

## **RECICLAGEM A QUENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM USINAS: ALTERNATIVA PARA BASES DE ELEVADO MÓDULO DE ELASTICIDADE**

**José Tadeu Balbo**

Laboratório de Mecânica de Pavimentos  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**Janos Bodi**

Secretaria Municipal de Sub-Prefeituras – Assessoria Técnica de Obras e Serviços  
PMSP

### **RESUMO**

Materiais para a construção de bases de pavimentos com elevados módulos de elasticidade se constituíram, nos últimos vinte anos, em alternativa para as convencionais bases tratadas com aglomerantes hidráulicos, na busca de soluções para minimização de deformações plásticas em pavimentos asfálticos bem como evitar problemas relacionados à retração hidráulica dos materiais convencionais. As misturas asfálticas recicladas a quente, em tese, poderiam se encaixar dentre os materiais alternativos, por trabalharem com asfaltos bastante duros além de evidentes ganhos como matéria prima ambientalmente amigável e de baixo custo. Alguns resultados laboratoriais com misturas recicladas a quente em usina, apresentados neste artigo, demonstram seu potencial de aplicação em pavimentos.

### **ABSTRACT**

Search for new materials for construction of high modulus asphalt bases as alternative for conventional cemented bases has increased last two decades since such as a material could accomplish the task of decreasing strongly the rutting on asphalt pavements as well as to avoid shrinkage typical of cemented bases due to hydraulic binder hydration, thus likely being a more advantageous base material within several application fields. Herein this paper are presented the resulting parameters for some recycled reclaimed asphalt pavement discussed the future applicability of such as a material, regarding its environmental appeal, as alternative for new mixtures with high grade asphalt.

### **1. INTRODUÇÃO**

No Brasil os anos de 1985 e 1986 foram marcos na tentativa de introdução dos processos de reciclagem de misturas asfálticas a quente, com obras da Via Anhanguera (SP), com emprego de fresagem a frio e reciclagem a quente em usina central, e na Via Dutra, com emprego de equipamentos de pré-aquecimento, fresagem e reciclagem, completamente *in situ*. Não há evidências, ao menos na expansão de normativos a partir de 1988, que tal processo, de grande interesse ambiental nos países mais evoluídos tecnologicamente, tenha ampliado espaço no país, a menos de esporádicas experiências não documentadas em vias urbanas, com introdução de fresados em usina misturadora, ou rodovias, com reciclagem *in situ*.

Essa aparente situação a qual tal técnica ficou relegada, não se tratando de foco central nem de pesquisas nem busca por métodos construtivos, pode ter como causa as próprias dificuldades de reciclagem a quente em laboratório para exploração tecnológica (Peres e Balbo, 1998) bem como as modificações necessárias em usinas tipo *drum-mixer* para uma eficiente reciclagem; além disso, a ausência de estudos mais sistemáticos sobre a real eficiência e desempenho de misturas asfálticas obtidas a alta taxa de reciclagem (aproveitamento preferencial do fresado com pequenas correções na mistura, caso necessárias) realizados com equipamentos de pequeno porte para reciclagem em pista de rolamento.

Os materiais fresados de misturas asfálticas são especialmente presentes em grandes e médias cidades, quando a restauração de pavimentos urbanos esbarra em exigências importantes quanto a alteamento do greide da plataforma viária, que causaria situações indesejáveis em especial com soleiras, guias e sarjetas, além de outras interferências. É possível que tenha ocorrido e venha ocorrendo, não oficialmente, um reaproveitamento dos fresados em parcela pequena na preparação de novas misturas asfálticas; contudo, a realidade oficial é que o reuso do material ocorre, não como

reciclagem porém na execução de revestimentos primários em ruas periféricas, no caso de São Paulo, tratando-se portanto de uma sub-utilização dos fresados, cujo asfalto incorporado não é de fato reciclado na acepção do termo.

No que diz respeito à reciclagem à quente em usina, em comparação com outros tipos de reciclagem *in situ*, a primeira apresenta indiscutíveis vantagens, tais como: a melhor homogeneidade do processo de termo-regeneração; não está restrita a pequenas espessuras de fresagem para uma reciclagem eficiente; emprego de equipamentos convencionais para transporte, distribuição e compactação das misturas; aproveitamento do poder aglomerante do CAP existente (vantagem sobre misturas recicladas a frio); abertura rápida ao tráfego (vantagem sobre misturas recicladas a frio); pode ser empregada em revestimentos (difícil para reciclados a frio); propriedades mecânicas análogas a misturas virgens e superiores aos reciclados *in situ*, a frio ou a quente (Ruiz, 2002).

Por outro lado, a desvantagem da reciclagem em usina reside principalmente no fato de necessidade de transporte da pista para o local de usinagem, o que seria superado no caso de grandes obras quando a usina pudesse ser instalada nas proximidades. No entanto, modernamente, usinas asfálticas móveis, com capacidade de reciclagem, não resultariam nesta limitação.

A reciclagem integral, incluído o CAP envelhecido dos materiais removidos de revestimentos e camadas asfálticas de pavimentos existentes resultaria em diversas economias nos investimentos de infra-estrutura viária, como de materiais e de energia na produção dos materiais, além de resguardar aspectos ambientais como a preservação de matéria-prima, até a minimização de reflexão de fissuras existentes para camadas de reforço colocadas sobre o pavimento existente, conforme ressaltam Peres e Balbo (1998).

Tais benefícios levaram diversos países, como Holanda e Reino Unido, a adotarem legislações específicas e restritivas sobre o destino das misturas asfálticas retiradas das vias públicas, incluindo os blocos de material resultantes da abertura de valas para a instalação de tubulações de concessionárias de serviços públicos. Inclusive, neste caso, é sabido que tais materiais são diretamente encaminhados para bota-foras em função de seu difícil reemprego, dadas suas dimensões.

Para se ter uma idéia, ainda que grosseira, sobre tais volumes de misturas asfálticas potencialmente recicláveis, apenas duas das maiores prestadoras de serviços públicos no Município de São Paulo abrem cerca de 45.000 valas mensais, empregando posteriormente concreto magro como base e nova mistura asfáltica como revestimento, para fechamento de tais valas. Somando-se a estes montantes, em 2003, o município teria atuado em cerca de 100 km de restauração de vias públicas com inclusão de fresagem, segundo dados parciais obtidos por meio de secretarias e concessionárias atuando em vias públicas.

Considerados os preços unitários do CAP-20 posto em São Paulo em R\$ 915,00 e da brita graduada simples a R\$ 23,50 (com base em valores de maio de 2004), as misturas asfálticas extraídas, se recicladas, representariam cerca de R\$ 42,5 milhões no ano de 2003 (ver Tabela 1). Há que se entender o porquê de em muitos outros países já existir legislação sobre o reaproveitamento e a reciclagem deste material: os números, ainda que subestimados, falam por si só. Reforçando tal interesse econômico, a partir de 1974, estados americanos como Texas e Nevada investiram maciçamente na reciclagem a quente, técnica que rapidamente se disseminou nos EUA, sendo trabalho corriqueiro no cotidiano de serviços de manutenção e restauração no país (Ruiz, 2002).

**Tabela 1** Montantes e valores das misturas asfálticas retiradas de pavimentos em São Paulo

Serviço Anual	Tipo de material extraído	Quantidade estimada para 2003 (t)	Quantidade de CAP antigo estimado (t)	Quantidade de agregados recicláveis estimado (t)	Custo estimado do CAP novo (R\$)	Custo dos agregados novos (R\$)
Abertura de valas	Misturas asfálticas em blocos	396.288	23.777	372.511	21.755.955,00	8.754.008,50
Restauração de vias públicas	Misturas asfálticas fresadas	151.200	9.072	142.128	8.300.880,00	3.553.200,00

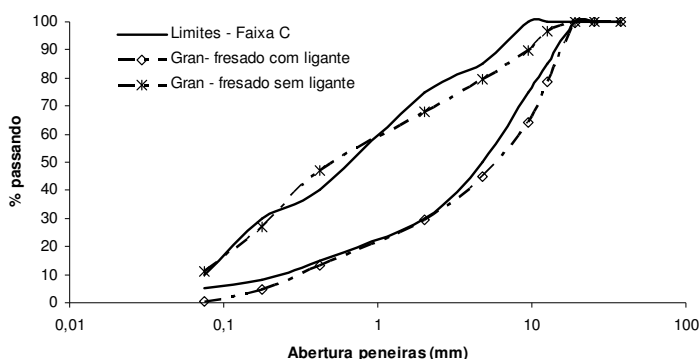
Trata-se, portanto, de ao menos se investigar racionalmente como se empregar tal material, levando-se em consideração suas potencialidades. Estudos laboratoriais recentes anteriormente realizados por Garrido e Balbo (1997) mostraram que, em termos de parâmetros de dosagem convencional e de ensaios de formação de trilhas de roda em laboratório, o acréscimo de 10% de material fresado a misturas asfálticas novas (sem incorporação de agentes de reciclagem), de fácil adaptação inclusive em usinas tipo *drum-mixer*, não incorria em alterações na potencial deformação plástica do material, possibilitando sua indicação, na pior das hipóteses, como material parcialmente reciclado para emprego em operações tapa-buraco no Município de São Paulo. Os autores atribuíam tais resultados ao efeito do CAP-20 novo empregado na preparação agir como um corretor de viscosidade sobre o asfalto oxidado.

Peres e Balbo (1998) também apresentaram resultados complementares ao estudo anterior, referentes a reciclagem de fresados extraídos de três vias públicas no Município de São Paulo, quando valores de penetração sobre o CAP extraído (pelo Método de Abson) resultaram entre 17 e 19 décimos de mm, desvendando, para os fresados como um todo, uma alteração expressiva de consistência de suas frações asfálticas em relação às características de CAP novos, dentro de um processo natural de envelhecimento dos asfaltos. Naquele trabalho eram também reveladas as dificuldades de reciclagem com emprego de equipamento de laboratório para aquecimento e mistura dos materiais. Bicheron e Migliori (1986) já empregaram há quase duas décadas, asfaltos recuperados de fresados com consistência de 12 décimos de mm, em misturas recicladas com 50% de aproveitamento de fresados.

No entanto, a eficiência da reciclagem a quente, medida fatalmente por meio do acompanhamento do desempenho da mistura reciclada em pista, deve ser uma garantia importantíssima para o sucesso do processo. Baroux *et al.* (1982), para exemplificar, verificaram que a adição de asfalto mais mole durante processo de reciclagem resultou em ensaios de trilha de roda insatisfatórios, atribuindo-se na ocasião a ocorrência da não miscigenação dos asfaltos novo e velho, o que incorreu em ocorrência de dupla camada asfáltica. Tal fenômeno pode ocorrer em especial devido à ineficiência térmica do processo de reciclagem a quente, seja em laboratório ou em pista, neste último caso quando o equipamento de reciclagem *in situ* não permite garantir aquecimento a temperatura de mistura adequada (175°C) toda a camada de mistura asfáltica em remoção; como consequência de tal fato, o fenômeno do *stripping*, que consiste na formação de fissuras pouco espaçadas e transversais, justamente em trilhas de roda, já ocorreram em misturas recicladas a quente postas em utilização, devido à formação de duplo filme asfáltico resultante da não homogeneização do asfalto antigo aderido à superfície do agregado com o novo CAP.

**Tabela 1:** Graduação do material fresado após extração de ligante

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



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

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

### 3.3. Caracterização dos ligantes asfálticos

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

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

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

- Revestimento altamente resistente ao cisalhamento, e portanto, às deformações plásticas, para fazer frente ao tráfego pesado, com durabilidade superior a doze anos (após o que fresagem e reforço), desde que alvo de manutenção preventiva entre o oitavo e décimo ano de uso, papel ao qual caberia a misturas do tipo SMA, preferencialmente;
- Uma base em mistura asfáltica densa, com elevado módulo de elasticidade<sup>1</sup>, que atuando mais em forma de placa (e lá no clima temperado com certeza, em função de fissuras de retração, ainda que bastante espaçadas entre si quando em misturas asfálticas) e não como camada elástica e flexível, contribuisse para evitar estados de tensão mais importantes na camada de revestimento;
- Sub-base em mistura asfáltica bastante flexível, preferencialmente elaborada com asfaltos incorporando polímeros, que, neste caso, dado suas características, seria altamente flexível e resistente à fadiga.

As espessuras recorrentes, nos experimentos relatados, apontam para revestimentos com 40 a 75 mm, bases com 100 a 180 mm e sub-bases com 75 a 100 mm (Newcomb *et al.*, 2001). É evidente que tal tipo de pavimento representa uma evolução bastante grande sobre o antigo conceito de *full depth pavement* lançado pelo Instituto do Asfalto dos EUA na década de 1960. Objetiva-se, com este tipo de solução, a construção de pavimentos asfálticos de alto desempenho, que possam ter uma durabilidade de mais de 40 anos, apenas com três atividades de reforço estrutural neste período, garantidos os trabalhos de manutenção preventiva com aplicação de camada de micro-concreto asfáltico.

Embora o documento (Newcomb *et al.*, 2001), não aborde as considerações que se seguem, é importante pontuar o porque desta solução, moderna e estruturalmente comedida, porém baseada em um conceito já anterior à década de 1950. Sabe-se que, a presença de uma base rígida, e apenas de uma base, em geral estabilizada com cimento Portland ou mesmo com concreto (convencional ou magro, compactado com rolos neste caso), tem como resultado mais notável para o desempenho do pavimento exatamente a minimização da ocorrência de trilhas de roda, em especial durante a fase em que a base rígida responde no estágio I (domínio elástico).

Entre vários estudos sobre a questão, um dos mais interessantes foi apresentado por Lewis e Broad (1968), do *Transportation Research Laboratory* do Reino Unido. Em enquête sobre o desempenho de 9 das principais rodovias britânicas, em segmentos com vários tipos de bases que já haviam sido solicitados por tráfego pesado por cinco anos, apontou-se explicitamente para o fato de ser insignificante a manifestação de deformação plástica em trilhas de roda, apesar de ocorrerem outros defeitos em pavimentos com bases rígidas cimentadas.

Em uma avaliação complementar e ainda mais ampla Wrigth (1969) avaliou 164 rodovias que haviam empregado pavimentos semi-rígidos, após 13 anos de ação do tráfego, 74% das mesmas não evidenciavam problemas associados à formação de trilhas de roda. A explicação estrutural para tal fato é que, a camada de revestimento asfáltico, sobre base cimentada, enquanto tal base responde elasticamente (estádio I), fica submetida a esforços de compressão em toda sua profundidade, uma vez que no pavimento composto, com ambas as camadas aderidas, a camada de base, com módulo de elasticidade de quatro a seis vezes maior que o do revestimento, mantém a linha neutra do sistema pouco acima de sua meia-altura (Balbo, 1993).

---

<sup>1</sup> Este tipo de base tem sido também preliminarmente chamado de “base negra”, muito provavelmente para descrever melhor uma expressiva presença de asfaltenos no CAP, parte inclusive responsável pela coloração do CAP.

Conseguir uma base asfáltica de elevado módulo de elasticidade representaria algumas vantagens sobre uma base cimentada convencional, relacionadas à não ocorrência de fissuras imediatas de retração de natureza hidráulica ou autógena (que tenderiam a se refletir para o revestimento asfáltico) bem como de ser menos sensível à fadiga posto tratar-se de material ainda bastante mais dúctil. Uma base asfáltica com módulo de elasticidade muito elevado, em tese, só é possível com o emprego de um CAP muito viscoso, não sendo tal possibilidade concreta apenas se ajustando a matriz de agregados pétreos.

Dado não ser comum a fabricação de um CAP duro em todas as refinarias (relacionado tal fato ao cru disponível e aos processos propriamente ditos, bem como à demanda do mercado), surge a questão: porque não empregar um material reciclado a elevada taxa de reciclagem, onde o CAP envelhecido é em geral bem viscoso (penetração inferior a 20 décimos de mm), em um processo de larga escala, para a construção de bases de elevado módulo de elasticidade, quando a situação permitir (exemplo: disponibilidade de grandes estoques de fresados)? Dados contundentes inclusive sobre melhor comportamento de misturas recicladas no que tange deformações plásticas foram extraídos de experimentos em rodovias no estado da Flórida a partir de meados da década de 1980 (Kandhal e Mallick, 1997).

## **2.2 Reparação de Valas em Pavimentos**

Uma segunda possibilidade de emprego de material reciclado em alta taxa de reciclagem, e com provável elevado módulo de elasticidade, em decorrência do exposto no item anterior, seria nas operações, em especial em vias urbanas, de fechamento de valas abertas por concessionárias de serviços públicos. Embora não de emprego geral, o uso de concreto magro é bastante comum para perfazer o papel de base do pavimento na área de reparação. A razão para tal tipo de solução ser adotada é evidente, pois, dada a dificuldade de compactação do solo de reposição do subleito (o que não garante muitas vezes os requisitos desejados) dentro de uma vala e também de dificuldade de execução de uma brita graduada (ou outro material como base), uma placa de concreto poderia resultar em: (1) distribuição de pressões do tráfego mais aliviadas sobre o solo de fundação; (2) garantia de se evitar afundamentos plásticos na vala fechada; (3) minimizar afundamentos no revestimento asfáltico superior ao concreto, com base nos argumentos anteriormente apresentados.

Existem, contudo, outras razões de ordem prática, que têm condicionado muito, e negativamente, o emprego do concreto magro como base do pavimento reparado. Dentre as mesmas, destacam-se: a necessidade de cura do concreto, o que resulta na possibilidade de fechamento de vala com o concreto asfáltico após alguns dias, bem como no emprego de chapas de aço provisórias no local, o que causa transtornos aos usuários das vias públicas; em consequência, cura inadequada, com resultados desfavoráveis para o ganho de resistência do concreto e no que tange à formação de fissuras por retração plástica, higrométrica ou autógena, que fatalmente se refletirão para a superfície do revestimento asfáltico.

Tendo-se presente as razões para se exigir, no caso de fechamento de valas (e são cerca de 50.000 valas mensais no Município de São Paulo), uma base de elevado módulo de elasticidade, eis aqui uma oportunidade excelente para o emprego de material reciclado a taxa de reciclagem elevada, que possa desempenhar esta função, com vantagens quanto às questões de tempo de liberação ao tráfego e ocorrência de fissuração na camada de base. Evidentemente., a tais especulações cabe colocar a reflexão de uma necessidade de acompanhamento, em qualquer caso, do processo construtivo, para se garantir a ausência de estrias resultantes de uma oxidação exagerada do ligante asfáltico envelhecido, que poderia comprometer as soluções alternativamente apresentadas.

Uma outra possibilidade de emprego do material, nesta linha, seria em operações “tapa-buraco”. Na cidade de São Paulo, tem-se empregado mistura virgem, preparada com pedrisco misto, como forma de garantir melhor estabilidade para o material ( $> 1.000$  kg), haja vista que o serviço é em geral terceirizado (a massa é fornecida pela PMSP e produzida em usina própria) e realizado em condições precárias de controle tecnológico; tal procedimento certamente possui ônus econômico importante. Desde que o material, fresado ou em blocos, reciclado a quente, apresentasse por sua vez elevada estabilidade, a economia geral poderia ser muito grande considerando-se os seguintes dados: (1) a produção de misturas asfálticas para atendimento de operações de tapa-buracos atinge cerca de 300 toneladas por dia, produzidas pela própria PMSP; (2) a quantidade de massa asfáltica adquirida diretamente de fornecedores para tais serviços é em média de 175 toneladas por dia. Observe que tal demanda poderia ser plenamente atendida com os quantitativos de material potencialmente recicláveis apresentados na Tabela 1.

### **3. ANÁLISE DE MATERIAL RECICLADO EM USINA A ALTA TAXA**

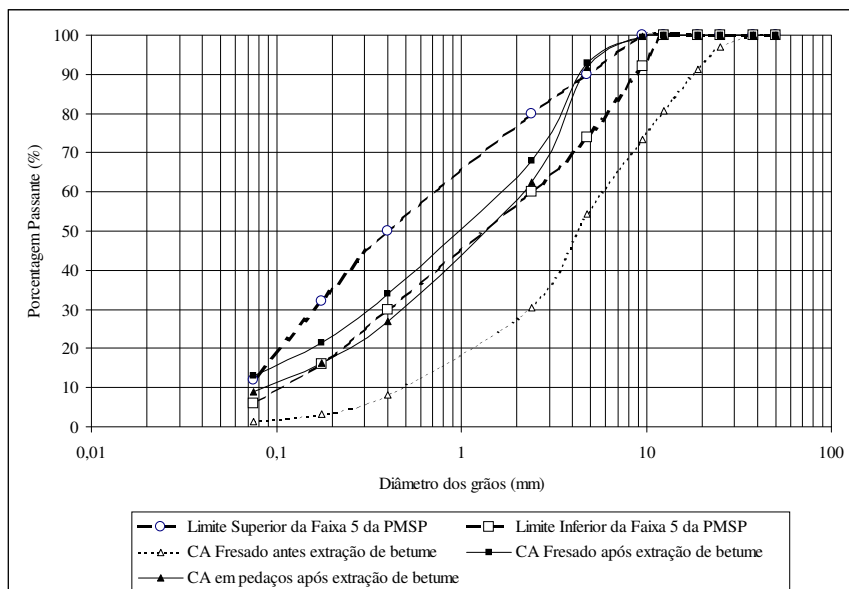
A possibilidade de reciclagem a quente de misturas asfálticas, atualmente, qualquer que fosse a taxa de reciclagem empregada, se perfaz pelo emprego seja de usinas de grande, médio ou pequeno porte (150, 80 e 10 t/hora de produção, respectivamente). Há equipamentos no mercado para tal tipo de operação, e além disso, equipamentos mais antigos podem ser adaptados, em alguns casos, para uma operação de reciclagem a quente com fresados ou com blocos de misturas asfálticas (Kandhal e Mallick, 1997). Apresentam-se, na seqüência, estudos preliminares sobre a reciclagem a quente de misturas asfálticas, na forma de fresados ou em blocos, elaboradas em usina de reciclagem de pequeno porte e móvel, com capacidade média de 8 toneladas por hora.

#### **3.1 Materiais Empregados**

As misturas asfálticas recicladas, a taxa de 100% de reciclagem, foram obtidas a partir de extração por fresagem a frio e por arrancamento de revestimento asfáltico de uma via situada em São Paulo onde o revestimento asfáltico, na faixa V da PMSP, havia sido executado em 1993. No caso da fresagem uma máquina fresadora de um metro de largura foi empregada, resultando em material granular com asfalto impregnado; os blocos foram arrancados com auxílio de uma pá-carregadeira de pequenas dimensões (lâmina de um metro). Neste último caso, o processo de arrancamento resultou também na presença de algumas pedras de maior diâmetro aderidas ao bloco retirado e pertencentes à camada de ligação inferior, também em mistura asfáltica usinada a quente.

Na Figura 1 são apresentadas as distribuições granulométricas dos materiais extraídos de pista, quando for o caso, antes e após a extração do betume em laboratório, onde é possível verificar que o material fresado encontrava-se com muitos grumos antes da reciclagem, o que acarretou aumento dos diâmetros máximos bem como pouca presença de finos. Após a extração de betume, os materiais fresados apresentaram maior quantidade de finos, resultante do próprio processo de trituração, em comparação com a granulometria do material em blocos.

Durante a reciclagem a quente do material em usina, quatro misturas foram preparadas; as misturas 1 e 2 foram elaboradas a partir de concreto asfáltico (CA) em pedaços e as misturas 3 e 4 a partir de fresados; ainda, as mistura 2 e 4 receberam adições, respectivamente, de 0,5% e 0,75% em peso de CAP modificado CRAFCO. Cumpridos os tempos de reciclagem para cada uma das misturas (16, 9,5, 8 e 6 minutos, respectivamente), o material reciclado foi extraído da usina móvel e imediatamente levado ao laboratório de controle (ao lado da usina), quando, após quarteamento e pesagem, foi mantido em estufa até estabilidade de temperatura a  $145^{\circ}\text{C}$  antes de compactação das amostras para testes posteriores.



**Figura 1** Granulometria dos materiais extraídos para reciclagem

### 3.2 Ensaios de Compactação no Padrão Marshall

Mantida a temperatura desejada, para cada uma das misturas foram moldadas quatro amostras de do CA reciclado, com emprego de molde e soquete Marshall, de acordo com a NBR 12891 (ABNT, 1993), aplicando-se 75 golpes por face; os resultados obtidos estão sendo apresentados na Tabela 2.

Verificou-se, em tais resultados, que a incorporação de novo betume gerou melhoria na massa específica aparente seca dos materiais reciclados, tornando mais eficiente o processo de compactação; além disso, a incorporação de novo ligante melhorou ainda mais a estabilidade Marshall das amostras, o que era esperado, por exemplo, conforme Taira et al. (2003). A incorporação de ligante, por sua vez, gerou índices de vazios inadequados, indicando que, neste quesito, seria necessário incorporar menos ligante para definição do teor adequado de ligante novo para uma reciclagem a quente (a porcentagem escolhida foi simplesmente adotada); assim, a incorporação de ligante novo, de modo não dosado, em consequência com provável exagero, causou consideráveis acréscimos na RBV (de até 100%), corroborando a assertiva anterior.

Os resultados, comparadas duas amostras supostamente similares, foram bastante coerentes, denotando adequada compactação dos corpos-de-prova em laboratório. A massa específica atingida para o material reciclado originalmente em blocos resultou superior àquela para o material fresado reciclado, embora a Estabilidade Marshall praticamente não se altere entre ambos os casos. Tal fato estaria associado à não destruição dos grãos por trituração durante a fresagem bem como pela presença de alguns agregados grãos a mais arrancados da camada de *binder*, conforme mencionado anteriormente.

A fluência pouco se alterou para reciclados a partir de fresados ou de blocos; porém, a incorporação de novo ligante aponta tendenciosamente para quedas nos valores de fluência, que mesmo assim permaneceriam adequados tendo em vista as especificações vigentes. Porém, era de se esperar um



aumento no valor da fluência, conforme verificado por Taira et al. (2003) paramisturas asfálticas com CAP-20 modificado com polímeros, o que deverá ser melhor investigado. Todavia, o resultado que mais se destaca é quanto resultou ao valor de EM para os CA estudados. Observa-se que os valores de EM para as amostras recicladas sem acréscimo de ligante resultaram similares, para fresados ou blocos, entre 2.600 a 2.900 kg, bastante elevados frente a misturas asfálticas convencionais (valores de 1.500 kg são encontrados para excelentes acertos granulométricos com agregado granítico e teor de betume próximo a 6%).

**Tabela 2** Cálculo dos parâmetros relacionados ao ensaio Marshall

Identificação do CP →	CP 1/1	CP 1/2	CP 2/1	CP 2/2	CP 3/1	CP 3/2	CP 4/1	CP 4/2
Peso ao ar (g)	1278,4	1248,4	1271,93	1252,11	1250,76	1250,73	1259,7	1269,8
Peso Imerso (g)	731,5	713,8	744,52	732,72	703,85	704,87	723,23	729,16
Volume do CP (cm <sup>3</sup> )	546,9	534,6	527,4	519,4	546,9	545,9	536,5	540,6
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,338	2,335	2,412	2,411	2,287	2,291	2,348	2,349
% de betume (%)	5,90	5,90	6,36	6,36	6,50	6,50	7,26	7,26
Massa específica teórica (g/cm <sup>3</sup> )	2,425	2,425	2,409	2,409	2,404	2,404	2,378	2,378
Vazios (%)	3,6	3,7	0	0	4,9	4,7	1,3	1,2
Vazios cheio de betume (%)	13,4	13,4	14,9	14,9	14,4	14,5	16,6	16,6
Vazios do agregado mineral (%)	17,0	17,1	14,9	14,9	19,3	19,2	17,9	17,8
RBV (%)	78,8	78,4	100,0	100,0	74,6	75,5	92,7	93,3
E.M. (kg)	2.812	2.896	4.344	4.469	2.855	2.633	3.707	3.548
Fluência (pol/10)	12,4	15,6	13,9	9,4	15,2	14	11,7	12,6

A incorporação de ligante ainda incrementou os valores de EM, o que esta diretamente ligado à massa específica dos corpos-de-prova que também aumentaram com a incorporação do ligante, tornando mais eficiente a compactação em laboratório; além disso, todos os valores de fluência estariam dentro de limites aceitáveis. Porém as porcentagens de ligantes acrescentadas (a título meramente tentativo) se mostraram inadequadas, diminuindo excessivamente o volume de vazios para a mistura 2 e aumentando, além dos limites toleráveis, a RBV.

Miró e Pérez (2002), trabalhando com elevadas taxas de reciclagem com fresados de pavimento asfáltico antigo, com incorporação de 1% de CAP 150-200 no material, também reciclado em usina, buscando verificação se tal tipo de material atenderia a requisitos mínimos adotados normativamente para misturas novas, chegaram a valores de EM entre 4.000 e 5.000 kg, além de terem encontrado valores de módulo de resiliência e de resistência à tração indireta superiores ao caso de misturas tradicionais virgens. Verificaram, no caso do módulo de resiliência, que tal valor aumentava sensivelmente, de 20 a 50%, com o acréscimo de 30% fresados nas misturas em comparação a misturas virgens, dependendo do tipo de mistura. Tais resultados encaminharam para testes com os materiais presentemente reciclados, para verificação de fato das possibilidades de incrementos expressivos em tais propriedades, para taxa de reciclagem de 100%, como se discorre na sequência.

### 3.2 Ensaios de Módulo de Resiliência e de Resistência à Tração Indireta

Os ensaios para medida do módulo de resiliência ( $M_r$ ) e da resistência à tração indireta por compressão diametral ( $R_t$ ) seguiram os procedimentos preconizados pelos métodos de ensaio do extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1994 a; DNER, 1994 b), com os corpos-de-prova a temperatura de 25°C. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos, que se mostraram compatíveis com os elevados valores também obtidos para EM.

**Tabela 3** Módulos de resiliência e resistências à tração

Identificação do CP →	CP 1/3	CP 2/3	CP 3/3	CP 4/3
Módulo de resiliência (MPa)	15.579	11.440	25.495	10.394
Resistência à tração (MPa)	n.d.	3,013	2,424	2,503
Relação Mr/Rt	-	3,797	10,518	4,153

Os valores de Mr, sempre elevados, decrescem no entanto quando da incorporação de CAP modificado (com polímeros) no material reciclado (corroborando Taira et al, 2003). Obteve-se, nos testes em questão, valores mais elevados para o corpo-de-prova moldado com material fresado (CP 3/3) em comparação àquele moldado com material em blocos (CP 1/3), o que no entanto somente poderia ser esclarecido por meio da moldagem de maior quantidade de amostras, pois, como se disse, os materiais possuem absolutamente a mesma origem.

A incorporação de CAP modificado (aumento do teor de betume) tornou mais resilientes as misturas estudadas, com quedas expressivas nos valores de Mr. Os valores de Rt, muito superiores àqueles comumente encontrados para misturas asfálticas convencionais (0,2 a 0,8 MPa) mostram-se também superiores a valores comuns encontrados para SMA de cerca de 0,75 a 1,0 MPa (Brown e Manglorkar, 1993). Isto conduz o material a apresentar relações Mr/Rt de até três vezes superiores àquelas tipicamente verificadas, por exemplo, para o SMA e para concretos asfálticos comuns, de 3.350 (Brown e Manglorkar, 1993; Reis *et al.*, 2002).

Ademais, deve ser dito que, ao se alterar a posição do corpo-de-prova na prensa pneumática para ensaios de módulo de resiliência, não é incomum a alteração dos resultados, o que vem a reforçar a necessidade de uma maior quantidade de amostras para balizar um valor mais preciso, além de uma melhoria nos procedimentos para determinação desse parâmetro. Contudo, deve ficar claro que os valores obtidos são referentes a misturas asfálticas recicladas em usina (móvel) e não em laboratório, quando as dificuldades neste último caso, principalmente de se atingir temperatura adequada para melhor homogeneização e envolvimento dos grãos quando se emprega, na realidade, um CAP muito viscoso. Portanto, os resultados refletem materiais preparados imediatamente após sua reciclagem em usina, em condições ideais.

#### 4. CONCLUSÕES

Estudou-se a potencialidade de emprego de concreto asfáltico reciclado a quente, fresado ou em blocos, a taxa de reciclagem de 100%. Tais estudos versaram sobre a potencialidade do emprego de tais materiais, a baixo custo, em situações onde bases asfálticas de elevado módulo de elasticidade fossem desejáveis, como se discorreu, em especial, para pavimentos asfálticos perpétuos e para bases rígidas de pavimentos em áreas de recomposição de valas, em especial aquelas causadas pela instalação de tubulações por concessionárias de serviços públicos. A aplicação em escala real dessas misturas recicladas, em cada um dos dois casos de aplicação relatados, dependerá da produção permitida pela usina (móvel ou fixa) e também das habilidades de compactação oferecidas por tais materiais, em especial no caso de execução de grandes volumes de bases contínuas.

As misturas asfálticas recicladas estudadas apresentaram, sintetizando, elevados valores para a estabilidade Marshall, para o módulo de resiliência e para a resistência à tração medida por compressão diametral, valores esses bastante acima dos corriqueiramente desejados para concretos asfálticos; os valores de fluência para as misturas estudadas mostraram-se dentro de padrões aceitáveis convencionalmente. O estudo também pôde mostrar que, para os materiais avaliados à

taxa de 100% de reciclagem, seria bastante reduzida a porcentagem de novo ligante a ser possivelmente incorporada à mistura reciclada, quando se desejar uma mistura de elevada rigidez.

Os valores de módulo de resiliência aferidos mostraram-se compatíveis com material de elevada estabilidade e com a presença de ligante asfáltico endurecido na mistura. Acima dos 15.000 MPa (medidas em laboratório) tem-se uma expectativa favorável, do ponto de vista de propriedades mecânicas, do emprego deste tipo de material como base negra para pavimentos asfálticos, sejam do tipo perpétuo (novas construções, o que implica em grandes volumes e equipamentos de grande porte) ou como camada rígida de base para reparos em pavimentos, sejam valas, sejam remendos para pavimentos rodoviários ou urbanos (com equipamento de pequeno porte).

Uma vez que a ocorrência de dejetos, entulhos e rejeitos de construção civil e suas implicações ambientais cada dia se tornam um objeto de maior interesse da administração pública, considera-se indispensável o emprego apropriado de tais materiais, como é o caso de misturas asfálticas fresadas ou extraídas de qualquer outra maneira dos pavimentos existentes, uma vez que poderá representar economia de dezenas de milhões de reais em trabalhos de manutenção de pavimentos.

Deveria, neste sentido, o poder público estabelecer regras claras e específicas sobre o emprego dos materiais asfálticos retirados de pavimentos, estabelecendo que tais materiais fazem parte de determinado grupo de bens que devem ser racionalmente empregados, por meio da reciclagem e não tão-somente do reuso ou reemprego de forma menos racional e durável, com desprezo ao potencial emprego do CAP existente nesses materiais. Mesmo porque, não há estudos estabelecendo as conseqüências de deposição de material contendo hidrocarbonetos aromáticos em bota-foras para os solos, o lençol freático e os mananciais.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente, com a resolução nº 258, deu um grande passo em exigir uma destinação final e ambientalmente sustentável para a borracha de pneus inservíveis, que vem sendo empregada na modificação de asfaltos para pavimentos. Um passo possível seria, diante das perdas em reais que representam o descaso com a potencial capacidade de reciclagem das misturas asfálticas, a exigência legal de que tais materiais fossem devidamente encaminhados a entidades que provassem sua capacidade no reaproveitamento integral, como mistura asfáltica reciclada, de tais materiais.

Note-se que tal exigência antevê inclusive um futuro (ainda que distante) quando, em função da escassez de petróleo, o CAP certamente terá preços bem mais elevados. A reciclagem a quente de misturas asfálticas, nesse sentido, deveria ser absolutamente retomada após décadas de descompasso com a tecnologia internacionalmente disponível, tornando-se uma espécie de política pública para o desenvolvimento viário sustentável, urbano e rural. A ANPET, em cuja missão agregam-se questões de formulação de políticas públicas para os Transportes, é considerada um fórum fundamental para discussão da exigência de reciclagem eficiente dos materiais de pavimentação no país.

O processo em curso de recuperação e restauração de rodovias federais no Brasil, uma vez viabilizado, irá gerar milhares de toneladas de material asfáltico e agregados resultantes da remoção de revestimentos de pavimentos deteriorados, em centenas de quilômetros de rodovias. Racionalmente, o destino mais sustentável ambientalmente para tais materiais, seria se tornarem matéria-prima para a elaboração de novos concretos asfálticos, para bases ou revestimentos das rodovias em recuperação. Ainda que tal solução não fosse viável, tal matéria prima seria de

utilidade inexorável para os municípios servidos por tais rodovias, que poderiam ser beneficiados, em vários aspectos, na exploração da reciclagem a quente para produção de revestimentos e bases de pavimentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993). *Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall - Método de Ensaio* - NBR 12891. Publicação da ABNT, Rio de Janeiro.
- Balbo, J. T. (1993) Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Baroux, R.; Champion, M.; Poirier, J.C. (1982) *Recyclage des enrobés en centrale. Aspects techniques*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 119, mai-juin, pp.78-84, Paris.
- Bicheron, G.; Migliori, F. (1986) *Effet du régénérant sur le vieux bitume au cours du recyclage à chaud*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 144, juil-aôut, pp.95-99, Paris.
- Brown, E. R.; Manglorkar, H. (1993) *Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures*. National Center for Asphalt Technology Research Report No. 93-5, Auburn.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994, a) *Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral*. DNER-ME 138/94, Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994, b) *Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência*. DNER-ME 133/94, Rio de Janeiro.
- Garrido, R. L.; Balbo, J. T. (1997) *Deformações permanentes em mistura asfáltica reciclada*. In: Ponencias del 9º. Congreso Ibero-Americano del Asfalto, Tomo 2, pp. 814-823, Asunción.
- Kandhal, P. S.; Mallick, R. B. (1997) *Pavement recycling guidelines for state and local governments*. Federal Highway Administration Report FHWA-SA-98-042, U. S. Department of Transportation, Washington, D. C.
- Lewis, W.A.; Broad, B.A. (1968). *An investigation of the performance of nine major roads having cement-bound granular bases*. Road Research Laboratory, RRL Report LR 196, Crowthorne.
- Miró-Recasens, R.; Pérez-Jiménez, F. (2002) *Características mecánicas de las mezclas recicladas en caliente*. Carreteras, Assosiación Española de la Carretera, n. 119, pp. 29-44, Madrid.
- Newcomb, D. E.; Buncher, M.; Huddleston, I. J. (2001) *Concepts of Perpetual Pavements*. Transportation Research Circular 503, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 44-11, Washington, D.C.
- Peres, A. R.; Balbo, J. T. (1998) *Estudo das deformações permanentes em misturas asfálticas recicladas com emprego de agente de reciclagem ARX-1*. In: Anais da 31ª. Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação, Vol. 1, pp. 249-269, São Paulo.
- Reis, R. M. M. de; Bernucci, L. B.; Zanon, A. L. (2002) *Revestimento asfáltico tipo SMA para alto desempenho em vias de tráfego pesado*. Transporte em Transformação VI, Confederação Nacional dos Transportes, CNT-ANPET, pp. 163-176, Brasília.
- Ruiz-Rubio, A. (2002) *Reciclado de mezclas bituminosas en planta en caliente: proceso, ventajas y limitaciones, empleo y perspectivas*. Carreteras, Assosiación Española de la Carretera, n. 119, pp. 11-27, Madrid.
- Taira, C.; Furlan, A. P.; Fabbri, G. T. P. (2003) *Efeito do asfalto modificado com polímero nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas*. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2003. Anais do XVII ANPET, Volume 1, pp.178-187, Rio de Janeiro.
- Wright, M.J. (1969). *The performance of roads with soil-cement bases*. Cement and Concrete Association, Technical Report, TRA 418, London.

## Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - PTR

Av. Prof. Almeida Prado, travessa 2, nº 83 - Cidade Universitária – São Paulo - CEP 05508-900

Fone: (11) 3091-5306

Fax: (11) 3091-5716

<http://www.ptr.usp.br/lmp>

e-mail: [jotbalbo@usp.br](mailto:jotbalbo@usp.br)