



## INFLUÊNCIA DE CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS NA SUSCEPTIBILIDADE A DANO POR UMIDADE DE MISTURAS ASFÁLTICAS

A. P. Furlan<sup>1</sup>, L. T. de Gouveia<sup>2</sup>, G. T. P. Fabbri<sup>3</sup>, J. L. Fernandes Jr.<sup>4</sup>

### Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação no 17º Encontro de Asfalto, realizado no período de 13 a 15 de dezembro de 2004, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Organizador do Evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais do 17º Encontro de Asfalto.

---

### Resumo

Este artigo apresenta uma avaliação das características e propriedades dos agregados quanto às suas influências na sensibilidade aos danos causados pela umidade em misturas de concreto asfáltico. São utilizadas misturas compostas por agregados de basalto e de gabro que, apesar da mesma origem geológica, apresentam características de porosidade, grau de absorção, angularidade, forma e textura superficial das partículas diferentes. As misturas são avaliadas quanto à sua sensibilidade aos danos causados pela umidade através do método ASTM 4867 e, adicionalmente, através do ensaio de módulo de resiliência para as mesmas condições expostas nesse método. Os resultados demonstram que agregados mais porosos absorvem mais asfalto, o que contribui para perdas maiores de resistência das misturas na presença de umidade, devido à diminuição da espessura do filme de asfalto. Além disso, mostram que as características de angularidade e forma dos agregados parecem não ter influenciado na sensibilidade das misturas aos danos causados pela umidade.

### Abstract

This paper presents an evaluation of the characteristics and properties of aggregates and its influence on moisture induced damage. It is tested asphalt concrete paving mixtures with basaltic and gabbroic aggregates, which present the same mineralogical composition and the same geological origin, although they have different porosity, absorption rate, shape and roughness. The laboratory evaluation of the hot mixture asphalt was based on ASTM D 4867 procedures. Additionally, resilient modulus tests were performed. The results showed that aggregates with higher porosity absorb more asphalt and lead to higher stiffness mixtures. Besides, the shape and roughness of the aggregates seem did not influence the mixtures moisture susceptibility.

## 1. Introdução

Um dos fatores que determinam a durabilidade de uma camada de concreto asfáltico é o grau de adesividade desenvolvido entre o asfalto e o agregado. A água (umidade) pode prejudicar a união asfalto/agregado, reduzindo assim a resistência ou estabilidade das misturas. A resistência da mistura é decorrente da coesão da mistura e do intertravamento e atrito entre as partículas dos agregados. Na presença de umidade, ocorre um enfraquecimento na interface asfalto/agregado que leva a uma perda prematura de resistência da mistura.

A sensibilidade das misturas à umidade associa-se a dois mecanismos que se inter-relacionam: a perda de adesão e a perda de coesão. A perda de adesão deve-se à existência de água entre o asfalto e o agregado, causando o descolamento do filme de asfalto. Já a perda de coesão se dá devido ao enfraquecimento do asfalto na presença de água,

---

<sup>1</sup> Engenheira Civil, Doutoranda – Escola de Engenharia de São Carlos – USP. afurlan@sc.usp.br

<sup>2</sup> Engenheira Civil, Doutoranda – Escola de Engenharia de São Carlos – USP. liliantg@sc.usp.br

<sup>3</sup> Prof. Doutor, Engenheiro Civil – Escola de Engenharia de São Carlos – USP. glauco@sc.usp.br

<sup>4</sup> Prof. Associado, Engenheiro Civil – Escola de Engenharia de São Carlos – USP. leomar@sc.usp.br

que diminui a resistência da união asfalto/agregado, causando uma redução severa na resistência e integridade da mistura.

A susceptibilidade de misturas asfálticas à umidade é um problema complexo, que depende de fatores ambientais, práticas construtivas e características das misturas asfálticas. Os principais fatores que aceleram o aparecimento dos danos causados pela umidade são o clima e o tráfego. Os maiores danos ocorrem em condições climáticas extremas, particularmente quando ocorre congelamento combinado com alto volume de tráfego. Os fatores construtivos que influenciam a sensibilidade da mistura à umidade incluem a qualidade da compactação e as condições do tempo durante o processo de construção do pavimento. Dentre as características das misturas asfálticas destacam-se a natureza do agregado, a natureza do asfalto e o tipo de mistura.

Quanto à natureza do asfalto, tem-se observado que asfaltos mais viscosos apresentam maior resistência ao deslocamento da película na presença da água que asfaltos menos viscosos (Hicks, 1991; Taylor & Khosla, 1983). Quanto ao tipo de misturas, Brown *et al.* (1959) indicam que misturas de granulometria densa geralmente exibem perda de resistência na presença de água quando o volume de vazios ou a umidade são excessivos ou a quantidade de asfalto é insuficiente, muitas vezes causada por uma absorção elevada de asfalto pelo agregado. Embora as características do asfalto e do tipo de mistura possam influenciar a sensibilidade das misturas à umidade, as propriedades dos agregados são as principais responsáveis pela resistência adesiva entre o asfalto e o agregado (Kandhal & Parker Jr., 1998; Roberts *et al.*, 1991; Yoon & Tarrer, 1988).

Este artigo avalia a sensibilidade aos danos causados pela umidade em misturas compostas por agregados com diferentes características de angularidade, forma e textura superficial das partículas, mas de mesmas mineralogia e composição química, ou seja, com diferentes graus de cristalização. Para tanto, determinam-se as propriedades dos dois tipos de agregados (basalto e gábro) e do asfalto utilizados, realizam-se duas dosagens Marshall para a determinação dos teores de asfalto “ótimos” (correspondentes a 4% de vazios) e, então, avaliam-se as susceptibilidades à umidade das misturas asfálticas produzidas nos teores “ótimos” de asfalto, através da norma padronizada pela ASTM D 4867 e, adicionalmente, através do ensaio de módulo de resiliência.

## 2. Características dos Agregados Influentes na Adesão

A adesividade entre os materiais de uma mistura asfáltica envolve muitos fatores intervenientes, assim como muitas explicações para os mecanismos de seu desenvolvimento que servem de bases teóricas para o entendimento e para a avaliação do fenômeno. Alguns autores enfatizam que as propriedades do material aderido (agregado) são decisivas na qualidade da ligação adesiva (Curtis, 2000; Yoon & Tarrer, 1988), em função do intertravamento que conferem à mistura; neste sentido a teoria mecânica “explica” que o asfalto entra nas irregularidades e poros da superfície do agregado fornecendo ligações adesivas mais resistentes devido ao aumento da área superficial disponível (Taylor & Khosla, 1983). Assim, são muitas as características dos agregados que influenciam no fenômeno da adesividade, dentre as quais destacam-se: composição mineralógica, porosidade, absorção, forma, textura e angularidade.

### 2.1. Composição Mineralógica e Polaridade

Os agregados apresentam composições mineralógicas e estruturas cristalinas específicas, podendo ser classificados em ácidos e básicos, de acordo com a quantidade de sílica (SiO<sub>2</sub>) presente. O aumento do teor de sílica num agregado aumenta sua afinidade com a água e, por isso, são chamados agregados hidrofílicos. Por outro lado, agregados básicos como basaltos, diabásios, gábricos e alguns tipos de calcários, devido à menor concentração de sílica em suas composições, tendem a desenvolver melhores ligações ao asfalto que à água e, por isso, são chamados hidrofóbicos.

Outro fator importante é a polaridade do agregado, pois na ligação com o asfalto há um balanceamento das cargas elétricas superficiais. Um complicador para a classificação dos agregados é que alguns deles apresentam os dois tipos de cargas elétricas superficiais, devido à composição mineral. O basalto e o gábro, estudados neste trabalho, são exemplos típicos de agregados que apresentam os dois tipos de cargas elétricas (Roberts *et al.*, 1991).

### 2.2. Porosidade e Absorção

Os poros em rocha são descritos como cavidades formadas irregularmente, que podem estar conectadas por capilares que têm forma e diâmetro variados. O menor diâmetro interno do poro é usado como a medida que caracteriza o seu tamanho.

A porosidade é uma relação entre o volume de vazios e o volume total de um material. Alguma porosidade no agregado é desejável, pois pode beneficiar a união asfalto/agregado. No entanto, se o agregado for muito poroso, ele pode absorver quantidades expressivas de asfalto. Basicamente, a consequência direta de uma absorção alta é a diminuição da espessura do filme de asfalto que envolve as partículas do agregado, ou seja, diminuição da quantidade

de asfalto efetivo na mistura. Essa diminuição torna a mistura frágil e mais suscetível às ações do clima, da água, do envelhecimento e do tráfego.

A porosidade do agregado pode ser determinada direta ou indiretamente através de vários métodos. Uma forma de determinação direta é a avaliação visual, observando-se microscopicamente ou por métodos de fotomicrografia, uma seção polida ou delgada do agregado e medindo a área de vazios (espaço do poro). Outra forma de determinação indireta, muito utilizada, consiste em avaliar a relação entre as densidades aparente ( $\rho_{ap}$ ) e real ( $\rho_r$ ) do agregado, denominada porosidade total (PT) do agregado, como mostra a Equação 1. A porosidade total é um indicador da capacidade de absorção máxima do agregado, que na prática, pode nunca vir a ocorrer.

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

### 2.3. Angularidade, Forma e Textura Superficial da Partícula do Agregado

A angularidade, a forma e a textura superficial das partículas dos agregados são características muito importantes para o bom desempenho da mistura asfáltica, inclusive quanto à resistência aos danos causados pela umidade na mistura (Mazidjadeh e Brovold, 1968). Agregados angulares, ou seja, com cantos agudos, proporcionam maior intertravamento e atrito entre partículas, formando uma estrutura granular mais resistente e proporcionando maior estabilidade às misturas. Por outro lado, os cantos agudos podem ser responsáveis pela perfuração do filme de asfalto, possibilitando a entrada de água na interface asfalto/agregado.

A forma ideal dos agregados, para uso em misturas asfálticas, é a cúbica. A utilização de partículas de forma plana ou alongada, ou ainda, plana e alongada (lamelar) em misturas asfálticas pode causar vários problemas, dentre eles a quebra de partículas durante a compactação, fazendo com que o filme de asfalto que cobre o agregado se rompa, também possibilitando a entrada de umidade na interface agregado-ligante.

Kim *et al.* (1992) verificam que misturas contendo agregados com textura superficial rugosa promovem melhor ligação entre asfalto/agregado. Exames cuidadosos nas superfícies de ruptura, após os ensaios de fadiga, revelam que a ruptura ocorrida nas misturas contendo agregados de textura superficial lisa se dá na interface asfalto/agregado, enquanto que em misturas contendo agregados de superfície rugosa ela progride através das partículas, até nos agregados mais grossos, indicando uma união mais forte entre asfalto/agregado.

## 3. Materiais

### 3.1. Agregados e Ligante Asfáltico

Na composição das misturas asfálticas analisadas neste trabalho são utilizados dois tipos de agregados de mesma origem geológica, um basalto e um gabro, porém com características de porosidade, absorção de asfalto, angularidade, forma e textura superficial distintas. O agregado de basalto é proveniente da Pedreira Santa Isabel, localizada na cidade de Ribeirão Preto – SP, e o de gabro é da Pedreira São Roque, em Limeira - SP.

O asfalto utilizado é 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
Viscosidade absoluta a 60 °C (poise)	3200	2000 a 3500
Viscosidade Saybolt Furol a 135 °C (s)	165	120 mín.
Viscosidade Saybolt Furol a 177 °C (s)	35	30 a 150
Índice de sensibilidade térmica	-0.45	-1,5 a 1,0
Penetração, 25 °C, 100g, 5s (0,1mm)	55	50 mín.
Ponto de fulgor (°C)	264	235 mín.
Densidade real (g/cm <sup>3</sup> )	1,020*	-

\* Resultado de ensaio fornecido pela Petrobras Petróleo Brasileiro S.A.

### 3.2. Misturas Asfálticas

A distribuição granulométrica de ambas as misturas, apresentada na Tabela 2 e ilustrada na Figura 1, passa acima da zona restrição do método SUPERPAVE<sup>®</sup> e, quase que em sua totalidade, acima da linha de densidade máxima, respeitando os pontos de controle. As misturas asfálticas são compostas, em suas frações grossa e fina, por apenas um

tipo de agregado cada, basalto ou gabro. Um único tipo de fíler, areia natural passante na peneira de abertura de 0,075 mm (n. 200), é empregado nas misturas com o objetivo de eliminar a utilização de fíleres distintos.

As misturas foram dosadas utilizando os critérios volumétricos estabelecidos pelo método SUPERPAVE<sup>®</sup>, resultando teores de asfalto de 6,7% para a mistura de basalto e de 6,2% para a de gabro, correspondentes a volume de vazios de 4%. A moldagem dos corpos-de-prova segue os procedimentos do método Marshall (NBR 12891/93 - ABNT), porém com aplicação de número de golpes suficiente para a obtenção de corpos-de-prova com volumes de vazios de  $7 \pm 1\%$ . O cálculo dos volumes de vazios das misturas baseia-se na densidade medida máxima (DMM), obtida através do método Rice (ASTM D 2041) e na densidade aparente da mistura, obtida através do método de secagem superficial dos corpos-de-prova, de acordo com a norma AASHTO T 166.

Tabela 2: Distribuição granulométrica

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

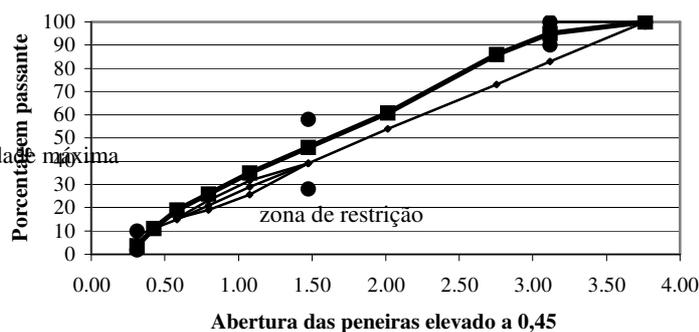


Figura 1: Curva granulométrica

## 4. Métodos

O programa experimental é composto de duas etapas: (1) determinação das características dos agregados e (2) determinação da sensibilidade aos danos por umidade das misturas executadas com os dois tipos de agregados. As propriedades determinadas na primeira etapa incluem: porosidade total, absorção de asfalto, angularidade, forma e textura superficial das partículas. Na segunda etapa, utiliza-se o método de avaliação do efeito da umidade nas misturas asfálticas (ASTM D 4867) e o ensaio de módulo de resiliência (DNER-ME 133/94), como alternativa ao uso do ensaio de resistência à tração na avaliação do efeito da umidade.

### 4.1. 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 são obtidos através da relação entre as massas obtidas no ensaio.

### 4.2. Absorção de Asfalto pelo Agregado

A porcentagem de asfalto absorvido, em relação à massa do agregado, é obtida através das densidades efetiva ( $\rho_{ef}$ ) e aparente ( $\rho_{ap}$ ) do agregado, como mostra a Equação 2. A densidade efetiva do agregado pode ser calculada a partir da densidade medida máxima (DMM), do teor de asfalto ( $P_b$ ) e da densidade do asfalto ( $\rho_b$ ), como mostra a Equação 3.

$$Abs_{asf} = \frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ef} \times \rho_{ap}} \times \rho_b \times 100 \quad (2)$$

$$\rho_{ef} = \frac{1 - P_b}{\frac{DMM}{\rho_b} - P_b} \quad (3)$$

### 4.3. Angularidade, Forma e Textura Superficial

A angularidade do agregado grosso (AAG) é avaliada através do ensaio de Porcentagem de Partículas Fraturadas para Agregados Grossos (ASTM D 5821), adotado pelo método SUPERPAVE<sup>®</sup>. O ensaio consiste na avaliação visual de partículas de agregados grossos, maiores que 4,75 mm (# n. 4), de modo a classificá-las quanto ao número de faces fraturadas. O resultado do ensaio de AAG mostra a porcentagem de partículas do agregado que possuem uma ou mais faces fraturadas.

A forma das partículas do agregado grosso é avaliada através do ensaio de Partículas Planas e Alongadas em Agregados Grossos (ASTM D 4791), adaptado do ensaio *U.S. Army Corps of Engineers Method CRD-C 119*, e adotado pelo SUPERPAVE<sup>®</sup>. Esse ensaio consiste na utilização de um paquímetro especial para medir a razão dimensional entre as dimensões maior (comprimento) e menor (espessura) das partículas, numa proporção de 5:1, ou seja, a partícula é considerada plana e alongada (lamelar) se o seu comprimento for mais que 5 vezes sua espessura. Já a textura superficial das partículas dos agregados grossos é avaliada visualmente, sendo classificadas como lisa ou rugosa.

Devido à dificuldade de avaliação visual das partículas do agregado fino, utiliza-se o ensaio de angularidade do agregado fino (AAF) para a determinação indireta da angularidade, da forma e da textura superficial das partículas. Esse ensaio, normalizado pela ASTM C 1252 e adotado pelo método SUPERPAVE<sup>®</sup>, determina a porcentagem dos vazios não compactados contidos entre as partículas dos agregados, quando são vertidas de uma altura de queda padronizada, dentro de um cilindro de volume conhecido.

Quanto maior a angularidade e rugosidade das partículas, maiores os valores de AAF, pois quando as partículas caem livremente umas sobre as outras, sem sofrer acomodação por compactação, suas arestas e cantos agudos fazem com que fiquem mais distantes umas das outras, aumentando o volume de vazios. Ao contrário, partículas menos angulares, com cantos arredondados e com textura superficial lisa, ao caírem livremente, acomodam-se com mais facilidade, diminuindo o volume de vazios e, conseqüentemente, os valores de AAF.

### 4.4 Efeito da Umidade em Misturas Asfálticas

Para a avaliar o dano causado pela umidade em uma mistura asfáltica é utilizado o Ensaio para a Determinação do Efeito da Umidade em Misturas Asfálticas (ASTM D 4867), que usa a variação da resistência à tração (RT) para a estimativa desse dano. O método consiste na moldagem de 6 corpos-de-prova Marshall, que são divididos em dois grupos de três corpos-de-prova cada. Após decorrido um período de 24 horas após a moldagem, submete-se o primeiro grupo, denominado de grupo de controle, ao ensaio de resistência à tração (DNER-ME 138/94), enquanto o segundo grupo, denominado de grupo condicionado, é submetido ao processo de condicionamento.

No processo de condicionamento, os corpos-de-prova são colocados imersos em água, à temperatura ambiente, e submetidos a vácuo, até que atinjam um grau de saturação entre 55% a 80%. Após a saturação, os corpos-de-prova saturados são colocados submersos em água destilada, à temperatura de 60°C, por 24 horas e, em seguida, são submersos em água destilada, à temperatura de 25°C, por 60 minutos. Terminado o procedimento de condicionamento, os corpos-de-prova são submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT).

Obtidos os valores de RT para os dois grupos, calcula-se a relação entre as resistências à tração (RRT) através da razão entre as resistências à tração médias do grupo condicionado ( $RT_2$ ) e do grupo de controle ou não condicionado ( $RT_1$ ). As misturas que apresentam RRT maior que 70%, ou seja, perda de resistência à tração causada pelo condicionamento inferior a 30%, são consideradas aceitáveis.

### 4.5. Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência também foi selecionado neste trabalho para avaliar o efeito da umidade nas misturas estudadas por ser de fácil execução, não danificar os corpos-de-prova e apresentar baixa dispersão de resultados. Os corpos-de-prova do grupo de controle e do grupo condicionado são submetidos a ensaios de módulo de resiliência (DNER-ME 133/94) para a obtenção dos valores de módulo do grupo condicionado ( $MR_2$ ) e do grupo de controle ( $MR_1$ ). À semelhança do ensaio de resistência à tração, as misturas que apresentam relação de módulo de resiliência (RMR) maior que 70% são consideradas aceitáveis, embora ainda não exista critério estabelecido que utilize os resultados desse ensaio.

## 5. Apresentação e análise dos Resultados

### 5.1. Características dos agregados

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados de densidades aparente ( $\rho_{ap}$ ) e real ( $\rho_r$ ) dos agregados, porosidade total (PT) e absorção de asfalto ( $Abs_{asf}$ ), assim como a angularidade do agregado grosso (AAG), a angularidade do agregado fino (AAF), a porcentagem de partículas planas e alongadas (PPA) analisadas na proporção de 5:1 e a textura superficial das partículas.

Observando-se essa tabela nota-se que o agregado de gabro apresenta porosidade duas vezes maior que a do agregado de basalto e também exibe maior absorção de asfalto. Ao analisar os resultados, verifica-se ainda que a absorção dos agregados está diretamente relacionada com a porosidade (porcentagem de interstícios) da massa cristalina das partículas. Embora os agregados de basalto e gabro tenham a mesma composição mineralógica, o basalto apresenta granulação fina e maior densidade aparente que o gabro, que tem granulação grossa. A densidade aparente menor do agregado de gabro indica uma maior quantidade de interstícios (poros) entre os seus cristais, o que propicia maior absorção de asfalto.

Quanto à angularidade e à rugosidade, tanto o agregado grosso de basalto quanto o de gabro apresentam 100% de suas partículas com duas ou mais faces fraturadas e textura superficial rugosa. Já as partículas finas do agregado de basalto demonstram ser um pouco mais angulares e rugosas (AAF = 51%) que as partículas do agregado de gabro (AAF = 48%). Com relação à forma do agregado, o basalto apresenta 2,5% de suas partículas lamelares, enquanto o gabro, apenas 0,5%.

Tabela 3: Propriedades dos agregados

Agregado	$\rho_{ap}$	$\rho_r$	PT (%)	Ab <sub>S<sub>asf</sub></sub> (%)	AAG (%)	AAF (%)	PPA - 5:1 (%)	Textura Superficial
Basalto	2,863	2,929	2,27	0,21	100	51	2,5	rugosa
Gabro	2,742	2,875	4,63	0,88	100	48	0,5	rugosa

## 5.2. Dosagem Marshall

Na Tabela 4 são apresentados os resultados médios obtidos da dosagem Marshall para volumes de vazios iguais a 4%. Observando essa tabela percebe-se que o teor “ótimo” de asfalto para a mistura com basalto (referente a  $V_v = 4\%$ ) é maior que o da mistura com gabro, apesar de apresentar um valor de absorção de asfalto consideravelmente menor que o de gabro. Entretanto, a angularidade do agregado fino (AAF) e a porcentagem de partículas alongadas (PPA) são maiores no basalto, o que pode, de uma certa forma, explicar essa diferença nos teores “ótimos” de asfalto encontrados.

Tabela 4: Resultados da dosagem Marshall para  $V_v = 4\%$ 

	Misturas	
	Basalto	Gabro
Teor ótimo de asfalto (%)	6,7	6,2
Densidade aparente	2,467	2,423
Estabilidade (N)	13090	17930
Fluência (0,1 mm)	44	40
Volume de vazios do agregado mineral (%)	19,6	17,1
Relação betume/vazios (%)	80,3	74,6

## 5.3. Propriedades mecânicas das misturas

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados de resistência à tração, em termos médios, dos grupos de controle ( $RT_1$ ) e condicionados ( $RT_2$ ) e a relação de resistência à tração (RRT), assim como os módulos de resiliência antes e após o condicionamento ( $MR_1$  e  $MR_2$ , respectivamente) e a relação de módulo de resiliência (RMR). Verifica-se que os valores de RT e MR da mistura com basalto são menores que os da mistura com gabro. Isso pode ter sido causado tanto pela contribuição da forma do agregado no intertravamento mecânico da mistura, como também pela maior absorção de asfalto, que provoca uma diminuição do teor de asfalto efetivo e, como consequência, diminuição da espessura do filme de asfalto e aumento dos valores da RT e do MR. A mistura com agregado de basalto apresenta espessura de película em torno de  $8,9 \times 10^{-6}$  m, enquanto que a com gabro, em torno de  $7,3 \times 10^{-6}$  m, o que, de uma certa forma, auxilia na explicação dessa aparente inversão de comportamentos quanto aos valores de RT e MR.

As Figuras 2 e 3 mostram os valores das relações de resistência à tração e de módulo de resiliência, em termos médios, para as duas misturas avaliadas. Pelo critério de aceitação estabelecido para RRT mínimo de 70%, tanto as misturas com basalto quanto as com gabro são aceitáveis, pois apresentam RRT de 97% e 94%, respectivamente (Figura 2). Assumindo o mesmo critério de aceitação para a relação de módulo de resiliência (RMR acima de 70%), as misturas com basalto seriam aceitáveis, pois apresentam RMR igual a 85%, enquanto que as com gabro exibem relação de módulo de resiliência baixa (56%) e, portanto, seriam consideradas não aceitáveis (Figura 3).

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

Mistura Basalto												
Módulo de Resiliência (MPa)					Resistência à tração (MPa)					Relação MR/RT		
Vv (%)	Gs (%)	MR <sub>1</sub>	MR <sub>2</sub>	RMR (%)	Vv <sub>1</sub> (%)	Vv <sub>2</sub> (%)	RT <sub>1</sub>	RT <sub>2</sub>	RRT (%)	MR <sub>1</sub> /RT <sub>1</sub>	MR <sub>2</sub> /RT <sub>2</sub>	
média	6,4	74,7	7378	6289	85	6,9	6,1	1,54	1,50	97	4791	4193
Mistura Gabro												
Módulo de Resiliência (MPa)					Resistência à tração (MPa)					Relação MR/RT		
Vv (%)	Gs (%)	MR <sub>1</sub>	MR <sub>2</sub>	RMR (%)	Vv <sub>1</sub> (%)	Vv <sub>2</sub> (%)	RT <sub>1</sub>	RT <sub>2</sub>	RRT (%)	MR <sub>1</sub> /RT <sub>1</sub>	MR <sub>2</sub> /RT <sub>2</sub>	
média	4,9	56,8	11822	6368	57	5,0	4,8	1,78	1,68	94	6642	3790

Gs – Grau de saturação

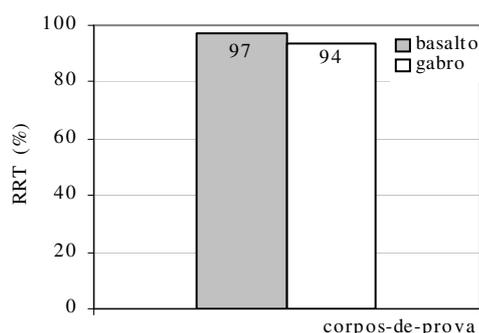


Figura 2: Variação dos RRT das Duas Misturas

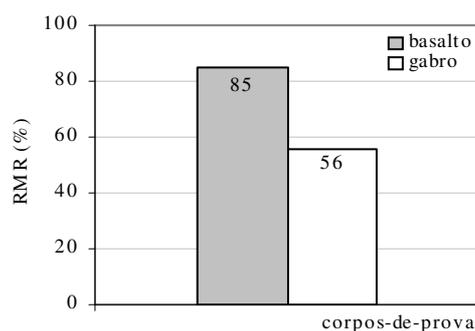


Figura 3: Variação dos RMR das Duas Misturas

O baixo valor da relação de módulos de resiliência apresentado pelas misturas com gabro pode estar relacionado à maior porosidade do agregado, que permite taxas altas de absorção de asfalto (0,88%), tendo como consequência a diminuição da espessura do filme de asfalto que envolve as partículas do agregado, o que pode tornar a mistura mais sensível à umidade.

Já as características de forma e de angularidade dos agregados parecem, neste caso, não influenciar na sensibilidade à umidade das misturas. O agregado de basalto apresenta a maior porcentagem de partículas lamelares, assim como a maior angularidade do agregado fino, o que, com base na literatura, seria prejudicial à resistência aos danos por umidade, mas apresenta RRT e RMR mais altas que as misturas com gabro. Acredita-se que isso possa se dever à maior espessura do filme de asfalto da mistura com basalto, que torna a película mais resistente a possíveis rupturas devido às características de forma e angularidade do agregado.

## 6. Conclusões

Com base nos resultados dos experimentos laboratoriais apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

- Quanto à porosidade dos agregados que:
  - os mais porosos podem absorver quantidades maiores de asfalto, reduzindo o teor de asfalto efetivo e proporcionar misturas mais rígidas;
  - ela pode reduzir a espessura efetiva de asfalto que recobre os agregados e causar misturas mais sensíveis danos por umidade.
- Quanto às características de angularidade e forma dos agregados que:
  - elas podem proporcionar misturas com maiores valores de estabilidade e fluência Marshall;
  - elas parecem não ter influenciado a sensibilidade à umidade das misturas.
- As misturas com gabro apresentam propriedades mecânicas (MR e RT) mais elevadas que as misturas com basalto;
- As misturas com gabro apresentaram as menores relações de resistência à tração e de módulo de resiliência;
- Misturas mais rígidas podem não ser as mais resistentes à ação da água.

Além disso, os autores recomendam que se estude a possibilidade de utilizar do ensaio do módulo de resiliência como alternativa para avaliação dos danos por umidade pois, além de se tratar de um ensaio de execução rápida, não destrutivo e particularmente de baixa dispersão, exibiu maior sensibilidade na avaliação da variação de propriedade ocasionada pela ação da umidade.

## 7. Agradecimentos

O desenvolvimento deste trabalho contou com os apoios da FAPESP e da CAPES na forma de bolsas de doutorado.

## 8. Referências

- AASHTO T 166 - *Standard Method of Test for Bulk Specific of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 1999.
- ABNT NBR 12891 - *Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1993.
- ASTM C 127 - *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993.
- ASTM C 128 - *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993.
- ASTM C 1252 - *Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*. American Society for Testing and Material, Philadelphia, 1993.
- ASTM D 4867 - *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988.
- ASTM D 4791 - *Standard Test Methods for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Material, Philadelphia, 1995.
- ASTM D 5821 - *Standard Test Methods for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Material, Philadelphia, 1995.
- BROWN, A. A., SPARKS, J. W., MARSH, G. E. *Objective Appraisal of Stripping of Asphalt from Aggregate*. STP 240, ASTM, p. 59-74, 1959.
- CURTIS, C. W. *A literature Review of liquid antistripping and test for measuring stripping*- Relatório Técnico UIR-90-016, Strategic Highway Research Program (SHRP), 1990.
- DNER-ME 133 *Método de Ensaio de Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, Rio de Janeiro, 1994.
- DNER-ME 138 *Método de Ensaio de Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, Rio de Janeiro, 1994.
- HICKS, G. H. *Moisture damage in asphalt concrete*- NCHRP Report 175, 1991.
- KANDHAL, P. S.; PARKER Jr., F. *Aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements*. NCHRP Report 405, 1998.
- KIM, Y. R.; N. P. KHOSLA, N. K. *Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete*. Meininger, R. C., editor, *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. ASTM, Philadelphia, 1992.
- LEE, D. Y. *The relationship between physical and chemical properties of aggregates and their asphalt absorption*. AAPT, v.38, p.242 – 275, 1969.
- MAJIDZADEH, K.; BROVOLD, F. N. *State of the art: Effect of water on bitumen-aggregate mixtures*, Highway Research Board, Special Report 98, 1968.
- ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W. *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. NAPA Education Foundation, Maryland, primeira edição, 1991.
- TAYLOR, M.A.; KHOSLA, N.P. *Stripping on asphalt pavement: State of the art*, TRR 911, 1983.
- YOON, H. H.; TARRER, A. R. *Effect of aggregate properties on stripping*. TRR, n. 1171, p. 37 – 43, 1988.