

## **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS PELA INSERÇÃO DE ZEÓLITAS UTILIZANDO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO MODIFICADO POR POLÍMERO**

Lucas Emerson Morais da Silveira<sup>1</sup> (*Universidade Federal do Ceará*), Ayres Correia de Sousa Filho<sup>2</sup> (*Universidade Federal do Ceará*), Jorge Barbosa Soares<sup>3</sup> (*Universidade Federal do Ceará*), Hosiberto Batista de Sant'Ana<sup>4</sup> (*Universidade Federal do Ceará*)

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Transportes, Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, Campus do Pici, Bloco 703, Fortaleza, CE, 60455 – 760, lucassilveira@det.ufc.br

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Química, Grupo de Pesquisas em Separações por Adsorção, Campus do Pici, Bloco 709, Fortaleza, CE, 60455 – 760, ayres@gpsa.ufc.br

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia de Transportes, Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, Campus do Pici, Bloco 703, Fortaleza, CE, 60455 – 760, jsoares@det.ufc.br

<sup>4</sup>Departamento de Engenharia Química, Grupo de Pesquisas em Separações por Adsorção, Campus do Pici, Bloco 709, Fortaleza, CE, 60455 – 760, hbs@ufc.br

Os cimentos asfálticos produzidos pelo refino do petróleo (CAP) atendem à maioria das situações às quais os pavimentos são submetidos. Entretanto, com o crescente aumento do volume de tráfego, principalmente nas capitais e rodovias interestaduais, faz-se necessário a aplicação de revestimentos mais resistentes. A modificação de cimentos asfálticos por polímeros tem sido uma solução eficiente para compensar algumas deficiências do cimento asfáltico convencional, melhorando propriedades como a susceptibilidade térmica, resistência à deformação permanente e à trincas térmicas. Contudo, devido às altas viscosidades do asfalto-polímero, é comum e necessário a aplicação de altas temperaturas para se produzir misturas homogêneas por meio de um recobrimento adequado do agregado mineral. O aumento da inquietação mundial relacionada a questões voltadas para a segurança, meio-ambiente e saúde (SMS), tem resultado em significantes esforços para a redução de emissões para o ambiente. A temperaturas muito elevadas o ligante asfáltico se degrada, emitindo para o meio ambiente fumos de asfalto e substâncias como CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>, contribuindo assim com o aumento do efeito estufa e conseqüentemente para o agravamento do aquecimento global. Além dos motivos supracitados, a diminuição dos custos com o consumo energético e a melhoria das condições de saúde e segurança dos operários (exposição a fumos de asfalto, odores) são razões suficientes para se reduzir a temperatura de usinagem e compactação (TUC) das misturas asfálticas modificadas. Incentivado por estas razões, neste trabalho avaliou-se a eficiência mecânica de misturas confeccionadas com asfalto modificado por Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), produzidas a temperaturas reduzidas com a inserção de zeólitas.

*Misturas Mornas, Zeólitas, SBS, Caracterização Mecânica.*

### **1. INTRODUÇÃO**

A constante busca da melhoria nas propriedades de materiais e produtos estimula indústrias a explorar novas tecnologias. Esta busca visa à redução de custos, conservação de matérias-primas não-renováveis e preservação da segurança, saúde e meio-ambiente (SMS). Em se tratando da produção de misturas asfálticas utilizando-se CAP modificado por polímero, são necessárias temperaturas acima de 160°C para se obter um recobrimento adequado do agregado, assim obtendo-se misturas asfálticas dentro dos padrões de qualidade.

A conservação de energia e a redução de emissões são razões suficientes para se reduzir a temperatura de produção dessas misturas. Além disso, temperaturas mais baixas podem diminuir o envelhecimento oxidativo do asfalto, implicando na diminuição de trincas causadas pelo endurecimento. Este trabalho objetiva aliar as vantagens de se produzir misturas asfálticas modificadas por polímeros, com os benefícios de se produzir misturas a temperaturas intermediárias (cerca de 20°C abaixo da convencional) pela inserção de zeólitas.

### **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado por Polímero**

De acordo com seu comportamento mecânico, os polímeros podem ser divididos em duas categorias genéricas: elastômeros e plastômeros. Os elastômeros são materiais macromoleculares, que exibem grande resistência à deformação retornável, ou seja, resistem à deformação por alongamento e recuperam sua forma original rapidamente ao cessar-se o esforço. Tais polímeros adicionam pouca resistência ao asfalto até que seja esticado, mas sua capacidade de recuperação elástica é diretamente proporcional ao alongamento. Os principais elastômeros utilizados na modificação do CAP são o estireno-butadieno-estireno (SBS), o estireno-isopreno-estireno (SIS), o látex de borracha natural e a borracha de estireno-butadieno (SBR). Os principais plastômeros utilizados na modificação de asfaltos são o copolímero de etilvinil-acetato (EVA), o polietileno/polipropileno, o etileno-propileno (EPDM) e o cloreto de polivinila (PVC). Os elastômeros conferem mais resistência e flexibilidade aos pavimentos, enquanto os plastômeros tornam as misturas mais rígidas (Leandro Liberatori, 2004).

A função básica dos polímeros é aumentar a consistência e reduzir a susceptibilidade térmica do asfalto e por esse motivo aumentar sua resistência a deformação permanente em temperaturas altas de serviço enquanto impede fissuras em baixas temperaturas de processo. O polímero também melhora o comportamento elástico do asfalto e assim ainda contribui para a sua resistência a deformação permanente e às trincas por fadiga. “O polímero pode contribuir também para uma melhor adesão entre agregados e asfalto, diminui o abrasão e melhora a resistência à oxidação” (Zanzotto & Kennepohl, 1996).

Pequenas quantidades do SBS formam uma forte rede elástica dentro do cimento asfáltico. Essa rede propicia melhorias nas propriedades de resistência ao fluxo e deformação permanente (Leite, 1999 *apud* Lucena, 2005).

## 2.2 Misturas Asfálticas Mornas

A produção de misturas asfálticas mornas foi primeiramente relatada em 2000 por Harrison & Christodoulaki, na *First International Conference of Asphalt Pavements*, em Sydney, e por Koenders, no Eurobitume 2000 (AAPA, 2001).

As indústrias de asfalto européias, sob os termos do Protocolo de Kyoto, vêm tentando atingir a marca de 15% nessa redução e desde 1998 iniciou-se na Alemanha o programa *Low Temperature Asphalt* (Asfalto de Baixa Temperatura), o qual tem como principal objetivo desenvolver e investigar métodos de produção nos quais misturas asfálticas possam ser produzidas em temperaturas mais baixas (Asphalt, 2004; Barthel *et al.*, 2004). Além das razões citadas, que estão relacionadas com os efeitos diretos que a produção de misturas asfálticas a altas temperaturas têm sobre o homem e o ambiente, existem ainda razões como reduzir o impacto da temperatura no processo de envelhecimento a curto prazo do ligante, o qual ocorre em misturas com TUC muito elevadas, causando endurecimento e tornando-as susceptíveis a trincas e deformações (Sousa Filho *et al.*, 2006).

Três tecnologias vêm se destacando na produção de misturas asfálticas mornas: o primeiro dos processos utiliza um sistema bi-componente, em dois estágios. O segundo método consiste na introdução de aditivos orgânicos de baixo ponto de fusão, e o terceiro processo que tem se mostrado bastante eficaz é a inserção de material zeolítico nas misturas asfálticas.

O primeiro ocorre devido à inserção de um ligante “leve” e um ligante “pesado” em forma de espuma, em tempos diferentes do processo de mistura. Essa combinação atua reduzindo a viscosidade da mistura asfáltica (Asphalt, 2004; Barthel *et al.*, 2004; Larsen *et al.*, 2004).

No segundo processo os aditivos adicionados, modificam quimicamente a curva de viscosidade *versus* temperatura. Os dois tipos de aditivos usados são: uma cera parafínica sintética e um éster de baixo peso molecular, que fundem a aproximadamente 99°C, produzindo assim a redução da viscosidade do ligante asfáltico (Asphalt, 2004);

O último processo é o explorado neste presente estudo, e consiste na expansão do volume do ligante, e conseqüente redução da viscosidade, através da adição de zeólitas durante o ciclo de mistura, criando um efeito de micro-espuma no ligante (Asphalt, 2004; Barthel *et al.*, 2004).

## 2.3 Material Zeolítico

As zeólitas englobam um grande número de minerais naturais e sintéticos que apresentam características comuns. Estão entre os silicatos minerais autigênicos, mais freqüentes em rochas sedimentares, embora haja ocorrência de zeólitas em rochas ígneas e metamórficas (Sheppard, 1973; Clifton, 1987). Foram reconhecidas pela primeira vez (estilbita) em 1756 pelo mineralogista sueco Baron Axel Frederick Cronstedt (Luz, 1995; Sherman, 1999).

Sua estrutura cristalina complexa origina diversas variações de estruturas porosas, como a zeólitas X, Y, A, BEA, ZSM, ALPO e SAPO (Meier & Olson, 1992; Aguiar & Novaes, 2002), tendo, cada uma,

diferentes capacidades de armazenamento de água em seus poros. Sua fórmula química por célula unitária é:



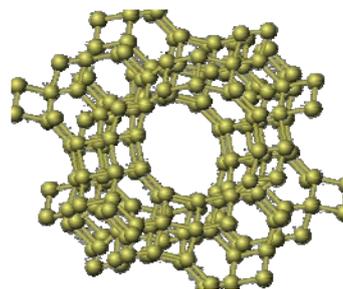
em que  $M$ : cátion de valência  $n$ ;  
 $m$ : número de moléculas de água; e  
 $x+y$ : número de tetraedros por célula unitária.

As principais propriedades decorrentes das estruturas das zeólitas são: alto grau de hidratação; baixa densidade; grande volume de espaços vazios quando desidratada; alta estabilidade da estrutura cristalina, mesmo quando desidratada; propriedades de troca catiônica; canais de dimensões uniformes nos cristais desidratados; propriedades catalíticas; adsorção seletiva de gases e vapores (Sheppard, 1973; Clifton, 1987; Luz, 1995; Sherman, 1999; Aguiar & Novaes, 2002).

As zeólitas são minerais de ocorrência natural, sendo encontrados em quantidades suficientes para serem consideradas um recurso mineral viável (Dal Bosco *et al.*, 2004). Exemplos da estrutura cristalina e da distribuição dos poros de uma zeólita são mostrados nas Figuras 1 e 2.



**Figura 1** Face hexagonal de uma zeólita



**Figura 2** Canais e cavidades moleculares de uma zeólita

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Para o estudo proposto foi utilizado um CAP formulado a partir de ligante asfáltico modificado por polímero tipo SBS, denominado Betuflex<sup>®</sup>, cedido pela Ipiranga Asfaltos S.A.

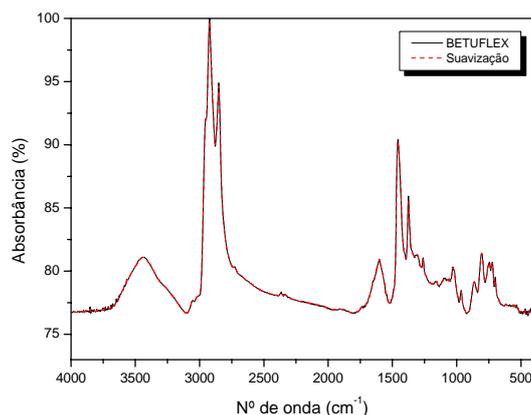
O Betuflex<sup>®</sup> é classificado por penetração como 65/60 e sua caracterização encontra-se na Tabela 1.

**Tabela 1** Caracterização do Betuflex<sup>®</sup>

Ensaio	Método	BETUFLEX 65/60
Viscosidade a 135°C (cp)	ASTM D4402	754
Viscosidade a 150°C (cp)	ASTM D4402	385
Viscosidade a 175°C (cp)	ASTM D4402	155
Ponto de amolecimento (dmm)*	ASTM D36	64,0
Penetração (°C)*	ASTM D5	59,0
Recuperação elástica, 25°C (%)*	DNER ME 382	86
Estabilidade a 163°C, 5 dias, ΔPa*	DNER ME 384	0,4
Ductilidade a 25°C (cm)*	NBR 6293	> 100
Ponto de fulgor (°C)*	NBR 11341	319

\*Dados fornecidos pela IPIRANGA ASFALTOS S.A.

Para a caracterização estrutural do Betuflex<sup>®</sup> foi realizada análise por espectroscopia no infravermelho (IV), por ser uma ferramenta útil no estudo dos grupamentos que se apresentam nas frações asfálticas (Lucena, 2005). Os experimentos foram realizados em espectrômetro da Shimadzu, modelo FTIR-8300. O espectro do Betuflex<sup>®</sup> foi obtido na faixa de 400 a 4000 cm<sup>-1</sup>, na pastilha de KBr e pode ser visualizado abaixo na Figura 3.



**Figura 3** Espectro na região do infravermelho Betuflex®

### 3.2 Agregados

Nesse estudo foram utilizados agregados oriundos da pedreira Itaitinga. Esta localiza-se no município de Itaitinga, distante 30 km da capital Fortaleza. Estes agregados foram: brita ¾” (origem granítica), pó de pedra e filer mineral. O filer utilizado como agregado miúdo foi natural, proveniente do pó de pedra (passado na peneira de 0,074 mm, nº 200). As densidades dos agregados foram determinadas e são listadas na Tabela 2.

**Tabela 2** Densidades reais dos agregados

Agregado	Densidade real	Método
Brita ¾”	2,658	ASTM C127/88
Pó de pedra	2,655	DNER 084/95
Filer	2,640	DNER 367/97

### 3.3 Zeólitas

O material zeolítico utilizado neste estudo é sintético e foi doado pela *Grace Davison Co.* Foi realizada uma caracterização textural no equipamento AUTOSORB (Quanta Chrome Instruments), de caracterização de materiais porosos, para determinar sua área superficial, o volume e o tamanho do poro através de isotermas de adsorção de N<sub>2</sub> a 77 K. Foi feita uma Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em um microscópio eletrônico de varredura da PHILIPS modelo XL30 com ampliação de até 100.000 vezes, que nos permite obter dados morfológicos de partículas através da visualização externa da textura do material (Girão, 2000; Skoog *et al.* 2002).

#### 3.3.1 Caracterização Textural

A caracterização textural permite determinar os parâmetros texturais do material. A determinação da área superficial foi realizada utilizando o método BET (*Brunauer, Emmett e Teller*), que é um procedimento usado na determinação de área superficial de materiais sólidos.

A grande área superficial encontrada na Tabela 3 é própria de materiais porosos cristalinos. O volume e o tamanho médio de poro da zeólita foram determinados utilizando o método DR (*Dubinin-Radushkevich*), que é baseado na teoria do potencial *Polanyi* de adsorção. A zeólita apresentou um tamanho médio de poros de aproximadamente 14Å e um volume médio dos poros de 2,461 E-01 cc/g, caracterizando-o como um material microporoso. Este valor permite confirmar a possibilidade de livre movimentação da água no interior da zeólita, já que seu diâmetro médio é de aproximadamente 3Å.

**Tabela 3** Caracterização textural – AUTOSORB

Parâmetro	Método	Resultado
Área Superficial	BET	4,427E+02m <sup>2</sup> /g
Volume do Poro	DR	2,461E-01cc/g
Tamanho do Poro	DR	1,404E+01Å

#### 3.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise microscópica eletrônica (MEV) nos fornece informações morfológicas e topográficas sobre a superfície do sólido. As micrografias apresentadas na Figura 4 (a), (b), (c) e (d) foram feitas com uma tensão de aceleração de 20,0kV e com uma extensão de varredura de 50, 20, 10 e 5µm, respectivamente. Podemos observar que, apesar de finamente dividido, as partículas formam aglomerações. Isto foi atribuído à alta higroscopicidade do material. Nota-se também que, apesar do agrupamento das partículas, individualmente elas apresentam morfologia uniforme, própria de materiais cristalinos.

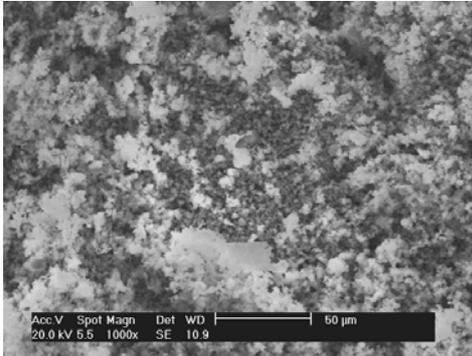


Figura 4 (a) Micrografia da zeólita – 1000x

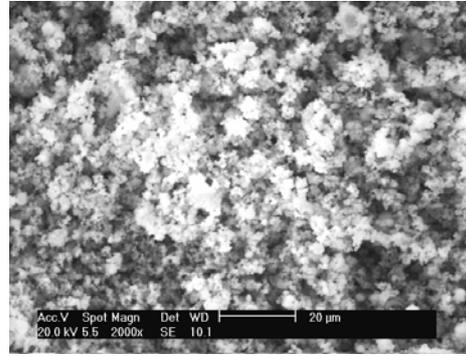


Figura 4 (b) Micrografia da zeólita – 2000x

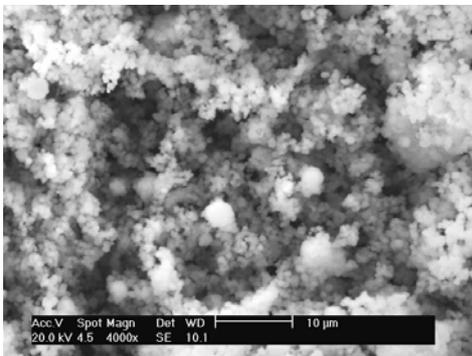


Figura 4 (c) Micrografia da zeólita – 4000x

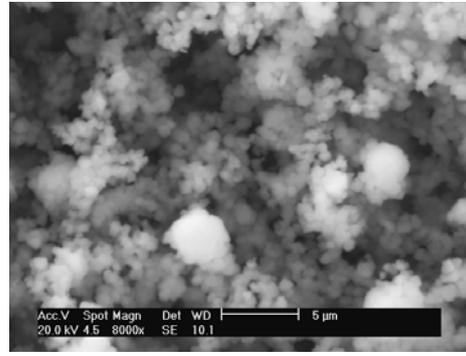


Figura 4 (d) Micrografia da zeólita – 8000x

### 3.4 Dosagem das Misturas

#### 3.4.1 Temperatura de Usinagem e Compactação (TUC)

Foi utilizado um viscosímetro *Brookfield* para a determinação das viscosidades do Betuflex® nas temperaturas de 135°C, 150°C e 175°C. O viscosímetro *Brookfield* mede a viscosidade em centipoise da amostra por meio de medidas de taxa de tensão de cisalhamento, segundo a norma ASTM D4402. Os dados de viscosidade obtidos foram correlacionados com a TUC das misturas através da Curva Logarítmica de Viscosidade versus Temperatura (CLVT), utilizando a norma ASTM D2493. Com as CLVTs adquiridas (Figura 5), determinou-se a TUC das amostras.

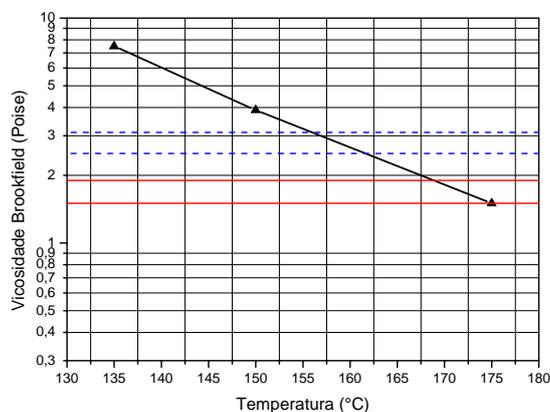


Figura 5 CLVT com viscosidade em poise (Betuflex®)

Podemos visualizar na Tabela 4 que a TUC sugerida pela fornecedora do Betuflex® não correspondeu ao encontrado através da leitura de viscosidade utilizando o viscosímetro *Brookfield*. Esta diferença pode estar refletindo o fato do método utilizado pela empresa (não-especificado), baseado em parâmetros de desempenho em campo (segundo informado por responsável técnico), não ser o mesmo utilizado neste estudo (ASTM 4402), para leituras de viscosidade em cp.

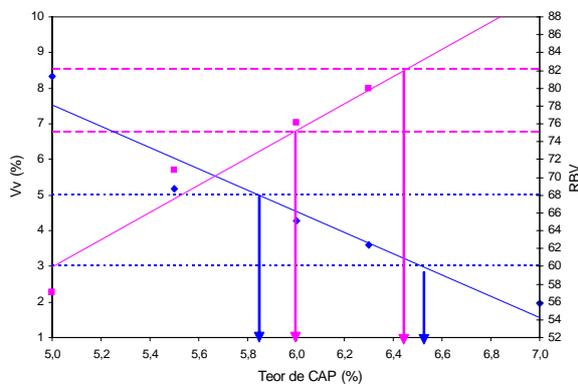
**Tabela 4** Faixas de TUC do Betuflex®

<i>Brookfield</i>		<i>Dados IPIRANGA</i>	
Usinagem	Compactação	Usinagem	Compactação
168°-173°C	156°-161°C	155°-163°C	144°-155°C

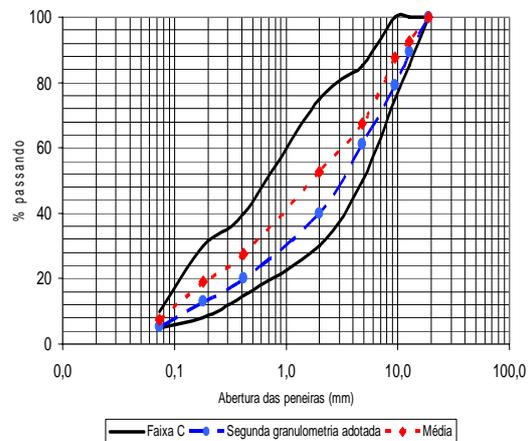
A TUC escolhida para a confecção dos CPs foi então decidida com base em avaliações na qualidade da mistura nas faixas obtidas, no que diz respeito ao recobrimento dos agregados e à homogeneidade da mistura. A TUC escolhida foi de 170°C (± 3°C) para a temperatura de usinagem e de 160°C (± 3°C) para a temperatura de compactação, portanto, acima das temperaturas obtidas pelos métodos *Brookfield* e pela *Ipiranga Asfaltos*.

### 3.4.2 Teor de Projeto do Betuflex®

O teor de projeto é dado pela média de dois valores centrais de teores de CAP, obtidos por retas verticais provenientes das especificações de Vv e RBV, estão apresentados na Figura 6 segundo a metodologia Marshall (DNER ME 043/95; Soares, 2000) foi determinado o teor ótimo sendo de 6,3% de CAP Betuflex®. As misturas foram compactadas manualmente com 75 golpes por face, simulando tráfego pesado, Para a dosagem, bem como para a moldagem dos corpos-de-prova (CPs), os materiais foram fracionados da peneira ¾” à peneira n° 200 de forma a enquadrar na antiga faixa C do DNIT (DNER ES 313/97). A Figura 7 apresenta a curva granulométrica adotada para a mistura em questão, escolhida de modo a se enquadrar dentro dos limites da antiga faixa C do DNIT.



**Figura 6** Gráfico para cálculo do teor de projeto de Betuflex®



**Figura 7** Enquadramento da mistura de agregados na antiga faixa C do DNIT

### 3.4.3 Planejamento Experimental

Foram moldados 60 CPs, em quatro grupos de 15. Variando-se o teor de zeólitas em: 0%, 0,1%, 0,3%, 0,5% e 1,0% em peso da mistura asfáltica. Onde o primeiro grupo destinava-se ao cálculo do teor de projeto, o segundo grupo foi produzido na TUC determinada pela CLVT denominada TUC1. O terceiro e o quarto grupo foram confeccionados com uma diminuição de 20°C (TUC2) e 30°C (TUC3), respectivamente. A composição dos CPs confeccionados pode ser visualizada na Tabela 5.

**Tabela 5** Composição dos CPs para o Betuflex® (6,3%)

Composição	Teor de Projeto: 6,3%				
	0,0%	0,1%	0,3%	0,5%	1,0%
<b>Zeólita</b>	0,0g	1,2g	3,6g	6,0g	12,0g
Brita (g)	437,4	436,9	436,0	435,1	432,7
Pó-de-Pedra (g)	687,0	686,2	684,8	683,5	679,8
Massa agregado (g)	1124,4	1123,2	1120,8	1118,4	1112,4
CAP (g)	75,6	75,6	75,6	75,6	75,6
<b>Massa total (g)</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>

### 3.4.4 Caracterização Mecânica

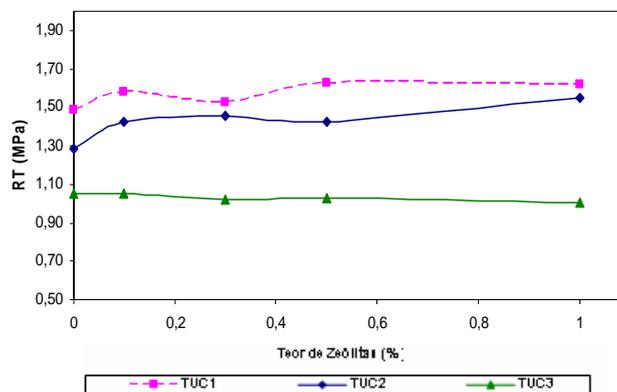
Os CPs moldados com o teor de projeto, tanto puros quanto com a inserção de zeólitas, foram submetidos aos ensaios de resistência à tração (RT) por compressão diametral (DNER ME 138/94) e módulo de resiliência (MR) (DNER ME 133/94), ambos à temperatura de 25°C. O comportamento mecânico das misturas foi avaliado por meio dos ensaios de RT e MR. O ensaio de RT, também conhecido como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido com a finalidade de determinar a resistência à tração de CPs de concreto de cimento Portland (Medina & Motta, 2005).

## 4. RESULTADOS

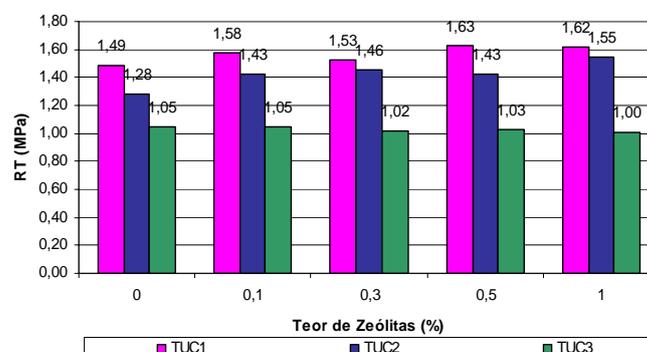
### 4.1 Resistência à Tração

Os resultados dos ensaios de RT dos CPs confeccionados com o Betuflex® (6,3%) em função do teor de zeólitas podem ser visualizados na Figura 8.

Observa-se que com a adição de zeólitas, as misturas apresentaram um aumento, notadamente quando confeccionadas com a TUC1 e a TUC2. Com a RT obtida em misturas moldadas com a TUC3, estes valores não tiveram redução ou ganho significativo, quando comparados às respectivas misturas puras(0% de zeólitas).



**Figura 8 (a)** Valores de RT por teor de zeólita



**Figura 8 (b)** Valores de RT por teor de zeólita

#### 4.2 Módulo de Resiliência

Os resultados dos ensaios de MR com CPs confeccionados com podem ser visualizados abaixo na Figura 9.

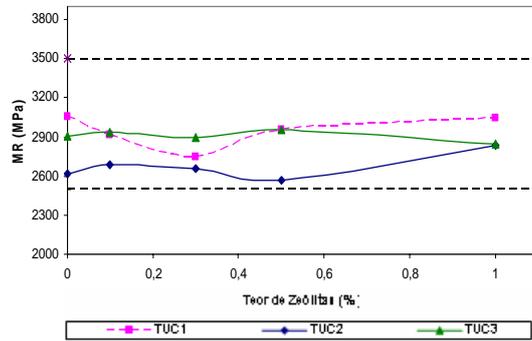


Figura 9 (a) Valores de MR por teor de zeólita

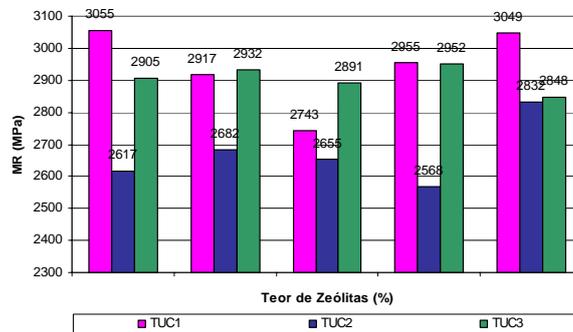


Figura 9 (b) Valores de MR por teor de zeólita

Os menores valores de MR, obtidos nos CPs utilizado o Betuflex<sup>®</sup>, foram observados com a TUC2. Entretanto os valores de MR também se mostraram satisfatórios em TUC1 e TUC3, uma vez que se apresentam em torno da média de 3000 MPa, valor comumente encontrado em concretos asfálticos convencionais (Soares *et al.*, 2000; Rede Asfalto, 2005).

#### 4.3 Relação MR e RT

Foi avaliada a relação MR/RT, que permite inferir o comportamento das misturas asfálticas com relação ao trincamento. Quanto menor o valor da relação, maior flexibilidade terá a mistura, unida a uma boa resistência à tração (Neves Filho, *et al.*, 2004; Silva Jr, *et al.*, 2004). A relação MR/RT para as misturas estudadas é apresentada nas Tabelas 6.

Tabela 6 Relação MR/RT

TUC1		TUC2		TUC3	
Zeólita (%)	MR/RT	Zeólita (%)	MR/RT	Zeólita (%)	MR/RT
0,0	2055	0,0	2041	0,0	2767
0,1	1845	0,1	1881	0,1	2792
0,3	1799	0,3	1825	0,3	2835
0,5	1817	0,5	1801	0,5	2860
1,0	1885	1,0	1831	1,0	2838

No geral, o valor da razão MR/RT na TUC2 tendeu a diminuir ou se manter próximo dos valores adequados, tipicamente encontrados em misturas similares da região (Rede Asfalto, 2005). Isto reflete a manutenção da trabalhabilidade e compactabilidade da mistura com a inserção de zeólitas, já que a micro-espuma resultante do fenômeno da liberação da água atua como um lubrificante entre o ligante e agregado. Já com a TUC3 podemos observar um aumento da razão MR/RT isto significa que houve uma diminuição da flexibilidade e na resistência à tração, em comparação a TUC1 e TUC2.

## 5. CONCLUSÃO

A inovação do processo de incorporação de zeólitas à mistura asfáltica, é atribuída à propriedade que o material zeolítico possui de adsorver água no interior de seus poros e liberá-la com o aumento da temperatura. Com a adição do adsorvente (zeólitas) ao ligante asfáltico, a temperatura do processo faz com que a água contida em suas cavidades forme uma micro-espuma com o ligante, causando uma expansão do volume e conseqüente redução da viscosidade, propiciando a produção das misturas a uma TUC abaixo daquela determinada pela curva de viscosidade *versus* temperatura.

A diminuição da TUC das misturas mornas pela inserção de zeólitas produzidas com asfalto polímero, não afetou negativamente as propriedades mecânicas das misturas confeccionadas na TUC1 e TUC2, tanto no que diz respeito à resistência a tração, quanto com relação ao módulo de resiliência, garantindo uma diminuição de até 20°C na temperatura de produção, sem comprometer as propriedades mecânicas desejáveis para uma mistura asfáltica. Os valores de RT aumentaram ou se mantiveram praticamente constantes em todos os teores e nas temperaturas estudadas. A razão MR/RT refletiu a manutenção da trabalhabilidade e compactabilidade da mistura estudada, tendo apresentado resultados satisfatórios para todos os teores apresentando uma tendência decrescente com a diminuição de 20°C na temperatura de produção.

Constatou-se que a adição de zeólitas na mistura asfáltica com CAP modificado por SBS é eficaz na diminuição da temperatura de usinagem e compactação de misturas asfálticas usinadas a quente, sem comprometer seu comportamento mecânicos.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Ipiranga Asfaltos, pelo fornecimento das amostras de CAP modificado Betuflex<sup>®</sup>, e à Grace Davison & Co, pelo fornecimento do material zeolítico.

## 7. REFERÊNCIAS

- AAPA (2001) *Warm Mix Asphalt – A State-of-the-Art Review*. Australian Asphalt Pavement Association, Advisory note 17.
- ASPHALT INSTITUTE (2002) *Manual de Asfalto*. USA
- ASTM – American Society for Testing and Materials (1988) *C127 Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate*.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (1995) *D2493 Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts*
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2002) *D4402 Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus*.
- BARTHEL, W., MARCHAND, J.-P., von DEVIVERE, M. (2004) *Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite*. 3th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Paper 354.
- CASTALDI, P., SANTONA, L., COZZA, C., GIULIANO, V., ABBRUZZESE, C., NASTRO, V., MELIS, P. (2005) *Thermal and Spectroscopy Studies of Zeolites Exchanged with Metal Cations*. Journal of Molecular Structure, Elsevier, 734, 99-105.
- DAL BOSCO, S. M., JIMENEZ, R. S., CARVALHO W. A. (2004) *Aplicação da Zeólita Natural Escolocita na Remoção de Metais Pesados de Efluentes Industriais: Competição entre os Cátions e Processo de Dessorção*. Eclética Química, Volume 29, número 1.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997) *ES 313 – Pavimentação – concreto betuminoso*.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995) *ME 43 – Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall*.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1995) *ME 84 – Agregado Miúdo – Determinação da Densidade Real*.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) *ME 133 – Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Betuminosas*.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) *ME 138 – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral*.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997) *ME 367 – Material de enchimento para misturas betuminosas*.
- GIRÃO, J. H. S. (2000) *Síntese, Caracterização e Propriedades Dessecantes de Peneiras Moleculares Obtidas de um Caulim Natural Contendo Ferro Isomórfico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

- LANDA, P.A., KNEEPKENS, T., v.d. ZUWAN, J.Th. (2004) Low Temperature-Asphalt Process with the Possibility to produce and Pave Hot Mix Asphalt at Temperatures Below 100°C or 212°F. 3th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Paper 140.
- LARSEN, O.R., MOEN, Ø., ROBERTUS, C., KOENDERS, B.G. (2004) WAM Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA. 3th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Paper 137.
- LUCENA, M.C.C. (2005) *Caracterização Química e Reológica de Asfaltos Modificados por Polímeros*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- LUZ, A. B. (1995) Zeólitas: Propriedades e Usos Industriais. CETEM/CNPq - Série Tecnologia Mineral, 68, Rio de Janeiro.
- MEIER, W.M., OLSON, D.H. (1992) Atlas of Zeolite Structure Types. Structure Commission of the International Zeolite Association & Butterworth-Heinemann. 3th Revised Edition, USA.
- NEVES FILHO, C. L. D, BERNUCCI, L. L. B., FERNANDES Jr., J. L. (2004) Avaliação de Misturas Asfálticas SMA Produzidas com Ligante Asfalto-Borracha quanto ao Módulo de Resiliência, a Resistência à Tração e a Fadiga. 17º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, Rio de Janeiro, paper 931\_04.
- OLIVEIRA, M. L. M. (2004) Estudo de Adsorção com Zeólitas Contendo Metais de Transição Visando a Dessulfurização de Misturas Combustíveis da Faixa da Gasolina. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- REDE ASFALTO N/NE (2005) *Relatório Final - Projetos 2002-2005*.
- SILVA Jr., C. A. P., FURLAN, A. P., GIGANTE, A. C., FABBRI, G. T. P., FONTENELE, H. B., LIBERATORI, L. A. (2004) *Estudo Preliminar para o Uso de Rejeito de Bauxita Refratária em Pavimentação Rodoviária*. 17º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, Rio de Janeiro, paper 934\_04.
- SKOOG, D. A., HOLLER, F. J., NIEMAN, T. A (2002) *Princípios de Análise Instrumental*. 5ª Edição, Bookman, Porto Alegre.
- SOARES, J. B. (2000) *Curso de Tecnologia de Pavimentos*. Fortaleza.
- SOUSA FILHO, A. C., SILVEIRA, L. E. M., SANT'ANA, H. B., SOARES, J. B. (2006) *Produção de Misturas Asfálticas a Temperaturas Intermediárias Pela Inserção de Zeólitas*. 18º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, Rio de Janeiro, paper 059\_06.
- SOUSA FILHO, A. C., SILVEIRA, L. E. M., SANT'ANA, H. B., SOARES, J. B. (2006) Avaliação de Influência de Zeólitas sobre as Propriedades volumétricas de Misturas Asfálticas Produzidas a Temperaturas Intermediárias. XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Brasília

## **EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF WARM MIXES ASPHALT BY ADDING SYNTHETIC ZEOLITE USING ASPHALT BINDER MODIFIED FOR POLYMER**

The asphalt cements produced by oil cement are adequate the majority of the situations to which pavements are submitted. However, with the increase in traffic volume, mainly in the interstate highways, more resistant surface courses become necessary. The asphalt cement modification by polymers has been an efficient solution to compensate some deficiencies of the conventional asphalt cement, improving properties as the thermal susceptibility, resistance to cracking and permanent deformation. Due to high viscosities of asphalt-polymer, it is common and necessary the application of high temperatures to produce homogeneous mixtures, getting an adequate covering of the mineral aggregate. The increase of the world-wide awareness towards safety, health and environmental issues, has resulted in significant efforts for the reduction of emissions for the environment. High temperatures not only degradate the asphalt binder, but emits more for the environment asphalt fumes and substances as CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub>, thus contributing to the greenhouse effect and consequently for the aggravation of global warning. Beyond the above-mentioned reasons, the reduction of the costs with energy consumption and the improvement of the health conditions and safely (exposition to fumes of asphalt, odors) are reasons to decrease the Compacting and Mix Temperature of the modified asphalt mixtures. This work evaluate the mechanical behavior of mixtures prepared with asphalt modified by styrene-butadiene-styrene copolymer (SBS), produced reduced temperatures and with the addition of zeolite.

Warm Mix, Zeolite, SBS, Mechanics Behavior.

