

INFLUÊNCIA DO PERCENTUAL DE FRESADO E DO ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE

Kamilla Lima Vasconcelos

Jorge Barbosa Soares

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - Petran

Universidade Federal do Ceará - UFC

RESUMO

O ligante asfáltico endurece em curto prazo após o aquecimento devido a perda de voláteis e no longo prazo devido, principalmente, a oxidação da mistura em campo. O presente trabalho trata de uma simulação do envelhecimento de curto prazo de misturas asfálticas recicladas a quente (MARQ) com diferentes teores de material fresado (0, 10, 30 e 50%). Esse envelhecimento foi feito em estufa antes da compactação por períodos de 0, 1, 2 e 4h à temperatura de compactação (144 a 149°C). Os resultados dos parâmetros volumétricos apresentaram grande variação nas MARQ's, fato esse devido provavelmente a heterogeneidade do material fresado. O resultado dos teores de projeto apresentaram uma tendência de um aumento com o tempo em estufa, devido a absorção de ligante pelos agregados. O mesmo não pode ser concluído para os diferentes teores de material fresado, devido a dispersão dos resultados obtidos.

ABSTRACT

Asphalt hardening is primarily associated with the loss of volatiles during mixing and construction (short-term aging) and progressive oxidation of the material in service (long-term aging). This paper presents a simulation of the short-term aging of recycled asphalt pavement (RAP) mixtures with different RAP percentages (0, 10, 30 and 50%). Aging was simulated in oven, before the compaction, for periods of 0, 1, 2 and 4 hours at compaction temperature (144 to 149°C). The results of volumetric parameters showed great variation in the recycled mixtures, probably due to the heterogeneity of the RAP. The optimum asphalt content tends to increase with short-term aging, due to asphalt absorption by the aggregates. The same conclusion was not reached for the different RAP percentages, due to the dispersion of the results obtained.

1. INTRODUÇÃO

De forma geral, o termo reciclagem significa processar um material, cujo estado não mais permite a sua utilização de maneira conveniente, de modo a recuperar propriedades que permitam a reutilização da matéria. A reciclagem de revestimentos asfálticos é um processo pelo qual uma mistura asfáltica existente, geralmente em condição deteriorada, é fresada e misturada a novos agregados e a um novo ligante asfáltico, possibilitando seu reaproveitamento. Existem casos ainda de utilização de 100% de material fresado como agregado, com adição apenas do ligante novo. Segundo Bonfim (1999), alguns autores classificam o reaproveitamento de material como reutilização quando este é aplicado para exercer função diferente da inicial. Na pavimentação, considera-se reciclagem somente quando da regeneração, ou rejuvenescimento, dos materiais asfálticos, com aplicação do material para exercer a mesma função inicial.

Entre as vantagens do uso dessa técnica podem ser destacados: o reaproveitamento de material, a redução nos custos de construção de novos pavimentos ou recapeamentos, um menor impacto ambiental antes causado pelo despejo inadequado de materiais e a diminuição da exploração de jazidas. Salienta-se ainda a possibilidade de correção do greide muitas vezes bastante elevado devido a sobreposições de recapeamentos.

É sabido que o ligante asfáltico endurece em curto prazo após o aquecimento devido à perda de voláteis e no longo prazo devido, principalmente, a oxidação da mistura em campo.

Segundo Tonial *et al.* (2001) a espessura da película de ligante sobre o agregado é fundamental para a determinação do envelhecimento do ligante no curto prazo e pode se tornar importante também para a determinação do envelhecimento de longo prazo em massas com elevado teor de vazios. O envelhecimento da mistura pode torná-la mais dura, quebradiça e suscetível a trincas e desintegração. Porém, o envelhecimento não é necessariamente um fenômeno negativo, visto que este processo pode levar a melhoria de algumas características da mistura, como uma melhor distribuição da carga, já que a mistura torna-se mais resistente à deformação permanente (Bell *et al.*, 1994).

Existe uma vasta bibliografia disponível sobre o envelhecimento do ligante asfáltico (Agnusdei *et al.*, 1975; Petersen *et al.*, 1993), porém observou-se uma carência em material bibliográfico sobre o envelhecimento das misturas asfálticas. Essa deficiência é ainda mais visível quando se trata de misturas que incorporam material com elevado grau de oxidação, como é o caso das misturas recicladas e essa foi uma das motivações deste trabalho. Não existe procedimento laboratorial padronizado para envelhecimento de misturas, nem de curto, nem de longo prazo, visto que a maioria das publicações existentes têm sido dedicadas ao envelhecimento do ligante asfáltico e não ao envelhecimento da mistura como um todo. Porém, segundo Bell *et al.* (1992), é possível que o envelhecimento da mistura apresente um comportamento diferente do envelhecimento do ligante asfáltico isoladamente, fato esse devido ao tipo de ligante e agregados utilizados.

O presente estudo consiste da dosagem de uma mistura asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), e de três misturas asfálticas recicladas a quente (MARQ) com 10, 30 e 50% de material fresado – *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), sendo todas com a mesma distribuição granulométrica. Procurou-se avaliar o efeito do envelhecimento de curto prazo na dosagem das misturas acima mencionadas. As misturas recicladas foram dosadas adotando-se pequenas adaptações do método de dosagem do Asphalt Institute (1995). Este é semelhante ao método Marshall, com adição da análise do RAP. Os procedimentos usados encontram-se descritos a seguir.

2. MÉTODO DE DOSAGEM DE MARQ DO ASPHALT INSTITUTE

Antes do início da dosagem da MARQ pelo método proposto pelo Asphalt Institute (1995) é necessária a caracterização de todos os materiais que compõem a mistura (fresado, agregados novos e ligante novo combinado ou não com AR). O diferencial da dosagem Marshall convencional para a dosagem de MARQ proposta pelo Asphalt Institute está em algumas etapas adicionais de análise do RAP, são elas: (i) extração do ligante para determinação de seu percentual na mistura fresada, (ii) granulometria após extração de ligante e (iii) recuperação do ligante envelhecido para determinação de sua viscosidade dinâmica a 60°C.

Este procedimento é sugerido para o percentual máximo de 70% de material fresado. Para valores inferiores a 20%, não se faz necessária a determinação da viscosidade do ligante asfáltico extraído, sendo o ligante a ser utilizado na mistura reciclada normalmente o mesmo usado para misturas convencionais (Asphalt Institute, 1986; McDaniel e Anderson, 2001). O resumo do procedimento de dosagem encontra-se resumido em Soares *et al.* (2002).

Para esse trabalho, foi adicionado ao procedimento Marshall convencional o tempo de envelhecimento da mistura em estufa, a fim de simular o envelhecimento de curto prazo. Segundo o procedimento de dosagem Superpave esse tempo deve ser de 2h (Roberts *et al.*,

1996) e segundo Bell *et al.* (1992) deve ser de 4h. A fim de verificar o efeito do tempo de simulação do envelhecimento de curto prazo, foram verificados diferentes tempos (0, 1, 2 e 4h) na dosagem do CBUQ convencional e das três MARQ's.

3. PROCEDIMENTO LABORATORIAL

3.1. Seleção dos materiais

A seleção dos agregados foi feita enquadrando as misturas na Faixa C do DNER, sendo utilizada brita ¾", como agregado graúdo; areia de campo, como agregado miúdo; e filer natural proveniente da própria areia de campo, com densidades reais 2,659; 2,646 e 2,650, respectivamente. A densidade do material de enchimento foi realizada separadamente, visto os resultados encontrados por Vasconcelos e Soares (2003a). Todos os agregados são provenientes da pedreira de Itaitinga – CE e apresentam uma absorção de água aproximadamente igual a 1,6%. Para a realização dos ensaios, bem como para a moldagem dos corpos-de-prova, os materiais foram fracionados da peneira ¾" à peneira N° 200, passando por toda a série especificada pelo DNER, de forma a assegurar que a curva granulométrica fosse a mesma, sendo as únicas variáveis no estudo, o percentual de fresado a ser incorporado e o tempo de envelhecimento das misturas em estufa. Como ligante, utilizou-se o CAP 50/60, densidade real 1,02 (Soares *et al.*, 1998) produzido a partir do petróleo nacional Fazenda Alegre refinado na Lubrificantes do Nordeste (Lubnor)/Petrobras.

3.2. Caracterização do material fresado

O material utilizado é proveniente da fresagem da Av. Eng. Santana Júnior, uma avenida de tráfego médio localizada na cidade de Fortaleza. Abaixo segue o teor de ligante encontrado no RAP, bem como a distribuição granulométrica após a extração do ligante envelhecido. As características do ligante recuperado encontram-se resumidas mais adiante, juntamente com as dos outros ligantes asfálticos utilizados neste estudo.

3.2.1. Teor de ligante

A determinação do teor de ligante do material fresado é realizada através da relação de pesos da amostra antes e depois da sua extração:

$$T = \frac{P_a - P_d}{P_a} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

T - teor de ligante no fresado, %;

P_a - massa da amostra de fresado antes da extração de ligante, g;

P_d - massa da amostra de fresado após a extração do ligante, g.

A extração foi realizada utilizando o aparelho Rotarex com o solvente tricloroetileno, a partir de amostras de 500g de fresado. O resultado obtido através de 9 determinações apresentou valor médio de 6,9%.

3.2.2. Granulometria do material fresado antes e após a extração do ligante

A granulometria do material fresado antes e após a extração adotada foi resultado de 5 determinações. A média obtida encontra-se descrita na Tabela 1. A Figuras 1 apresentam a distribuição granulométrica do RAP e dos agregados do fresado – *Reclaimed Aggregate Material* (RAM), segundo especificações do DNIT e Superpave.

Tabela 1: Graduação do material fresado após extração de ligante

Peneira	Abertura (mm)	% passando	
		Fresado com ligante	Fresado sem ligante
¾"	19,1	99,5	100,0
½"	12,7	78,5	96,5
3/8"	9,5	63,9	89,7
Nº 4	4,8	45,0	79,6
Nº 10	2,0	29,4	68,1
Nº 40	0,42	13,1	46,9
Nº 80	0,18	4,7	26,8
Nº 200	0,075	0,5	11,0

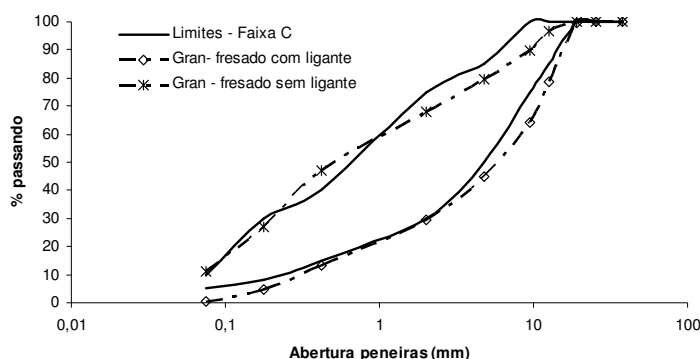


Figura 1: Granulometria do fresado sem ligante segundo especificações do DNIT

Observa-se que os agregados presentes no RAP não estão enquadrados na Faixa C do DNIT, nem atendem as especificações Superpave para tamanho máximo nominal de 12,5 mm. Observa-se também um percentual excessivo de finos, podendo esse ser devido a recapeamentos no trecho com misturas compostas de materiais finos, ou mesmo devido à quebra de parte dos agregados durante o procedimento de fresagem. A correção da granulometria do fresado foi feita com a adição dos agregados virgens, que juntos compuseram a granulometria final da MARQ.

3.3. Caracterização dos ligantes asfálticos

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) usado neste trabalho é classificado por penetração como um CAP 50/60 e atende às especificações da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 1993). A Tabela 2 fornece algumas características do CAP 50/60 novo e do ligante extraído e recuperado do material fresado.

Tabela 2: Classificação e características do CAP 50/60 (ANP, 1993)

Característica	Método	CAP 50/60 novo	Ligante recuperado
Penetração a 25°C (dmm)	ASTM D 5	51	23
Viscosidade dinâmica (60°C) (P)	ASTM D 2171	4.300	17.354

O agente rejuvenescedor utilizado (AR 75) é de viscosidade baixa, visto que o ligante existente no material fresado encontrava-se bastante oxidado, além de se estar trabalhando com até 50% da mistura composta de RAP. Na Tabela 3 são apresentadas algumas características do agente rejuvenescedor utilizado.

Tabela 3: Características do agente rejuvenescedor (AR 75)

Características	Método	Resultado
Viscosidade Cinemática à 60°C (cSt)	ASTM D 2170	8.260
Ponto de Fulgor (°C)	ASTM D 92	250
ECA – Variação de massa (%)	ASTM D 1754	0,7
ECA – Relação de viscosidade	ASTM D 1754	1,8

Antes de iniciar a dosagem das misturas é necessário fixar um valor de viscosidade para a combinação CAP novo, CAP envelhecido e AR. O ensaio de viscosidade dinâmica só foi realizado para o CAP novo e o CAP envelhecido, de forma que para se obter o valor da viscosidade dinâmica (60°C) do AR, multiplicou-se a viscosidade cinemática, em Stoke, pela sua massa específica, em g/cm³ (Santana, 1992), resultando em uma viscosidade de 83P.

3.4. Dosagem das misturas asfálticas

A metodologia de dosagem adotada neste estudo procurou ser a mais semelhante possível de uma dosagem de CBUQ convencional, de forma que o material fresado seria incorporado à mistura como mais um agregado (McDaniel e Anderson, 2001). O método de dosagem de misturas asfálticas recicladas do Asphalt Institute segue os mesmos passos da dosagem Marshall convencional com o acréscimo de procedimentos para análise do ligante do RAP. Abaixo seguem os ensaios realizados nos materiais isolados, assim como nas misturas estudadas.

3.4.1. Definição da curva granulométrica

A definição da granulometria foi feita de forma que as misturas apresentassem a mesma curva, independente do percentual de fresado a ser incorporado. Optou-se por enquadrá-la na Faixa C do DNIT, visto ser a mais utilizada para CBUQ em obras no estado do Ceará. Um dos cuidados que se teve foi de manter a granulometria do material fresado, a fim de não fugir da realidade de campo, além de assegurar que a única variável entre as misturas fosse o percentual de RAP.

A Figuras 2 apresenta: (i) a granulometria alvo, que considera todos os grumos de fresado desestruturados, e (ii) as granulometrias das misturas com 10, 30 e 50% de fresado caso esses grumos não se desestruturarem. Segundo Bonfim (1999), grumos são “pedaços de pavimento constituídos de um ou mais agregados, envoltos por material fino e cimento asfáltico de petróleo (CAP), resultantes e inerentes ao processo de fresagem”. Observa-se que, para o caso mais extremo (mistura com 50%), a granulometria passa a ser consideravelmente diferente da granulometria alvo, passando por baixo da zona de restrição, enquanto a alvo passa por cima. Essa diferença é suavizada na mistura de 10%, como já era esperado, devido a menor quantidade de material fresado.

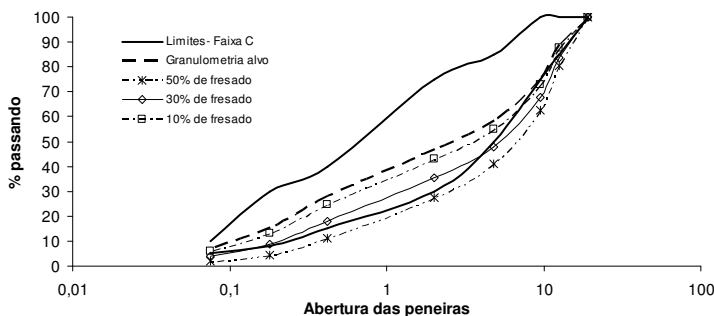


Figura 2: Distribuição granulométrica das misturas segundo especificações do DNIT

Hveem constatou que a espessura do filme de ligante de uma partícula é reduzido com a diminuição do diâmetro da mesma (Roberts *et al.*, 1996). A técnica utilizada para calcular a espessura do filme de ligante é baseada na área superficial dos agregados, mencionada no método de dosagem Hveem. O filme de ligante é calculado segundo a fórmula abaixo:

$$T_F = \frac{V_{asp}}{SA \times W} \quad (2)$$

Onde:

T_F - espessura média do filme de ligante, microns;

V_{asp} - volume efetivo do ligante (litros);

SA - área superficial do agregado (m^2 por kg de agregado); e

W - peso de agregado (kg).

Dessa forma a espessura do filme de ligante é baseada em grande parte na área superficial dos agregados. Conforme descrito em Roberts *et al.* (1996), calculou-se a área superficial dos agregados considerando a granulometria alvo, além das granulometrias das misturas com 10, 30 e 50% de fresado considerando a não desestruturação dos grumos. A Tabela 3 mostra os valores de área superficial para as quatro granulometrias.

Tabela 4: Área superficial por kg de agregado

Mistura	Área Superficial (m^2/kg)
Alvo	6,8
10%	6,0
30%	4,4
50%	2,9

3.4.2. Determinação dos teores iniciais de ligante

A escolha e/ou determinação do teor inicial com que se pretende iniciar um estudo de um CBUQ convencional muitas vezes é um valor indicado pela experiência do projetista. Para o caso de MARQ, optou-se por seguir a metodologia proposta pelo Asphalt Institute (1986), descrita de forma resumida em Soares *et al.* (2002). Esta metodologia fornece o percentual de ligante total (CAP novo, CAP envelhecido e AR) que deve existir na MARQ. Para o cálculo da quantidade de material asfáltico novo a ser incorporado é necessário descontar o ligante existente no RAP.

A combinação dos ligantes novos (CAP 50/60 e AR 75) deve proporcionar à mistura um ligante de consistência previamente estabelecida, obtida da forma descrita no item 2. Os percentuais de CAP novo e AR em relação a quantidade total de ligante novo da MARQ foram obtidos através de uma média ponderada das viscosidades dos dois materiais. A mistura de CAP novo, CAP envelhecido e AR foi realizada de forma a fornecer à MARQ um ligante de viscosidade a 60°C próxima a 4.300P, valor aproximado da viscosidade do CAP 50/60 utilizado nesse estudo. A Tabela 4 apresenta o teor de ligante total das misturas (ligante envelhecido + ligante novo), bem como o teor de ligante novo (CAP 50/60 + AR 75), ambos expressos como percentual da massa total. A Tabela 5 mostra ainda os percentuais de CAP 50/60 e de AR 75, em relação a massa de ligante novo das misturas.

Tabela 5: Ligante total e ligante novo das misturas e percentuais de CAP 50/60 e AR 75

Fresado (%)	Ligante total	Ligante novo	CAP 50/60	AR 75
	% da massa total da mistura		% da massa de ligante novo	
0	5,7	5,7	100	0
10	5,7	4,9	92	8
30	5,7	3,5	45	55
50	5,7	2,1	11	89

3.4.3. Densidade máxima teórica das misturas

Para este estudo, a DMT foi obtida por meio da aplicação de vácuo (ASTM D 2041), conforme sugerido por Vasconcelos *et al.* (2003b). A Tabela 6 apresenta os valores de DMM para 5 percentuais de ligante, necessários para a obtenção do teor de projeto de ligante asfáltico da mistura.

Tabela 6: Valores de DMM obtidas pela aplicação de vácuo

Ligante (%)	0% de fresado	10% de Fresado	30% de Fresado	50% de Fresado
4,7	2,460	2,467	2,480	2,490
5,2	2,448	2,449	2,464	2,471
5,7	2,426	2,431	2,442	2,452
6,2	2,410	2,417	2,421	2,437
6,7	2,391	2,391	2,413	2,415

3.4.4. Parâmetros volumétricos e teor de projeto

O teor de projeto foi determinado baseado no método convencionalmente usado pela 3ª Unidade de Infra-Estrutura Terrestre (UNIT) / Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) e cujo procedimento adotado encontra-se descrito em Soares *et al.* (2000). Os corpos-de-prova foram moldados por um compactador Marshall com 50 golpes por face. Segundo Tuchumantel Jr. (1988) são necessários aproximadamente 120 segundos de mistura dos materiais para que haja incorporação do AR com total homogeneização. Esse tempo foi levado em consideração antes do envelhecimento das misturas em estufa, seguido da moldagem dos corpos-de-prova. O envelhecimento foi feito à temperatura de compactação, que variou de 144 a 149°C. As Tabelas 7 a 10 apresentam os parâmetros volumétricos relativos ao teor de projeto. As Tabelas apresentam ainda o teor de projeto de cada mistura para os diferentes percentuais de material fresado e os tempos de envelhecimento adotados.

Tabela 7: Parâmetros volumétricos e teor de projeto das misturas com 0% de fresado

Parâmetros	Tempo de envelhecimento em estufa			
	0h	1h	2h	4h
D _a (densidade aparente)	2,364	2,339	2,343	2,343
DMM	2,425	2,425	2,422	2,418
V _v (%)	2,4	3,5	3,2	3,1
VCB (%)	13,4	13,3	13,6	13,8
VAM (%)	15,9	16,8	16,7	16,8
RBV (%)	84,6	79,4	81,1	81,8
Teor de Projeto (%)*	5,8	5,8	5,9	6,0

* em relação ao peso total da mistura

Tabela 8: Parâmetros volumétricos e teor de projeto das misturas com 10% de fresado

Parâmetros	Tempo de envelhecimento em estufa			
	0h	1h	2h	4h
D _a (densidade aparente)	2,360	2,328	2,339	2,345
DMM	2,439	2,418	2,431	2,418
V _v (%)	3,3	3,9	3,8	3,2
VCB (%)	12,5	13,7	13,1	13,8
VAM (%)	15,8	17,6	16,8	17,0
RBV (%)	78,9	77,9	77,6	81,2
Teor de Projeto (%)*	5,4	6,0	5,7	6,0

* em relação ao peso total da mistura

Tabela 9: Parâmetros volumétricos e teor de projeto das misturas com 30% de fresado

Parâmetros	Tempo de envelhecimento em estufa			
	0h	1h	2h	4h
D _a (densidade aparente)	2,363	2,369	2,323	2,325
DMM	2,441	2,442	2,420	2,423
V _v (%)	3,2	3,0	3,9	3,9
VCB (%)	13,2	13,2	14,6	14,4
VAM (%)	16,4	16,2	18,5	18,3
RBV (%)	80,3	81,7	78,7	78,7
Teor de Projeto (%)*	5,7	5,7	6,4	6,3

* em relação ao peso total da mistura

Tabela 10: Parâmetros volumétricos e teor de projeto das misturas com 50% de fresado

Parâmetros	Tempo de envelhecimento em estufa			
	0h	1h	2h	4h
D _a (densidade aparente)	2,347	2,345	2,308	2,332
DMM	2,437	2,437	2,420	2,424
V _v (%)	3,7	3,8	4,6	3,8
VCB (%)	14,3	14,3	14,9	14,9
VAM (%)	18,0	18,0	19,5	18,9
RBV (%)	79,4	79,1	76,5	74,6
Teor de Projeto (%)*	6,2	6,2	6,6	6,5

* em relação ao peso total da mistura

Os autores acreditavam, a priori, que durante o processo de mistura, envelhecimento e compactação das misturas recicladas, os grumos seriam desestruturados e os materiais novos poderiam passar a interagir perfeitamente com os materiais do fresado (agregados e ligante envelhecido). Dessa forma, o AR desempenharia seu papel de rejuvenescer o ligante oxidado e as propriedades volumétricas das misturas com um mesmo tempo em estufa seriam semelhantes. No caso da não desestruturação dos grumos, haveria mudança da granulometria alvo, conforme mencionado no item 3.4.1, com uma diminuição do percentual de finos a medida que aumentasse o percentual de fresado. Esse fato levaria a crer que os vazios aumentariam a medida que se elevasse o percentual de fresado, devido a diminuição do número de finos, que passariam a não mais preencher os vazios existentes entre os agregados graúdos, cabendo esse papel apenas aos agregados miúdos virgens e ao ligante.

A Tabela 11 resume os valores de Vv encontrados durante a dosagem das 16 misturas. Nota-se que este parâmetro, diretamente ligado ao teor de projeto (TP), apresentou grande variação nas misturas com diferentes percentuais de fresado. Não se percebe claramente uma tendência indicando a desestruturação total (o que levaria a Vv semelhantes), ou a não desestruturação dos grumos (aumento do Vv com o aumento de percentual de fresado).

Tabela 11: Volume de vazios dos CP's obtidos na dosagem para as 16 misturas e os respectivos teores de projeto

0h de Estufa					1h de Estufa				
Fresado	0%	10%	30%	50%	Fresado	0%	10%	30%	50%
% de ligante	(5,8%)	(5,8%)	(5,9%)	(6,0%)	% de ligante	(5,4%)	(6,0%)	(5,7%)	(6,0%)
4,7	8,2	4,5	5,9	-	4,7	6,6	7,8	5,9	-
5,2	5,2	3,4	4,1	6,9	5,2	5,4	6,0	4,8	9,0
5,7	2,5	3,2	3,2	5,9	5,7	3,7	4,7	3,0	4,2
6,2	2,1	2,3	2,5	3,7	6,2	2,4	3,4	1,6	3,8
6,7	1,4	1,5	2,6	2,9	6,7	1,5	2,0	1,8	2,7
2h de Estufa					4h de Estufa				
Fresado	0%	10%	30%	50%	Fresado	0%	10%	30%	50%
% de ligante	(5,7%)	(5,7%)	(6,4%)	(6,3%)	% de ligante	(6,2%)	(6,2%)	(6,6%)	(6,5%)
4,7	6,6	6,0	-	-	4,7	6,8	7,6	8,9	-
5,2	5,4	4,5	6,6	8,7	5,2	5,5	4,5	4,8	10,3
5,7	3,8	3,8	5,6	8,5	5,7	3,8	3,0	4,2	6,3
6,2	2,2	2,0	4,2	5,6	6,2	2,6	3,3	4,1	4,8
6,7	2,0	2,4	3,5	4,3	6,7	-	2,7	3,2	3,1
7,2	-	-	-	1,6	7,2	-	-	-	1,5

Para nenhuma das misturas e nenhum dos teores de ligante foi observada semelhança nos valores de Vv. As linhas que estão sombreadas na Tabela 10 representam os teores de ligante que apresentaram a tendência esperada considerando a não desestruturação dos grumos, ou seja, aumento de Vv com o percentual de fresado. A Figura 3 mostra a variação do teor de projeto e dos volumes de vazios nesses teores para os diferentes percentuais de RAP e os diferentes tempos de envelhecimento em estufa.

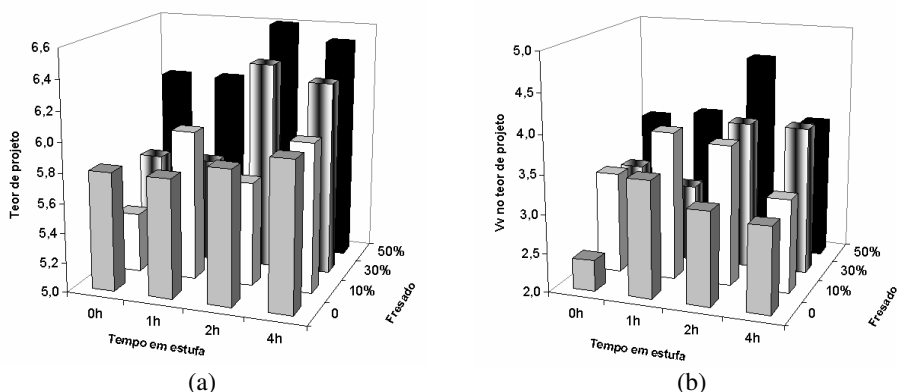


Figura 3: Variação do teor de projeto (a) e Vv nesses teores (b) com o percentual de fresado e tempo em estufa

Diante dos dados expostos nas Tabelas 6 a 10 e na Figura 3, conclui-se que a desestruturação dos grumos de fresado não ocorreu de forma homogênea. A Figura 4 ilustra um grumo de fresado entre a peneira de 19,1mm e a de 12,5mm, além de possíveis composições desse grumo. É, portanto, difícil se fazer qualquer previsão sobre o que ocorrerá com estas composições quando da confecção de uma MARQ, ou seja, é difícil prever o grau de desestruturação, que dependerá da adesividade existente entre ligante e agregado do fresado, esta por sua vez função de características do ligante (envelhecimento, presença de DOPE) e do agregado.

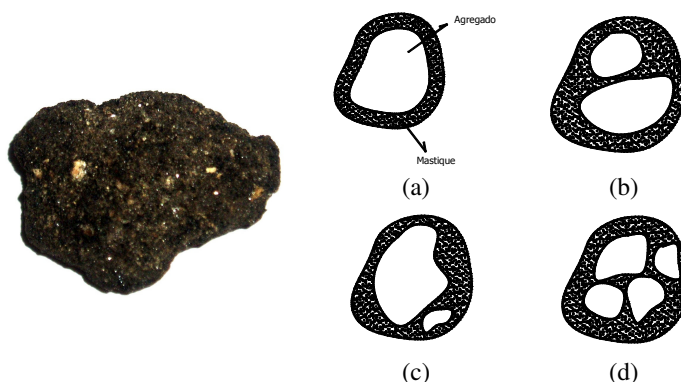


Figura 4: Esquema das possíveis composições dos grumos

Outro fato importante que pode ser levantado com respeito a desestruturação dos grumos é relativo a interação entre ligante novo e ligante oxidado. Para o caso da não utilização de RAP, o ligante novo é absorvido apenas pelos agregados virgens (Figura 5a). No caso da utilização de fresado, o ligante oxidado (na verdade um mastic) pode “blindar” os vazios permeáveis que poderiam ser atingidos pelo ligante novo (Figura 5b). Dessa forma, o tempo de envelhecimento dessas misturas em estufa passa a ser determinante para que o ligante novo consiga agir sobre o ligante oxidado. O aumento desse tempo em estufa deve reduzir os

vazios para grandes quantidades de fresado, fato que pode ser observado mais claramente nas misturas com 50% de RAP quando se comparam os tempos de 2 e 4h em estufa (Figura 3b).

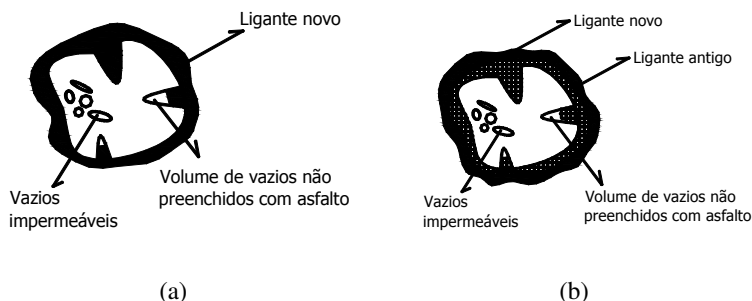


Figura 5: Esquema do preenchimento de vazios em (a) agregados virgens e em (b) material fresado

Segundo DNER-ES 313/97, a variação de ligante permitida em um CBUQ é 0,3%. Os resultados de teor de projeto obtidos para as misturas com diferentes percentuais de fresado e o mesmo tempo em estufa apresentaram variação máxima de 0,9%. Em laboratório, é ainda desejada uma variação inferior, visto que o controle é maior, além dos materiais terem sido fracionados entre as peneiras $\frac{3}{4}$ " (19,1mm) e de N° 200 (0,075mm), passando por toda a série especificada pelo DNIT. De acordo com estudo dos autores, variações nesse nível de magnitude podem apresentar diferenças consideráveis nos resultados de ensaios mecânicos (Vasconcelos *et al.*, 2003b).

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A dosagem das MARQ's mostrou-se de difícil execução quando baseada nos parâmetros volumétricos, devido à heterogeneidade do material fresado. A variação dos parâmetros obtidos para as misturas com diferentes percentuais de fresado pode ter sido causada pela mudança na granulometria alvo, com redução do percentual de finos devido ao aumento do percentual de fresado, caso os grumos não tenham sido desestruturados. Um possível alargamento das faixas de tolerância dos parâmetros volumétricos pode ser uma opção para a dosagem desse tipo de mistura.

Com exceção da mistura com 10% de fresado e 1h em estufa, todas as demais apresentaram aumento do teor de projeto com o aumento do tempo de envelhecimento de curto prazo. O CBUQ convencional foi o que apresentou menor variação do teor de projeto com o tempo de envelhecimento em estufa. A diferença em relação as MARQ's pode ter sido causada pela diferença de absorção dos agregados virgens e do RAP, ou RAM. Para os tempos de 2 e 4h observou-se também pequena variação para as misturas analisadas. Isso pode ser uma evidência de que a maior parte da absorção de ligante pelos agregados se dá nas duas primeiras horas da mistura em estufa e que a partir de 2h é que há a verdadeira interação entre ligante novo e ligante oxidado, causando uma pequena redução do teor de projeto para os maiores percentuais de fresado.

Diante dos dados de área superficial expostos na Tabela 4, e considerando a não desestruturação dos grumos, a mistura com 50% de fresado deveria apresentar a maior espessura do filme de ligante, acarretando em um menor envelhecimento da mistura,

principalmente no curto prazo. Para a verificação desse fato é importante que seja dada continuidade ao estudo, a fim de caracterizar as misturas mecanicamente. Outro importante desenvolvimento do estudo é a extração e recuperação do ligante após o envelhecimento de curto prazo, a fim de verificar a interação entre CAP envelhecido, CAP novo e AR, além da obtenção das propriedades físicas e reológicas da combinação de ligantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP/DET/UFC, aos Engs. Daniel Rodrigues Aldigueri, Jorge Henrique Magalhães Pinheiro e Verônica Teixeira Franco Castelo Branco pelas respectivas contribuições, à ANP pela bolsa do primeiro autor e ao CNPq pela bolsa do segundo autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP (1993) Portaria DNC, 5 de 18 de fevereiro de 1993. Agência Nacional do Petróleo, Brasília.
- Asphalt Institute (1986) *Asphalt Hot-Mix Recycling*. Manual series n° 20. Second edition.
- Asphalt Institute (1995) *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types*. Manual Series n°2, USA.
- ASTM (1997) D 2170 – *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2000a) D 2171 – *Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2000b) D 2041 – *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2002a) D 92 – *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cut Tester*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2002b) D 1754 – *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test)*. American Society for Testing and Materials.
- Agnusdei, J; P.O. Frezzini e A.A. Comai (1975) Envelhecimento de Asfaltos durante a Mistura. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro.
- Bell, C.A.; Y. AbWahab; J.E. Kliever; D. Sosnovske e A. Wieder (1992) Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures. *7th International Conference on Asphalt Pavements*. Nottingham, U.K.
- Bell, C.A.; Y. AbWahab; M.E. Cristi e D. Sosnovske (1994) *Selection of Laboratory Aging Procedure for Asphalt-Aggregate Mixtures*. SHRP-A-383, National Research Council, Washington, DC.
- Bonfim, V. (1999) *Estudo da Granulometria Resultante da Fresagem de Revestimentos Asfálticos com Vistas à Reciclagem “in situ” a Frio*. Dissertação de M. Sc., Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP.
- Mc Daniel, R. e R.M. Anderson (2001) Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician’s Manual. NCHRP Report 452, Washington, EUA.
- Petersen, J.C.; J.F. Branthaver; R.E. Robertson, P.M. Harnsberger; J.J. Duvall e E.K. Ensley (1993) Effects of Physicochemical Factors on Asphalt Oxidation Kinetics. *Transportation Research Record* 1391, Washington, DC.
- Roberts, F.L.; P.S. Kandhal; R.E. Brown; D. Lee e T.W. Kennedy (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA. Maryland.
- Santana, H. (1992) Manual de Pré-Misturado a Frio. Rio de Janeiro, IBP/Comissão de Asfalto.
- Soares, J.B.; L.M.G. Motta; L.M. Nóbrega; L.M. Leite e E.F. Nobre Jr. (1998) Estudo Comparativo de Cimento Asfáltico de Petróleo na Pista Experimental do Ceará. *Anais do XII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, v. I, p. 590-601.
- Soares, J.B.; F.A.C. Freitas; J.V.C. Branco e L.M.G. Motta (2000) Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ. *32^a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv*, Brasília, v. I, p. 148-160.
- Soares, J.B.; D.R. Aldigueri e L.M. Leite (2002) Métodos de Dosagem e Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente. Relatório Interno. Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, UFC-CE.
- Tonial, I.A.; L.M.G. Motta; L.M.F. Leite e R.S. Constantino (2001) Envelhecimento de Ligantes Asfálticos Observado em Trechos Experimentais Comparado a Modelo de Previsão. *XV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Campinas, v. 2, p. 269 a 278.
- Tuchumantel Jr., O. (1988) Reciclagem de pavimentos – conceitos, interpretações e controle. *23^a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv*, Florianópolis.

Vasconcelos, K.L. e J.B. Soares (2003a) Influência dos Métodos de Ensaio para Determinação das Densidades Real e Aparente de Agregados na Dosagem de Misturas Asfálticas. *34ª Reunião Anual de Pavimentação*, ABPv, Campinas.

Vasconcelos, K.L.; J.B. Soares e L.M. Leite (2003b) Influência da Densidade Máxima Teórica na Dosagem de Misturas Asfálticas. *XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Rio de Janeiro, v. I, p. 5 a 17.

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
Departamento de Engenharia de Transportes
Centro de Tecnologia
Universidade Federal do Ceará
Campus do Pici – Bloco 703 s/n
CEP 60455-760
email: kamilla@det.ufc.br e jsoares@det.ufc.br