

4. ESPUMAS DE BETUME

4.1 INTRODUÇÃO

A espuma de betume é uma mistura de ar, água e betume e é produzida através da injeção de pequenas quantidades de água atomizada, 2 a 3% por massa de ligante, em betume quente numa câmara de expansão. Durante este processo o betume expande, por aumento da sua superfície específica, até cerca de 25 vezes o seu volume inicial. No processo de expansão, o betume adquire temporariamente uma viscosidade muito baixa, próxima do valor da viscosidade da água, podendo então ser misturado com agregados minerais a temperaturas e humidades ambiente, melhorando a sua dispersão na mistura final. Este processo é representado na figura 4.1.

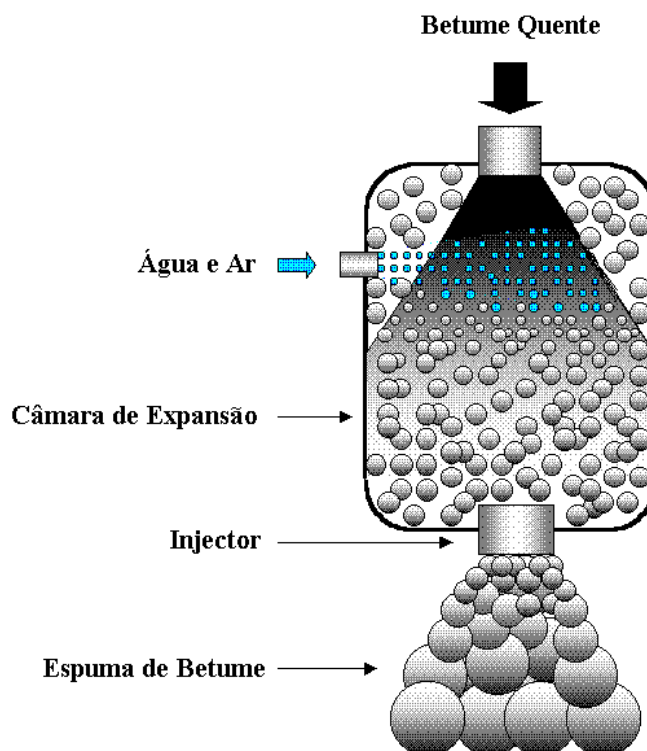


Figura 4.1 - Esquema de uma Câmara de Expansão
FONTE: Jenkins (2000)

Para que se perceba o processo de uma forma simplificada, reflecta-se sobre a mistura de um ovo com farinha. Quando se pretende juntar um ovo com farinha o

procedimento comum consiste em “bater” o ovo de modo a reduzir a sua viscosidade, e só depois se realiza a mistura dos dois ingredientes. Ao “bater” o ovo não se faz mais do que criar uma espuma constituída por uma dispersão de ar, fase gasosa, no ovo, meio contínuo.

4.2 FORMAÇÃO DA ESPUMA DE BETUME

Quando a água é injectada no betume, que se encontra usualmente a temperaturas entre 150 e 180 °C, ocorre uma sucessão de diversas transformações. As pequenas bolhas de água entram em contacto com o betume, seguindo-se uma troca de energia da qual resulta o aquecimento da água e o arrefecimento do betume. Numa primeira fase a troca de energia entre os dois fluidos permite que a água aqueça até aos 100 °C. Depois desta fase, a troca de energia que continua a efectuar-se entre as superfícies dos fluidos permite que a água passe ao estado de vapor. Como este fenómeno acontece sob pressão o vapor de água penetra no betume, verificando-se que uma fina camada de betume envolve o vapor.

A troca de energia entre o betume e o vapor de água encapsulado no seu interior provocam o aquecimento do vapor que expande o seu volume e consequentemente expande a camada de betume que o envolve. Esta expansão termina quando a pressão do vapor de água no interior da bolha de betume é equilibrada pela tensão superficial do mesmo. Este estado de equilíbrio é atingido, pois durante a expansão, o vapor de água vai perdendo pressão até que esta se iguala à pressão superficial exercida pelo filme de betume envolvente. É esta sucessão de acontecimentos e este fenómeno de expansão que provoca o aumento de volume inicial de betume e a formação da espuma, que não é mais do que o acontecimento simultâneo do fenómeno descrito para uma infinidade de bolhas de água.

Como a condutividade térmica do betume é baixa, este estado de equilíbrio mantém-se durante alguns segundos, durante os quais o betume se encontra em forma de

espuma. Após este breve período de tempo dá-se o colapso da espuma e o betume retoma o seu volume e viscosidades iniciais.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ESPUMAS DE BETUME

Os processos de pavimentação incorporam sempre alguma variabilidade que advém geralmente da diversidade dos materiais usados e as espumas de betume são disso um bom exemplo. As propriedades das espumas de betume variam com factores diversos tais como, as propriedades do betume ou mesmo as características do próprio aparelho onde se produz a espuma (vd. capítulo 2).

Como referido no segundo capítulo, as espumas de betume caracterizam-se por dois parâmetros, a “expansão” **ER** e a “semi-vida” $\tau_{1/2}$.

A “expansão” **ER** é a relação entre o volume máximo da espuma e o volume inicial do betume que lhe deu origem e constitui uma medida da viscosidade da espuma.

A “semi-vida” $\tau_{1/2}$ corresponde ao intervalo de tempo (normalmente medido em segundos) que decorre desde o instante em que a espuma atinge o seu volume máximo até ao momento em que atinge metade desse volume. Este parâmetro corresponde a metade do tempo de vida total da espuma e é um indicador do tempo disponível para proceder à mistura dos agregados com a espuma, ou seja, é um parâmetro medidor da sua estabilidade.

A **expansão** e a **semi-vida** estão relacionados com a percentagem de água utilizada na produção da espuma, da forma ilustrada na figura 4.2. Quanto maior for o valor da percentagem de água utilizada na produção da espuma, maior o valor da **expansão** e menor a **semi-vida** da espuma.

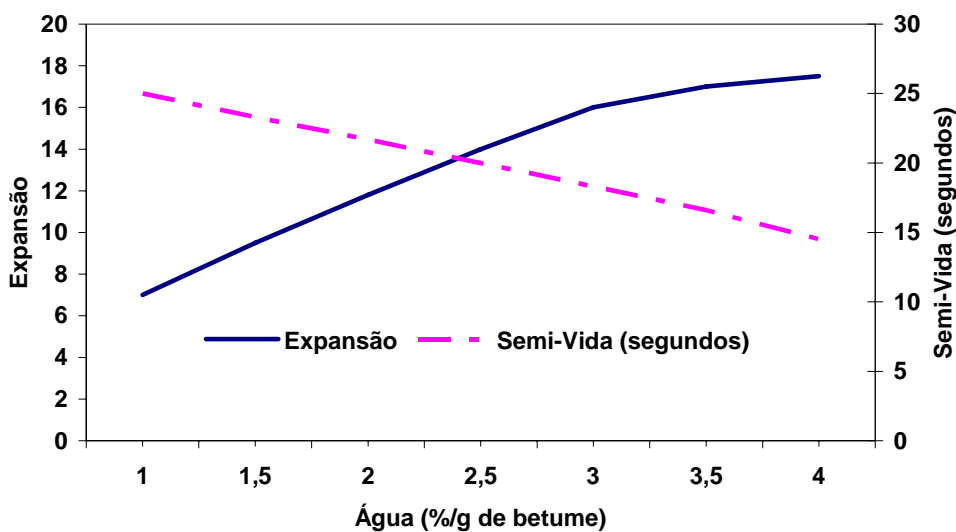


Figura 4.2 - Relação das Propriedades de uma Espuma com a Percentagem de Água

Assim conclui-se que os dois parâmetros **expansão** e **semi-vida** estão inversamente relacionados. Se considerarmos como variável independentemente a percentagem de água adicionada para obter uma maior **expansão**, a **semi-vida** da espuma reduz-se (aumentando um diminui o outro e vice-versa).

Tendo presente este facto é fácil depreender que a optimização de ambos os parâmetros não é fácil. Analisando unicamente a figura 4.2 não é possível determinar a percentagem de água que optimiza a espuma, pois para obter uma maior **expansão** a percentagem de água é uma, mas para ter uma espuma com maior **semi-vida** a percentagem de água é bastante inferior.

Como o objectivo é maximizar ambos os parâmetros **expansão** e **semi-vida** de modo a melhorar a dispersão do betume na mistura, é perceptível a dificuldade na determinação de um valor óptimo de percentagem de água pois é necessário escolher qual das duas propriedades da espuma deve ser valorizada em relação à outra, sendo evidente a subjectividade de que se reveste tal procedimento.

Ao representarmos a medida da expansão da espuma durante o intervalo de tempo que decorre entre o atingir o valor máximo da expansão e o volume inicial de betume obtém-se uma curva semelhante à apresentada na figura 4.3 Esta curva, chamada curva de queda da espuma não é mais do que o registo “discreto” da medição da expansão da espuma em intervalos de tempo predeterminados, desde que a espuma atinge o seu valor máximo até ao seu colapso (valor inicial de betume). O processo que decorre durante este intervalo de tempo designa-se por “queda” de uma espuma.

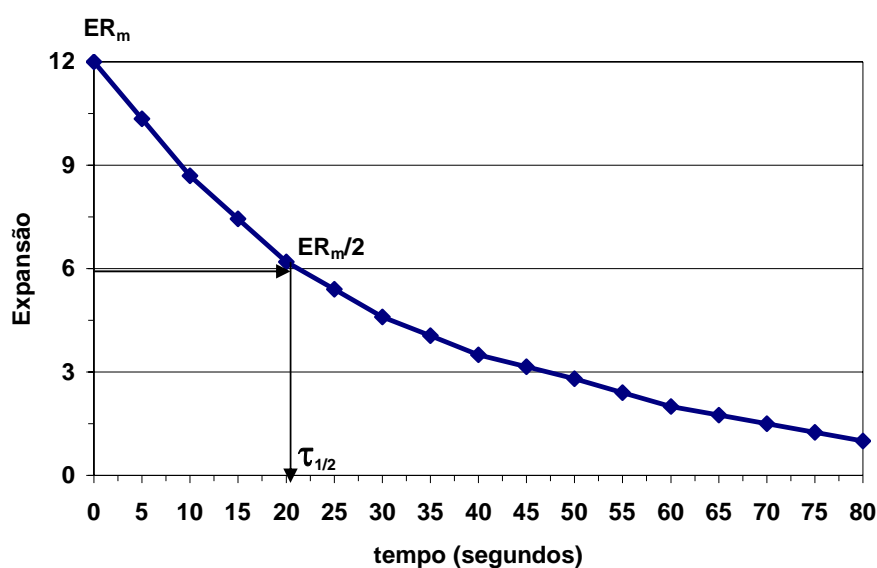


Figura 4.3 - Exemplo de uma Curva de Queda de uma Espuma

4.4 “QUEDA” DAS ESPUMAS DE BETUME

Em laboratório podem ser identificadas várias causas para a “queda” da espuma com o tempo.

O contacto das bolhas de espuma (principalmente das da fronteira) com o ar e com o recipiente, a temperaturas inferiores provoca um arrefecimento das bolhas. O arrefecimento das bolhas induz uma diminuição da pressão do vapor de água

encapsulado. Se essa diminuição da pressão interior for suficiente para que a pressão no interior da bolha tome valores inferiores aos da pressão de recuperação da camada de betume que a envolve, essa bolha perde volume, podendo mesmo entrar em colapso.

É evidente que bolhas maiores, tendo maior superfície específica tendem a entrar em colapso primeiro, pois perdem mais calor do que as mais pequenas, fruto da sua maior superfície específica que permite uma maior troca de calor com o exterior. Se a “gota” de água que dá origem à bolha de espuma for muito grande, e a sua expansão, em forma de vapor, ultrapassar o limite de expansão da camada de betume, a bolha “rebenta” deixando escapar o vapor contido no seu interior. Contudo é usual neste caso que nem toda a água se transforma em vapor, existindo ainda uma pequena “gota” de água no interior da bolha de espuma que rebenta. Desta forma pode-se formar outra bolha de espuma originada por esta “gota” de água embora a energia existente para este novo processo de formação de nova bolha de espuma seja agora menor.

A curva de “queda” das espumas de betume pode ser modelada numericamente.

A expressão 4.1 apresentada por Jenkins (1999) foi desenvolvida com o intuito de descrever a queda de espumas de betume obtidas com betumes não aditivados, ou seja, sem adição de aditivos com o objectivo de melhorar as propriedades da espuma.

$$ER(t) = ER_m \cdot e^{\frac{-\ln 2}{\tau_{1/2}} t} \quad (\text{Expressão 4.1})$$

Nesta expressão os símbolos têm os seguintes significados:

$ER(t)$ - Expansão função do tempo após descarga;

ER_m - Expansão máxima medida;

$\tau_{1/2}$ - Semi-vida;

t - Tempo medido, após descarga.

Esta expressão permite estimar a curva de queda das espumas de betume, permitindo obter um registo contínuo da curva de queda que se apresenta semelhante à da figura 4.3 apresentada anteriormente.

Um factor importante e que deve ser tomado em consideração, é a impossibilidade de medir o volume da espuma de betume durante o tempo que decorre entre o início e fim da produção da espuma (tempo de “*spray*”, t_s). Note-se que só é possível medir a expansão após o instante em que se verifica o término da produção da espuma.

Assim, não se pode quantificar a expansão durante este intervalo de tempo. É por esta razão que a curva de “queda” da espuma apenas pode ser representada após o instante em que termina a sua produção ignorando o que se passa durante o tempo de “*spray*”. Em espumas cuja **semi-vida** é relativamente grande, este facto não tem uma importância extrema, mas para o caso das espumas com uma **semi-vida** relativamente curta este facto é importante e deve ser tido em conta.

Uma vez que a ordem de grandeza do intervalo de tempo de “*spray*” é de cerca de 5 segundos, verifica-se que quando se começa a medir o volume/expansão da espuma, a mesma já sofreu um decréscimo durante este período de tempo. Assim, o volume máximo que se mede (primeiro registo) não corresponde exactamente ao volume máximo real da espuma. Este facto está ilustrado nas figuras 4.4 e 4.5.

Na figura 4.4 é possível observar que só passados 5 segundos de se começar a fazer o “*spray*” se mede o volume da espuma, tomando este como o volume máximo. O ramo ascendente da curva corresponde ao intervalo de tempo de “*spray*” da espuma e o ramo descendente corresponde à queda da espuma após o “*spray*”.

Na figura 4.5 está representada a curva de queda da mesma espuma, mas efectuando uma pequena correcção que consiste em extrapolar o valor da **expansão** para o intervalo de tempo que decorre durante o “*spray*” da mistura. Comparando as curvas (figuras 4.4 e 4.5) observa-se que a expansão máxima quantifica o valor de 13, mais perto da realidade, que o valor 12 da figura 4.4.

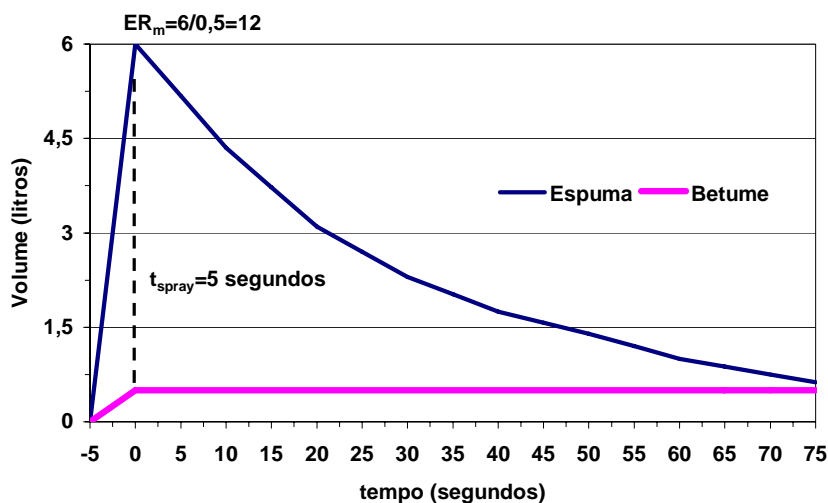


Figura 4.4 - Ciclo de Vida de uma Espuma Betuminosa

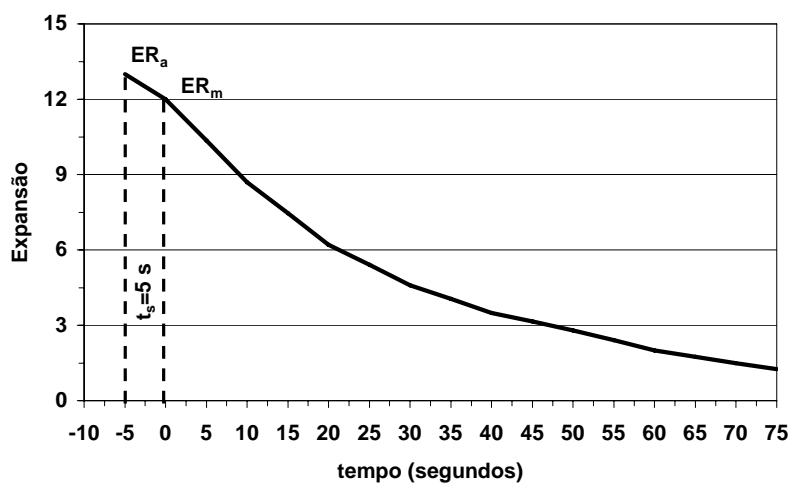


Figura 4.5 - Representação da Expansão Real

O parâmetro **ER_a**, “expansão máxima real” da espuma é a **expansão** da espuma considerando que esta se mede desde o instante de tempo em que se começa o “*spray*” da espuma.

Este parâmetro **ER_a** não pode ser medido, pois não é possível medir a queda durante o tempo de “*spray*” da espuma, mas pode ser extrapolado. A relação entre estes dois

parâmetros pode ser representada por um terceiro indicador $c = ER_m/ER_a$. Assim, quantificando ER_m podemos estimar o valor de ER_a , uma vez que há uma relação entre ambos (Figura 4.6).

A figura 4.6 apresentada por Jenkins (1999) é a representação deste parâmetro em função da **semi-vida** da espuma para diferentes tempos de “*spray*”. Este diagrama serve para estimar a **expansão** real (ER_a) de uma espuma medindo apenas a **expansão** máxima ER_m .

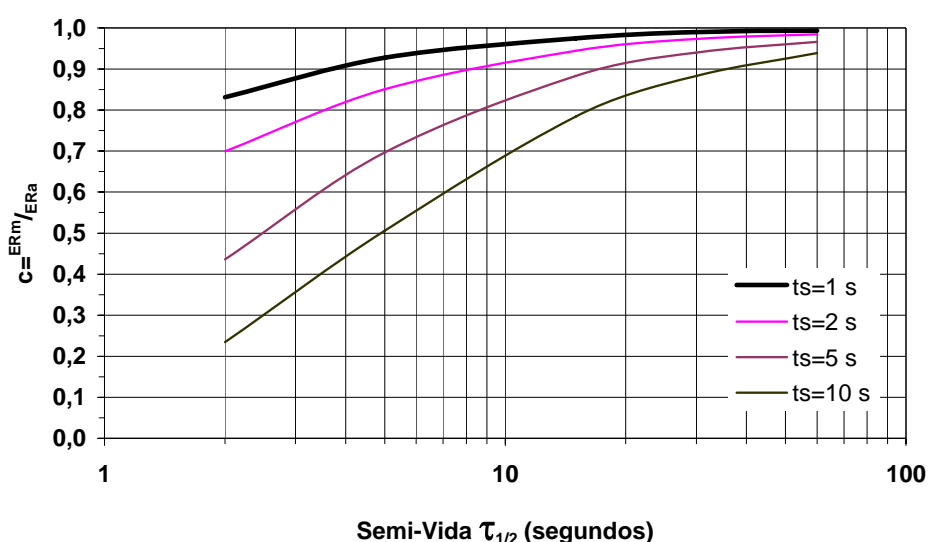


Figura 4.6 - Curvas de Relação entre a Expansão Real e a Expansão Medida

4.5 O ÍNDICE DE ESPUMA, “FOAM INDEX”

Um parâmetro introduzido recentemente e que se tem mostrado muito útil na identificação das condições ótimas para a produção da espuma, maximizando as suas propriedades e também na identificação da percentagem óptima de água a adicionar ao betume para produzir a espuma é o Índice da Espuma (Foam Index na designação inglesa e designado ao longo do presente texto por **FI**). Como já foi referido os parâmetros de **expansão** e de **semi-vida** da espuma são dependentes entre

si, sendo ainda ambos dependentes da percentagem de água. A sua optimização não é de fácil obtenção como já se referiu. Este novo parâmetro, o **FI**, simplifica o processo de optimização.

Para determinadas condições (percentagem de água, tipo de betume e sua temperatura) o **FI** é obtido quantificando o valor da área sob a curva de queda da espuma. (A_2+A_1 na figura 4.7). Este parâmetro é calculado utilizando toda a curva de queda da espuma, em vez de se considerarem apenas os dois pontos da curva **ER** e **semi-vida** representativos das propriedades da espuma. A experiência até ao momento permitiu concluir que só para valores de **ER** iguais ou superiores a 4 se atinge uma viscosidade superior a 0,2 (Pa.s), limite inferior do intervalo considerado aceitável (0,2 a 0,55 Pa.s) para se proceder à mistura de modo a possibilitar uma boa dispersão do betume nos agregados (Shell Bitumen, 1990).

Este valor de **ER** é então o adoptado como a fronteira da área a considerar sob a curva. Integrando a curva de queda (assimptótica) de modo a obter a área A1 e calculando a área A2 (ambas representadas na figura 4.7) obtemos a expressão 4.2, válida apenas para betumes não aditivados (Jenkins, 2000).

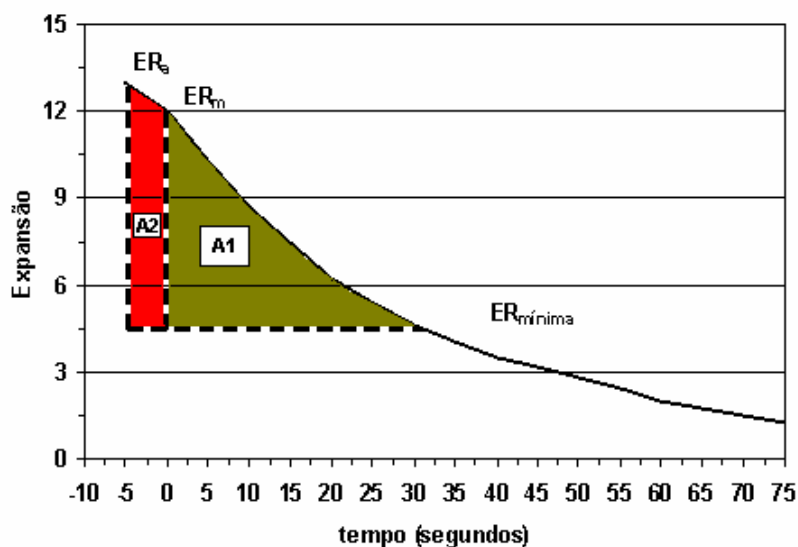


Figura 4.7 - Curva de "Queda"

$$FI = \frac{-\tau_{1/2}}{\ln 2} \left(4 - ER_m - 4 \times \ln \left(\frac{4}{ER_m} \right) \right) + \left(\frac{1+c}{2c} \right) \times ER_m \times t_s \quad (\text{Expressão 4.2})$$

Os parâmetros envolvidos são os já definidos, representando t_s o tempo de “*spray*” que como foi já referido representa o tempo que dura a descarga de toda a espuma.

Refira-se que a expressão apresentada 4.2 só permite calcular o FI no caso dos betumes cuja curva de queda seja do tipo assintótica, a mais comum (ver figura 4.3).

No caso de tal não se verificar, a utilização da expressão não é válida e deve proceder-se ao cálculo da área sob a curva por outro método, por exemplo:

- Medição da $ER(t)$ e representação da curva de queda;
- Repetições deste procedimento pelo menos três vezes de forma a verificar se não existiram erros em cada experiência;
- Cálculo da área $A1$ sob a curva de queda entre t_0 e t_{\min} , ver figura 4.7, por exemplo por um processo gráfico;
- Cálculo da área $A2$ entre $t \in [-t_s, t_0]$ utilizando a expressão 4.3, que corresponde à segunda parcela da expressão 4.2 utilizada para calcular o **FI**.

$$A2 = \left(\frac{1+c}{2c} \right) \times ER_m \times t_s \quad (\text{Expressão 4.3})$$

O **FI** é um parâmetro muito versátil, cujo conceito permite avaliar o potencial de cada betume para formar espuma de boas características.

Um betume X com um FI maior que um betume Y tem melhores capacidades para originar uma espuma que o Y com um FI inferior. O betume X com um maior FI é capaz de armazenar uma maior quantidade de energia na espuma do que o betume Y. Esta forma de comparação de diferentes betumes quanto à sua capacidade de originar espuma com boas propriedades, revela-se mais eficaz do que a simples comparação por **ER** e **semi-vida**.

Variando a percentagem de água para produção da espuma e determinando o FI para cada situação, obtém-se um gráfico do tipo do apresentado na figura 4.8. este gráfico permite estimar qual a percentagem de água que maximiza a energia acumulada pela espuma, ou seja, aquela que permite obter o maior FI. Procedendo desta forma elimina-se a subjectividade inerente ao processo anteriormente referido que tinha como inconveniente a valorização de um dos medidores das propriedades da espuma sobre o outro.

Considere-se a figura 4.8, que representa os valores medidos do **FI** em função da percentagem de água utilizada para a produção da espuma. Torna-se evidente que quanto maior é o **FI**, maiores são as áreas A1 e A2, que são proporcionais à **semi-vida** e à **expansão** da espuma.

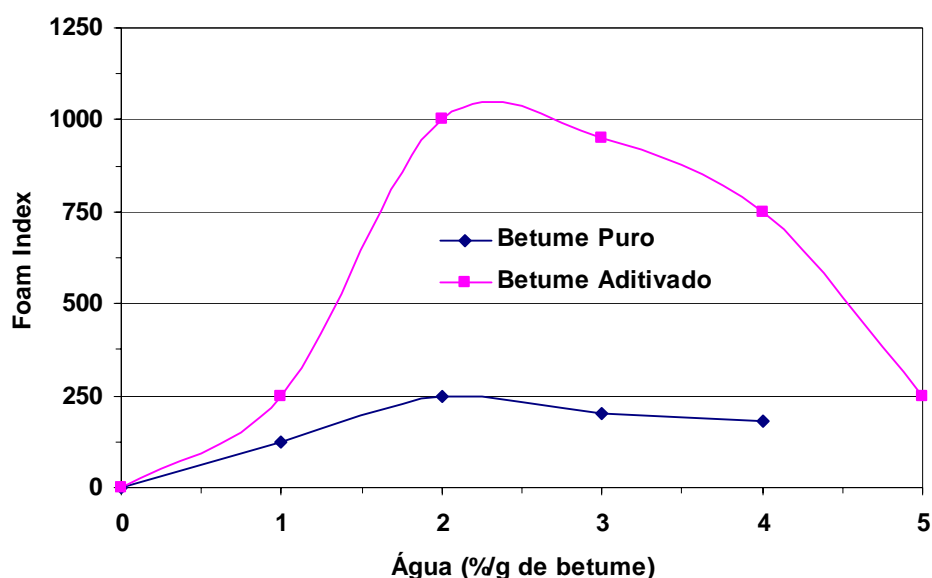


Figura 4.8 - *Foam Index* em Função da Percentagem de Água

O ponto mais elevado do gráfico da figura 4.8 não representa necessariamente a percentagem de água óptima, mas permite situar um valor médio do intervalo a considerar para a obtenção da espuma com melhores propriedades. Analise-se o gráfico da figura 4.8 observa-se que à esquerda do ponto óptimo (menor percentagem de água), a percentagem de água adicionada é insuficiente, de tal modo que não se gera quantidade suficiente de vapor para atingir o valor máximo da **expansão**.

Para a direita do ponto óptimo (maior percentagem de água) a quantidade de vapor gerado é superior à que o betume pode reter, resultando numa perda de energia. É entre estas duas situações que se encontra a espuma “otimizada”.

Na mesma figura podemos também observar a existência de duas curvas.

A curva azul diz respeito à utilização de um betume sem aditivos. Neste caso, o procedimento para determinação do FI foi a utilização da expressão 4.2.

A curva vermelha diz respeito à utilização do mesmo betume mas adicionando 0,1 % de aditivo expansivo ao mesmo e evidencia o benefício da utilização de aditivos na produção de espumas de betume pois permite quantificar valores para o FI superiores e conseqüentemente a **expansão** e a **semi-vida** da espuma obtida atingem valores consideravelmente superiores. A utilização destes aditivos nem sempre é considerada uma vez que a sua utilização implica custos elevados (mesmo quando utilizados em pequenas quantidades, o seu preço é muito elevado quando comparado com os outros elementos necessários para a produção de espumas de betume).

4.6 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A PRODUÇÃO DE ESPUMAS DE BETUME

TEMPERATURA E VAPOR DE ÁGUA

Alguns factores que influenciam as características da espuma devem ser considerados aquando da sua produção, nomeadamente em estudos laboratoriais que visam o estudo das suas propriedades, por exemplo a **expansão** e a **semi-vida**, e a compreensão dos fenómenos envolvidos. Um destes aspectos e que assume uma importância relevante está directamente relacionado com a temperatura de equilíbrio do sistema, conceito que se apresenta de seguida.

A espuma ao ser descarregada num contentor, que é normalmente constituído por aço, transfere energia calorífica para o recipiente. Se considerarmos um sistema fechado, em que apenas se dá transferência de calor entre os seus elementos, a aplicação da lei da conservação da energia é simples e permite a determinação de uma temperatura de equilíbrio do sistema. Toda a energia perdida pelo betume é transmitida ao recipiente e à água.

Exemplificando, a energia calorífica adquirida pela água pode dividir-se em três parcelas. Uma primeira que serve para elevar a temperatura da água até ao ponto de ebulição. Uma segunda que é consumida para vencer a energia latente para formação do vapor de água e uma terceira que respeita à energia utilizada para elevar a temperatura do vapor de água. Para quantificar a energia transferida para o recipiente é necessário conhecer a sua massa específica e a sua temperatura inicial. Com esta informação pode estabelecer-se qual a temperatura de equilíbrio para o sistema que deve ser considerada na determinação das características da espuma.

Considerando que em laboratório se pretende determinar as propriedades de uma espuma, procede-se do seguinte modo:

Aquecimento de 1 kg de betume até à temperatura de 170 °C.

Adição de água à temperatura de 20 °C a uma taxa de 2,5 % (25 g) num dispositivo próprio de modo a produzir a espuma.

Descarga da espuma produzida para um determinado recipiente de aço de 2,0 kg que se encontra a 25 °C.

Considerando este sistema fechado, a energia perdida pelo betume é transferida na forma de calor para a água e para o recipiente.

$$E_{\text{água}} + E_{\text{recipiente}} = E_{\text{betume}} \quad (\text{Expressão 4.4})$$

A energia de cada elemento é quantificada pela expressão:

$$E_x = m_x \times C_x \times (t_i - t_f)_x \quad (\text{Expressão 4.5})$$

Representando:

E_x - A quantidade de energia do material x envolvida no processo de alteração da sua temperatura;

m_x - Massa do material x que sofre alteração da sua temperatura (g);

C_x - Calor específico do material x (cal/g);

t_i - Temperatura inicial do material x (°C);

t_f - Temperatura final (equilíbrio do sistema) do material x (°C).

Substituindo para cada elemento os factores da expressão 4.5 vem:

$$E_{\text{betume}} = 1000 \times 0,5 \times (170 - t);$$

$$E_{\text{recipiente}} = 2000 \times 0,112 \times (t - 25);$$

A energia calorífica absorvida pela água divide-se em 3 parcelas, como foi referido, e quantificadas pelas expressões seguintes:

$$E1_{\text{água}} = \frac{2,5 \times 1000}{100} \times 1,0 \times (100 - 20);$$

$$E2_{\text{água}} = \frac{2,5 \times 1000}{100} \times 539,4;$$

$$E3_{\text{água}} = \frac{2,5 \times 1000}{100} \times 0,5 \times (t - 100).$$

Substituindo na expressão 4.4 e resolvendo a equação em ordem a t obtemos o valor da temperatura de equilíbrio para o sistema. Neste caso 103 °C. A determinação desta temperatura vai permitir determinar o **volume teórico de vapor de água** que se obtém a partir do volume de água inicial do exemplo apresentado. Consideremos a lei universal dos gases traduzida pela seguinte expressão:

$$p \times V = n \times R \times t \quad (\text{Expressão 4.6})$$

Representando,

p - Pressão (atm);

V - Volume (l);

n - Número de moles (moles);

R - Constante universal = $0,08205 \left(\frac{\text{atm} \times \text{l}}{\text{mole} \times ^\circ \text{Kelvin}} \right)$;

t - Temperatura (° Kelvin).

Substituindo os factores da expressão 4.6 vem:

$$1,0 \times V = \frac{2,5 \times 1000}{100 \times 18} \times 0,08205 \times (103 + 273,16)$$

Resolvendo a equação obtida em ordem a V obtemos o valor de 42,9 l. Se este volume de vapor fosse combinado na sua totalidade com o betume obteríamos um coeficiente de **expansão** de aproximadamente 42,9 para a espuma produzida. Este valor é muito elevado, pois verifica-se que a sua ordem de grandeza é cerca de duas vezes e meia superior aos valores máximos que se medem experimentalmente. Este facto permite concluir que nem todo o vapor de água produzido é utilizado de uma forma eficiente no processo de produção da espuma e pode ser explicado por três ocorrências seguintes:

- Nem todo o vapor é encapsulado pelo betume e parte dele escapa;
- Nem toda a água se transforma em vapor, podendo permanecer pequenas bolhas de água no interior das bolhas de vapor;
- E por último, a pressão dentro das bolhas de betume é maior que a pressão atmosférica.

Tendo em conta as observações de experiências realizadas em laboratório, pode afirmar-se que é do consenso da comunidade científica que “gotas” de água com dimensões máximas entre 100 e 150 μm , dão origem a bolhas de espuma com tamanho crítico, ou seja bolhas que sofrem rotura pois “gotas” de água com esta dimensão ou superiores induzem uma expansão/deformação muito grande das bolhas de betume que as envolvem. Assim a fina camada de betume que envolve o vapor rebenta resultando na perda do vapor de água encapsulado no seu interior. Perante este facto entende-se que dispositivos de produção de espuma que produzam água atomizada com dimensões de 100 e 150 μm ou inferiores tendem a produzir uma espuma de qualidade superior. Assim é de todo o interesse que os dispositivos utilizados para a produção de espumas de betume quer em obra, quer em laboratório sejam capazes de produzir água atomizada em que a dimensão máxima das gotículas de água se situe num valor próximo deste intervalo.