

UTILIZAÇÃO DE ESPUMAS BIODEGRADÁVEIS NO COMBATE A INCÊNDIOS FLORESTAIS

Use of biodegradable foams on wildfire

Marco Aurélio Stimamiglio Timmermann

Bombeiro Militar - Serviço de Segurança Contra Incêndios - São José. Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: timmermann@cbm.sc.gov.br

Tadeu Luiz Alonso Pelozzi

Bombeiro Militar - 1ª Companhia do 2º Batalhão de Bombeiros Militar - Curitiba. Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. Bacharel em Química. Especialista em Gestão Pública. Universidade do Estado de Santa Catarina. E-mail: pelozzi@cbm.sc.gov.br

Amir Antônio Martins de Oliveira Junior

Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos - LabCET, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, CEP: 88.040-900 Florianópolis, SC, Brasil.

RESUMO

A humanidade convive com a ocorrência de incêndios florestais desde o início de sua existência, porém nos últimos anos a quantidade e intensidade dos incêndios aumentou de forma significativa, assim como seus efeitos negativos. Os incêndios em vegetação do tipo turfa representam um problema em especial, tendo em vista que emitem gases e materiais particulados em maior quantidade e toxicidade. Apesar disso, as técnicas de prevenção e combate têm evoluído. Este trabalho visa identificar o uso de espumas como intensificadores de supressão dos incêndios florestais, com especial ênfase na toxicidade das espumas mais comuns, além de avaliar as opções de espumas com componentes biodegradáveis que estão em desenvolvimento.

Palavras-chave: Incêndios florestais; Turfa; Espumas; Toxicidade. Biodegradável.

ABSTRACT

Humanity has lived with forest fires since the beginning of its existence, but in recent years the number and intensity of fires has increased significantly, as have their negative effects. Fires in peat-type vegetation pose a particular problem, given that they emit gases and particulate matter in greater quantities and toxicity. Despite this, prevention and combat techniques have evolved. This work aims to identify the use of foams as forest fire suppression enhancers, with special emphasis on the toxicity of the most common foams, in addition to evaluating the options for foams with biodegradable components that are under development.

Keywords: Forest fires; Peat; Foam; Toxicity; Biodegradable.

1 INTRODUÇÃO

A combustão pode ser considerada a reação química mais relevante para a humanidade. O controle da combustão ocorre há pelo menos 100.000 anos e neste tempo os humanos a utilizam para inúmeros fins, mas principalmente para cozinhar, aquecimento e geração de energia. Atualmente, a queima de combustíveis orgânicos representa 80,9% da produção anual de energia do planeta (IEA, 2021).

Incêndios florestais são eventos comuns que ocorrem há milhões de anos no planeta. Alguns de seus efeitos podem ser benéficos para o ambiente, na medida em que auxiliam plantas que necessitam de queimas para espalhar suas sementes, matam doenças e insetos que atacam as plantas, bem como removem excesso de detritos do chão, permitindo maior acesso aos nutrientes que necessitam de luz solar. Entretanto, a quantidade e intensidade dos incêndios nos últimos anos desequilibra os efeitos para o lado negativo, sendo a devastação deixada por estes eventos muito mais significativa.

Conforme o Congressional Research Service (2021), entre 2011 e 2020 houve uma média anual de 62.805 incêndios em vegetação nos Estados Unidos, com uma área média de 3.035.000 de hectares queimados. No Brasil, estima-se uma média anual de 184.120 focos e 28.336.300 hectares no mesmo período, de acordo com dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2021). Estima-se que os incêndios ocorridos em vegetação do tipo turfa no ano de 1997 liberaram algo entre 13 % e 40 % da média anual global de emissão de carbono a partir de combustíveis fósseis (PAGE et al., 2002). Na Indonésia, estima-se que são liberados 2 Gt de CO₂ por ano, ou aproximadamente 5% de toda a emissão causada por atividades humanas (UNITED NATIONS, 2017).

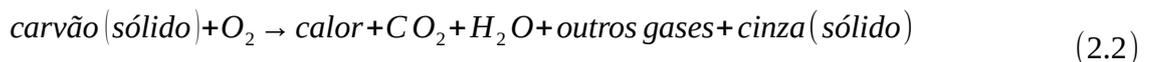
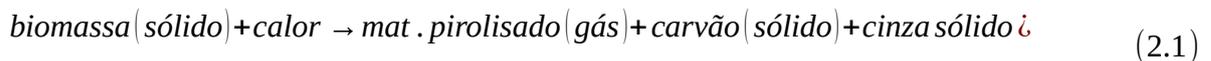
Do ponto de vista dos seus efeitos diretos, os incêndios florestais:

- 1 Causam perda de cobertura vegetal, que é transformada em diversos produtos de combustão sendo o principal o dióxido de carbono, contribuindo diretamente para o aquecimento global. A perda de vegetação pode também remover a proteção que ela oferece contra deslizamentos, causando ainda danos indiretos como assoreamento de rios e redução de fluxos de água.
- 2 Causam danos ao solo, destruindo a cobertura orgânica, modificando suas propriedades e expondo-o a intempéries.
- 3 Afetam o equilíbrio ecológico local, causando a morte de animais diretamente, ou pela destruição de seu alimento e habitat.
- 4 A fumaça causa irritação dos olhos e do trato respiratório, podendo causar distúrbios mais graves como função pulmonar reduzida e bronquite.
- 5 Finalmente, colocam em risco pessoas que moram próximas ao incêndio, suas propriedades, bem como os combatentes.

Este trabalho visa descrever o uso de espumas no combate a incêndios florestais, especialmente em camadas de turfa, com foco no potencial de utilização de espumas feitas com componentes biodegradáveis.

2 DESCRIÇÃO FENOMENOLÓGICA

As reações de oxidação envolvem a troca de átomos entre combustível e oxidante. São globalmente exotérmicas, tendo em vista que os produtos possuem menos energia do que os reagentes, resultando na liberação de energia na forma de calor, além de produtos nas fases sólida e gasosa. A combustão que ocorre na vegetação pode ser aproximada por duas rotas mais relevantes: pirólise (eq. 2.1) e oxidação (eqs. 2.2 ou 2.3) (REIN, 2013)



Os produtos gerados pela oxidação de combustíveis orgânicos dependem das características da queima. Se a oxidação for completa, obtém-se como produtos o dióxido de carbono, CO_2 , a água, H_2O , e nitrogênio, N_2 . Esta condição é mais facilmente obtida em condições de chama pré-misturada, na qual o oxidante e o combustível estão misturados de forma homogênea previamente à combustão. Em condições naturais, a combustão completa é extremamente difícil de ocorrer. Diferentemente de chamas pré-misturadas, o combustível e o oxidante têm origem em regiões distintas, não estando homogeneamente misturados entre si. Nestas situações são obtidos subprodutos característicos da combustão incompleta.

Figura 1 - Demonstração da ocorrência de combustão por embrasamento e por chamas, típicas de incêndios florestais



Fonte: Oliveira (2021).

Embrasamento é o tipo de combustão sem chama que ocorre de forma lenta, a baixas temperaturas, que se propaga através de combustíveis porosos. Sustenta-se através do calor gerado quando a combustão ocorre diretamente na superfície do sólido. A química do embrasamento pode ser aproximada por um processo de duas etapas: a pirólise de biomassa (Eq. 1) produz o carvão que é então oxidado in-situ (Eq. 2) (HADDEN et al., 2013). A reação pode ocorrer na superfície do sólido, situação na qual a atmosfera é a fonte de oxigênio, além da possibilidade de ocorrer em profundidade em materiais porosos, na qual o oxigênio chega até a reação através dos poros.

O embrasamento produz emissões maiores de CO e CH₄, compostos orgânicos voláteis, hidrocarbonetos poliaromáticos e material particulado do que a combustão em chamas. Incêndios de turfa tropical podem emitir de três a seis vezes mais partículas por unidade de carbono queimada do que incêndios em pastagens, florestas ou plantações (TURETSKY et al., 2014). Ainda, o embrasamento pode ocorrer sob baixas concentrações de oxigênio. Por exemplo, as concentrações críticas de oxigênio para ignição natural e forçada de turfa são 12% e 11%, respectivamente (YANG et al., 2018).

O embrasamento é controlado por dois mecanismos que envolvem o suprimento de oxigênio e a perda de calor. Em condições naturais, o oxigênio é conduzido à frente de combustão principalmente por difusão. Foi demonstrado experimentalmente (OHLEMILLER, 1990) que o embrasamento horizontal possui uma estrutura bidimensional e é controlado por difusão do oxigênio. Quando há um fluxo de ar forçado sobre o combustível, o transporte de oxigênio é potencializado e as perdas de calor são mais significativas, formando assim dois mecanismos que competem entre si (YANG et al., 2018). Quanto à frente de combustão, a taxa de oxidação e a perda de calor são fortemente dependentes da concentração de oxigênio. Concentrações menores deixam mais resíduos, sugerindo que uma frente de combustão mais larga é necessária para manter a propagação (YANG et al., 2018).

Em incêndios florestais, o embrasamento pode ocorrer em diversos tipos de vegetação, mas com maior frequência em troncos de árvores remanescentes do incêndio após a passagem das chamas e, principalmente, em turfas. A turfa representa um problema maior, visto que contribui significativamente para a quantidade total de vegetação consumida, ocorrendo dentro do solo, propagando-se de forma horizontal e vertical. Pode persistir sob baixas temperaturas, alto teor de umidade e baixas concentrações de oxigênio e, como resultado, queimar por longos períodos (por exemplo, semanas, meses ou ocasionalmente mais), mesmo com ventos, chuva e mudanças nas condições do incêndio. Embora os incêndios com chama possam se mover a velocidades até 10 km/h, os incêndios por embrasamento podem ser tão lentos quanto 0,5 m por semana (TURETSKY et al., 2014). Incêndios em turfa produzem gases tóxicos e materiais particulados em taxas maiores que as incêndios por chamas, a sua extinção envolve altos custos e com frequência não produz os resultados desejados.

As duas formas de combustão ocorrem simultaneamente em incêndios florestais. Por exemplo, o embrasamento em turfa pode fornecer um caminho para iniciar um incêndio por chamas (Figura 2a). Apesar disto, mesmo em anos de incêndios severos a queima em turfeiras boreais não perturbadas

normalmente é limitada aos 10 a 20 cm superiores de turfa (TURETSKY et al., 2014). Embora a taxa de liberação de energia em incêndios com chama seja maior do que incêndios por embrasamento, as chamas produzem altas temperaturas na superfície do solo por pouco tempo, com pouco aquecimento das camadas de solo mais rasas. A maior duração do embrasamento transfere mais calor para os solos e plantas, atingindo-os mais profundamente, podendo levar a um consumo de combustível que pode ser duas ordens de magnitude maior do que quando há chamas (TURETSKY et al., 2014).

De forma geral, à medida que um incêndio florestal se propaga, converte a vegetação e o solo em carvão, e o carvão em cinzas. No fim, a camada de cinzas e pedaços carbonizados permanecem, restando um vazio no lugar da vegetação. A maior parte do conteúdo orgânico da vegetação é convertida em produtos da combustão. Na vegetação e no solo ocorrerá a chegada sucessiva de quatro frentes de trocas térmicas e reações químicas distintas, conforme apresentado a seguir e na Figura 2b (REIN, 2013; RAMADHAN et al., 2017):

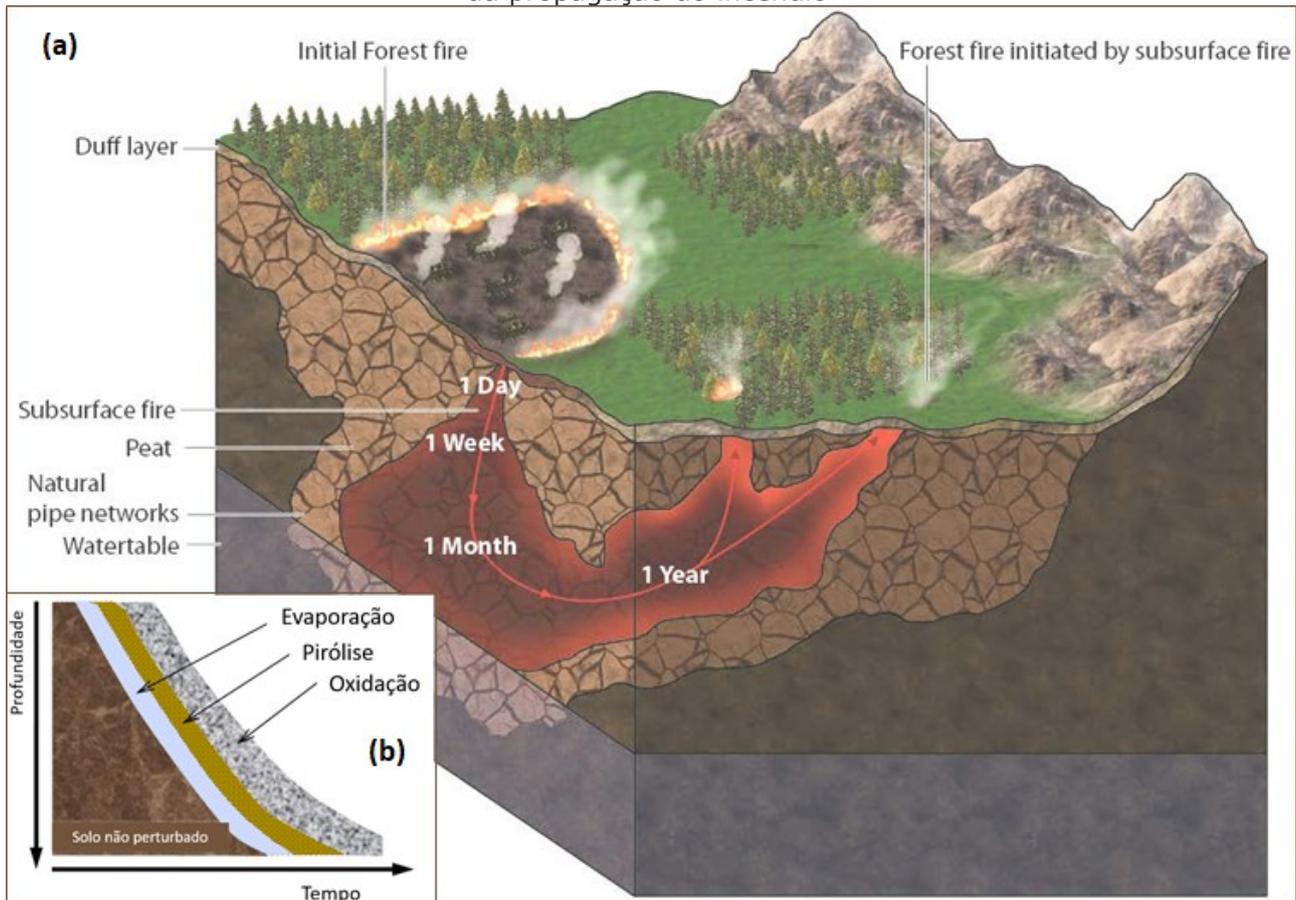
- Frente de pré-aquecimento: o calor da reação de oxidação é conduzido em direção à vegetação não perturbada, aquecendo-a até temperaturas onde inicia a evaporação da água.

- Frente de evaporação: a absorção do calor ocorre dentro de uma faixa de temperaturas abaixo de 100°C, produzindo vapor d'água e secando a vegetação.

- Frente de pirólise: na qual a temperatura continua a aumentar devido ao calor. O aquecimento acima de 150°C aumenta a taxa de pirólise até que toda a vegetação reaja. Carvão e material pirolisado são formados como produtos (Eq. 1). O carvão permanece onde foi formado e o material pirolisado é liberado para a atmosfera.

- Frente de oxidação. Esta frente ocorre atrás das demais, alimentando-as (no embrasamento, é a frente mais próxima da fonte de oxigênio, que pode ser a atmosfera para incêndios superficiais, ou o sistema de dutos em incêndios profundos). É a frente na qual ocorre a reação de combustão de fato, consumindo a biomassa seca e o carvão, sendo a oxidação do carvão muito mais significativa (Eq. 2) (HADDEN et al., 2012). A oxidação de materiais ricos em carbono domina o processo em temperaturas acima de 280 °C (CANCELLIERI et al., 2011), e o aquecimento acima desta temperatura aumenta a taxa de oxidação até que todo o carvão tenha reagido. Esta frente sobrepõe-se à frente de pirólise, e em altas temperaturas ambas as reações podem competir pelo consumo de biomassa, dependendo da disponibilidade de oxigênio e das condições térmicas (HADDEN et al 2012).

Figura 2 - (a) Propagação subterrânea de um incêndio iniciado em um determinado local na superfície, podendo iniciar um incêndio em local distinto; (b) Representação das quatro frentes da propagação do incêndio



Fonte: Rein (2013).

A propagação dos incêndios florestais também possui forte dependências de fatores locais, como características da vegetação e do solo, inclinação do terreno, incidência de vento e clima. Conforme Christensen et al. (2020), as taxas de propagação de incêndios em forma de chama crescem não linearmente com a inclinação do terreno e quando a propagação é para cima, ou quando a propagação coincide com a direção do vento. As taxas decrescem quando a propagação é para baixo ou contra o vento. Tal comportamento é explicado pela transferência de calor da chama para o combustível. Tanto a inclinação quanto o vento fazem com que a chama se incline em direção ao combustível, aumentando a radiação e a convecção. O mesmo ocorre para a combustão por embrasamento, mas a influência é muito menos significativa.

3 UTILIZAÇÃO DE ESPUMAS PARA COMBATE A INCÊNDIOS

Existem diversas técnicas utilizadas no combate a incêndios florestais. Dentre as mais comuns, destacam-se a produção de aceiros, o emprego de abafadores, além da utilização de água. A água é o agente extintor mais utilizado, dada a sua ampla disponibilidade, baixo custo, facilidade de transporte, além de possuir o calor específico alto, funcionando de forma eficiente na refrigeração do incêndio. Entretanto, suas características podem

também limitar sua capacidade extintora. A tensão superficial restringe sua capacidade de revestir os combustíveis. A água também evapora facilmente, por vezes sem remover o calor do incêndio, especialmente nas condições de vento quente e seco típicos de incêndios florestais. Um aumento na efetividade da supressão pode reduzir consideravelmente o tempo de combate. Neste sentido, aditivos químicos são frequentemente misturados na água para aumentar a eficácia de supressão (PLUCINSKI; SULLIVAN; HURLEY, 2017).

Existem dois tipos principais de aditivos químicos usados no combate a incêndios florestais: retardantes e intensificadores de supressantes. Os retardantes são compostos de sais inorgânicos (principalmente fosfatos de amônio) que inibem as chamas e podem retardar a propagação do incêndio, mesmo quando a água na qual foram misturados já evaporou. Geralmente são utilizados em ataque indireto, sobre a vegetação ainda não queimada, no caminho da propagação do incêndio. Já os intensificadores são adicionados à água para aumentar a efetividade de supressão ao modificar suas características físicas (PLUCINSKI; SULLIVAN; HURLEY, 2017).

Há duas classes principais de intensificadores utilizados. A primeira são os géis, que são compostos por polímeros hidrofílicos superabsorventes, com capacidade de absorver até setecentas vezes a própria massa de água. Podem aumentar a viscosidade da água, aumentando sua aderência aos combustíveis (PLUCINSKI; SULLIVAN; HURLEY, 2017).

A segunda classe são as espumas, que usam surfactantes para reduzir a tensão superficial da água, aumentando a cobertura que promove sobre os combustíveis e o tempo de umedecimento. O termo surfactante é sinônimo de detergente, categoria que também inclui detergentes para a louça, shampoos e géis de banho. Eles também podem emulsificar hidrocarbonetos, óleos e graxas formando micelas, dando uma suspensão coloidal leitosa em água (KLEIN, 2009). A redução da tensão superficial diminui o tamanho das gotas, aumentando a área superficial disponível e permitindo uma maior penetração no combustível. Ainda, permite que o ar se misture com a água, formando uma barreira de espuma que isola o combustível, impedindo que o oxigênio chegue até ele (PLUCINSKI; SULLIVAN; HURLEY, 2017). As espumas combatem os incêndio por meio da combinação dos seguintes fatores (SCHRAMM, 2014): i) cobrindo a superfície do combustível e abafando o fogo; ii) suprimindo e evitando que o ar se misture com vapores inflamáveis; iii) separando as chamas da superfície do combustível; e iv) resfriando o combustível e sua superfície pela ação da água da espuma. Alguns desses efeitos são ilustrados na Figura 3.

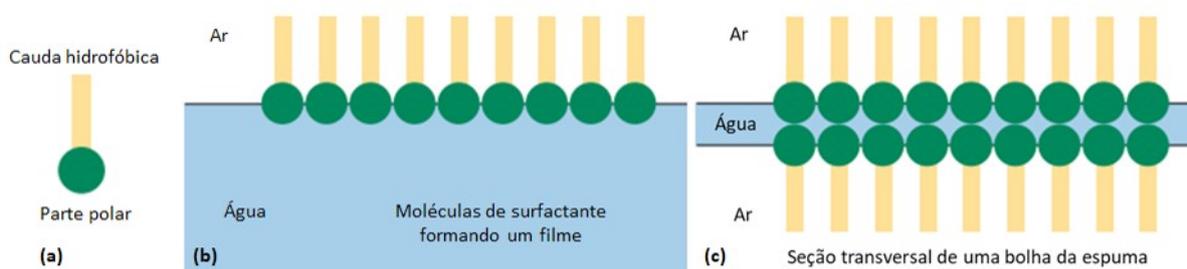
Os surfactantes possuem na molécula uma parte hidrofóbica (geralmente hidrocarboneto ou fluorocarbono) e uma parte hidrofílica (miscível em água, geralmente altamente polar ou carregada), conforme Figura 4a. Os fluorosurfactantes são distintos dos tensoativos de hidrocarbonetos por terem uma cadeia hidrofóbica que também é oleofóbica, permitindo que eles se formem em interfaces de hidrocarboneto-água, daí o acrônimo para espumas derivadas de fluorosurfactantes AFFF (espuma formadora de filme aquosa). As espumas de fluorosurfactante têm estabilidade química, térmica e de armazenamento muito alta em comparação com as espumas de hidrocarbonetos (KLEIN, 2009).

Figura 3 - Espuma cobrindo o combustível e combatendo o incêndio



Fonte: adaptado de Schramm (2014).

Figura 4 - (a) Molécula de surfactante; (b) Moléculas de surfactante formando um filme; (c) Moléculas de surfactante formando bolhas



Fonte: adaptado de Klein (2009).

Os surfactantes afetam a tensão superficial da água na interface ar-água ao alinhar as moléculas de modo que a cauda hidrofóbica aponte para o ar e a parte hidrofílica para a água (Figura 4b). Podem ainda formar micelas ou sistemas de camada dupla na presença de água dependendo da concentração, dando origem à formação de bolhas em que há ar em ambos os lados de uma camada dupla de moléculas de detergente (Figura 4c).

Observa-se a partir da Figura 4c como se estruturam as espumas. Uma espuma é uma dispersão coloidal na qual um gás é disperso em uma fase líquida contínua. A estrutura geral da espuma consiste no líquido na parte inferior e uma segunda fase, geralmente gás, no lado superior. Em uma espuma persistente, as bolhas não são esféricas, mas células poliédricas separados por filmes líquidos quase planos (SCHRAMM, 2014).

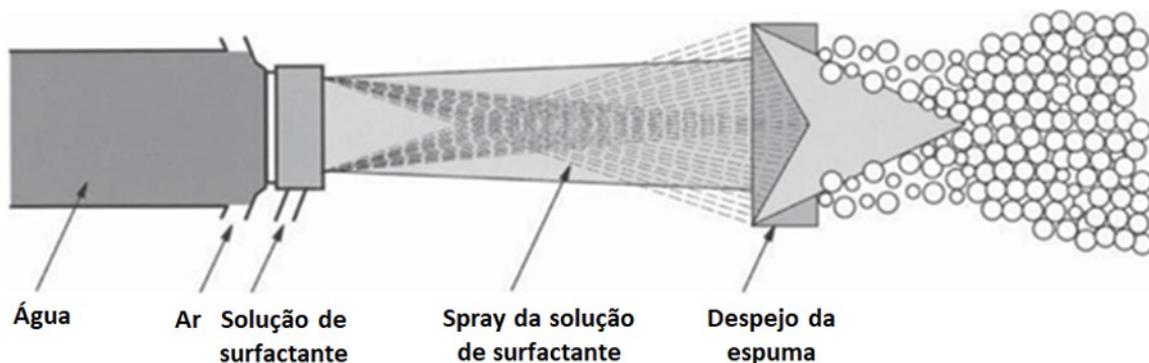
No combate ao incêndio, a produção da espuma é feita no local, através do acoplamento do recipiente que contém a substância surfactante (líquido gerador de espuma - LGE) à linha de água utilizada no combate. A espuma é criada misturando mecanicamente o ar (normalmente 75 - 97 %) com a solução concentrada de surfactante em água, conforme mostrado na Figura 5. Os surfactantes usados precisam aumentar a formação e estabilidade da espuma, promovendo o umedecimento ou espalhamento da espuma sobre o combustível.

Existem diversos equipamentos manuais e automáticos utilizados para controlar a dosagem de LGE, sendo o mais comum a adoção de um sistema com dosagem manual de aspiração por efeito de Venturi, por diferença de pressão. Neste método, a dosagem é menos precisa, geralmente não atingindo

a qualidade esperada para a espuma.

Espumas de combate a incêndio são frequentemente formuladas no intuito de suprimir incêndios em hidrocarbonetos líquidos, como gasolina. Estas espumas costumam conter surfactantes de fluorocarbono, que são menos solúveis do que surfactantes de hidrocarboneto na gasolina, e às vezes são misturados com surfactantes de hidrocarboneto e/ou polímeros. As espumas eficazes em incêndios de hidrocarbonetos são tipicamente caracterizadas como proteína (surfactantes de proteína hidrolisada - P), fluoroproteína (proteína hidrolisada e surfactantes perfluorados - FP), fluoroproteína formadora de filme (FFFP), espuma formadora de filme aquosa (mistura de surfactantes perfluorados - AFFF) e espuma formadora de filme aquosa resistente a álcool (AFFF-AR). Cada tipo tem suas próprias vantagens e desvantagens. Por exemplo, as espumas P são baratas e produzem espumas grossas, mas não se espalham bem sobre os combustíveis. As espumas FP resistem à absorção de combustível. A AFFF se espalha ao longo da queima de combustível mais rápido, mas tem tempos de drenagem mais rápidos e menor resistência ao calor. As espumas FFFP são um meio-termo entre os tipos AFFF e P. Normalmente são utilizadas misturas de surfactantes, como as variações resistentes ao álcool de AFFF ou FFFP, que contêm polímeros neutros que são insolúveis em solventes polares. As formulações práticas de espuma de combate a incêndios podem conter vários outros aditivos para controlar o congelamento, a viscosidade, a degradação bacteriana, a oxidação e a corrosão (SCHRAMM, 2014).

Figura 5 - Esguicho de combate a incêndios, apontando o suprimento de água e de surfactante, bem como o suprimento de ar. Os elementos são então misturados e direcionados ao fogo



Fonte: adaptado de Schramm (2014).

4 ESPUMAS COM COMPOSIÇÃO NÃO AGRESSIVA AO MEIO-AMBIENTE

Apesar das vantagens que os retardantes e supressantes apresentam quando utilizadas no combate a incêndios, questões ambientais sobre a sua composição e consequentes efeitos em humanos, animais, plantas e no meio ambiente são frequentes, na medida em que o aumento da quantidade e severidade dos incêndios leva a uma maior utilização destes aditivos. Com frequência a mídia (JORNAL NACIONAL, 2021) questiona o seu uso.

Os retardantes comuns são sais inorgânicos misturados em água, com alguns aditivos para engrossar (argilas e gomas), inibir a corrosão e deterioração (bactericidas) e tintas. São geralmente baseados em diferentes elementos químicos, como fósforo, enxofre, antimônio, cloro, bromo, boro e nitrogênio, que têm o potencial de causar efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente quando aplicados em excesso ou indiscriminadamente. Por exemplo, os sais de borato (versões iniciais de retardantes) apresentaram efeitos indesejáveis, como a esterilização do solo e altos níveis de toxicidade (KALABOKIDIS, 2000). Elementos como o cloreto de zinco, hidróxido férrico, tetraborato de sódio, entre outros, são usados junto com os hidróxidos de alumínio e magnésio como aditivos retardantes de chama em plásticos e agentes de extinção e prevenção de incêndios.

Entre os agentes extintores utilizados em incêndios florestais geralmente estão pós à base de fosfato monoamônico e sulfato de amônio. A sílica também é amplamente utilizada devido à grande área de superfície e capacidade de absorção de água. O uso de sílica permite a síntese de espumas nanoestruturadas gelatinosas. Embora esses compostos inorgânicos sejam eficazes como aditivos em composições de extintores de incêndio, eles não são usados de forma independente. Ainda, eles próprios ou outras partes de composições podem ser tóxicos para o meio ambiente, com efeitos duradouros (MOSINA et al., 2020).

Os radicais amônio (NH_4), fosfato (PO_4) e sulfato (SO_4) são os produtos químicos em soluções retardantes com maior probabilidade de causar alterações ambientais. O amônio fica disponível para as plantas direta e indiretamente (como nitrito e nitrato). Parte do amônio pode ser desnitrificada (evaporada como gás nitrogênio) e parte pode vazar para o lençol freático. Argilas expansivas também podem reter uma porção de amônio (KALABOKIDIS, 2000). O radical fosfato pode ser absorvido diretamente pelas plantas, bem como indiretamente (convertido quimicamente), ou ser absorvido na água do solo. O radical sulfato reduz o pH do solo ao formar ácido sulfúrico, fazendo com que elementos como ferro, cobre, zinco e manganês se tornem mais solúveis (HARDY, 1977).

As espumas modernas de combate a incêndios para incêndios Classe B (líquidos inflamáveis), fabricadas desde 1960, tradicionalmente continham fluorosurfactante como princípio ativo devido à sua excelente estabilidade química e térmica. Entretanto, esses produtos possuíam a base química de perfluorooctano sulfonato (PFOS), que se decompõem química ou biologicamente para gerar produtos de degradação fluorados, ambientalmente persistentes e altamente estáveis. Esses produtos podem ser tóxicos e bioacumulativos. Descobriu-se que o PFOS está disperso em todo o mundo em uma grande variedade de espécies animais, incluindo o homem, bem como em animais cujos habitats estão longe de qualquer fonte de contaminação, como as regiões polares. O PFOS é conhecido por ser tóxico, afetando o metabolismo hormonal e a reprodução em espécies em que foi testado, e é bioacumulativo apresentando biomagnificação na cadeia alimentar. O sal de lítio do PFOS é classificado nos Estados Unidos como um inseticida para uso contra vespas e marimbondos. O PFOS é tão estável quimicamente que suporta ácido nítrico ou sulfúrico quente por vinte e quatro horas sem decomposição (KLEIN, 2009).

Um estudo (MOODY; FIELD, 2000) demonstrou que altos níveis de PFOS persistiram nas águas subterrâneas em locais onde era realizado treinamento de combate a incêndio com espuma por militares dos EUA após uma década depois do lugar ter sido utilizado pela última vez. Em alguns casos, a água subterrânea ainda espumava. Esses dados sugerem que materiais perfluorados como PFOS são extremamente persistentes no ambiente com meias-vidas da ordem de pelo menos décadas. Há estudos que identificaram esses produtos em toda a Europa continental, em locais como rios, lagos, solo e lençóis freáticos, amostras de ar, em batatas e até mesmo em leite materno (KLEIN, 2009).

Em incêndios florestais é comum o combate com água sem aditivos. Isso porque a área afetada pode ser fonte de água para cidades e a poluição causada pelo escoamento da espuma para os rios e o meio ambiente é preocupante. Uma postura cautelosa no uso de espuma é adotada até mesmo nos Estados Unidos, tendo sido reportados casos em que a preocupação com os danos ambientais da espuma levou a permitir que os incêndios apagassem naturalmente, resultando em uma grande área consumida (KAWAHARA et al., 2016).

As evidências mostram que o principal impacto dos produtos de supressão de incêndio no meio ambiente pode ser o efeito adverso na qualidade da água e, conseqüentemente, nos peixes de água doce e outras formas de vida presentes em rios. Muitos dos íons são letais para a vida aquática nas concentrações encontradas nos produtos químicos utilizados no combate e incêndios. A amônia parece ser o mais tóxico, afetando organismos aquáticos invertebrados (como o camarão) e os alevinos de certos vertebrados (como o salmão e a truta) (BLAHM; SNYDER, 1974). Desta forma, faz-se necessária a busca por aditivos cuja composição não ofereça riscos ao meio-ambiente, além de que possuam ampla disponibilidade e baixo custo.

Mosina et al. (2020) estudou o uso de nanoparticulados de alumina em aplicações de prevenção de incêndios e no combate a incêndios florestais. Segundo os autores, quando as nanopartículas entram em contato com as superfícies em alta temperatura, começam a se decompor e transformam-se em partículas sólidas com uma superfície maior, ocorrendo um resfriamento intenso da zona de combustão durante este processo. Quando as modificações de baixa temperatura (até 700°C) da alumina são formadas, os microporos se fecham e dificultam o processo de combustão. Forma-se assim uma estrutura de óxido que fornece propriedades refratárias mesmo a temperaturas acima de 2000°C. O uso das composições de nanopartículas de alumina proporciona a criação de um filme poroso de cerâmica com uma área de superfície específica elevada, que reduz o efeito térmico geral da reação de combustão aumentando a eficiência de extinção de incêndio. Ademais, são substâncias ecologicamente corretas e de baixo custo.

Kawahara et al. (2016) desenvolveram uma espuma de combate a incêndios com base em sais de ácidos graxos de origem natural (sabão) como o principal componente. O sabão é muito menos tóxico para organismos aquáticos em comparação com detergentes sintéticos. A razão pela qual a toxicidade do sabão é menor para microrganismos aquáticos e peixes é que ele reage com íons de metal, como por exemplo íons de cálcio que existem no

ambiente para formar sabão de metal, cuja toxicidade é significativamente baixa. Apesar disso, sua formação não é desejada devido à sua baixa atividade interfacial e, para tanto, os autores afirmam a necessidade de adicionar um agente quelante (substância que forma complexos com os íons metálicos) para evitar a reação dos íons de metal com o sabão. Normalmente utiliza-se o ácido etilenodiaminotetracético (EDTA), agente quelante que é muito eficaz no mascaramento dos íons metálicos. No entanto, é pouco biodegradável e seu resíduo de longo prazo no meio ambiente, particularmente como complexo de metal pesado, levanta preocupações sobre toxicidade (OVIÉDO et al., 2003). Ainda, o agente quelante tetrasódio glutamato diacetato (GLDA), altamente biodegradável, é usado em espuma de combate a incêndio para edifícios em geral (MIZUKI et al., 2007). No entanto, a este aditivo faz com que a espuma tenha a desvantagem de alta viscosidade cinética e baixa fluidez em baixa temperatura. Os autores concluíram que o uso de alaninato dicarboximetil trissódico (MGDA) apresentou melhor desempenho na taxa de expansão, operabilidade e estabilidade de baixa temperatura. Ao usar íon de potássio em vez de íon de sódio como o contra-cátion do sal de ácido graxo, a viscosidade cinética e o ponto de fluidez foram reduzidos, e a operabilidade e a estabilidade a baixa temperatura foram aumentadas (KAWAHARA et al., 2016).

Conforme Kang et al. (2019), a espuma de proteína (protein foam - PF) é um agente extintor amplamente utilizado na indústria de incêndio, podendo ser produzida pela hidrólise alcalina de pêlos de animais, cascos e proteínas vegetais, possuindo baixo custo, boa resistência ao fogo e estrutura estável, além de ser biodegradável.

5 CONCLUSÃO

Incêndios florestais têm aumentando em frequência e intensidade nos últimos anos, causando diversos impactos diretos e indiretos no meio ambiente e na vida humana. Há esforços de diversos tipos que visam diminuir a sua ocorrência, seja pelo combate direto, pela tentativa de impedir sua deflagração ou aprimorar técnicas de contenção e combate.

As espumas utilizadas como agente intensificador de supressão podem danosas ao meio-ambiente, tendo em vista que muitas possuem componentes tóxicos e altamente estáveis na natureza, acumulando-se nos organismos vivos, além de solos e rios. Existem algumas espumas biodegradáveis que utilizam principalmente óxidos metálicos, sais de ácidos graxos e proteínas, mas a sua utilização ainda é incipiente e carece de novos estudos que possibilitem a obtenção de substâncias amplamente disponíveis, eficientes e de baixo custo.

Apesar dos fatos não parecerem favoráveis e indicarem que os incêndios florestais ainda serão devastadores por vários anos, os esforços em busca de soluções são grandes. Neste sentido, sugere-se para trabalhos futuros a busca de novas fontes de intensificadores de supressantes, que possibilitem uma ampla utilização não apenas como ferramenta de combate, mas também de prevenção de novos incêndios.

REFERÊNCIAS

BLAHM, Theodore H.; SNYDER, George R. **Effect of chemical fire retardants on the survival of juvenile Salmonids**. National Marine Fisheries Service, Prescott, p. 1-2, jan. 1974.

CANCELLIERI, Dominique; LEROY-CANCELLIERI, Valérie; LEONI, Eric; SIMEONI, Albert; KUZIN, Alexander Ya.; FILKOV, Alexander I.; REIN, Guillermo. **Kinetic investigation on the smouldering combustion of boreal peat**. Fuel, v. 93, p. 479-485, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.052>.

CHRISTENSEN, Eirik G.; HU, Yuqi; PURNOMO, Dwi M.J.; REIN, Guillermo. Influence of wind and slope on multidimensional smouldering peat fires. **Proceedings Of The Combustion Institute**, v. 38, n. 3, p. 5033-5041, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.128>.

CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE. Federal Assistance for Wildfire Response and Recovery. 2021. Disponível em: <https://sgp.fas.org/crs/homesec/IF10732.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2021.

HADDEN, Rory M.; REIN, Guillermo; BELCHER, Claire M. Study of the competing chemical reactions in the initiation and spread of smouldering combustion in peat. **Proceedings Of The Combustion Institute**, v. 34, n. 2, p. 2547-2553, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2012.05.060>.

HARDY, Charles. **Chemicals for forest fire fighting**. Boston: National Fire Protection Association, 1977.

IEA. **World Energy Balances**: Overview. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview/world>. Acesso em: 10 set. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Programa Queimadas**. 2021. Disponível em: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/aq1km/>. Acesso em: 26 ago. 2021.

JORNAL NACIONAL. **Relatórios não recomendam retardantes de incêndio da forma como foram usados na Chapada dos Veadeiros**. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2020/10/13/relatorios-nao-recomendam-retardantes-de-incendio-da-forma-como-foram-usados-na-chapada-dos-veadeiros.ghtml>. Acesso em: 10 set. 2021.

KALABOKIDIS, Kostas D. Effects of wildfire suppression chemicals on people and the environment. **Global NEST Journal**, v. 2, n. 2, p. 129-137, 28 abr. 2013. University of the Aegean. <http://dx.doi.org/10.30955/gnj.000144>.

KANG, Wendong; YAN, Long; DING, Faxing; GUO, Xing; XU, Zhisheng. Experimental study on fire-extinguishing efficiency of protein foam in diesel pool fire. **Case Studies In Thermal Engineering**, v. 16, p. 100557, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2019.100557>.

KAWAHARA, Takayoshi; HATAE, Shuichi; KANYAMA, Takahide; ISHIZAKI, Yuki; UEZU, Kazuya. Development of Eco-Friendly Soap-Based Firefighting Foam for Forest Fire. **Environment Control In Biology**, v. 54, n. 1, p. 75-78, 2016. Japanese Society of Agricultural, Biological and Environmental Engineers and Scientists. <http://dx.doi.org/10.2525/ecb.54.75>.

KLEIN, Roger. **Firefighting foam and the environment**. 2009. Disponível em: <https://www.solbergfoam.com/getattachment/678ee341-8f4c-4a2f-b527-993568c6b606/Firefighting-Foam-and-the-Environment.aspx>. Acesso em: 26 ago. 2021.

MIZUKI, H.; UEZU, K.; KAWANO, T.; KADONO, T.; KOBAYASHI, M.; HATAE, S.; OBA, Y.; IWAMOTO, S.; MITUMUNE, S.; NAGATOMO, Y.; OWARI, Y.; UMEKI, H.; YMAGAGA, Y. Novel environmental friendly soap-based fire-fighting agent. **Journal Of Environmental Engineering And Management**, v. 17, p. 403-408, jan. 2007.

MOODY, Cheryl A.; FIELD, Jennifer A. Perfluorinated Surfactants and the Environmental Implications of Their Use in Fire-Fighting Foams. *Environmental Science & Technology*, v. 34, n. 18, p. 3864-3870, 12 ago. 2000. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es991359u>.

MOSINA, Kseniia S.; NAZAROVA, Elena A.; VINOGRADOV, Aleksandr V.; VINOGRADOV, Vladimir V.; KRIVOSHAPKINA, Elena F.; KRIVOSHAPKIN, Pavel V. Alumina Nanoparticles for Firefighting and Fire Prevention. **Acs Applied Nano Materials**, v. 3, n. 5, p. 4386-4393, 22 abr. 2020. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acsanm.0c00506>.

OHLEMILLER, Thomas J. Smoldering combustion propagation through a permeable horizontal fuel layer. **Combustion And Flame**, v. 81, n. 3-4, p. 341-353, set. 1990. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180\(90\)90030-u](http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180(90)90030-u).

OLIVEIRA, Amir Antônio Martins de. **Introdução à Combustão**. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFSC, 2021. 97 slides, color.

OVIEDO, Claudia; RODRÍGUEZ, Jaime. EDTA: the chelating agent under environmental scrutiny. **Química Nova**, v. 26, n. 6, p. 901-905, dez. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422003000600020>.

PAGE, Susan E.; SIEGERT, Florian; RIELEY, John O.; BOEHM, Hans-Dieter V.; JAYA, Adi; LIMIN, Suwido. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. **Nature**, v. 420, n. 6911, p. 61-65, nov. 2002.

PLUCINSKI, M.P.; SULLIVAN, A.L.; HURLEY, R.J. A methodology for comparing the relative effectiveness of suppressant enhancers designed for the direct attack of wildfires. **Fire Safety Journal**, v. 87, p. 71-79, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.12.005>.

RAMADHAN, Mohamad Lutfi; PALAMBA, Pither; IMRAN, Fahri Ali; KOSASIH, Engkos Achmad; NUGROHO, Yulianto Sulisty. Experimental study of the effect of water spray on the spread of smoldering in Indonesian peat fires. **Fire Safety Journal**, v. 91, p. 671-679, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.012>.

REIN, Guillermo. Smouldering Fires and Natural Fuels. **Fire Phenomena And The Earth System**, p. 15-33, 9 abr. 2013. John Wiley & Sons. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118529539.ch2>.

SCHRAMM, Laurier L. **Emulsions, Foams, Suspensions, and Aerosols**. Saskatoon: Wiley-Vch, 2014.

TURETSKY, Merritt R.; BENSCOTER, Brian; PAGE, Susan; REIN, Guillermo; WERF, Guido R. van Der; WATTS, Adam. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 1, p. 11-14, 23 dez. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2325>.

UNITED NATIONS. **CO2 emissions from peatlands degradation**. 2017. Disponível em: <https://www.grida.no/resources/12529>. Acesso em: 26 ago. 2021.

YANG, Jiuling; LIU, Naian; CHEN, Haixiang; GAO, Wei; TU, Ran. Effects of atmospheric oxygen on horizontal peat smoldering fires: experimental and numerical study. **Proceedings Of The Combustion Institute**, v. 37, n. 3, p. 4063-4071, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.218>.