

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INTRODUÇÃO

A produção de misturas de espumas requer a utilização de agregados, betume e água. Os agregados depois de misturados em proporções específicas, constituem o esqueleto granular da mistura depois desta compactada.

A espuma funcionará como o elemento ligante da mistura. A presença de água durante o processo de construção da camada influencia as características finais da mesma. Numa primeira fase, é necessário considerar a presença de água sob forma de humidade inicial nos agregados, pois esta condiciona o modo como a espuma se dispersa nos agregados. Numa segunda fase tem de se considerar a água necessária para a própria produção da espuma. E numa terceira fase, como teor de humidade da mistura que deve estar situado entre limites determinados de modo a permitir uma boa compactação da mesma. O diagrama apresentado na figura 3.1 esquematiza estas relações de uma forma mais evidente.

Ao longo deste capítulo apresenta-se uma breve revisão bibliográfica apoiada no esquema ilustrado na figura 3.1. Seguindo este raciocínio, dar-se-á ênfase às referências encontradas relativas aos procedimentos e metodologias referentes à produção da espuma e às condicionantes que influenciam o desempenho da mistura final que é obtida.

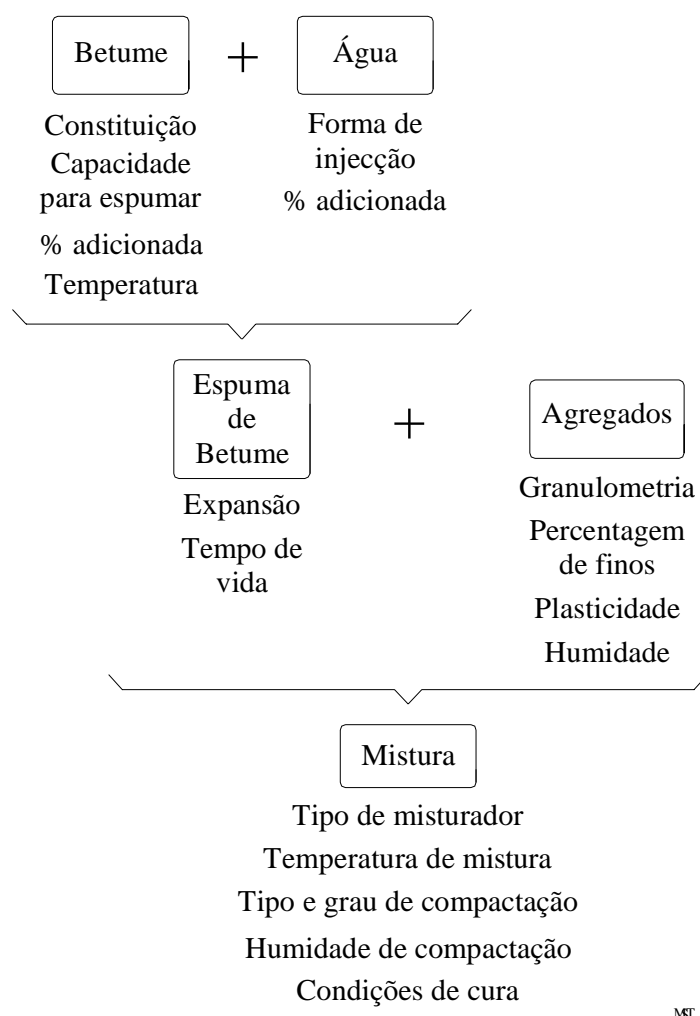


FIGURA 3.1 - Factores Influentes nas Propriedades da Mistura durante a sua Produção

3.2 BETUME

As características do betume a utilizar para a produção da espuma são extremamente importantes, pois influenciam as propriedades da espuma que se obtém, nomeadamente a **expansão** e a **semi-vida**. Estes por sua vez influenciam as propriedades da mistura. (Bowering and Martin, 1976; Lee, 1981). Este facto permitiu estabelecer valores a utilizar como referência entre 8 e 15 para a **expansão** e valores mínimos de 20 segundos para a **semi-vida** (Ruckel *et al*, 1983; Acott and Myburgh, 1982). Posteriormente estes valores foram revistos tomando os valores de

10 para a **expansão** e 12 segundos para a **semi-vida** (Muthen (CSIR), 1998). Estes limites por si só limitam a escolha do betume a utilizar, pois embora seja possível produzir espuma com qualquer tipo de betume os valores de referência apresentados não são possíveis de obter com todos os betumes, nomeadamente os que contêm silicões na sua constituição.

Os betumes com menor viscosidade oferecem menor resistência ao processo de “foaming”, ou espumação, e permitem obter valores de **expansão** e **semi-vida** superiores aos medidos em espumas produzidas com betumes de viscosidade superior. Por outro lado, as espumas produzidas com betumes mais viscosos agregam os agregados de uma forma mais eficaz (Abel, 1978). Aos betumes que originam espumas com valores de **expansão** e **semi-vida** insuficientes podem ser adicionados agentes químicos espumantes (“foamants” na designação anglo-saxónica) que aumentam estas duas propriedades, permitindo a sua utilização. Contudo, é preciso ter em conta que a utilização deste tipo de aditivos tem repercussões económicas relevantes (Maccarone *et al*, 1994).

Os betumes utilizados para a produção de espumas são regra geral moles, do tipo 170-200 (Saleh, 2000). Embora fosse de grande utilidade relacionar a penetração dos betumes com as propriedades das espumas que se obtêm, não é possível correlacionar estas propriedades de uma forma explícita (Brennenet *et al*, 1983 e Lee, 1981).

3.3 AGREGADOS

Na utilização de espumas como agente ligante em pavimentos, verifica-se a existência de uma grande compatibilidade com todos os tipos de agregados. Note-se que é bastante variada a gama de agregados utilizados neste tipo de misturas, assim como as suas características e propriedades iniciais. Este facto é reforçado na literatura acerca do tema que embora apresente algumas referências a materiais mais ou menos adequados ao tratamento com espumas, não apresenta referências a agregados incompatíveis com este tipo de ligante. Esta circunstância revela-se uma

vantagem pois verifica-se que o sucesso da utilização das espumas não tem uma relação de dependência com a carga das partículas constituintes dos agregados, como acontece em outros processos nomeadamente com as emulsões (Jenkins, 2000).

A primeira propriedade dos agregados que foi alvo de estudo foi a granulometria e como resultado foram definidos fusos granulométricos de referência para escolha da granulometria a utilizar em misturas de espuma de betume. Estas curvas estão representadas na figura 3.2 (Akeroyd and Hicks, 1988).

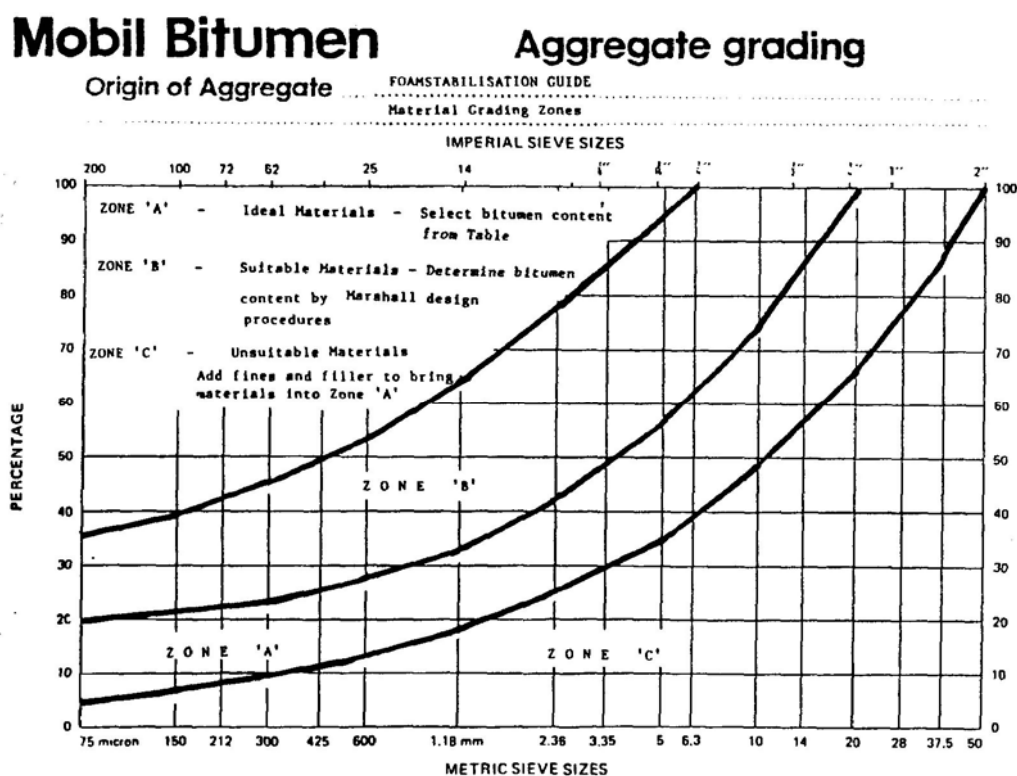


FIGURA 3.2 - Fusos Granulométricos definidos por Akeroyd and Hicks

FONTE: Akeroyd and Hicks (1988)

Como se pode observar na figura 3.2 é necessária a presença de agregados finos ($< 0,075$ mm) no esqueleto da mistura em percentagens superiores a 5% para que se possa utilizar a espuma como ligante de um modo eficaz (Saleh, 2000). Estas curvas têm sido utilizadas até hoje como referência e auxiliar na selecção de materiais com granulometria ideal para a utilização em misturas de espuma (Muthen (CSIR), 1998; Egziabher, 2000; Wirtgen, 2001a e Saleh, 2000). No caso dos finos presentes na

mistura serem do tipo plástico, a sua percentagem deve ser limitada a valores próximos do intervalo de 8 a 12 % (Lee, 1981 e Lancaster *et al*, 1994). Se a percentagem destes materiais for superior aos valores referidos os agregados devem ser submetidos a tratamento com cal ou cimento antes da sua mistura com a espuma. A adição de cimento deve também ser estudada cuidadosamente pois embora a sua adição possa ser benéfica em casos de agregados finos com presença de argila o seu excesso pode levar ao aparecimento de fissuras de retracção (Saleh, 2000; Lancaster *et al*, 1994).

3.4 ESPUMA DE BETUME

São várias as variáveis que condicionam a produção da espuma de betume e as suas propriedades. A **expansão** e a **semi-vida** medidas aquando da produção da espuma dependem da quantidade produzida, da quantidade de água utilizada e da temperatura do betume. Na figura 3.3 são apresentadas curvas que relacionam a **expansão** e a **semi-vida** com a percentagem de água utilizada para a produção da espuma e a temperatura e tipo de betume (Brennen *et al*, 1983).

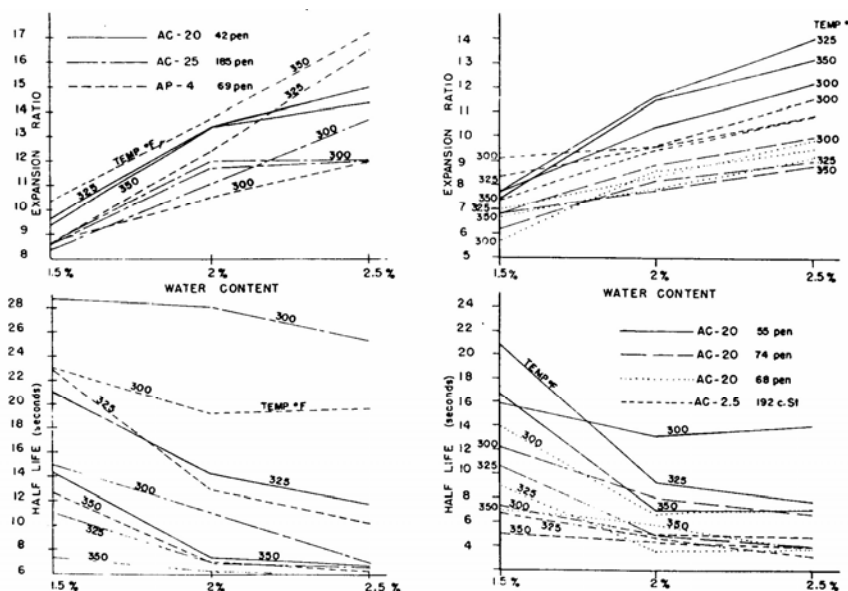


FIGURA 3.3 - ER e $\tau_{1/2}$ em Função da Percentagem da Água

FONTE: Brennen *et al* (1983)

Analisando os gráficos apresentados concluímos que podemos aumentar a **expansão** por duas vias, ou aumentando a temperatura do betume ou aumentando a quantidade de água utilizada na produção de espuma. Esta acção tem implicações na **semi-vida** da espuma pois verifica-se uma diminuição do mesmo com o aumento da percentagem de água utilizada ou da temperatura do betume. É evidente a existência de uma permuta entre estas duas propriedades, sendo por isso necessário encontrar um ponto de equilíbrio entre ambas.

Um outro factor a ter em conta na produção de espuma é o tipo de recipiente para o qual se descarrega a espuma produzida, aquando da medição das suas propriedades. É fundamental conhecer a temperatura deste recipiente pois a sua influência na medição da **expansão** e da **semi-vida** é muito relevante. Este facto tem sido regra geral negligenciado, encontrando-se poucas referências ao mesmo (Brennen *et al*, 1983; Muthen (CSIR), 1998).

3.5 A MISTURA DE ESPUMA

A etapa seguinte à determinação dos parâmetros que maximizam as propriedades da espuma é a produção da mistura, que consiste no envolvimento dos agregados com a espuma de betume. A tabela 3.1 apresentada é ainda hoje utilizada como indicadora da percentagem de betume a utilizar para a formulação das misturas com espumas em função do agregado utilizado (Saleh, 2000). Nesta tabela é apresentada a percentagem de betume a utilizar para cada tipo de solo, sendo que estes são designados em conformidade com a Classificação Unificada de Solos e a sua propensão para utilização em misturas de espuma de betume.

TABELA 3.1 - Relação entre Solos e Espumas

FONTES: Ruckel et al (1983) e Saleh (2000)

Tipo de Solo	Classificação Unificada	Compatibilidade com Espuma de Betume	Percentagem óptima de Betume (%)	Notas
Cascalho bem graduado	GW	Boa	[2,0 , 2,5]	Requer correção granulométrica
Cascalho bem graduado, com argila	GW-GC	Boa	[2,0 , 4,0]	Requer correção granulométrica
Cascalho bem graduado, com silte	GW-GM	Boa	[2,0 , 4,0]	Requer correção granulométrica
Cascalho mal graduado, com argila	GP-GC	Boa	[2,0 , 3,0]	Requer correção granulométrica
Cascalho argiloso	GC	Má	[4,0 , 6,0]	Requer adição de cal
Areia bem graduada	SW	Razoável	[4,0 , 5,0]	Requer adição de filer
Areia siltosa bem graduada	SW-SM	Boa	[2,5 , 4,0]	
Areia siltosa mal graduada	SP-SM	Má	[3,0 , 4,5]	Requer adição de filer e uso de betumes duros
Areia mal graduada	SP	Razoável	[2,5 , 5,0]	Requer adição de filer
Areia siltosa	SM	Boa	[2,5 , 4,5]	
Areia siltosa com argila	SM-SC	Boa	4,0	
Areia argilosa	SC	Má	[4,0 , 6,0]	Requer a adição de cal em pequena %
		Boa	[3,0 , 4,0]	Requer adição de cal

Como foi referido anteriormente a presença de finos nos agregados em determinados valores é fundamental para a obtenção de uma mistura com boas propriedades. Uma outra forma de estimar uma aproximação do valor da percentagem de betume a utilizar é a utilização da tabela 3.2 que relaciona essa mesma percentagem com a percentagem de agregados finos presentes no esqueleto granular da mistura. Esta tabela deve ser tida em conta para aferir o valor da tabela 3.1, e aconselha-se a utilização das duas de um modo complementar para estimar o valor da percentagem de betume a utilizar.

TABELA 3.2 - Percentagem de Betume a utilizar na Mistura em Função do Agregado Fino

FONTES: Ruckel et al (1983) e Saleh (2000)

Passados no peneiro de 4,57 mm (%)	Passados no peneiro de 0,075 mm (%)	Espuma de betume/agregado seco (%)
< 50	[3,0 ; 5,0]	3,0
	[5,0 ; 7,5]	3,5
	[7,5 ; 10,0]	4,0
	> 10,0	4,5
> 50	[3,0 ; 5,0]	3,5
	[5,0 ; 7,5]	4,0
	[7,5 ; 10,0]	4,5
	> 10,0	5,0

A percentagem de betume na mistura é uma característica muito importante pois tem uma influência elevada nas propriedades na mesma. A título de exemplo pode referir-se que o aumento da percentagem de betume aumenta o número de repetições necessárias para se atingir uma deformação permanente de 2% num ensaio triaxial cíclico (Shackel et al, 1974). Pode também observar-se que para a grande maioria dos ensaios o desempenho da mistura melhora com o aumento da percentagem de betume até um valor máximo para depois diminuir (Bowering and Martin, 1976). Outra evidência que se pode referir e que é até comum a outro tipo de mistura a frio (como as misturas com emulsões betuminosas) é a diminuição da absorção e da susceptibilidade à humidade com o aumento da percentagem de betume (Brennen et al, 1983). É do conhecimento comum que a deformação permanente das misturas quando submetidas a cargas repetitivas aumenta com o grau de saturação (Shackel et al, 1974).

Na produção das misturas deve ser tido em conta que os misturadores utilizados “*in-situ*” são diferentes dos utilizados em laboratório. Como forma de superar este inconveniente foi desenvolvido um procedimento que consistia em dividir os

agregados em duas fracções, uma fina e uma grossa que depois eram misturados com o betume separadamente (Ruckel *et al*, 1983). Posteriormente este método foi aperfeiçoado. A fracção grossa passou a ser tratada com emulsão e a fracção fina com espuma de betume. A mistura obtida assemelha-se a uma mistura betuminosa a quente (Maccarone, 1994).

Um conceito a ter em conta e que tem uma grande influência na dispersão do betume nos agregados e conseqüentemente nas características das propriedades da mistura é a humidade dos agregados antes de se misturarem os mesmos com a espuma. Note-se que valores elevados de humidade aumentam os tempos de cura e diminuem a densidade e a resistência. Por sua vez valores baixos de humidade dificultam a dispersão do betume nos agregados (Brennen *et al*, 1983).

O “fluf point”, percentagem de humidade para a qual uma dada porção de solo não compactado ocupa o máximo volume, é indicado em alguns estudos como o teor ideal de humidade para proceder à mistura (Bowering, 1970; Brennen *et al*, 1983). Este valor não reúne consenso sendo considerado muito baixo em um outro estudo (Jenkins, 2000). Como alternativa podemos considerar como sendo ideal o intervalo compreendido entre 65 e 85% da compactação Proctor (Lee, 1981). Dentro desta filosofia (Ruckel *et al*, 1983) recomendam como procedimento padrão a utilização de 50, 60 e 80% da percentagem óptima de humidade para compactação (OMC) do material natural e a armazenagem da mistura durante 12 horas (uma noite) para permitir uma melhor dispersão do ligante durante o intervalo de repouso. Uma evidência em todos os estudos é o facto de tratarem a humidade dos agregados independentemente do betume adicionado (Jenkins, 2000). A única excepção a este facto é referida em (Franco and Wood, 1982), que adoptam o conceito de percentagem óptima de fluído presente na mistura (betume+humidade dos agregados virgens) entrando deste modo em conta com a humidade adicionada pela espuma à humidade já presente nos agregados e estabelecem como valor óptimo o determinado em conformidade com a norma ASTM D 698. Uma outra abordagem consiste em considerar a humidade de moldagem (MMC) como função de OMC, da fracção fina e da percentagem de betume (Sakr and Manke, 1985).

Quando se consideram agregados reciclados, o valor determinado para a humidade de mistura deve ser cerca de 1% menor que a considerada para os mesmos agregados virgens (Roberts *et al*, 1984; Engelbrecht *et al*, 1985).

A temperatura dos agregados aquando da mistura com o ligante é um factor que também influencia o desempenho da mistura. O aumento da temperatura dos agregados facilita a dispersão do betume nos mesmos (Muthen (CSIR), 1998). A temperatura recomendada como indicativa situa-se no intervalo compreendido entre 13 a 23° C (Bowering and Martin, 1976; Franco and Wood, 1982).

A compactação da mistura é outro factor a ter em conta como influente no desempenho das misturas de espuma. A compactação em laboratório com o compactador de Marshall (75 pancadas) não é representativa da compactação atingida “*in-situ*” para as misturas de espuma (Brennen *et al*, 1983). O compactador giratório é mais adequado a este tipo de misturas pois atinge índices de compactação superiores e mais aproximados dos atingidos “*in-situ*” (Lewis and Collings, 1999).

A cura é outro factor que influencia as características relacionadas com o desempenho das misturas de espuma. A resistência final de uma mistura de espuma só se desenvolve após perda de grande parte da sua humidade inicial (humidade de compactação) (Bowering, 1970; Ruckel *et al*, 1983). A perda de humidade “*in-situ*” é influenciada pela circulação do tráfego e pela temperatura, evoluindo no tempo (Clarke, 1976). Por esta razão os primeiros tempos de uma mistura de espuma são os mais cruciais (Jenkins, 2000), a ocorrência de deformações prematuras em misturas de espuma ocorre nos primeiros dias (Ruckel *et al*, 1983) e por esta razão é importante simular a cura “*in-situ*” de modo o mais real possível (Jenkins, 2000).

As propriedades das misturas de espuma, quando sujeitas a cura em laboratório, não são afectadas pela temperatura mas pela humidade de equilíbrio que se atinge (Clarke, 1976; Bowering and Martin, 1976). A taxa de perda de humidade até se atingir este ponto de equilíbrio está relacionada com a temperatura e a presença ou não de molde durante a cura. A humidade representativa das condições “*in-situ*” pode ser atingida em 3 dias quando as amostras são conservadas a cerca de 60°C. Este procedimento é suficiente para atingir uma humidade de equilíbrio inferior a 4%

que é o valor atingido normalmente “*in-situ*” (Jenkins, 2000; Bowering, 1970 e Lee, 1981).