014. Disponível em: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/100002767.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

EPA. **Drinking Water Health Advisory for Perfluorooctanoic Acid (PFOA).** Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, maio 2016. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-05/documents/pfoa\\_health\\_advisory\\_final\\_508.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-05/documents/pfoa_health_advisory_final_508.pdf). Acesso em: 21 jul. 2025.

EPA. **Technical Fact Sheet – Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and Perfluorooctanoic Acid (PFOA).** EPA 505-F-17-001. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2017. Disponível em: [https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/static/files/2017-12/documents/ffrofactsheet\\_contaminants\\_pfos\\_pfoa\\_11-20-17\\_508\\_0.pdf](https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/static/files/2017-12/documents/ffrofactsheet_contaminants_pfos_pfoa_11-20-17_508_0.pdf). Acesso em: 21 jul. 2025.

EPA NSW. **Regulation of PFAS firefighting foams.** 2024. Disponível em: <https://www.epa.nsw.gov.au/Your-environment/Chemicals/PFAS-in-NSW/Regulation-of-PFAS-firefighting-foams>. Acesso em: 29 abr. 2025.

EPA NSW. **Guidance on the management of firefighting foams containing PFAS.** 2024. Disponível em: <https://www.epa.nsw.gov.au/Your-environment/Chemicals/PFAS-in-NSW/Regulation-of-PFAS-firefighting-foams/Guidance>. Acesso em: 29 abr. 2025.

FARIAS, Luciana A.; FÁVARO, Déborah I. T. **Vinte anos de Química Verde: conquistas e desafios.** Química Nova, São Paulo, v. 34, n. 6, p. 1089–1093, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/8NM8K3MNf5tsZTZ84HCJ3mf/>. Acesso em: 3 maio 2025.

GEOSYNTEC CONSULTANTS. **Appendix C: Kow, Koc and Mass Distribution Calculations. 2019.** Disponível em: <https://files.nc.gov/ncdeq/GenX/consentorder/paragraph-16/FW-CAP-FINAL-12-31-2019-Appendix-C.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

GREENSCREEN. **Standard for Firefighting Foam: Class A Foam Concentrates, Class B Foam Concentrates, Class A Wetting Agents, Class A&B Wetting Agents, Surrogate Liquids.** Version 2.2.1. September 2024. Disponível em: [https://www.greenscreenchemicals.org/images/ee\\_images/uploads/resources/CPA\\_GSC\\_Firefighting\\_Foam\\_Standard\\_v2-2-1\\_\(1\).pdf](https://www.greenscreenchemicals.org/images/ee_images/uploads/resources/CPA_GSC_Firefighting_Foam_Standard_v2-2-1_(1).pdf). Acesso em: 8 maio. 2025.

IKISA, K. G.; BABATUNDE, B. B.; HART, A. **Acute toxicity of benzalkonium chloride mixture with treated produced water to juveniles of freshwater tilapia - *Oreochromis niloticus*.** Journal of Applied Sciences and Environmental Management, [s. l.], v. 23, n. 7, p. 1289–1293, 2019. Disponível em: <https://www.bioline.org.br/pdf?ja19174>. Acesso em: 21 jul. 2025.

INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL (ITRC). **AFFF (Aqueous Film-Forming Foam).** Washington, D.C.: ITRC, 2022. Disponível em: <https://pfas-1.itrcweb.org/3-firefighting-foams/>. Acesso em: 3 abr. 2025.

JAHURA, Fatema Tuj; MAZUMDER, Nur-Ul-Shafa; HOSSAIN, Md Tanjim; KASEBI, Arash; GIRASE, Arjunsing; ORMOND, R. Bryan. **Exploring the prospects and challenges of fluorine-free firefighting foams (F3) as alternatives to aqueous film-forming foams (AFFF): a review.** ACS Omega, [s.l.], v. 9, n. 36, p. 37430–37444, 2024. Acesso em: 7 maio. 2025.

KAJ, Lennart; WALLBERG, Petra; BRORSTRÖM-LUNDÉN, Eva. **Quaternary ammonium compounds: analyses in a Nordic cooperation on screening.** Oslo: Norwegian Environment Agency, 2014. (Report M-263). Disponível em: <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m263/m263.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

KEFFER, J. F. et al. **Efeito de retardantes de fogo sobre a germinação de espécies florestais tropicais.** Ciência Florestal, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 725–748, 2021. Acesso em: 24 abr. 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/QXcJRtHGd87NPPmP96Lmrv/>. Acesso em: 10 mai. 2025.

KLEMM, P. et al. **Aqueous film forming foams: An overview of their classification, film formation, chemical composition, toxicity and regulations.** Environmental Chemistry Letters, [s.l.], 2024. DOI: 10.1007/s10311-024-01739-x.

KNUDSEN EFFUSION METHOD. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 15, p. 9427–9436, 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7505237/>. Acesso em: 23 jul. 2025.

LIU, Min et al. **High persistence of novel polyfluoroalkyl betaines in aerobic soils.** Environmental Science & Technology, Washington, DC, v. 57, n. 19, p. 7234–7244, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.2c07395>. Acesso em: 8 maio 2025.

MARVEL, Skylar W.; TO, Kevin; GRIMM, Frank A.; WRIGHT, Fred A.; RUSYN, Ivan; REIF, David M. **ToxPi Graphical User Interface 2.0: dynamic exploration, visualization, and sharing of integrated data models.** BMC Bioinformatics, [s.l.], v. 19, n. 1, p. 80, 5 mar. 2018. DOI: 10.1186/s12859-018-2089-2. Disponível em: <https://bmcbioinformatics.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12859-018-2089-2>. Acesso em: 21 jul. 2025.

MIRANDA, Daniele A. et al. **Spatial and temporal distribution of perfluoroalkyl substances (PFAS) detected after an aqueous film forming foam (AFFF) spill.** *Journal of Hazardous Materials*, [s.l.], v. 437, p. 129294, 2022. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&source=all&id=W4399377918>. Acesso em: 3 jul. 2025.

MONTAGNOLLI, Renato Nallin et al. **Metabolical shifts towards alternative BTEX biodegradation intermediates induced by perfluorinated compounds in firefighting foams.** *Chemosphere*, v. 163, p. 450–458, 2016. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.08.038. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653516318884>. Acesso em 02 jul. 2025.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION (NCBI). **Perfluorohexanoic Acid – PubChem Compound Summary.** PubChem, 2025. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Perfluorohexanoic-Acid>. Acesso em: 23 jul. 2025.

NILU – Norsk institutt for luftforskning. **Siloxanes: Soft, Shiny, and Dangerous?** NILU, 2015. Disponível em: <https://nilu.com/2015/07/siloxanes-soft-shiny-and-dangerous/>. Acesso em: 23 jul. 2025.

PELTZER, Eike. **How does AFFF work?** EPFIRE, 2023. Disponível em: <https://epfire.de/en/afff-foam>. Acesso em: 09 maio 2025.

PENA, Sheareazade A.; SALAS, Juana G.; GAUTAM, Nilisha; RAMOS, Ashley M.; FRANTZ, Aubrey L. **Sublethal exposure to common benzalkonium chloride leads to antimicrobial tolerance and antibiotic cross-resistance in commensal and opportunistic bacterial species.** *Antibiotics*, Basel, v. 3, n. 2, p. 41, 2024. DOI: 10.3390/antibiotics3020041. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-8007/3/2/41>. Acesso em: 21 jul. 2025.

PEREIRA, Beatriz Merchel Piovesan; TAGKOPOULOS, Ilias. **Benzalkonium chlorides: uses, regulatory status, and microbial resistance.** *Applied and Environmental Microbiology*, [s. l.], v. 85, n. 13, e00377-19, 2019. DOI: 10.1128/AEM.00377-19. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6581159/>>. Acesso em: 25 jul. 2025.

PÉREZ, Francisca; NADAL, Martí; NAVARRO-ORTEGA, Alicia; FÀBREGA, Francesc; DOMINGO, José L.; BARCELÓ, Damià; FARRÉ, Marinella. **Accumulation of perfluoroalkyl substances in human tissues.** *Environment International*, v. 59, p. 354–362, 2013. DOI: 10.1016/j.envint.2013.06.004. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23892228/>. Acesso em 01 jul. 2025.

PERSON, Ana Laura. **Compostos Per e Polifluoralquílicos, uma síntese do conhecimento atual.** Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/248b8012-4e38-4450-bba0-ae1cefd83883/AnaLauraPerson%20PQI22.pdf>. Acesso em 06 maio. 2025.

POZO, Karla et al. **Using large amounts of firefighting foams releases per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) into estuarine environments: A baseline study in Latin America.** *Marine Pollution Bulletin*, [s.l.], v. 178, p. 113583, 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X22006208?via%3Dihub>. Acesso em: 3 jul. 2025.

PUBCHEM. **6:2-Fluorotelomer sulfinyl amido sulfonic acid**. National Center for Biotechnology Information. Disponível em: [https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6\\_2-Fluorotelomer-sulfinyl-amido-sulfonic-acid](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6_2-Fluorotelomer-sulfinyl-amido-sulfonic-acid). Acesso em: 08 maio 2025.

ROSATO, I.; BONATO, T.; FLETCHER, T.; BATZELLA, E.; CANOVA, C. **Estimation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) half-lives in human studies: A systematic review and meta-analysis**. *Science of the Total Environment*, v. 915, p. 168513, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168513.

RUSSELL, M. H.; HIMMELSTEIN, M. W.; BUCK, R. C. **Inhalation and oral toxicokinetic of 6:2 FTOH and its metabolites in mammals**. *Chemosphere*, [s.l.], v. 120, p. 328–335, 2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25180935/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

RUSSELL, Mark H.; NILSSON, Helena; BUCK, Robert C. **Elimination kinetics of perfluorohexanoic acid in humans and comparison with mouse, rat and monkey**. *Toxicology*, v. 303, p. 36–46, 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24050716/>. Acesso em: 23 jul. 2025.

SCHEDIN, Erika. **Effect of organic carbon, active carbon, calcium ions and aging on the sorption of per- and polyfluoroalkylated substances (PFASs) to soil**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Swedish University of Agricultural Sciences. Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/providers/125347/records/6749836d7625988a3722f969>. Acesso em: 23 jul. 2025.

SERRANO, M. del C. D. **Química verde: um novo enfoque para o cuidado do meio ambiente**. *Educación Química, México*, v. 20, n. 5, p. 412–420, out. 2009. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/64402>. Acesso em 5 maio. 2025.

SILVA, Silvana Carmo da; PUSCEDDU, Fabio Hermes; PEREIRA, Camilo Dias Seabra; MARANHO, Luciane Alves. **Toxicidade de líquidos geradores de espuma (LGE) ao ambiente aquático através do bioensaio utilizando Daphnia similis**. *Anais do Encontro Nacional de Pós-Graduação – VII ENPG*, v. 2, p. 189–193, 2018. ISSN: 2594-6153. Disponível em: <https://periodicos.unisanta.br/ENPG/article/view/1586>. Acesso em: 15 mai. 2025.

SIDDIQUI, Waheed H. et al. **A two-generation reproductive toxicity study of octamethylcyclotetrasiloxane (D4) in rats exposed by whole-body vapor inhalation**. *Reproductive Toxicology*, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 202–215, 2006. DOI: 10.1016/j.reprotox.2006.11.011. ISSN 1873-1708. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&id=W2110737085#:~:text=F0%20animals%20were%20mated%20once,considered%20to%20be%20700%20ppm>. Acesso em: 21 jul. 2025.

SOARES, Aluísio; BERTOLO, Reginaldo A. **Ocorrência de compostos per e poli-fluoralquilados (PFAS) em água subterrânea contaminada por efluentes domésticos**. São Paulo: Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, [s.d.]. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/0ecaec75-a3e9-4adc-b2f4-67bdd3b572b0/3119888.pdf>. Acesso em: 13 maio 2025.

SSRN. **Toxicological profiles of novel carbosiloxanes**. SSRN Electronic Journal, 2023. Disponível em: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=5197478](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5197478). Acesso em: 23 jul. 2025.

TAMBORAN B2 PTY LTD. **Beetaloo Sub-basin Shenandoah South E&A Program EMP**. Darwin, 28 nov. 2024. Disponível em: [https://environment.nt.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0005/1472126/tam1-3-modification5-regulation22-additional-drilling-chemical.pdf](https://environment.nt.gov.au/__data/assets/pdf_file/0005/1472126/tam1-3-modification5-regulation22-additional-drilling-chemical.pdf). Acesso em: 25 jul. 2025.

TICKNER, Joel A. et al. **Sustainable and Informed Substitution of AFFF: A Safer Chemicals and Firefighting Performance Framework**. Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP), Project WP19-1424, 2022. Disponível em: <https://www.serdp-estcp.org/>. Acesso em: 8 maio 2025.

TUREKOVÁ, Ivana; BALOG, Karol. **The environmental impacts of fire-fighting foams. Research Papers Faculty of Materials Science and Technology in Trnava – Slovak University of Technology in Bratislava, Trnava**, n. 29, p. 111–120, 2010. Disponível em: [https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/doc/casopis\\_Vedecke\\_prace/29/12\\_turekova.pdf](https://www.mtf.stuba.sk/buxus/docs/doc/casopis_Vedecke_prace/29/12_turekova.pdf). Acesso em: 6 maio 2025.

UNECE – UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. **Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS)**. 10. rev. Genebra: UNECE, 2023. Disponível em: <https://unece.org/sites/default/files/2023-07/GHS%20Rev10e.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2025.

WIKIPEDIA. **Perfluorohexanesulfonic acid**. Wikipedia, the free encyclopedia. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Perfluorohexanesulfonic\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Perfluorohexanesulfonic_acid). Acesso em: 08 maio 2025.

YBIRMA, Luis. **Utilização de espumas no combate a incêndios**. Portal Incêndio, 2022. Disponível em: <https://portalincendio.com.br/Publicacao.aspx?id=78817>. Acesso em: 8 maio 2025.

ZHANG, Yuqiang; ZENG, Shanjin; ZHU, Xinhua; JIA, Xuhong. **Physicochemical properties of aqueous film-forming foams based on short fluorocarbon surfactant-graft hydrophilic functional groups**. ACS Omega, [s.l.], v. 9, n. 13, p. 13427–13436, 2024. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsomega.4c04414>. Acesso em: 30 jun. 2025.

ZHANG, Mengke; YAMADA, Kyle; BOURGUET, Stephen; GUELFO, Jennifer; SUUBERG, Eric M. **Vapor pressure of nine perfluoroalkyl substances (PFASs) determined using the SGS**. CH regulations update: EU tightens regulations on D4, D5, D6 in cosmetic products. SGS Ticmall, 2024. Disponível em: [https://ticmall.sgs.com/tc/blog\\_details/ch-regulations-update-safeguarding-the-environment-eu-tightens-regulations-on-d4-d5-d6-in-cosmetic-products](https://ticmall.sgs.com/tc/blog_details/ch-regulations-update-safeguarding-the-environment-eu-tightens-regulations-on-d4-d5-d6-in-cosmetic-products). Acesso em: 23 jul. 2025.

ZHANG, Cuiping et al. **Evaluation of Litchi Honey Quality in Southern China**. Foods, Basel, v. 14, n. 3, p. 510, 2025. DOI: 10.3390/foods14030510. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11817087/>. Acesso em: 21 jul. 2025.

