

COMPORTAMENTO DO RESÍDUO “BORRA ASFÁLTICA” COMO MATERIAL PARA CAMADAS DE REVESTIMENTO VISANDO PAVIMENTOS DE BAIXO CUSTO E BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO

Michéle Dal Toé Casagrande

Daniela Cadore Vale

Paulo Roberto Nunes Fernandes

Sandra de Aguiar Soares

Jorge Barbosa Soares

Universidade Federal do Ceará – UFC

Departamento de Engenharia de Transportes – DET

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP

RESUMO

As refinarias são responsáveis pela maior parte dos resíduos gerados na indústria petrolífera, dos quais se destacam os produtos acumulados no fundo dos tanques, como o resíduo de cimento asfáltico de petróleo, conhecido como borra oleosa asfáltica pura. A presente pesquisa visa avaliar o uso deste resíduo como material componente das camadas de revestimento para pavimentos de baixo custo, tendo suas características comparadas às do ligante convencionalmente utilizado, através de misturas do tipo concreto asfáltico usinado a quente, bem como a combinação destes dois ligantes numa mesma mistura. Foram realizados ensaios químicos dos ligantes e analisados parâmetros volumétricos das misturas, bem como o comportamento mecânico destas, por meio de ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração e vida de fadiga. Verificou-se o potencial de uso da borra oleosa asfáltica pura como ligantes em camadas de revestimento asfáltico para pavimentos de baixo volume de tráfego, possibilitando uma destinação mais nobre deste material, tanto no ponto de vista ambiental quanto sócio-econômico.

ABSTRACT

Refineries are responsible for a good part of the residues produced in the petroleum industry. A significant residue is the asphalt binder oil accumulated in the bottom of asphalt tanks. The present research aims to evaluate the use of the asphalt oil residue as a binder for surface layers of low cost, comparing the results with conventional asphalt binders used in hot asphalt mixes, as well as a combination of both materials. Binder properties were evaluated as well as the mechanical behavior of the mixtures, using resilient modulus, indirect tensile strength and fatigue tests. The mechanical tests indicate differences between the two binders analyzed because of the low viscosity of the residue. Although the asphalt binder oil residue is shown not to be appropriate for high traffic roads, it has great potential for low traffic roads, allowing the construction of such roads and an environmental correct use of the residue.

1. INTRODUÇÃO

Em praticamente todas as operações, desde a perfuração até a distribuição dos derivados, passando pelas etapas de produção, armazenamento, transporte e refino, a indústria petrolífera gera resíduos oleosos de diversos tipos. As refinarias respondem pela maior parte dos resíduos gerados na indústria do petróleo, dos quais destacam-se os produtos acumulados no fundo dos tanques de óleo cru, lodos oleosos, lodos das torres de resfriamento, catalisadores gastos, resíduos das torres de troca de calor, finos de coque e águas residuárias.

Muitos destes resíduos podem conter materiais considerados potencialmente perigosos para a saúde e o meio ambiente. Durante muito tempo a maior preocupação com os resíduos da indústria do petróleo situou-se apenas na redução do teor de óleos contidos nestes. Este procedimento visava recuperar a parcela com valor comercial, sobrando, ao final deste processo, um resíduo conhecido como borra de petróleo.

A grande variedade de resíduos sólidos e semi-sólidos gerados nestas unidades, aliada à presença de substâncias potencialmente tóxicas tem exigido dos profissionais envolvidos no gerenciamento destes resíduos exaustivos esforços na busca de soluções apropriadas, sem prejuízo à saúde pública e ao meio ambiente.

Os resíduos oleosos e viscosos formados durante as etapas de produção, transporte e refino, denominados borras oleosas, são emulsões basicamente compostas por óleo, água e sólidos grosseiros. Características como a composição extremamente variável, dificultam o seu reaproveitamento, além de conferir-lhes significativa resistência à decomposição de determinadas moléculas contidas neste tipo de resíduo. Os resíduos coletados nas diversas áreas das refinarias são encaminhados para a central de resíduos para que sejam segregados, pesados, embalados e encaminhados para a disposição temporária ou disposição final.

A geração de borra oleosa não é resultado do processo de produção de combustíveis e derivados e sim dos processos que operacionalizam o sistema produtivo, ou seja, os processos que gerenciam a entrada e estocagem de matéria-prima, estocagem e expedição de produtos, manutenção de equipamentos, tanques e materiais, limpeza de tubovias e canaletas de águas oleosas, procedimentos operacionais e problemas de comunicação (Magalhães, 2006). Os produtos utilizados na limpeza dos tanques de armazenamento, para remoção da borra, são solventes originários do petróleo, que não alteram a homogeneidade e a composição química do resíduo.

O resíduo estudado na presente pesquisa foi cedido pela refinaria Lubrificantes do Nordeste (Lubnor)/Petrobras, localizada em Fortaleza, capital do estado do Ceará, na região nordeste do Brasil, onde uma média de 56 toneladas de borra de tanque foi gerada no ano de 2004, enquanto que em 2006 foram geradas mais de 400 toneladas de borra, ou seja, a geração deste tipo de resíduo é variável no tempo e depende também da capacidade de produção e geração de borra nas refinarias de uma forma geral, estando sujeito à frequência na manutenção dos tanques de armazenamento, à problemas de estocagem do resíduo e problemas operacionais.

A refinaria em questão processava inicialmente 450 m³/dia de petróleo (1966) e hoje possui uma produção de 1.100 m³/dia, após passar por várias ampliações e instalação de novas unidades. Responde por até 13% da produção de asfalto do país em função da sua alta produtividade e atende 100% da demanda do Ceará e dos estados circunvizinhos e parte da demanda da região Norte. No cenário local, a Lubnor/Petrobras também é a única empresa que produz asfalto no Ceará, item que responde por 62% do volume total de processamento pela Unidade. É uma das empresas que lideram o ranking nacional em produção de asfalto. Além do processamento de petróleo, a empresa produz 235 mil toneladas por ano de asfalto e 170 metros cúbicos de lubrificantes diários (Fonte: Petrobras, em entrevista ao Diário do Nordeste, publicado em 28/06/2006, Fortaleza/CE).

A busca por tratamentos eficazes que possam ser implementados a um custo acessível é um problema de difícil solução dentro do programa de gerenciamento de resíduos da indústria petrolífera. O método empregado atualmente pela Lubnor para o tratamento da borra utilizada nesta pesquisa é o co-processamento (processo de combustão do resíduo oleoso, em fornos de indústrias cimenteiras, utilizado para eliminar o conteúdo orgânico do mesmo, incorporando as cinzas ao cimento produzido), em uma indústria localizada em Sobral, a 233 km de

Fortaleza, o que resulta em um custo de aproximadamente R\$600,00 para a refinaria, por tonelada de resíduo gerado, não incluindo custos de geração (limpeza, transporte para central resíduos, mão de obra) e armazenamento (construção central resíduos, manutenção, recurso de energia).

Inserido neste contexto e enfatizando-se que o uso de resíduos gerados pela indústria petrolífera tem sido cientificamente pouco explorado no Brasil e no exterior, buscam-se novas aplicações para a borra asfáltica na área de misturas de revestimento, visando a pavimentação de baixo custo e baixo volume de tráfego, pois a experiência acumulada com este tipo de material até o presente momento se restringe a técnicas de tratamento ambiental deste resíduo, podendo este ser usado, depois de tratado, como material de construção em sistemas de impermeabilização de aterros sanitários, por exemplo. Casagrande *et al.* (2006) iniciaram a pesquisa com a borra asfáltica proveniente da Lubnor, baseando-se em uma curva granulométrica composta por maior quantidade de agregados graúdos. Os resultados obtidos para os parâmetros volumétricos e ensaios mecânicos apresentaram-se satisfatórios para o traço utilizado, porém através do teste de outros traços quando da continuação desta pesquisa, foram obtidos melhores resultados, a serem apresentados neste trabalho.

Pode-se enfatizar que o presente estudo se encontra em fase inicial e se apresenta de forma inédita para o uso em pavimentação, sendo de interesse e demanda da própria refinaria localizada em Fortaleza, proporcionando uma extensão de estudo deste tipo de resíduo em refinarias de outros estados do país, que enfrentam também problemas ambientais e econômicos no tratamento e disposição final da borra asfáltica.

2. METODOLOGIA E MATERIAIS

Para a verificação da aplicabilidade da borra asfáltica como ligante em um concreto asfáltico seguiu-se as seguintes etapas: (i) seleção e caracterização de agregados locais; (ii) determinação da viscosidade e temperaturas de compactação e usinagem dos ligantes; (iii) análise química dos ligantes – massa molar e extração de asfaltenos e maltenos; (iv) definição de curvas granulométricas; (v) confecção e dosagem de misturas asfálticas utilizando os ligantes (CAP 50/70 e borra asfáltica) puros e misturados; (vi) caracterização mecânica destas misturas por meio dos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração estática e vida de fadiga.

A seleção dos agregados foi feita de forma a enquadrar as misturas na Faixa C antiga do DNER, sendo utilizada brita ¾”, como agregado graúdo e pó de pedra como material passante na peneira N° 200, com densidades reais 2,651 e 2,655, respectivamente. Todos os agregados são de origem granítica, provenientes da Pedreira de Itaitinga, localizada a aproximadamente 30 km da cidade de Fortaleza - Ceará. O resultado obtido no ensaio de Abrasão Los Angeles (DNER - ME 035/98) foi de 49%, valor este superior ao determinado pela norma DNER-ES 313/97. Em vista ao desempenho satisfatório de vias no estado (Silveira, 1999; Benevides, 2000) e comportamento mecânico de misturas produzidas neste laboratório (Loureiro, 2003; Pinheiro, 2004; Vasconcelos, 2004), exceção prevista na norma que permite a utilização, manteve-se a brita selecionada. Adotou-se como material de enchimento o pó de pedra passando na peneira N° 200 e não o da areia de campo devido ao maior percentual de fíler natural existente no primeiro. Para a realização dos ensaios, bem como para a moldagem dos corpos-de-prova, os materiais foram fracionados da peneira ¾” à peneira n°200, passando por

toda a série especificada pelo DNER, de forma a assegurar a menor variação possível das granulometrias originais.

Como ligante utilizou-se o CAP 50/70 fornecido pela Lubnor/Petrobras. Este é proveniente do petróleo nacional Fazenda Alegre e atendeu a todas as especificações da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2005), sendo os ensaios realizados na própria refinaria.

O resíduo utilizado, também conhecido como borra oleosa asfáltica pura, é proveniente do acúmulo de material retirado do fundo dos tanques de armazenamento de CAP, localizados na Lubnor/Petrobras e cedido pela mesma para o estudo em questão. Segundo a classificação convencional, é considerado um resíduo do tipo Classe I (perigoso), composto de emulsão oleosa líquida, pastosa ou sólida e isenta de sólidos (Magalhães, 2006). Ensaio de penetração do ligante (DNER 003/99) indicaram que esta é cerca de 35% maior para a borra asfáltica quando comparada à penetração do CAP 50/70.

Análises de cunho ambiental não foram realizadas nesta fase de estudo da pesquisa, sendo previstas em etapas futuras desta, para que se possa avaliar com maior precisão a periculosidade do resíduo estudado, bem como a capacidade de adsorção e potencial de lixiviação de compostos.

3. VISCOSIDADES E TEMPERATURAS DOS LIGANTES

A viscosidade Brookfield e as temperaturas de compactação e usinagem foram determinadas conforme a ASTM D4402 (2002) e ASTM D2493 (2001), respectivamente, nas temperaturas: de 135, 150 e 175°C a diferentes taxas de cisalhamento. O CAP 50/70 apresentou uma maior viscosidade quando comparado com a borra asfáltica (cerca de 30 a 40% superior, sendo que esta variação diminui com o aumento da temperatura), pois se pode considerar que este é mais consistente. A viscosidade não apresentou alteração com a variação da taxa de cisalhamento, apenas com a temperatura, pois alguns fluidos diminuem sua viscosidade com o aumento da temperatura. Esta diminuição da viscosidade ocorre devido às ligações intermoleculares do fluido serem quebradas, pois as moléculas são submetidas a uma maior agitação com o aumento da temperatura (Casagrande *et al.*, 2006).

Com relação aos resultados obtidos para as temperaturas de compactação e usinagem dos materiais estudados, para a borra asfáltica os valores de temperatura de compactação e usinagem foram menores, quando comparados ao ligante convencional (aproximadamente 10°C). Não foram realizadas análises de envelhecimento da borra asfáltica, porém, como se trata de um resíduo onde se pode considerar um envelhecimento prévio acentuado, a possibilidade de envelhecimento deste material pode ser menor quando comparada ao ligante convencional, acarretando uma menor perda de suas frações voláteis e um menor risco exposto aos operadores.

É importante ressaltar que os valores de viscosidade e temperaturas de compactação e usinagem não se apresentaram significativamente alterados quando misturados o ligante convencional e a borra asfáltica, sendo utilizados então valores de temperatura correspondentes ao ligante de maior porcentagem na mistura.

4. ANÁLISE DE MASSA MOLAR E EXTRAÇÃO DE ASFALTENOS E MALTENOS DOS LIGANTES

Segundo Corbett (1978) a reatividade das moléculas que compõe o ligante com o oxigênio é grandemente influenciada pela temperatura, sendo os asfaltenos os mais reativos, seguidos das resinas, aromáticos e saturados. Outro aspecto importante no estudo do ligante são as emissões geradas pelo aquecimento deste quando utilizado na produção de misturas asfálticas a quente. Estas emissões contêm uma grande quantidade de compostos orgânicos, potencialmente prejudiciais à saúde dos profissionais que trabalham no processamento e aplicação do ligante.

Entre esses compostos, podemos destacar os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – HPAs (Binet *et al.*, 2002). Nesta pesquisa, foi realizada a extração e separação de HPAs da fração maltênica do ligante utilizando métodos cromatográficos, tais como: dispersão de matriz em fase sólida - DMFS (Barker, 1989); cromatografia de adsorção em coluna e cromatografia gasosa - GC e determinação qualitativa e quantitativa dos HPAs. A extração dos asfaltenos foi realizada através de uma adaptação da norma IP-143, que descreve a metodologia para quantificação destas frações pesadas em petróleo. A análise da massa molar dos asfaltenos extraídos dos ligantes foi realizada através da cromatografia de permeação em gel - GPC. As extrações das fases maltênicas do CAP fazenda alegre foram realizadas por duas técnicas: agitação em bancada (batelada) e ultra-som. As soluções maltênicas foram submetidas ao método DMFS a fim de avaliar a presença de HPAs no CAP Fazenda Alegre.

Com relação à extração dos asfaltenos dos ligantes, os resultados indicaram uma menor quantidade de asfaltenos na borra, que pode estar associado ao processo de remoção e limpeza dos tanques, quando da geração do resíduo. O CAP Fazenda Alegre apresentou 18,1% de asfaltenos e 81,9% de maltenos, enquanto a borra asfáltica apresentou 6,3% de asfaltenos e 93,7% de maltenos.

Em termos de medida da massa molar dos asfaltenos, para o CAP foram obtidos tempos de eluição para os picos de maior massa molar (18,05 min) e menor massa molar (21,32 min), esse pico pode estar associado a alguma fração mais leve do CAP, não retido do filtro no processo de extração. A borra possui o pico de maior valor de massa molar (18,23 min) e os de menor valor (20,33 e 21,44 min), associados a frações mais leves da borra asfáltica não retidas no filtro. Com base na curva de calibração obtida foi possível calcular a massa molar dos asfaltenos do CAP (18,05) e da borra (18,23). Os valores de massa molar demonstram que os asfaltenos são a fração de maior massa molar do ligante utilizado e da borra asfáltica, sendo os da borra com menor valor, fato esse que pode estar associado ao processo de produção do ligante asfáltico, já que a borra é um resíduo gerado através do armazenamento deste.

A identificação dos HPAs presentes na borra asfáltica foi realizada por meio da comparação entre o cromatograma das amostras extraídas da borra e o cromatograma dos padrões analíticos. Com base na curva de calibração e nos valores da relação entre a área dos picos dos HPAs presentes na amostra e o pico do padrão interno, foram determinados a concentração dos HPAs presentes na amostra. Os resultados indicam que a técnica de agitação em bancada mostrou-se eficiente na extração dos HPAs, pois extraiu os HPAs prioritários (U.S.EPA), tal classificação, baseia-se nas características tóxicas, mutagênicas e carcinogênicas dos HPAs,

sendo os HPAs de até 3 anéis considerados tóxicos, e os com 4 ou mais anéis mutagênicos e carcinogênicos. Além dos HPAs prioritários, os cromatogramas das duas técnicas apresentaram picos diferentes dos padrões analíticos utilizados nos experimentos, tais picos podem estar associados a HPAs com organização dos anéis diferentes dos padrões utilizados, ou HPAs com cadeias alifáticas substituintes.

Através da análise química realizada, conclui-se que a massa molar média dos asfaltenos do CAP e borra na cromatografia de permeação em gel, ficaram na faixa de 5900-6700 g/mol, tal valor comprova que os asfaltenos são a fração mais pesada dos ligantes estudados, podendo os mesmos provocar prejuízos na cadeia produtiva do asfalto, com a sua precipitação nos equipamentos utilizados na produção e processamento do asfalto. Os ligantes analisados apresentaram em sua composição HPAs considerados tóxicos e outros considerados mutagênicos e carcinogênicos, além de outros HPAs, diferentes dos padrões analíticos estudados, provavelmente HPAs com cadeias alifáticas laterais. Porém estes compostos tóxicos, mutagênicos e carcinogênicos se apresentam em níveis de concentração aceitáveis, sendo recomendado cuidado no manuseio destes ligantes, sendo imprescindível análises ambientais para que seja comprovada a não lixiviação destes compostos para camadas subjacentes do pavimento, análises estas em fase de desenvolvimento desta pesquisa no momento atual.

5. CURVAS GRANULOMÉTRICAS

Para definição das curvas granulométricas escolheu-se a Faixa C antiga (DNER-ME 313/97) como faixa de trabalho por esta ser a mais utilizada no Estado do Ceará. Não houve necessidade do uso de brita $\frac{3}{4}$ " para a montagem de curvas que se enquadram na Faixa C do DNER. As curvas e os respectivos enquadramentos na faixa utilizada são apresentados na Figura 1.

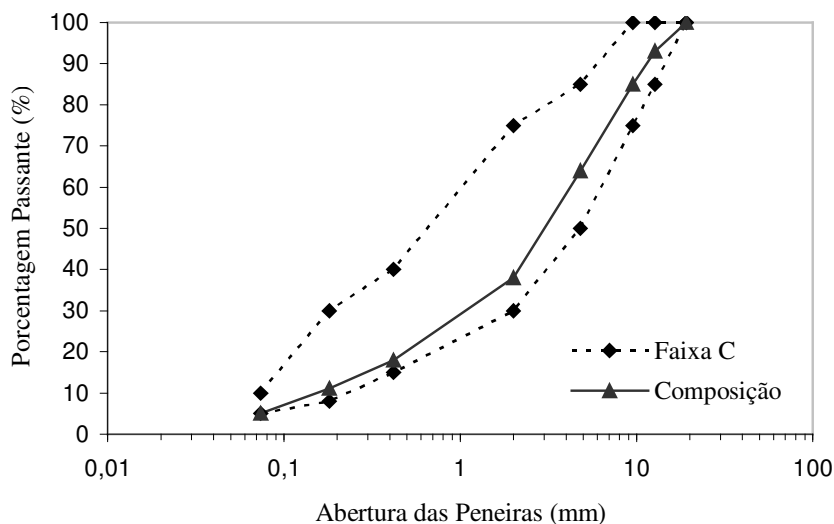


Figura 1: Distribuição granulométrica de agregado das misturas segundo especificações do DNER para Faixa C antiga de concreto asfáltico

6. DOSAGEM E CONFECÇÃO DAS MISTURAS

A determinação do teor ótimo (teor de projeto) de CAP em misturas asfálticas é convencionalmente realizada no Brasil por meio do método de dosagem Marshall. O

procedimento utilizado seguiu a norma NBR 12891/93 da ABNT. Neste método, são moldados cinco grupos de três corpos-de-prova com diferentes teores de ligante. A experiência do projetista pode sugerir um teor de CAP para o primeiro grupo de três corpos-de-prova com base na faixa granulométrica considerada. Os outros quatro teores são determinados com incrementos de $\pm 0,5\%$ e $\pm 1,0\%$ a partir do primeiro teor. Antes da confecção dos corpos-de-prova das misturas asfálticas, foram definidas as densidades máximas teóricas (DMT). O procedimento utilizado foi o chamado método “Rice” (ASTM D 2041 – 2000) no qual a DMT é determinada experimentalmente por meio da saturação de seus vazios inter e intra-granulares com água (Vasconcelos e Soares, 2003).

Após a determinação da DMT, foram confeccionados os corpos-de-prova, que foram também utilizados na determinação dos parâmetros volumétricos conforme a NBR 12891/93 e posteriormente na caracterização das propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Os parâmetros volumétricos determinados foram vazios do agregado mineral (VAM), volume de vazios (Vv), relação betume-vazios (RBV) e densidade aparente. O teor ótimo de ligante foi determinado a partir das especificações para Vv e RBV (Soares *et al.*, 2000). A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros citados e o teor de ligante para as misturas realizadas com 100% de ligante convencional (CAP 50/70), 100% de borra asfáltica e com misturas de CAP 50/70 e borra asfáltica como ligante, onde são apresentados resultados dos parâmetros obtidos para misturas com 40% de CAP + 60% de borra e 60% de CAP + 40% de borra. A Figura 2 mostra a aparência das misturas confeccionadas com 100% de CAP e com 100% de borra asfáltica.

Tabela 1: Resultados dos ensaios Marshall

Mistura	100% CAP 50/70	100% Borra	40% CAP 50/70 + 60% Borra	60% CAP 50/70 + 40% Borra
Teor ótimo de ligante (%)	6,9	6,8	6,9	7,0
Vazios do agregado mineral (%)	19,5	19,1	19,6	19,7
Volume de vazios (%)	4,1	3,8	4,0	4,1
Relação betume-vazios (%)	79,1	79,9	79,4	79,3
Densidade aparente	2,29	2,30	2,29	2,29

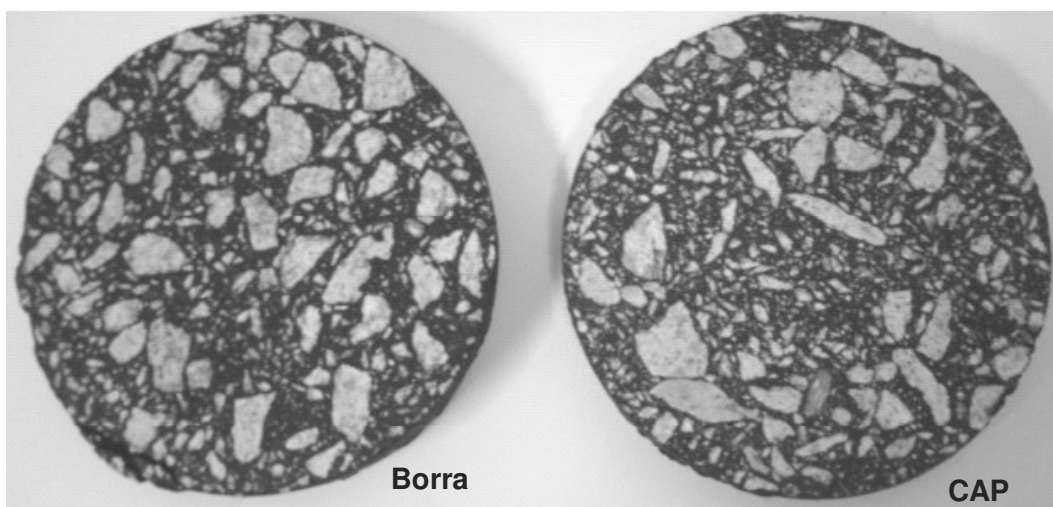


Figura 2: Corte em corpos de prova confeccionados com 100% de CAP e com 100% de borra asfáltica

Observa-se que todas as amostras apresentam dados volumétricos que satisfazem as recomendações da norma DNER-ES 313/97, relativas aos intervalos desejados de volume de vazios (3 a 5%) e para a relação betume-vazios (75 a 82%). Além disso, o teor de projeto observado é um pouco acima do usual para misturas convencionais, o que não condena o potencial uso das misturas estudadas para serem empregadas em camadas de revestimentos asfálticos, base, regularização ou reforço do pavimento (Aldigueri *et al.*, 2000). Ressalta-se que foram realizados ensaios de adesividade (DNER-ME 078/94) com os ligantes e agregados estudados e estes apresentaram resultados satisfatórios quanto à avaliação visual da adesividade ligante-agregado, sem haver deslocamento da película do ligante, tanto para o CAP 50/70 quanto para o resíduo borra asfáltica utilizado nesta pesquisa.

7. COMPORTAMENTO MECÂNICO

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) é um ensaio de ruptura, onde o corpo-de-prova é posicionado horizontalmente e a carga é aplicada diametralmente a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s. Os ensaios foram conduzidos a 25°C e realizados segundo a norma DNER-ME 138/94.

Na análise tensão-deformação das estruturas dos pavimentos, o parâmetro de deformabilidade normalmente empregado para caracterizar as misturas asfálticas é o módulo de resiliência (M_R) (Motta, 1995). O ensaio para determinação deste parâmetro vem sendo realizado no Brasil em equipamentos pneumáticos com controle do tempo e frequência de aplicação da carga, sistema de aplicação da carga, sistema de medição do deslocamento diametral horizontal do corpo-de-prova quando submetido à carga e sistema de controle de temperatura. Os ensaios da presente pesquisa foram realizados segundo a norma DNER-ME 133/94. O M_R foi determinado em corpos-de-prova moldados em laboratório (diâmetro de $10 \pm 0,02$ cm e altura de $6,35 \pm 0,20$ cm) a 25°C, e o resultado foi obtido por meio da leitura da deformação instantânea. Os resultados obtidos para os ensaios descritos acima são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração estática

Mistura	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Resiliência (MPa)	M_R/RT
100% CAP 50/70	0,85	3073	3615
100% Borra	0,65	2232	3434
40% CAP + 60% Borra	0,78	2520	3231
60% CAP + 40% Borra	0,84	2729	3249

Os resultados de resistência à tração encontrados para as amostras confeccionadas com 100% de borra asfáltica mostraram-se baixos quando comparados com resultados de concretos asfálticos convencionais (Loureiro, 2003; Pinheiro, 2004), onde houve uma redução em torno de 22% de resistência à tração. O valor de módulo de resiliência encontrado para a borra asfáltica mostra-se satisfatório, uma vez que se apresenta em torno de 2000 MPa, sendo, portanto, próximo aos valores de uma mistura convencional (Soares *et al.*, 2000), porém, estes resultados se mostraram inferiores para a mistura com borra asfáltica, da ordem de aproximadamente 27%, quando comparada ao CAP convencional. Estas diferenças podem estar relacionadas à menor viscosidade e maior penetração da borra asfáltica, quando comparada ao ligante convencional.

A partir destes resultados foram executadas misturas com o ligante convencional e borra asfáltica, em diferentes porcentagens. Pode-se observar que a resistência à tração da mistura com borra aumenta à medida que se insere CAP nesta, ou seja, 40% de CAP misturado a 60% de borra apresenta uma resistência à tração 7% inferior quando comparada ao ligante convencional puro, e passa a ter a mesma magnitude quando se mistura 40% de borra com 60% de CAP. Com relação ao módulo de resiliência percebe-se que os 27% de diferença para a amostra com 100% de borra diminui em 18% para a mistura com 60% de borra e cai para 11% no caso da mistura com 40% de borra, comparando-se aos valores das amostras executadas com 100% de CAP 50/70.

A relação M_R/RT vem sendo usada no país como um indicativo da vida de fadiga de uma mistura, afinal representa uma combinação de flexibilidade e resistência e observa-se que ambas as misturas apresentaram a relação M_R/RT próxima de 3000, valor comumente encontrado em misturas betuminosas no Ceará (Soares *et al.*, 1998, 1999).

A fadiga é um processo de deterioração estrutural que sofre um material quando submetido a um estado de tensões e deformações repetidas, que podem ser muito menores que a resistência última do material, resultando em trincas, após um número suficiente de repetições do carregamento (Pinto e Motta, 1995). No ensaio de vida de fadiga, os corpos-de-prova são submetidos à compressão diametral, a temperatura de 25°C e, de acordo com o valor encontrado no ensaio de resistência à tração, ensaiou-se os corpos de prova em diferentes níveis de tensão, correspondentes a 30, 40 e 50% da RT. A Figura 3 apresenta as curvas de fadiga das misturas estudadas.

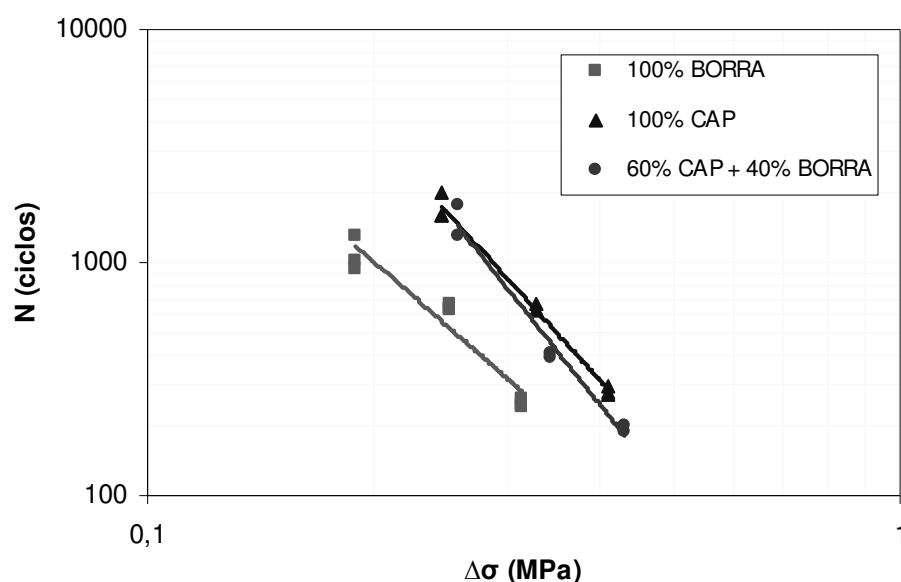


Figura 3: Vida de fadiga para as misturas asfálticas estudadas

Analisando-se as curvas de vida de fadiga apresentadas, conclui-se que a mistura realizada com 100% de borra apresenta valores inferiores para um mesmo ciclo de tensões aplicado, indicando uma menor vida útil desta mistura quando comparada com o ligante convencional. Porém, a mistura realizada com 40% de borra inserida a 60% de CAP 50/70 apresentou resultados equivalentes à mistura realizada com 100% de CAP 50/70, onde se conclui que esta

mistura com o resíduo pode ser utilizada em pavimentos de revestimento para vias de baixo volume de tráfego, comportando-se de forma aceitável nos parâmetros de fadiga analisados.

Pode-se observar que a utilização da borra asfáltica como material para camadas de revestimento proporciona benefícios, tanto no aspecto de destinação final mais nobre para este resíduo, quanto do aspecto econômico, onde se pode prever que um revestimento asfáltico executado com a inserção de 40% de borra pode apresentar, dentro dos parâmetros usuais de dimensionamento e custos correntes de materiais utilizados em rodovias regionais, uma economia de até R\$16.000,00 por quilômetro de pavimento, utilizando agregados convencionais. Portanto, a utilização da borra oleosa asfáltica pura pode não ser considerada totalmente adequada para vias de alto volume de tráfego, no entanto, as misturas estudadas apresentaram valores compatíveis para serem empregadas como revestimentos de baixo custo, bem como em regularizações e reforço de pavimentos, se mostrando uma alternativa viável para vias de baixo volume de tráfego, possibilitando uma destinação mais nobre deste material, tanto no ponto de vista ambiental quanto sócio-econômico.

A continuação desta pesquisa, com a realização de outros ensaios mecânicos, é necessária para que os parâmetros possam ser verificados de forma a se tentar obter resultados mais esclarecedores. Podem-se vislumbrar outros importantes resultados em diferentes tipos de mistura, como por exemplo areia asfalto usinado a quente e misturas asfálticas a frio. Estão em execução nesta fase da pesquisa e serão divulgados futuramente, resultados obtidos através da dosagem Superpave, bem como ensaios para determinação do afundamento ou deformação permanente de trilhas de roda, por meio da simulação de tráfego em placas compactadas, a serem testadas no simulador de tráfego laboratorial.

Como citado anteriormente, a realização de ensaios de avaliação ambiental da borra asfáltica utilizada é imprescindível e estão sendo executados na fase atual da pesquisa, estando disponíveis por meio da divulgação de resultados futuros, para que se possa avaliar com maior precisão a periculosidade deste resíduo com relação à capacidade de adsorção e potencial de lixiviação de compostos.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As seguintes observações e conclusões podem ser citadas com relação ao comportamento obtido nos ensaios realizados em misturas asfálticas executadas com CAP convencional e borra oleosa asfáltica pura:

- A borra asfáltica apresenta uma maior penetração e menor viscosidade quando comparada ao CAP convencional, entretanto a viscosidade não apresentou alteração com a variação da taxa de cisalhamento, apenas com as temperaturas, que se apresentaram inferiores para a borra asfáltica estudada. Os asfaltenos são a fração mais pesada dos ligantes estudados, onde estes apresentaram em sua composição HPAs considerados tóxicos, mutagênicos e carcinogênicos, porém em níveis de concentração aceitáveis, desde que haja cuidado no manuseio destes ligantes e que através de testes ambientais seja comprovada a não lixiviação destes compostos para camadas subjacentes do pavimento;

- Resultados referentes ao comportamento mecânico da borra asfáltica se apresentaram inferiores quando comparados ao ligante convencional em misturas puras, porém, à medida que se acrescenta certa porcentagem de borra ao ligante, o comportamento mecânico tende a melhorar e as diferenças nos valores de resistência à tração e vida de fadiga atingem uma mesma magnitude para a mistura realizada com 40% de borra e 60% de CAP 50/70, apresentando um módulo de resiliência 11% inferior, quando comparada à amostra com 100% de ligante convencional;
- A utilização da borra oleosa asfáltica pura pode não ser considerada totalmente adequada para vias de alto volume de tráfego, no entanto, as misturas estudadas apresentaram valores compatíveis para serem empregadas como revestimentos de baixo custo, bem como em regularizações e reforço de pavimentos, se mostrando uma alternativa viável para vias de baixo volume de tráfego, possibilitando uma destinação mais nobre deste material, tanto no ponto de vista ambiental quanto sócio-econômico.

Agradecimentos

Os autores querem expressar seus agradecimentos ao CNPq (Programa de Iniciação Científica) e a CAPES (Programa de Apoio a Projetos Institucionais com a Participação de Recém-Doutores – PRODOC), pelo apoio financeiro destinado a este grupo de pesquisa, bem como à Lubnor/Petrobras pelo fornecimento do CAP e disponibilização da borra asfáltica para o estudo realizado e à equipe laboratorial do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1993) NBR 12891 – Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil.
- Aldigueri, D. R.; Bernucci, L. B.; Moura, E. (2000) O Estudo do Comportamento de Misturas de Areia Asfalto Usinadas a Quente Quanto à Deformação Permanente. 32ª Reunião Anual de Pavimentação - ABPv, Brasília, DF.
- ANP (2005) Resolução ANP Nº 19, de 11.7.2005 DOU 12.7.2005. Regulamento técnico Nº 3/2005. Agência Nacional do Petróleo.
- ASTM (2001) D 2493 - Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts. American Society for Testing and Materials. American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2004) D 2872 - Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2002) D 4402 - Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus. American Society for Testing and Materials.
- ASTM (2000) D 2041 - Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixture. American Society for Testing and Materials.
- Benevides, S.A.S. (2000) Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento dos Pavimentos Asfálticos: Empírico do DNER e da Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Estado do Ceará. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Binet, S.; Pfohl-Leskowicz, A.; Brandt, H.; Lafontaine, M.; Castegnaro, M. Bitumen Fumes: Review of Work on the Potential Risk to Workers and the Present Knowledge on its Origin. The Science of the Total Environment., v. 300, p.37–49, 2002.
- Casagrande, M.D.T., Nascimento, D.R., Lima, C.S., Soares, J.B. (2006) Estudo da Aplicabilidade de Borra Oleosa Asfáltica Pura como Material para Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego. XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, v.2. p.1100 – 1109, Brasília, DF.
- Corbett, L.W., Petrovski, U. Differences in Distillation and Solvent Separated Asphalt Residua, Research & Development., v. 17, p. 342, 1978.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) Métodos de Ensaio - Determinação do Módulo de

- Resiliência de Misturas Betuminosas. DNER-ME 133/94. Ministério dos Transportes, Brasil.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) Métodos de Ensaio – Agregado Graúdo – Adesividade a ligante betuminoso. DNER-ME 078/94. Ministério dos Transportes, Brasil.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994) Métodos de Ensaio – Misturas Betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. DNER-ME 138/94. Ministério dos Transportes, Brasil.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997) Pavimentação – Concreto Betuminoso. DNER-ES 313/97. Ministério dos Transportes, Brasil.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997) Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. DNER-ME 35 317/97. Ministério dos Transportes, Brasil.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1999) Material Betuminoso – Determinação da Penetração. DNER ME-003/99. Ministério dos Transportes, Brasil.
- Loureiro, T.G. (2003) Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado. PETRAN/UFC, Fortaleza, CE.
- Magalhães, S. C. (2006) Plano de gerenciamento de resíduos sólidos para a indústria de petróleo: o caso de Petrobras/Lubnor-CE. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Produção). UFC, Fortaleza, CE.
- Motta, L. M. G. (1995) Curva de Resiliência e fadiga de Misturas Asfálticas. Instituto Brasileiro de Petróleo, São Paulo, SP, Brasil.
- Pinheiro, J.H.M. (2004) Incorporação de Borracha Moída de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco). Dissertação de Mestrado. PETRAN/UFC, Fortaleza, CE.
- Silveira, M.A. (1999) Estudo de Adição de Polímero em Areia-Asfalto a Frio. Dissertação de Mestrado. EESC/USP, São Carlos, SP.
- Soares, J.B.; Motta, L.M.G.; Nóbrega, L.M.; Leite, L.M.; Paiva, J.A.A.; Nobre, E.F. (1998) Estudos Comparativo de Cimentos Asfálticos de Petróleo na Pista Experimental do Ceará. XII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Fortaleza, CE.
- Soares, J.B.; Leite, L. M.; Motta, L. M. G. e Branco, J. V. C. (1999) O efeito da consistência do CAP no teor ótimo e nas propriedades das misturas asfálticas. XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, São Carlos, SP.
- Soares, J.B.; L.M. Motta; J.A. Paiva e J.V.C. Branco (2000) Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Variação de Granulometria e de CAP. 15º Encontro de Asfalto - IBP.
- Vasconcelos, K. L.; Soares, J. B. (2003) Influência dos métodos de ensaio para determinação das densidades real e aparente de agregados na dosagem de misturas asfálticas. 34ª Reunião Anual de Pavimentação - ABPv, Campinas, SP.
- Vasconcelos, K. L. (2004) Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado. PETRAN/UFC, Fortaleza, CE.

Michéle Dal Toé Casagrande (michedtc@det.ufc.br)

Daniela Cadore Vale (danielacadore@det.ufc.br)

Jorge Barbosa Soares (jsoares@det.ufc.br)

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP)
Departamento de Engenharia de Transportes (DET)
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Campus do Pici, Bloco 703 - Fortaleza, CE, Brasil