

CONSIDERAÇÕES ACERCA DA ABSORÇÃO DE ASFALTO PELOS AGREGADOS E SUA INFLUÊNCIA NA SUSCETIBILIDADE À UMIDADE

Lilian Taís de Gouveia
Ana Paula Furlan
Alexandre Benetti Parreira
José Leomar Fernandes Júnior
Glauco Tulio Pessa Fabbri

Departamento de Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos - USP

RESUMO

Este artigo apresenta uma avaliação da absorção de asfalto em misturas compostas por agregados de basalto e de gabro, que apesar da mesma origem geológica, apresentam diferentes graus de absorção, e sua relação com a suscetibilidade das misturas aos danos causados pela umidade, avaliadas pelos métodos AASHTO T 283 e ASTM 4867; adicionalmente, foram executados ensaios de módulo de resiliência seguindo os mesmos critérios de aceitação das referidas normas. Os resultados dos ensaios de resistência à tração, preconizados pelas duas normas, mostraram-se pouco sensíveis em função dos diferentes tipos de condicionamento aos quais as misturas foram submetidas. Entretanto, os resultados dos ensaios de módulo de resiliência não só conseguiram diagnosticar os danos causados pelos condicionamentos, como também evidenciaram a influência da absorção de asfalto pelos agregados nas misturas em relação aos danos por umidade.

ABSTRACT

This paper presents an evaluation of aggregate asphalt absorption and its influence on moisture induced damage. It is tested asphalt concrete paving mixtures with basaltic and gabbroic aggregates, which present different absorption rate, although they have the same mineralogical composition and the same geological origin. The laboratory evaluation of the aggregates asphalt absorption was based on AASHTO T283 and ASTM D 4867 procedures. Additionally, resilient modulus and tensile strength tests were performed. The indirect tensile strength results were not able to identify variations in the absorption rate due to the different conditioning processes. The resilient modulus results, otherwise, were able to identify variations due to the conditioning process and also the influence of the aggregate asphalt absorption to the moisture susceptibility.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, os pavimentos flexíveis constituem a maior parte da rede pavimentada e, atualmente, os revestimentos mais utilizados nesses pavimentos são os do tipo concreto asfáltico. Com o tempo ou até prematuramente, esses revestimentos apresentam defeitos, que podem ocorrer devido a alguma falha no projeto, na execução, ou ainda, pela ação de fatores externos como clima e tráfego. Algumas ações podem prevenir ou solucionar o aparecimento desses defeitos como, por exemplo, a seleção de materiais com características adequadas. Para a obtenção de misturas asfálticas com bom desempenho e durabilidade merecem especial atenção, no que concerne aos agregados, as propriedades de forma, angularidade, textura superficial e absorção, enquanto que em relação aos ligantes destacam-se as propriedades viscosidade, tensão superficial e ângulo de molhagem.

Defeitos como panelas e buracos são atribuídos à desagregação da camada de rolamento. A desagregação é caracterizada pela desintegração da camada de rolamento que ocorre de cima para baixo, iniciando-se com a perda dos finos e progredindo, com a ação do tráfego, para o deslocamento dos agregados maiores, podendo chegar à delaminação. Outro defeito, mais difícil de ser detectado, é o *stripping*, que se caracteriza pelo descolamento da película de ligante do agregado que, nesse caso, inicia-se na parte inferior da camada de rolamento, devido aos esforços de tração resultantes das cargas do tráfego, progredindo até a superfície.

Tanto na desagregação como no *stripping*, o problema é a perda de adesividade, devido a uma ligação adesiva deficiente, que pode estar aliada a uma solitação capaz de descolar o ligante do agregado, ou ainda pela ação diversificada da água na interface ligante-agregado. Além da afinidade do ligante de aderir ao agregado, é imprescindível o conhecimento das características e grau de absorção de asfalto pelos agregados, para assegurar a durabilidade das misturas, pois a porção de asfalto absorvida não atua mais como ligante, diminuindo a espessura do filme de asfalto que envolve as partículas do agregado, tornando as misturas mais frágeis e suscetíveis às ações danosas da água.

Assim, este artigo tem como objetivo apresentar uma avaliação da influência da absorção de asfalto pelos agregados em relação à suscetibilidade à umidade das misturas (*stripping*) à luz dos métodos de ensaios padronizados pela AASHTO T 283 e pela ASTM 4867, de forma a estabelecer uma comparação entre seus resultados.

2. PROPRIEDADES DO AGREGADO NA ABSORÇÃO E ADESÃO

A adesão é um fenômeno que ocorre do contato entre a superfície de dois materiais diferentes e dá-se pela afinidade desenvolvida entre eles. Acredita-se que perda de adesividade está associada, principalmente, às características do agregado, particularmente regida pela “química” da superfície do agregado, enquanto que o asfalto desempenha um efeito menor (CURTIS, 1990). A absorção de asfalto pelo agregado pode influenciar positivamente no fenômeno da adesividade, se a absorção ocorrer em pequena magnitude, pois melhora o intertravamento mecânico da mistura; por outro lado, se a absorção for muito alta, há diminuição da espessura da película de asfalto sobre o agregado, tornando a mistura mais suscetível à ação deletéria da água. As principais propriedades dos agregados em relação ao processo da absorção são a porosidade, a distribuição do tamanho dos poros e a composições química e mineral do agregado.

2.1. Características do Poro

Os poros em rocha são descritos como cavidades de formas irregulares, que podem ser conectadas por capilares que podem ter forma e diâmetro variados. O menor diâmetro interno do poro é usado como sua medida de tamanho. A parte interconectada de um sistema de poros é chamada de espaço efetivo do poro. As características dos poros geralmente determinadas são: porosidade, tamanho do poro, distribuição dos tamanhos dos poros e área interna específica, chamada de superfície específica (KANDHAL & LEE, 1972).

2.2. Porosidade

Lettier *et al.* (1949) relacionaram porosidade e absorção através da densidade aparente do agregado, verificando que quanto menor a densidade aparente dos agregados de mesma origem, maior é a absorção de água, em uma escala linear. Portanto, a absorção do agregado, como função da densidade, está diretamente relacionada com a porcentagem de interstícios (poros) na massa cristalina das partículas.

A porosidade dos agregados pode ser determinada, direta ou indiretamente, através de vários métodos. Um método muito utilizado para determinar a porosidade total é determinar a densidade aparente e a densidade real, e calcular a porosidade pela razão entre duas (expressão 1). A porosidade total é um indicador da capacidade de absorção máxima do agregado, que na prática, pode nunca vir a ocorrer.

$$PT = 100 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_r} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

PT = Porosidade Total, %;

ρ_{ap} = densidade aparente do agregado;

ρ_r = densidade real do agregado.

2.3. Distribuição dos Tamanhos dos Poros

A absorção de asfalto pelo agregado tem uma forte correlação com a porosidade e com a distribuição do tamanho dos poros, pois a taxa e a extensão da absorção de asfalto dependem não somente do total de vazios, mas também do tamanho real do poro no agregado, sob os efeitos da pressão capilar e da viscosidade.

O tamanho e a distribuição dos tamanhos dos poros no agregado podem ser considerados como as propriedades mais importantes e, ao mesmo tempo, as mais difíceis de serem determinadas. Washburn (1921), em caráter pioneiro, sugeriu a utilização de mercúrio para determinar a distribuição dos tamanhos dos poros dos sólidos porosos, a partir de um modelo baseado em um sistema de capilares circulares; desde então os métodos para esse tipo de determinação baseiam-se nessa concepção.

O tamanho e a distribuição dos tamanhos dos poros podem determinar a quantidade e o mecanismo de absorção. Alguns poros pequenos que podem ser penetrados pela água podem não apresentar absorção de asfalto, devido à maior viscosidade do asfalto comparada à da água. A distribuição do tamanho do poro é um dos fatores que influencia na diferença entre a absorção de água e asfalto.

Lee (1969), em seus estudos sobre absorção, ao determinar as curvas de distribuição dos tamanhos dos poros, notou que os agregados possuem poros de tamanhos distintos e que estes variam de maneira desigual. Lee (1969) verificou ainda que tamanhos de poros maiores que 0,5 μm influenciam diretamente a absorção de asfalto e que poros menores que 0,1 μm não absorvem asfalto, evidenciando que a absorção depende não somente da porosidade, mas também da frequência de ocorrência dos tamanhos dos poros.

2.4. Composições Química e Mineralógica do Agregado

A composição química dos agregados também pode influenciar de maneira indireta a absorção. Lettier *et al.* (1949), ao estudarem a estrutura cristalina dos agregados de mesma origem, mas com características de absorção distintas, verificaram que os agregados que absorvem menos asfalto possuem estruturas cristalinas compactas e densas, com granulação fina e que, agregados que absorvem mais asfalto são caracterizados por numerosos interstícios entre os cristais ou são compostos de cristais com granulação grossa. Esses pesquisadores verificaram que a capacidade de absorção do agregado não está relacionada diretamente com sua composição química, pois existem agregados absorventes e não absorventes de mesma composição química, mas sim com a porosidade da partícula. Através de análises microfotográficas, observaram os mecanismos físicos da absorção que se processam através da passagem do líquido por canais intercristalinos, que constituem vazios com formas e tamanhos diferenciados (poros), verificando que não há penetração de asfalto dentro dos cristais.

3. PROPRIEDADES DO ASFALTO NA ABSORÇÃO E NA ADESÃO

Ao asfalto cabe envolver e aglutinar os agregados através da adesividade desenvolvida entre estes dois materiais. Como aglutinante, o asfalto deve ligar-se aos agregados, não se descolar e resistir à ação do clima e da presença de água. Dos fatores relacionados ao asfalto, a viscosidade é a característica mais frequentemente ligada ao fenômeno de adesividade e de absorção.

A viscosidade do asfalto “indica” o grau de mobilidade molecular e a magnitude das forças atrativas em líquidos e é influenciada diretamente pela temperatura. Com o aumento da temperatura, as forças intermoleculares diminuem, aumentando o poder de molhagem do asfalto, possibilitando o aumento da área de recobrimento na superfície do agregado. Essa diminuição da viscosidade pode contribuir para que ocorra uma pequena absorção de asfalto pelo agregado, melhorando assim o intertravamento.

No que se refere a adesividade, ao longo dos anos, vários autores verificaram que asfaltos mais viscosos resistem mais ao descolamento da película pela ação da água que os menos viscosos (MAJIDZADEH & BROVOLD (1968), TAYLOR & KHOSLA (1983) e HICKS (1991)). Um comportamento semelhante é esperado com o envelhecimento dos ligantes, já que no processo de envelhecimento há alteração nas características dos asfaltos, como por exemplo, o aumento da viscosidade. Entretanto, deve-se destacar que o envelhecimento altera as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, tornando-as mais quebradiças ou frágeis, e este processo pode acarretar em defeitos prematuros nas camadas de rolamento. O envelhecimento pode afetar o grau de absorção de asfalto pelo agregado, pois ela está diretamente relacionada ao tempo de exposição das misturas a temperaturas que propiciem diminuição da viscosidade.

Huang *et al.* (2003) afirmaram que a perda da resistência adesiva das misturas asfálticas corresponde à perda de componentes resultantes da ligação na interface asfalto-agregado da mistura. Como um par único, a “química” da interface asfalto-agregado determina o grau de adesão e de sensibilidade à água. A partir da avaliação das misturas asfálticas com grupos funcionais similares àqueles formados no envelhecimento, concluíram que alguns compostos formados no processo de oxidação do asfalto aumentam a resistência da mistura à ação da água.

Outro tipo de alteração na composição dos asfaltos pode ocorrer devido à absorção seletiva, que causa modificações no asfalto absorvido e no não absorvido (ou efetivo). Alguns componentes do asfalto podem penetrar nos poros de forma diferenciada, dependendo do tamanho do poro. Por exemplo, grandes moléculas, como as dos asfaltenos, ficam concentradas no filme de asfalto efetivo, enquanto moléculas menores, como as dos maltenos, são preferencialmente absorvidas dentro do poro. Portanto, o filme de asfalto que cobre o agregado pode ter suas propriedades reológicas, físicas, químicas e de envelhecimento diferentes das do asfalto original adicionado à mistura (LEE *et al.* 1990).

4. MATERIAIS

4.1. Agregados

Para a composição das misturas asfálticas desta pesquisa foram utilizados dois tipos de agregados de mesma origem geológica, um basalto e um gabro. O agregado de basalto é

proveniente da Pedreira Santa Isabel, localizada na cidade de Ribeirão Preto – SP, e o de gabro, da Pedreira São Roque, em Limeira - SP.

4.2. Ligante Asfáltico

O asfalto utilizado foi um CAP 20 com suas propriedades satisfazendo às exigências contidas no Regulamento Técnico do Departamento Nacional de Combustíveis DNC n. 01/92, conforme mostrado na tabela 1.

Tabela 1: Características físicas do CAP-20 utilizado

Ensaio	Resultados	Exigência DNC 01/92	Método
Viscosidade absoluta a 60 °C (poise)	3200	2000 a 3500	MB-827
Viscosidade Saybolt Furol a 135 °C (s)	165	120 mín.	MB-517
Viscosidade Saybolt Furol a 177 °C (s)	35	30 a 150	
Índice de suscetibilidade térmica	-0.45	-1,5 a 1,0	-
Penetração, 25 °C, 100g, 5s (0,1mm)	55	50 mín.	MB-107
Ponto de fulgor (°C)	264	235 mín.	MB-50
Densidade real (g/cm ³)	1,020*	-	-

* Resultado de ensaio fornecido pela Petrobrás Petróleo Brasileiro S.A.

4.3. Misturas Asfálticas

As distribuições granulométricas que compõem as misturas, apresentadas na Tabela 2 e ilustradas na Figura 1, passam acima da zona restrição (AZR) do Superpave® e quase que em sua totalidade, acima da linha de densidade máxima, respeitando os pontos de controle. A mistura asfáltica AZR foi composta usando em suas frações grossa e fina apenas um tipo de agregado, basalto ou gabro. Um único tipo de fíler, areia natural passante na peneira de abertura de 0,075 mm (n. 200), foi empregado com o objetivo de eliminar a variação decorrente da utilização de fileres distintos. Diferentes fileres enrijecem o asfalto e, conseqüentemente, a mistura, em diferentes graus de intensidade e, portanto, afetam o desempenho das misturas.

Tabela 2: Faixa granulométrica AZR

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passada (%)
19,0	100
12,5	95
9,50	86
4,75	61
2,36	46
1,18	35
0,60	26
0,30	19
0,15	11
0,075	3,5

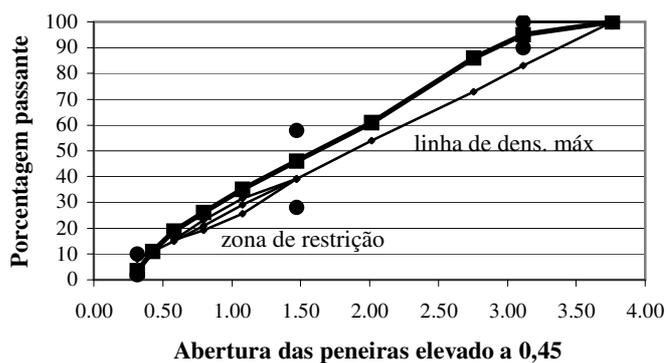


Figura 1: Curva Granulométrica AZR

As misturas foram dosadas utilizando os critérios volumétricos estabelecidos pelo Superpave®, obtendo-se teores ótimos de asfalto de 6,7% para a mistura de basalto e de 6,2% para as de gabro, correspondentes a um volume de vazios de 4%. A moldagem dos corpos-de-prova seguiu os procedimentos do método Marshall (NBR 12891/93 – ABNT), porém o número de golpes foi modificado a fim de resultar corpos-de-prova com volumes de vazios de

$7 \pm 1\%$. Os volumes de vazios foram calculados utilizando-se a densidade medida máxima (DMM), obtida através do método Rice (ASTM D 2041) e da densidade aparente da mistura, obtida através do método de secagem superficial dos corpos-de-prova, de acordo com a norma AASHTO T 166.

5. MÉTODOS

O programa experimental foi composto de duas etapas: (1) determinação das características dos agregados e das propriedades das misturas asfálticas associadas aos fenômenos da absorção e da adesividade e (2) determinação da suscetibilidade aos danos por umidade das misturas executadas com os dois tipos de agregados, que apresentaram diferentes graus de absorção. As propriedades determinadas na primeira etapa incluíram: densidade aparente do agregado, densidade real do agregado e absorção de água, porosidade total e absorção de asfalto pelo agregado pelo método Rice (ASTM D 2041). Na segunda etapa, os métodos para avaliar a suscetibilidade à umidade das misturas incluíram: (a) Resistência das Misturas Compactadas quanto aos Danos por Umidade Induzida - AASHTO T 283, (b) Efeito da Umidade em Misturas Asfálticas - ASTM D 4867 e (c) Módulo de Resiliência - DNER ME-133/94 como alternativa ao uso do ensaio de resistência à tração na avaliação do efeito da umidade.

5.1. Densidades do Agregado e Absorção de Água

A ASTM C-127 e a ASTM C-128 padronizam os métodos para a determinação da densidade aparente e real dos agregados grossos e finos, respectivamente e, a absorção de água pelos agregados, onde as amostras são deixadas submersas em água por 24 horas e, posteriormente, as partículas saturadas dos agregados são secas superficialmente. Os valores das densidades e da absorção de água dos agregados são obtidos através da relação entre as massas obtidas no decorrer do ensaio.

5.2. Absorção de Asfalto pelo Agregado

Rice (1953) propôs um procedimento utilizando vácuo para determinar a densidade medida máxima (DMM) das misturas asfálticas. Através da DMM, do teor de asfalto (P_b) e da densidade aparente dos agregados (ρ_{ap}), calcula-se a densidade efetiva do agregado (ρ_{ef}), cujo valor é usado no cálculo da absorção de asfalto (Abs_{asf}). O Superpave® estabelece a utilização do método Rice, padronizado pela ASTM D 2041, para a determinação da DMM das misturas, por ser um ensaio de execução relativamente rápida, realístico e apropriado para a determinação da absorção de asfalto. A densidade efetiva do agregado (ρ_{ef}) pode ser obtida através da Equação 2.

$$\rho_{ef} = \frac{1 - P_b}{\frac{DMM}{\rho_b} - \frac{P_b}{\rho_b}} \quad (2)$$

Então a absorção de asfalto pelo agregado pode ser determinada pela expressão 3:

$$Abs_{asf} = \frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ef} \times \rho_{ap}} \times \rho_b \times 100 \quad (3)$$

5.3. Métodos de ensaio para avaliação dos danos por umidade

Na avaliação da adesividade foram utilizados dois métodos de ensaio, o AASHTO T 283 e o ASTM D 4867. Ambos os métodos consistem da avaliação da variação de uma propriedade mecânica causada por danos por umidade. Essas normas preconizam a execução do ensaio de

resistência à tração por compressão diametral (de acordo com DNER-ME 138/94) em dois grupos de corpos-de-prova, um grupo chamado de controle, e outro grupo que é submetido a algum tipo de condicionamento, chamado de condicionado. O critério para aceitação de uma mistura asfáltica é dado em porcentagem de propriedade retida, que para a AASHTO é de 80% e para ASTM é de 70%.

Foram executados ensaios de módulos de resiliência (de acordo com DNER-ME 133/94) nos dois grupos (AASHTO e ASTM) seguindo os mesmos critérios de aceitação. Este procedimento foi adotado por ser um ensaio rápido, não destrutivo e, particularmente, com baixa dispersão. Além disso, pode-se avaliar variações no módulo de resiliência dos corpos-de-prova decorrentes do condicionamento, o que não é possível com o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (que destrói os corpos-de-prova), que avalia a variação da propriedade em termos médios dos grupos, e, portanto, acumula dispersões de outras fontes, como por exemplo procedimento de moldagem e variação de temperatura. A Tabela 3 detalha os procedimentos dos dois métodos de avaliação da adesividade da AASHTO e ASTM.

Tabela 3: Procedimentos dos ensaios de avaliação dos efeitos da umidade

Ensaio	Características do conjunto de corpos-de-prova	Características do Condicionamento	Absorção e Envelhecimento	Critério de aceitação
<i>ASTM D 4867</i>	n=6 corpos-de-prova Marshall $V_v = 7 \pm 1$ % ou do campo	Vácuo: 500mmHg por 5min Saturação: 55-80% <i>Ciclo Térmico:</i> 1) Congelamento: não há 2) Aquecimento: 60°C por 24h 3) Imersão (opcional): 25°C por 1h	Absorção: Temperatura de mistura por 2h Envelhecimento: Não há	Relação de propriedade retida: <i>RTR > 70%</i>
<i>AASHT T 283</i>	n=6 corpos-de-prova Marshall $V_v = 7 \pm 1$ % ou do campo.	Vácuo de 500mmHg por 5-30min ou até atingir saturação: 55-80%. <i>Ciclo Térmico:</i> 1) Congelamento: -18°C por 16h 2) Descongelamento: 60°C por 24h 3) Imersão: 25°C por 2h	Absorção: Não há Envelhecimento: Mistura não compactada, 60°C por 16h	Relação de propriedade retida: <i>RTR > 80%</i>

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. Características dos agregados

Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram que quanto menor a densidade aparente (ρ_{ap}) entre agregados de mesma origem, maior é a absorção de água e de asfalto, devido à maior porosidade total do agregado. Pode-se depreender, através dos resultados, que a absorção dos agregados, como função da densidade, está diretamente relacionada com a porcentagem de

interstícios (poros) na massa cristalina das partículas. Em outras palavras, apesar dos agregados possuírem a mesma composição química, verifica-se que o basalto apresenta granulação fina e maior densidade aparente que o gábro, que possui granulação grossa. Agregados de granulação grossa apresentam mais interstícios entre seus cristais, facilitando assim a penetração de asfalto no interior das partículas dos agregados.

Apesar de não terem sido feitos ensaios para a determinação da distribuição dos tamanhos dos poros, pode-se notar, através dos resultados apresentados na Tabela 4, que a absorção de água é, aproximadamente, cinco vezes maior que a absorção de asfalto (ASTM) para o agregado de basalto e duas vezes a absorção de asfalto (ASTM) para o agregado de gábro. Essa diferença entre as absorções da água e do asfalto pelo agregado evidencia que poros pequenos podem ser penetrados pela água mas não pelo asfalto, devido à maior viscosidade do asfalto comparada à da água. Geralmente a comparação entre a absorção de água e a do asfalto é feita considerando a absorção promovida com a mistura na temperatura de compactação, simulando assim, o tempo médio que a mistura permanece nessa temperatura, desde sua usinagem até o espalhamento no campo, pois a absorção do asfalto pelo agregado pode ocorrer durante a construção enquanto o asfalto ainda está fluido o suficiente para migrar para dentro dos poros do agregado.

As misturas que foram empregadas para avaliação da suscetibilidade à umidade, através do método da ASTM, permaneceram na estufa à temperatura de compactação (148°C) por duas horas (sem envelhecimento). Já as misturas a serem avaliadas pelo método da AASHTO permaneceram em uma estufa ventilada à temperatura de 60°C por dezesseis horas (com envelhecimento). A maior absorção de asfalto pelos agregados ocorreu durante o processo de mistura para o método da ASTM, devido à exposição a temperaturas mais altas, que diminuem a viscosidade do asfalto e, conseqüentemente, aumentam a absorção.

No método da AASHTO, embora a mistura permaneça um tempo maior em estufa, a sua temperatura é de 60°C, portanto o asfalto apresenta-se com maior viscosidade, o que dificulta a sua entrada nos poros das partículas do agregado. Fato que pode ser verificado pela absorção de asfalto obtida, ao empregar o método da ASTM, que foi, aproximadamente, cinco vezes maior que a do método da AASHTO, para o agregado de basalto e, para o agregado de gábro, quatro vezes maior.

Tabela 4: Propriedades dos agregados relacionadas à absorção

Tipo de Agregado	ρ_{ap}	ρ_r	Porosidade Total (%)	Abs _{água} (%)	AASHTO	ASTM
					Abs _{asf} (%)	Abs _{asf} (%)
Basalto	2,863	2,929	2,27	1,14	0,04	0,21
Gábro	2,742	2,875	4,63	1,67	0,22	0,88

6.2. Resultados dos ensaios da AASHTO T 283 e da ASTM D 4867

A Tabela 5 apresenta os resultados referentes aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, em termos médios, dos grupos de controle (RT₁) e condicionados (RT₂) e a resistência a tração retida (RTR). Quanto a estes resultados, nota-se que, aparentemente, as perdas sofridas pelas misturas foram muito pequenas, ou ainda houve ganho na propriedade após o condicionamento (misturas com basalto avaliadas pela AASHTO).

Tabela 5: Resumo dos resultados de suscetibilidade aos danos por umidade

Misturas com basalto: AASHTO T 283			Misturas com basalto: ASTM D 4867		
Vv ₁ (%)	6,1		Vv ₁ (%)	6,9	
RT ₁ (mPa)	1,34		RT ₁ (mPa)	1,54	
Vv ₂ (%)	5,3		Vv ₂ (%)	6,1	
RT ₂ (mPa)	1,46		RT ₂ (mPa)	1,50	
RTR (%)	109		RTR (%)	97	
Misturas com gabro: AASHTO T 283			Misturas com basalto: ASTM D 4867		
Vv ₁ (%)	4,5		Vv ₁ (%)	5,0	
RT ₁ (mPa)	1,58		RT ₁ (mPa)	1,78	
Vv ₂ (%)	4,3		Vv ₂ (%)	4,8	
RT ₂ (mPa)	1,48		RT ₂ (mPa)	1,68	
RTR (%)	94		RTR (%)	94	

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência são apresentados na Tabela 6, onde constam algumas características dos corpos-de-prova ensaiados (volume de vazios e grau de saturação), os módulos de resiliência antes e após os condicionamentos de cada norma utilizada (MR₁ e MR₂) e a retenção do módulo de resiliência (MRR).

Tabela 6: Resumo dos resultados de módulo de resiliência na avaliação da suscetibilidade aos danos por umidade

Misturas com basalto : AASHTO T 283						Misturas com basalto : ASTM D 4867					
cp	Vv (%)	Gs (%)	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MRR (%)	cp	Vv (%)	Gs (%)	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MRR (%)
3	6,0	70,74	6358	3995	0,63	2	6,8	61,5	8205	6839	0,83
4	5,4	59,23	6696	4842	0,72	3	6,2	58,8	6482	5304	0,82
6	5,8	59,24	6068	5299	0,87	5	6,1	87,9	7446	6725	0,90
Misturas com gabro : AASHTO T 283						Misturas com gabro : ASTM D 4867					
cp	Vv (%)	Gs (%)	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MRR (%)	cp	Vv (%)	Gs (%)	MR1 (MPa)	MR2 (MPa)	MRR (%)
3	4,2	76,62	10267	5731	0,56	1	5,0	58,1	14622	6054	0,41
4	4,2	70,48	11274	6441	0,57	3	4,7	55,4	10669	5444	0,51
5	4,1	74,87	9639	5592	0,58	5	4,9	56,9	10176	7606	0,75

Pelos critérios de aceitação estabelecidos para a resistência à tração retida, todas as misturas seriam aceitáveis; já com relação ao módulo de resiliência, essa tendência não se mantém pois, em geral, as misturas com gabro não atenderam os mesmos critérios. Não era esperado que se obtivessem resultados de MR e RT que levassem às mesmas conclusões em termos de aceitação, pois os mesmos podem não ser igualmente sensíveis às mudanças de propriedades das misturas quanto à sua suscetibilidade à umidade.

A Figura 2 ilustra a variação dos valores médios dos módulos de resiliência em função do tipo de agregado e do método utilizado. Nela nota-se que as misturas não envelhecidas (ASTM) apresentaram-se mais rígidas que as misturas envelhecidas (AASHTO), ao contrário do esperado e encontrado na literatura. Aparentemente, neste caso, o período de 2 h de estabilização na temperatura de compactação, preconizado pela ASTM, provocou uma maior absorção de asfalto (Tabela 4), causando o enrijecimento dessas misturas. Na temperatura de compactação, o asfalto apresenta-se menos viscoso, penetrando nos poros do agregado, aumentando os vazios da mistura e, conseqüentemente, diminuindo a espessura da película. Os aumentos do módulo de resiliência e da resistência à tração poderiam ser assim explicados; entretanto, alguma contribuição, aqui não avaliada, do envelhecimento do ligante não deve ser descartada. Por outro lado, nas misturas AASHTO, é razoável que a menor absorção tenha propiciado o aumento do teor de asfalto efetivo resultando em valores menores dessas propriedades.

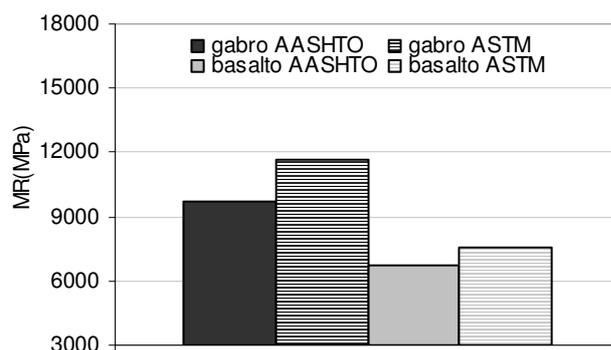


Figura 2: Variação do módulo de resiliência das misturas em função do tipo de agregado e do método de ensaio utilizado

A partir da análise dos dados obtidos seguindo a sistemática da AASHTO, apresentados na Figura 3, nota-se que o ensaio de módulo de resiliência é capaz de avaliar a variação na propriedade decorrente do condicionamento, e que as misturas com gabro apresentaram sempre valores de módulos significativamente maiores que as misturas com basalto. Se o critério de aceitação assumido fosse o mesmo para a resistência à tração, somente as misturas com basalto seriam aceitas. Isto significa que, apesar das misturas com gabro apresentarem módulos maiores (o que nem sempre é desejável), elas sofreram maior influência da ação da água, o mesmo acontecendo para o método da ASTM, como se nota na Figura 4.

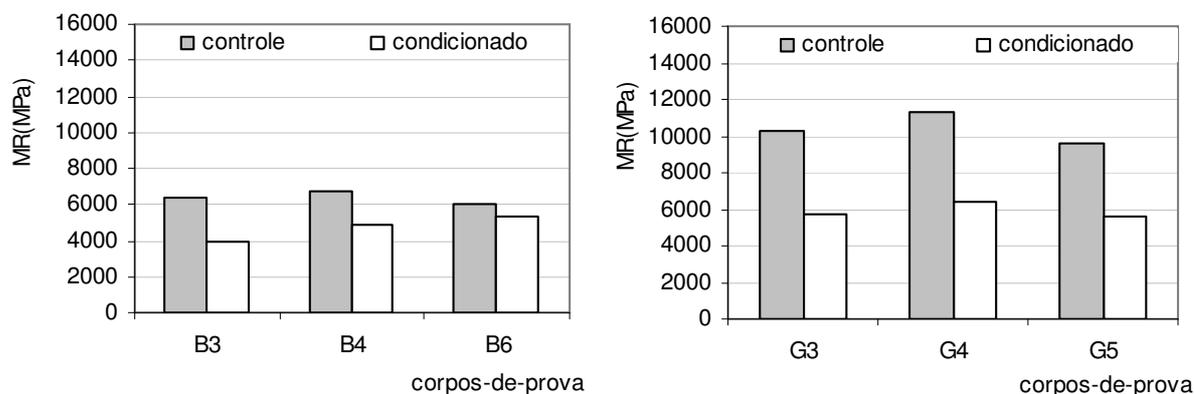


Figura 3: Variação dos módulos de resiliência para as duas misturas pelo AASHTO T 283

Ainda que o método da AASHTO pareça mais severo em termos de condicionamento, a mesma tendência de suscetibilidade ao danos por umidade foi encontrada no método da ASTM. A consideração de uma sistemática mais simples e rápida tal qual o método da ASTM, assim como a adoção do módulo de resiliência como propriedade analisada, pode ser uma opção na avaliação dos efeitos da umidade em misturas asfálticas, principalmente considerando-se que os ensaios de módulo de resiliência permitem que as determinações sejam repetidas.

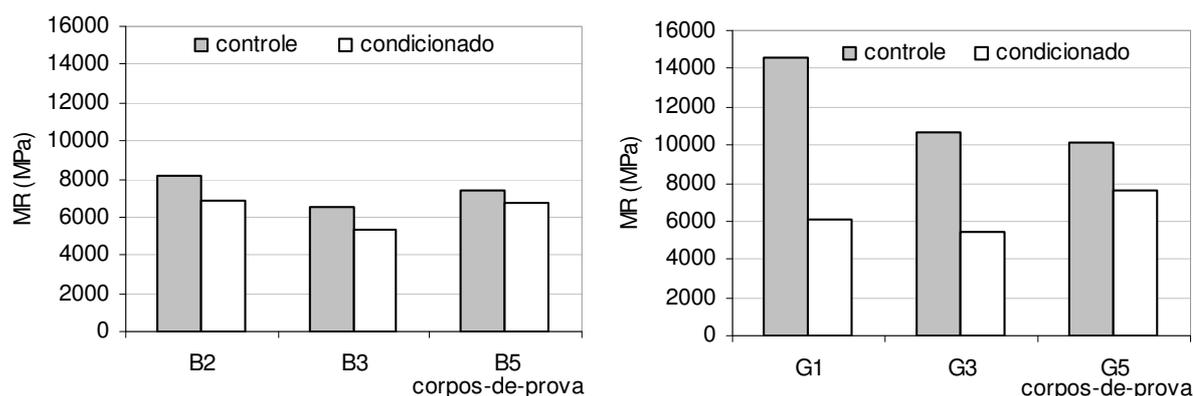


Figura 4: Variação dos módulos de resiliência para as duas misturas pelo ASTM D 4768

7. CONCLUSÕES

Com base nos experimentos laboratoriais desta pesquisa, pode-se concluir que:

- A absorção de asfalto pelos agregados parece estar relacionada com a densidade aparente dos agregados de mesma origem, que por sua vez parece estar relacionada à estrutura cristalina do agregado;
- A quantidade de asfalto absorvido depende do tempo de exposição da mistura a uma determinada temperatura e à viscosidade do asfalto;
- A absorção influenciou nos valores dos módulos de resiliência das misturas, onde taxas de absorção maiores corresponderam à módulos mais elevados;
- A ação do água foi mais prejudicial nas misturas com agregados mais absorventes (gabro) comparados ao para os menos absorventes (basalto);
- Ao comparar os resultados da aplicação dos métodos da AASHTO T 283 e da ASTM D 4867, verificou-se que não houve variação significativa na resistência à tração por compressão diametral aos condicionamentos dos métodos;
- Ao comparar os resultados da aplicação dos métodos da AASHTO T 283 e da ASTM D 4867, verificou-se que houve variação significativa no módulo de resiliência devido às diferenças de condicionamentos dos métodos;
- Ainda que o método da AASHTO aparentemente seja mais severo em termos de condicionamento, a mesma tendência de suscetibilidade aos danos por umidade foi encontrada pelo método da ASTM.
- A consideração de uma sistemática mais simples e rápida, como a adoção do método da ASTM e a utilização do módulo de resiliência como propriedade analisada, pode ser uma opção na avaliação dos efeitos da umidade em misturas asfálticas.

Agradecimentos

O desenvolvimento desta pesquisa conta com o apoio da FAPESP e da CAPES na forma de bolsas de doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO T 166 – Standard Method of Test for Bulk Specific of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens.
- AASHTO T 283 (1999) – Standard Method of Test for Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage.
- ABNT NBR 12891 (1993) - Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall. Associação Brasileira de

Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

- ASTM C 127 (1993) – Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM C 128 (1993) – Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D 4867 (1988) – Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D 2041 (1995) – Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Curtis, C. W. (1990). A literature Review of liquid antistripping and test for measuring stripping- Relatório Técnico UIR-90-016, Strategic Highway Research Program (SHRP).
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) *Método de Ensaio DNER-ME 133/94. Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência*. Rio de Janeiro, DNER.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) *Método de Ensaio DNER-ME 138/94. Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral*. Rio de Janeiro, DNER.
- Hicks, G. H. (1991). Moisture damage in asphalt concrete- NCHRP 175 – National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice Transportation Research Board.
- Huang, S.C.; Robertson, R.E. e Branthaver, J.F. (2003) Physico-Chemical Characterization of asphalt-aggregate interactions under the influence of freeze-thaw cycle. Annual Meeting, Transportation Research Record, pp. 2-17.
- Kandhal, P. S.; Khatri, M. A. (1991). Evaluation of asphalt absorption by mineral aggregates. Relatório Técnico 91 – 4, National Center for Asphalt Technology.
- Kandhal, P. S.; Khatri, M. A. (1992). Relating asphalt absorption to properties of asphalt cement and aggregates. Relatório Técnico 92 – 2, National Center of Asphalt Technology.
- Kandhal, P. S.; Lee, D. (1972). Asphalt absorption as related to pore characteristics of aggregates. Highway Research Record, n. 404.
- Lee, D. Y. (1969). The relationship between physical and chemical properties of aggregates and their asphalt absorption. Association of Asphalt Paving Technologists, v.38, p.242 – 275.
- Lee, D. Y.; Guinn, J. A.; Kandhal, P. S.; Dunning, R. L. (1990). Absorption of asphalt into porous aggregates. Relatório Técnico UIR-90-009, Strategic Highway Research Program (SHRP).
- Lettier, J. A.; Fink, D. F.; Wilson, N. B.; Farley, F. F. (1949). Mechanism of absorption of bituminous materials by aggregate. Association of Asphalt Pavement Technologists, v.18, p.278 – 300.
- Majidzadeh, K. e Brovold, F. N. (1968) State of the art: Effect of water on bitumen-aggregate mixtures, Highway Research Board, Special Report n 98.
- Rice, J. M. (1953). New test method for direct measurement of maximum density of bituminous mixtures. Crushed Stone Journal.
- Taylor, M.A.; Khosla, N.P (1983). Stripping on asphalt pavement: State of the art, Transportation Research Record 911.