

Rita C. R. Figueredo, Fabiana A. L. Ribeiro e Edvaldo Sabadini

Instituto de Química - Universidade Estadual de Campinas - CP 6154 - 13081-970 - Campinas - SP

Recebido em 31/3/98; aceito em 1/6/98

**SCIENCE OF FOAMS - APPLICATION IN FIRE-FIGHTING.** The structural characteristics of foams are responsible for a broad range of applications of this system. Foams produced by aqueous solutions of surfactant concentrates are used in fire-fighting due to their special properties as extinguishing agents. In the present paper we discuss the main aspects involved in fire-fighting, based on some properties of foams. Thermal and chemical stability, good wetting of surfaces, cooling effect by water drained from the bubbles, isolation of the air from the burning surface and suppression of flammable vapors are some of the factors involved in the extinguishment of fire by foams.

**Keywords:** foam; fire-fighting; perfluorinated surfactants.

## INTRODUÇÃO

Há alguns anos temos estudado espumas usadas em incêndios em líquidos inflamáveis (incêndios classe B). O principal enfoque do nosso estudo envolve o emprego de polímeros redutores de atrito hidrodinâmico em espumas extintoras, aplicação potencial no campo da extinção de incêndios. Agentes redutores do atrito hidrodinâmico<sup>1,2</sup> produzem significativa redução na energia necessária para o deslocamento de um fluido, atribuindo maior eficiência e flexibilidade ao combate. Em nosso trabalho, contamos com a colaboração de um dos principais grupos técnicos que lidam com a extinção de incêndios, o PAM (Plano de Auxílio Mútuo de Paulínia), que congrega algumas indústrias próximas à Refinaria do Planalto da Petrobrás (Replan). Pretendemos divulgar neste artigo processos envolvidos na extinção de incêndios por espumas, com uma breve referência à ciência de espumas.

## CIÊNCIA DE ESPUMAS

As espumas são sistemas termodinamicamente instáveis que apresentam uma estrutura tridimensional constituída de células gasosas envolvidas por um filme líquido contínuo. Essa estrutura origina-se do agrupamento de bolhas geradas ao se dispersar um gás em um líquido que contenha agentes espumantes, como surfatantes solúveis ou impurezas. Moléculas do surfatante difundem-se na solução em direção à interface gás-líquido formando uma monocamada adsorvida que estabiliza a bolha de gás e retarda sua rápida coalescência. A destruição das bolhas é termodinamicamente favorável pois provoca redução da elevada área superficial da espuma e expansão do gás contido nas células e, conseqüentemente, redução da energia livre da espuma.

O processo de dispersão do gás pode ser desencadeado por agitação ou batimento do líquido e por borbulhamento do gás no líquido, e influi diretamente sobre as características da espuma. Espumas formam-se também quando há redução de pressão ou aumento de temperatura em soluções supersaturadas de gás. Pelo borbulhamento, é possível estimar o tamanho das células geradas através da dimensão do borbulhador<sup>3</sup>. A uniformidade na distribuição e no tamanho de suas bolhas, grau de dispersidade, está sujeita às irregularidades do dispositivo através do qual o gás é introduzido<sup>4</sup>. Entretanto, fatores como velocidade do gás e concentração de surfatante nas células e, sobretudo, a natureza química dos agentes estabilizantes<sup>5,6</sup> são significativos na estruturação da espuma. Assim como o tamanho da

bolha, o volume de espuma formado em relação ao volume de solução utilizado para gerá-la, ou coeficiente de expansão de uma espuma<sup>7</sup>, é delimitado pela natureza química do sistema e pelas condições em que é produzido. O coeficiente de expansão é um parâmetro com o qual se pode relacionar intrinsecamente o volume de gás e o de líquido presente na espuma.

A geometria normalmente observada em bolhas de espuma pode ser poliédrica ou esférica. Células esféricas possuem filmes líquidos espessos e são frequentemente vistas no estágio inicial da formação de uma espuma. Conforme o líquido drena, os filmes afinam-se, diminuindo a distância entre as bolhas de gás, as quais adquirem formato poliédrico. Células poliédricas também estão presentes em espumas formadas a partir de líquidos de baixa viscosidade. O modelamento da estrutura de uma espuma tem apresentado controvérsias. Bolhas de espumas típicas são consideradas como dodecaedros pentagonais<sup>8</sup>, mas o arranjo das células com essa geometria não preenche todo o espaço. Além disso, espumas reais possuem não só filmes pentagonais mas também hexagonais e tetragonais, e o número médio de filmes que compõem uma célula está próximo a catorze. Alguns pesquisadores<sup>9</sup> consideram o b-tetradecaedro, poliedro formado por quatro superfícies hexagonais, duas tetragonais e oito pentagonais, o modelo que melhor representa as células da espuma.

O arranjo das bolhas geralmente segue as leis postuladas por Plateau<sup>10,11</sup>, governadas pela tendência à minimização de sua área superficial. Segundo essas leis, três filmes adjacentes encontram-se ao longo de uma linha curva com ângulos de 120° entre eles, ou quatro linhas, cada uma formada pela intersecção de três filmes, encontram-se em um ponto, com ângulos de 109°28'16" (ângulo tetraédrico) entre cada par de linhas adjacentes. Quando ocorre a ruptura de um filme da espuma, as bolhas rearranjam-se de modo a manter essa conformação. As colunas de líquido formadas pelo encontro dos filmes, os chamados canais de Plateau, assemelham-se a um triângulo de faces curvas. Esses canais estão interconectados pelos filmes, estruturando a rede que constitui a fase líquida da espuma (Fig. 1).

A partir do momento de formação de uma espuma, três processos podem ocorrer simultaneamente<sup>13-18</sup>: rearranjo das células, devido à difusão de gás entre as bolhas, drenagem do líquido intralamelar pelos filmes e canais de Plateau, levando ao afinamento do filme, e ruptura da célula. A progressão desses processos determina o tempo de vida da espuma.

As células de uma espuma rearranjam-se com o tempo devido à expansão do gás e à contração dos filmes, sendo através

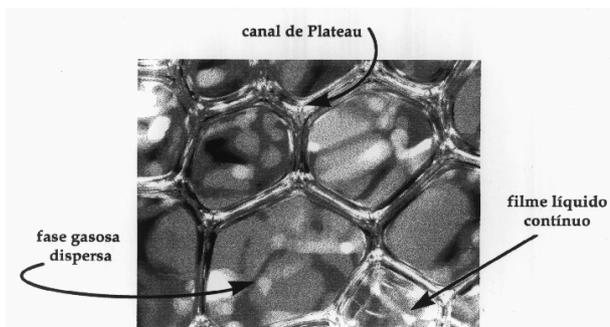


Figura 1. Estrutura de uma espuma<sup>12</sup>, constituída por uma fase gasosa e uma fase líquida (filmes e canais de Plateau).

desses eventos que vai diminuindo parte da energia livre da espuma. A expansão do gás ocorre através de ruptura de filmes e difusão entre as bolhas. Estas abrigam gás a diferentes pressões entre elas, conforme a desigualdade nos seus raios de curvatura, e a uma pressão maior do que a pressão atmosférica externa. A transferência de gás por difusão ocorre das células menores, nas quais é maior a pressão do gás aprisionado, para as células adjacentes maiores, resultando em mudanças na distribuição dos tamanhos inicialmente verificada. A espuma pode se tornar monodispersa ou mais polidispersa dependendo da mobilidade dos filmes em relação à rapidez com que o gás expande. A difusão torna-se mais pronunciada quando os filmes atingem espessura de poucas centenas de angstroms e é afetada pela permeabilidade do gás através das lamelas. Quanto maior a polidispersidade da espuma, maior o efeito desse processo.

A drenagem do líquido presente nos filmes e nos canais ocorre, inicialmente, sobretudo pela ação da força gravitacional e por sucção capilar do líquido intralamelar pelos canais. O canal de Plateau desempenha um importante papel na drenagem da espuma, pois essa região, pela curvatura de sua superfície, apresenta grande diferença de pressão entre as fases líquida e gasosa. O líquido é então succionado da região lamelar em direção aos canais, onde há menor pressão local. Com o escoamento do líquido, os filmes afinam até uma espessura crítica a partir da qual interações de van der Waals e propriedades elétricas da superfície, entre outros fatores, passam a governar o processo de afinamento do filme.

Conforme o líquido drena, moléculas do surfatante são carregadas com o fluxo produzindo irregularidade na sua concentração ao longo da superfície. Devido à variação local de tensão superficial, as moléculas difundem-se tentando restabelecer a tensão de equilíbrio, provocando uma força oposta ao fluxo. Essa habilidade do filme de espuma em restaurar deformações locais é resultado do efeito combinado da elasticidade de Gibbs, que considera uma tensão superficial de equilíbrio, e da elasticidade de Marangoni, efeito este mais superficial, associada às variações instantâneas de tensão superficial. Havendo aumento na tensão superficial causado por estiramento em um ponto do filme, a região contrai-se e em direção a ela avançam as áreas adjacentes para restabelecer a tensão inicial, movimento não só superficial, pois carrega líquido presente entre as interfaces. A elasticidade aumenta a resistência do filme e contribui para que sua espessura seja mantida por mais tempo.

O afinamento do filme pode ser acompanhado através das cores de interferência produzidas pela reflexão da luz incidente. O fenômeno de interferência produzido em um filme de espuma deve-se ao formato angular de seu perfil lateral, resultante da drenagem de líquido intralamelar. Sucessivas bandas de cores espectrais tornam-se visíveis quando o filme está exposto à luz branca e tem espessura da ordem de  $10^4 \text{ \AA}$ <sup>10,19</sup>. Essas bandas são formadas pela interferência entre o raio luminoso refletido logo após o feixe incidir sobre a superfície frontal e o raio que emerge dessa superfície após ser refratado no

filme e refletido pela superfície posterior. Todos os comprimentos de onda visíveis contribuem, após sucessivas etapas de interferência construtiva e destrutiva, para a cor e a intensidade do raio refletido em cada ponto do filme, características que serão determinadas pela espessura do filme.

Com o escoamento do líquido, as superfícies ficam mais próximas na parte superior do filme e as bandas de interferência vão se tornando mais espaçadas, enquanto a base do filme, mais espessa, apresenta um número maior de bandas. Quando a distância entre as superfícies está em torno de 300 a 1200 Å, surge na área envolvida uma banda cinza e o filme começa a escurecer. Eventualmente, podem aparecer pequenos pontos cinzas em decorrência de um afinamento irregular. O afinamento do filme pode terminar com sua ruptura ou com o estabelecimento de uma espessura de equilíbrio (menor do que 300 Å) em que as duas superfícies estão paralelas e de dimensão muito menor do que o comprimento de onda da luz visível. Dessa forma, a luz refletida pelas superfícies frontal e posterior do filme é destrutiva para todos os comprimentos de onda visíveis e a sua intensidade é praticamente nula. A banda torna-se negra e aumenta até que o filme fique completamente negro, formando o chamado 'filme negro comum'. Num filme negro, de espessura entre 50 e 250 Å, as duas interfaces estão separadas apenas por poucas camadas de moléculas de água e contraíons. Na Figura 2 está representado um filme negro típico; diversos tipos de filmes podem ser formados, dependendo da polaridade, carga e estrutura molecular do composto adsorvido. Alguns filmes sofrem um afinamento posterior até uma espessura crítica, atingindo o estágio do 'filme negro de Newton'. Sua dimensão está em torno de 30-50 Å, correspondente ao comprimento das duas cadeias moleculares que compõem, longitudinalmente, as monocamadas.

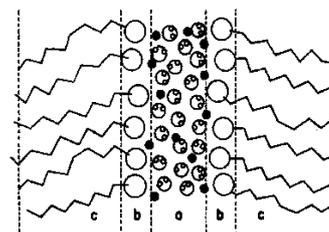


Figura 2. Representação idealizada da estrutura de um filme negro típico<sup>20</sup>, constituído de moléculas de água e contraíons (a) e monocamadas de surfatante: grupo hidrofílico (b); cadeia carbônica (c).

Teorias mais recentes consideram que as interfaces não permanecem planares durante o afinamento, mas adquirem um perfil oscilatório. A amplitude das oscilações nas interfaces cresce próximo à espessura crítica, aumentando a velocidade com que as superfícies vão se aproximando<sup>21,22</sup>. Essa característica é de considerável importância uma vez que a espessura crítica é determinada essencialmente pela velocidade de afinamento próxima a ela.

Na fase de filme negro, as deformações superficiais começam a crescer e as forças no filme tornam-se mais importantes. Derjaguin<sup>23</sup> definiu o balanço de forças que atuam no filme e o qual determina sua estabilidade como pressão de ruptura. Esse conceito envolve forças repulsivas eletrostáticas, devido à existência de duplas camadas elétricas nas suas superfícies, e, opondo-se a elas, forças atrativas de van der Waals. Enquanto a repulsão eletrostática tende a manter o filme, evitando que as atmosferas iônicas das interfaces sobreponham-se e impedindo o colapso, as forças de dispersão fazem com que as moléculas sejam atraídas para regiões mais espessas do filme, provocando a aproximação das duas superfícies e a ruptura da lamela. Em monocamadas formadas por moléculas não-iônicas, apenas forças repulsivas de natureza não-eletrostática, como forças estéricas, contribuem para a repulsão mútua entre as interfaces, e a pressão de ruptura perde seu efeito estabilizador.

Um estado metaestável é atingido com o equilíbrio entre a componente eletrostática e a componente molecular da pressão de ruptura, mas perturbações térmicas e mecânicas no filme podem acelerar sua ruptura. Segue-se, à ruptura do filme, a coalescência das bolhas adjacentes, e quanto mais rápidas as alterações na espuma, menor sua estabilidade, ou seja, menor a resistência da lamela à diminuição da área interfacial da estrutura.

Como resultado da drenagem, o grau de dispersidade, a área interfacial e a concentração de surfatante nas células são funções de sua posição na espuma, pois cada seção transversal apresenta células em estágios diversos de drenagem. A ruptura de filmes provoca redistribuição de surfatante nas células vizinhas e mudança na distribuição das células, a diminuição na espessura dos filmes e canais e o conseqüente aumento na pressão capilar provocam uma maior taxa de drenagem e as células inferiores possuem maior volume de líquido intralamelar. O líquido resultante da drenagem tende a restituir a solução geradora da espuma, mas possui surfatante em concentração maior do que na solução inicial, pelos efeitos de evaporação, e menor em relação aos filmes, onde constantemente sofre alterações.

Um bom critério para a avaliação da estabilidade da espuma é a medida do tempo em que ocorre algum evento, como o tempo decorrido desde a formação até a ruptura total das bolhas. Obtém-se, neste caso, o tempo de vida da espuma, determinado por dois processos que são o afinamento e o colapso dos filmes. Soluções diversas podem formar espumas cujo tempo de vida pode ser de apenas alguns segundos ou de até centenas de meses. A evolução dos processos vai depender da natureza química do agente espumante, considerando-se que seu papel consiste basicamente em estabilizar os filmes de espuma, e do controle de efeitos externos.

Diversos fatores exercem influência direta sobre a estabilidade da espuma. A viscosidade do líquido presente nas bolhas contribui ao retardamento de qualquer tipo de movimento no filme e impõe resistência mecânica a ele. Com um escoamento mais lento, a velocidade de drenagem é alterada principalmente nos momentos iniciais após a formação da espuma. É desde esse momento que os efeitos Marangoni e Gibbs participam da estruturação dos filmes. Deformações na superfície que levam a um gradiente de tensão superficial, mesmo em filmes negros, fortalecem o filme permitindo que ele resista aos distúrbios locais.

Um filme de espuma pode ser desestabilizado se exposto a flutuações térmicas<sup>24,25</sup>; sob redução de temperatura, sua elasticidade pode ser reduzida, enquanto a elevação de temperatura pode provocar dessorção do agente espumante da interface e diminuição da viscosidade e da resistência superficial. A uma temperatura mais elevada, a evaporação da água é acelerada, estimulando a desidratação do filme e induzindo, para compensar a diminuição da tensão superficial resultante, o seu estiramento e a aproximação das camadas de adsorção. A sobreposição das interfaces é um processo entropicamente desfavorável, que exerce papel desestabilizador sobre o filme e leva ao colapso<sup>26</sup>. A hidratação das interfaces retarda a interpenetração das moléculas adsorvidas, mantendo a espessura do filme. Pela presença de eletrólitos ou aditivos<sup>20</sup>, as forças de estabilização nos filmes de espuma também são modificadas. A introdução de eletrólitos provoca compactação da camada elétrica difusa, diminuindo a magnitude da componente eletrostática da pressão de ruptura. A espessura de equilíbrio diminui gradualmente conforme a concentração de eletrólito aumenta. Distúrbios mecânicos, como correntes de ar, vibrações e choques, expõem os filmes da espuma a sofrerem antecipadamente a ruptura em relação ao que se processaria com estes fatores controlados. Variações rápidas de pressão e espalhamento de agentes sobre o filme que arrastam a solução intralamelar podem provocar um afinamento rápido até a espessura crítica, aumentando a probabilidade da ruptura.

O tempo de vida da espuma e sua estabilidade são determinados

por diversos fatores; sua existência depende, basicamente, da natureza do agente espumante, da composição relativa de todos os componentes presentes no filme e das condições a que a espuma está submetida.

## ESPUMAS EM EXTINÇÃO DE INCÊNDIOS

A estrutura particular apresentada pelas espumas garante uma vasta aplicação desse sistema. Espumas produzidas com soluções aquosas são utilizadas em combates a incêndios por apresentarem propriedades que, juntamente com as da água, tornam-nas um eficiente agente extintor. A eficiência da água em incêndios deve-se ao efeito refrigerador provocado pelo seu calor de vaporização ( $40,66 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ), o qual remove calor do processo de combustão e resfria o material em chamas. Outra propriedade extintora está associada à diminuição da concentração de oxigênio do ar pelo vapor de água produzido no combate. Mas a água apresenta algumas limitações, e as espumas extintoras foram desenvolvidas a fim de contorná-las. A alta tensão superficial da água dificulta a molhabilidade da superfície em chamas e a penetração no material, e sua baixa viscosidade provoca escoamento rápido pelas superfícies, dificultando a atuação da água sobre elas, principalmente as superfícies verticais. Além disso, os jatos de água podem provocar transbordamento de um líquido em chamas, levando à propagação do incêndio.

As espumas foram desenvolvidas para se obter melhor aderência ao material em chamas, produzindo um recobrimento contínuo sobre ele. Como apresentam baixa densidade, espalham-se sobre a superfície do material em combustão, abafando-a e isolando-a do contato com o oxigênio atmosférico. Tanto a supressão do vapor comburente como o resfriamento do material em chamas, pelo líquido presente na espuma, previnem a reignição. Para aperfeiçoar tais características, espumas com estruturas cada vez mais resistentes e fluidas tem sido obtidas para diferentes classes de incêndio, visando-se garantir a rapidez e a segurança do combate.

As espumas utilizadas atualmente em incêndios, chamadas 'mecânicas'<sup>27-30</sup>, são geradas através da introdução de ar, por ação mecânica, em soluções preparadas a partir de 'líquidos geradores de espuma' (LGE). Esses concentrados contêm surfatantes específicos e outros aditivos que conferem alta estabilidade às espumas extintoras. A partir do desenvolvimento da espuma mecânica, mais econômica e de aplicabilidade mais fácil, o emprego da espuma 'química', largamente utilizada no início do século, tem sido cada vez mais restrito a extintores portáteis. A espuma química é formada com a liberação de dióxido de carbono pela reação entre sulfato de alumínio e bicarbonato de sódio em solução aquosa, que contém proteínas hidrolisadas como agentes espumantes. São espumas densas, viscosas e resistentes ao calor mas, como espalham-se lentamente, tem baixo poder de extinção.

As primeiras espumas mecânicas foram produzidas a partir de extratos protéicos, para extinções em derivados de petróleo, e surgiram por volta de 1937, na Alemanha e na Inglaterra. Os concentrados protéicos são formulados com derivados de digestão química e de hidrólise de proteínas naturais, como as encontradas em soja e chifres e cascos de boi. Esses compostos proporcionam elasticidade, resistência mecânica e maior hidratação aos filmes da espuma. Também contêm alginatos e pectinas, que estabilizam a espuma e inibem a corrosão e o crescimento bacteriano, sais metálicos e solventes orgânicos, que proporcionam uniformidade à estrutura. A espuma resultante é densa, viscosa e altamente estável, mas a velocidade de espalhamento e de extinção são baixas.

O desenvolvimento de uma espuma de base protéica com maior capacidade de extinção (no caso, velocidade de espalhamento) e compatível com o pó químico, específica para aplicação em derivados de petróleo, ocorreu principalmente na

Inglaterra, em 1965. Surgiram os concentrados fluoroprotéticos, de formulação semelhante ao LGE protético, contendo surfatantes fluorados que melhoram a fluidez da espuma e a resistência à temperatura, propriedades que aumentam a rapidez do combate.

A mais versátil espuma para extinção em líquidos inflamáveis foi desenvolvida em 1962, pela marinha americana, a partir de surfatantes fluorados sintéticos, devido às limitações das espumas de base protéica. Os concentrados, conhecidos como AFFF ('aqueous film-forming foam'), produzem espumas que formam um fino filme aquoso sobre a superfície em chamas, o qual é resultante do processo de drenagem e tem a propriedade de espalhar-se rapidamente sobre regiões não totalmente recobertas pela espuma. Como em outras espumas, seu mecanismo de extinção consiste em evitar o contato do oxigênio do ar com o combustível e a liberação de vapores inflamáveis; a presença do filme aquoso ajuda no resfriamento do combustível e na supressão dos vapores, prevenindo a reignição do material. Menos viscosas, estas espumas apresentam maior fluidez e alta velocidade de extinção, e sua eficiência permite redução na quantidade de água, equipamentos e extrato utilizada. As espumas AFFF são compatíveis com o pó químico e também podem ser aplicadas em incêndios classe A (madeira, tecido, plástico,...), pois a baixa tensão superficial do líquido drenado (até cerca de  $15 \text{ dyn.cm}^{-1}$ ) possibilita a umectação do material incendiado, penetrando sob as superfícies expostas e extinguindo os focos de fogo.

Para aplicação em solventes polares foram formulados concentrados AFFF contendo um polissacarídeo solubilizado que, conforme a espuma drena, produz uma membrana polimérica devido à pequena solubilidade desse componente no solvente. Essa membrana protege o filme aquoso e a espuma da destruição pelo solvente, resultando em maior tempo de resistência à reignição do combustível. A formulação desses extratos é muito importante no Brasil, devido ao grande volume de etanol estocado, e também é eficiente no combate a incêndios envolvendo derivados de petróleo. LGE protéticos e fluoroprotéticos para aplicação em incêndios envolvendo solventes polares, apesar de formarem espumas altamente estáveis, não são muito eficientes em função de sua baixa fluidez, característica que dificulta seu espalhamento.

A produção da espuma mecânica é realizada em dois estágios, que são proporcionamento e formação. Durante o proporcionamento, o extrato é introduzido no fluxo de água com dosagem controlada. Concentrados AFFF são geralmente aplicados a 3% (massa de LGE/volume de água) para incêndios em hidrocarbonetos e 6% para solventes polares. A formação da espuma ocorre apenas no estágio final, quando ocorre a introdução de ar no esguicho lançador. Diferentes equipamentos hidráulicos são utilizados na produção da espuma, de acordo com as condições do combate, e a maior parte deles apresenta tanto a introdução do LGE como a do ar ocorrendo através de simples tubos Venturi, que provocam a sucção para o fluxo de linha<sup>31,32</sup> (Figura 3). Segue-se então a aplicação da espuma, que deve ser suave e feita sobre anteparos para minimizar a perda pelas chamas, a uma velocidade própria para cada caso; segundo normas como ABNT e NFPA, a taxa de aplicação mínima recomendada sobre a área atingida está em torno de  $4.1 \text{ Lmin}^{-1}\text{m}^{-2}$  em hidrocarbonetos e  $6.9 \text{ Lmin}^{-1}\text{m}^{-2}$  em solventes polares.

As propriedades dos LGE são periodicamente avaliadas, segundo normas como NFPA ('National Fire Protection Association')<sup>33</sup>; para testes de qualidade, determina-se a capacidade de produção de espuma pelo concentrado (medidas do coeficiente de expansão), que tem tempo máximo de estoque de dez anos. Testes de estabilidade são realizados por medidas do tempo de drenagem, geralmente o tempo necessário para que drene 25% da amostra da espuma, produzida segundo condições específicas.

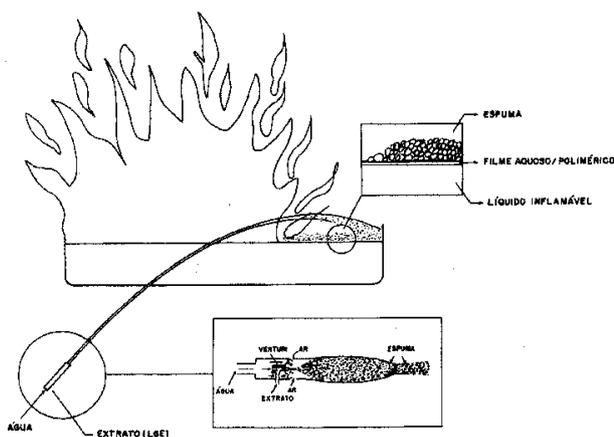
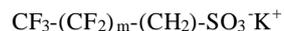


Figura 3. Produção de espuma mecânica com extrato formador de filme protetor (tipo AFFF).

As espumas produzidas com concentrados AFFF são de baixa expansão, com coeficiente de até 20. Para incêndios em ambientes fechados e de difícil acesso, como minas de carvão, foram desenvolvidos LGE de tensoativos sintéticos que produzem espumas de alta expansão, apropriadas para provocar inundações. Seu coeficiente de expansão está entre 200 e 1000, e seu uso tem sido restrito a áreas fechadas, pois são espumas de densidade baixa e sua eficácia pode ser comprometida pelas condições climáticas. Elas podem ser aplicadas tanto em incêndios classe A como classe B, mas cuidados devem ser tomados quando estão envolvidos ambientes pequenos, pois o ar proveniente da espuma pode elevar a concentração de oxigênio e, caso a mistura com o vapor combustível exceda a concentração limite para ignição, pode inevitavelmente provocar uma explosão.

A eficiência de espumas geradas com extratos do tipo AFFF deve-se fundamentalmente à estrutura molecular dos surfatantes presentes em sua formulação. Surfatantes perfluorados de fórmula geral  $\text{CF}_3-(\text{CF}_2)_n$ -hidrocarboneto-X, sendo  $6 < n < 10$  e X um grupo hidrofílico<sup>34</sup>, são usualmente encontrados na composição de LGE. Através de análises para a caracterização do extrato AFFF com o qual estudamos, observamos que a estrutura básica do surfatante é constituída por uma cadeia carbônica fluorada ( $6 \leq m \leq 10$ ) e por um grupo sulfonato:



Essa estrutura molecular, através das ligações C-F e do grupo sulfonato, atribui alta estabilidade térmica e química ao surfatante. A natureza aniônica do surfatante confere propriedades particulares à interface dos filmes da espuma, atribuindo um efeito estabilizante, através do componente eletrostático, às forças de estabilização existentes na lamela.

O extrato AFFF foi aplicado com sucesso no incêndio ocorrido na Replan<sup>35</sup>, em 8 de janeiro de 1993, o maior incêndio já ocorrido em refinarias de petróleo no Brasil (Figura 4). Um tanque que possuía 15 milhões de litros de óleo diesel, sua capacidade máxima, foi atingido por um raio que provocou a ignição da mistura de gases inflamável nele contida e, imediatamente, uma explosão seguida de incêndio. A eficiência do combate de um incêndio de tais proporções é de extrema importância. As chamas atingiram uma área de  $4300 \text{ m}^2$ , com labaredas de mais de 40 m de altura, produzindo fumaça que apresentava mais de 50 km de extensão. O grande risco inicial era de que o fogo se alastrasse e atingisse os tanques vizinhos, provocando um prejuízo incalculável e representando uma ameaça ao ambiente. Bombeiros da Replan iniciaram, então, a extinção do fogo que atingia as bacias de contenção com aplicação de jatos de espuma (AFFF) e o resfriamento do tanque

atingido e dos adjacentes utilizando jatos de água, enquanto estratégias de combate eram definidas pelos técnicos da Replan, em colaboração com o Corpo de Bombeiros de Campinas e o PAM. No total, foram 12 horas para o controle e a extinção do fogo, sendo consumidos 4 milhões de litros de óleo diesel e gastos 37 mil litros de LGE, num prejuízo total de cerca de US\$ 1.900.000,00, entre diesel consumido, combate ao fogo e reparo dos equipamentos. Cerca de 100 bombeiros, civis e militares, mobilizaram-se para conter esse incêndio.



Figura 4. Combate ao incêndio ocorrido na Replan com espumas extintoras do tipo AFFF. Foto gentilmente cedida pelo SESIN/Replan

## REFERÊNCIAS

- McCormick, C. L.; Morgan, S. H.; *Prog. Polym. Sci.* **1990**, *15*, 507.
- Hoyer, K.; Gyr, A.; *J. Non-Newtonian Fluid Mech* **1996**, *65*, 221.
- Bikerman, J. J.; *Physical Surfaces*; Academic Press, New York, 1970; p 133.
- Narsimhan, G.; Ruckenstein, E.; *Langmuir* **1986**, *2*, 494
- Sandor, N.; Racz, G.; *Acta Chimica Bulgarica - Models in chemistry* **1993**, *130*, 873
- Baets, P. J. M.; Stein, H. N.; *Langmuir* **1992**, *8*, 3099
- Schukin, E. D.; Pertsov, A. V.; Améline, E. A.; *Química Coloidal*; Editorial Mir, Moscou, 1988; p. 301
- Bhakta, A.; Ruckenstein, E.; *Langmuir* **1995**, *11*, 1486.
- Gururaj, M.; Kumar, R.; Gandhi, K. S.; *Langmuir* **1995**, *11*, 1381
- Isenberg, C.; *The science of soaps films and soap bubbles*; Dover Publications Inc., New York, 1992
- Ross, S.; *Ind. and Eng. Chem* **1969**, *61*, 48
- Folienserie des Fonds der Chemischen Industrie, ISSN 0174-366 X, 1987
- Tam, W. Y.; Chae, J. J.; Burnett, G. D.; Almeida, R. M. C.; Tabor, M.; *Phys. Rev. E* **1995**, *51*, 5788.
- Zaniquelli, M. E. D.; *Tese de Doutorado*; Universidade Estadual de Campinas, 1987.
- Salager, J. -L.; Iglesias, E.; Anderez, J.; Forgiarini, A.; *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* **1995**, *98*, 167.
- Ivanov, I. B.; Dimitrov, D. S. In *Thin Liquid Films - Fundamentals and Applications*; Ivanov, I.B., Ed; Marcel Dekker Inc., New York, 1988.
- Wasan, D. T.; Huang, D. D.; Nikolov, A.; *Langmuir* **1986**, *2*, 672.
- Cohen-Addad, S.; Meglio, J -M; *Langmuir* **1994**, *10*, 773.
- Boys, C. V.; *Soap Bubbles-Their colors and forces which mold them*; Dover Publications Inc., New York, 1959.
- Klein, M. L.; Gamba, Z.; Hautman, J.; Shelley, J.C.; *Langmuir* **1992**, *8*, 3155.
- Ruckenstein, E.; Sharma, A.; *J. Colloid Interface Sci.* **1987**, *119*, 14.
- Miller, C. A.; Neogi, P.; *Interfacial phenomena- Equilibrium and Dynamic Effects*; Marcel Dekker Inc., New York, 1985.
- Derjaguin, B. V.; Abricossova, I. I.; Titigevskaia, A. S.; Malkina, A. D.; *Discuss. Faraday Soc.* **1954**, *18*, 24.
- Epstein, M. B.; Ross, J.; Conroy, L. E.; Jakob, C. W.; Wilson, A.; *J.Phys.Chem.* **1954**, *58*, 860.
- Khilar, K. C.; Pradhan, M. S.; Sita Ram Sarma, D.S.H.; *J. Colloid Int. Sci.* **1990**, *139*, 519.
- Vrij, A.; Overbeek, J.Th.G.; *J. Am. Chem. Soc.* **1968**, *90*, 3074.
- Informações Técnicas da Wormald/Resmat-Parsch, *Espuma para combate a incêndio*, 1994.
- Informações Técnicas da 3M do Brasil Ltda, *Light Water AFFF*, 1988.
- Casey, J.F.; *Fire Service Hydraulics*; Fire Engineering, New York, 1984.
- Norma UL 162; *Foam Equipment and Liquid Concentrates*; Underwriters Laboratories Inc, 1983.
- Norma N-1886 (Petrobrás); *Projeto de Sistemas de Combate a Incêndio com Água e Espuma para Áreas de Armazenamento e Transferência de Álcool Etilico*; Petróleo Brasileiro S. A., 1983.
- Norma NBR 12615 (ABNT); *Sistema de Combate a Incêndio por Espuma*; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.
- Norma NBR 11830 (ABNT); *Líquido Gerador de Espuma de Película Aquosa (AFFF) à 3% para Uso Aeronáutico*; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993.
- Porter, M.R.; *Handbook of Surfactants*; Blackie & Son Ltd., Londres, 1991.
- Informações obtidas através do SESIN/REPLAN.