

Reciclagem de pavimento com adição de cimento e espuma de asfalto na BR-354/MG

César A Rodrigues da Silva
Célio S. de Castro
Gilmar S. Salem

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta a experiência da reciclagem a frio *in situ* nas obras de restauração do pavimento da BR 354, trecho Entrº MG 050-Entrº BR 262, com adição de cimento e espuma de asfalto, desenvolvida pela Construtora Barbosa Mello S.A e pela Construtora Pavisan Ltda., com a supervisão técnica da Meecca-Engenheiros Consultores Associados Ltda.

Dado o volume de tráfego existente, a opção de reciclagem foi adotada em função da necessidade de imediata liberação da pista, minimizando as interferências da obra no fluxo de veículos e prazo exíguo de execução dos trabalhos devido à proximidade do período de chuvas. O reaproveitamento da camada betuminosa existente possibilitou a redução dos custos de transporte e a eliminação de áreas de lançamento de bota-foras, relevando sobremaneira a preservação ambiental ao longo do trecho.

Além das condições estruturais, o trabalho enfoca as características dos materiais que compõem as camadas do pavimento existente, os aspectos construtivos, os equipamentos utilizados, a produção e os controles tecnológicos.

São apresentadas as análises dos resultados obtidos através de gráficos e quadros dos padrões de desempenho

do pavimento após a reciclagem, que objetivam também a formação de um banco de dados referencial.

Ao final, algumas considerações são elaboradas, referentes aos cuidados e às vantagens da utilização desta técnica.

2. CARACTERÍSTICAS DO TRECHO

O segmento da BR 354 analisado situa-se na região Centro-Oeste do Estado de Minas Gerais, entre os km 473 (Arcos) e 495,8 (Entrº MG 050), em uma extensão de 17 quilômetros. O relevo é predominantemente ondulado e a plataforma compreende 7,20 m de pista de rolamento e 2,50 m de acostamentos não pavimentados para cada lado. O tráfego comercial é da ordem de 3.000 veículos/dia, sendo 72% de veículos pesados. A estimativa de tráfego para o período de projeto de 15 anos é de $3,44 \times 10^7$ repetições do eixo padrão de 8,2 tf, calculada pelo critério do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América, USACE.

O pavimento então existente compunha-se de camada betuminosa com espessuras variando entre 4 a 26 cm, caracterizando os sucessivos recapeamentos recebidos ao longo do tempo.

A base granular, cuja espessura variava de 14 a 20 cm, apresentava graus de compactação entre 93% e 102% da massa específica aparente

máxima seca e umidade de equilíbrio com 1,5% abaixo da umidade ótima. Observou-se que os materiais da base alternavam-se ao longo de todo o segmento entre cascalhos de quartzo arenosos, cascalhos lateríticos e brita graduada.

A sub-base de cascalho de quartzo e saibro arenoso, com espessuras entre 10 e 20 cm, apresentava grau de compactação médio de 96% da massa específica aparente máxima seca e umidade de equilíbrio com 0,7% abaixo da umidade ótima.

As espessuras do reforço do sub-leito em argila variavam entre 10 e 20 cm, grau de compactação médio de 97% e desvio de umidade de 0,5% abaixo da umidade ótima.

O sub-leito apresenta solo residual predominado por siltes argilosos e argilas siltosas, com expansão média de 1,8% e Índice de Suporte Califórnia em torno de 7,0%.

3. ESTADO DE DEGRADAÇÃO DO PAVIMENTO

O estado de degradação superficial do pavimento era bastante avançado, apresentando trincamento generalizado da camada betuminosa, desconfiguração do abaulamento transversal da pista de rolamento, panelas e remendos em mau estado. Havia ocorrências de problemas estruturais em segmentos específicos,

ocasionados pela inexistência de drenagem sub-superficial e profunda.

As deformações reversíveis medidas com a viga Benkelman na superfície de rolamento, apresentavam valores médios da ordem de 76×10^{-2} milímetros. Concluiu-se que, na maioria do segmento, os defeitos originaram-se da fadiga do revestimento betuminoso, estando as camadas inferiores do pavimento relativamente íntegras na sua constituição.

4. PROPOSTA DE RECICLAGEM

O diagnóstico obtido das avaliações funcional e estrutural do pavimento indicou a adoção de reforço para atender à demanda de tráfego prevista para o novo período de projeto. Propôs-se a reciclagem a frio *in situ* da camada betuminosa com a incorporação de parte da base neste processo, nos segmentos onde as camadas subjacentes mantinham-se em razoáveis condições, com prevalência de defeitos oriundos do envelhecimento do revestimento. Esta nova camada exerceria o papel de base, com características mais nobres, aplicando-se sobre ela o revestimento betuminoso.

Preventivamente, indicou-se a execução de drenagem sub-superficial e profunda em todos os segmentos reciclados.

4.1 Tipo de Reciclagem

Reciclagem profunda com espessura de 15 cm foi empregada com adição de dois agentes estabilizadores:

- o cimento Portland, com largo emprego na engenharia rodoviária, que além de conferir melhoria nas características físicas dos materiais, proporciona também o aumento de resistência mecânica em camadas de pavimento;
- a espuma de asfalto, cuja

aplicação em reabilitação de pavimentos é recente no Brasil, também proporciona a elevação da resistência da camada tratada, sendo um processo de fácil execução, com a vantagem de liberação ao tráfego imediatamente após a mistura.

4.2 Caracterização do Material Fresado

Para caracterização do material fresado, foram coletadas amostras no campo pelo processo de fresagem, na espessura especificada de reciclagem, em pontos situados a cada 500 metros de pista. O mesmo equipamento (WR 2500) empregado nos serviços de reciclagem, foi utilizado nessa etapa.

Preliminarmente à dosagem, determinaram-se o teor de betume contido e a composição granulométrica da camada a ser reciclada, de maneira a avaliarem-se as necessidades de incorporação ou não de materiais, de forma a enquadrá-la dentro de uma faixa granulométrica contínua.

Por se tratar de camada betuminosa envelhecida, a velocidade de deslocamento da recicladora e a conseqüente rotação do tambor fresador, foram fatores fundamentais na obtenção de um material mais desagregado, sem grumos ou placas de concreto asfáltico. Para o caso em questão, a velocidade do equipamento variou entre 5 e 7 metros/minuto. As amostras avaliadas apresentavam teores remanescentes de asfalto, da ordem de 3% e enquadravam-se dentro das faixas "C" e no ramo graúdo da faixa "D" do DNER, não havendo a necessidade de incorporação de agregados.

4.3 Dosagem da Espuma de Asfalto e Cimento Portland

Definiu-se que o material reciclado

e estabilizado com asfalto e cimento Portland, atenderia à resistência à tração indireta, seca e saturada, mínimas de 400 Kpa e 200 Kpa respectivamente, medidas em corpos de prova moldados em cilindros Marshall com 75 golpes/face e submetidos ao ensaio de compressão diametral (Ensaio Brasileiro do Eng^o Lobo Carneiro). A mistura seria reciclada e compactada na umidade ótima com energia do proctor modificado ME 048 – DNER.

Na realização dos estudos laboratoriais, chegou-se a teores de 1,5% de cimento e 3,5% de espuma de asfalto CAP-20. Essa proporção de cimento e asfalto foi aplicada entre as estacas 9 a 35, 122 a 430, e 515 a 850.

4.4 Extensão e Quantidades

Os trabalhos foram realizados pela Construtora Pavisian Ltda., tendo sido reciclados 31.100 m³ de pavimento, com largura aproximada de 12,20 m, incluindo os acostamentos e a pista de rolamento. Por ser a BR 354 um expressivo corredor de tráfego, que interliga a região Noroeste à região Sul do Estado de Minas Gerais, a reabilitação do pavimento foi executada em meia pista, desviando-se o tráfego para a outra metade. Reciclaram-se aproximadamente 600 metros lineares de semiplataforma por dia.

4.5 Equipamento

Na execução dos serviços de reciclagem da pista da rodovia BR 354, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- recicladora Wirtgen WR-2500, dotada de sistema de dosagem, produção e espargimento de espuma de asfalto;
- motoniveladora CAT 140;
- distribuidor de cimento;
- caminhão tanque de água;

- caminhão tanque de asfalto CAP 20;
- rolo liso vibratório CA-25;
- rolo de patas vibratório CA-25;
- rolo de pneus CP-27.



Detalhe da distribuição do cimento pelo "spreader".

Algumas tarefas foram programadas antes da operação de reciclagem, de forma a evitarem-se transtornos e interrupções durante a jornada diária:

- a disponibilidade e funcionalidade das máquinas e equipamentos a serem empregados nos trabalhos;
- verificação da adequada fixação dos mangotes de alimentação de água e betume do comboio de reciclagem;
- o conhecimento por parte dos operadores dos teores de água e betume a serem adicionados na mistura.
- a temperatura do asfalto, bem como as propriedades de espumação em se tratando da taxa de expansão e o tempo de meia vida, necessários a uma boa distribuição.

Esses cuidados simples e rápidos fizeram parte da rotina preliminar de cada turno.

4.6 Reciclagem

A operação iniciou-se pelo espalhamento do cimento sobre a superfície, na taxa indicada pela dosagem. Utilizou-se, neste caso, o distribuidor mecânico rebocado por um

trator agrícola. Introduziu-se, então, o comboio de reciclagem operando na profundidade de corte e velocidade já estabelecidos.

A homogeneidade da mistura produzida para o ajuste da velocidade de trabalho foi avaliada visualmente.

Coletaram-se amostras para controles de umidade, densidade e resistência.

A compactação foi realizada por rolos vibratórios de aço pata curta e de pneus, seguindo imediatamente atrás do comboio reciclador, aproveitando-se ao máximo a umidade contida na mistura, minimizando-se a sua evaporação.

Esta prática mostrou ser eficaz, uma vez que a umidade é um fator crítico na obtenção da densidade. Por isso, eventuais aspersões de água foram necessárias para manter a umidade superficial.

Nos casos de adição de cimento, levou-se em conta que todos os trabalhos deveriam estar concluídos em até 2 horas após a mistura do cimento, em razão do "tempo de pega". Esta condição obrigou a execução dos trabalhos para a incorporação do cimento e espuma de asfalto em uma única passagem da recicladora, adotando-se comprimentos aproximados de 300 metros de corte longitudinal por vez. A junta longitudinal de construção foi situada no eixo da pista, evitando-se as trilhas de rodas. Adotou-se, também, uma sobreposição de 20 cm na execução da outra semipista.

Observou-se que o tamanho dos tanques de asfalto e água devem ser adequados, de maneira a permitir a execução do corte em toda a extensão acima referida, evitando-se paralisações desnecessárias para substituições.

Coube à motoniveladora, o trabalho de regularizar e conformar a superfície

da camada reciclada nos padrões de abaulamento e nível.



Comboio reciclador



Início da Reciclagem

Na rolagem final e acabamento, combinaram-se rolos pneumáticos e rolos lisos de aço, tomando-se os cuidados para que a superfície se mantivesse desempenada, homogênea, isenta de solas e segregações.

Uma vez concluído o acabamento, procedeu-se imediatamente aos controles de qualidade.

A cura da camada reciclada foi executada através da aplicação de emulsão asfáltica RR-2C, diluída na proporção de 70% de emulsão e 30% de água, na taxa de 1,0 a 1,2 litros/m², seguido de salgamento com areia seca e rolagem em uma única passagem do rolo pneumático. A liberação ao tráfego foi imediata, permanecendo pelo período mínimo de 7 dias sobre a camada reciclada. Posteriormente, foi sobreposto o revestimento betuminoso.

Ressalta-se a utilização da geogrelha de poliéster, fixada sobre as juntas longitudinais de construção antes da aplicação da camada betuminosa.



Compactação e corte da segunda faixa



Acabamento



Pintura de impermeabilização e cura



Salgamento com areia



Liberação ao tráfego



Execução dos drenos laterais



Execução do revestimento betuminoso. Detalhe da geogrelha fixada sobre a junta longitudinal da camada reciclada

5. CONTROLE DE QUALIDADE

Alguns controles foram necessários para avaliar o processo e a qualidade da camada reciclada. Os controles de processo referiam-se a todas aquelas verificações realizadas durante a execução dos trabalhos de reciclagem, tendo sido importantes na medida em que permitiam corrigir erros ou distorções que iriam contribuir para a má qualidade do produto acabado.

Destacaram-se como controles de processo:

- determinação prévia da umidade higroscópica da camada reciclada, para que fossem adicionados teores complementares à umidade ótima;
- controle da quantidade de cimento adicionado;
- controle de temperatura do asfalto;
- controle da taxa de expansão e tempo de meia vida da espuma de asfalto;
- espessura de corte.



Detalhe da medição da expansão e meia vida da espuma de asfalto

Os controles finais atestaram a qualidade do produto dentro dos critérios de aceitação, estabelecidos nas especificações técnicas do projeto. Para

a reabilitação da BR 354, definiu-se um plano de coleta de amostras a cada 200 metros, submetendo-as aos seguintes ensaios:

- granulometria por peneiramento (DNER-ME 080);
- teor de betume (DNER-ME 053);
- massa específica aparente máxima com energia do proctor modificado (DNER-ME 048);
- umidade higroscópica (DNER-ME 213);
- resistência à tração indireta por compressão diametral (DNER-ME 138);
- meia vida e taxa de expansão da espuma de asfalto;
- massa específica aparente *in situ* (DNER-ME 092);
- determinação das deflexões pela viga Benkelman (DNER-ME 024) a cada 20 metros;
- controle geométrico;
- extração de amostras na pista após 7 dias de liberação ao tráfego, através de sonda rotativa para obtenção do grau de compactação final.



Detalhe do corpo de prova após rompimento



Controle deflectométrico

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Textura

A distribuição granulométrica da camada de revestimento betuminoso reciclada juntamente com a base existente, enquadrou-se em sua maioria nas faixas "C" e "D" da Especificação do DNER-ES 303/97 - Base Estabilizada Granulometricamente".

A proporção de pedregulho variou entre 35% e 56% da mistura, enquanto que a fração intermediária e fina alternou entre 37% e 50%. A fração menor que 0,075 mm (# 200), variou entre 6% e 15%. Essas alterações ocorreram em função da variação da espessura da camada betuminosa. Mesmo assim, a camada reciclada apresentou estabilidade e resistência dentro dos limites esperados. Os teores de betume finais variaram entre 4% e 7,5%.

A mistura reciclada aceitou perfeitamente a energia do proctor modificado, não se verificando ruptura ou desagregações por excesso de compactação. A textura superficial fina proporcionou adequada aderência à pintura de ligação.

6.2 Massa Específica Aparente *In situ*

Em função da distribuição granulométrica e da energia de compactação, as densidades de campo da camada reciclada situaram-se em média entre 2000 e 2150g/dm³.

Isto proporcionou graus de

compactação preliminares e finais em torno do 100%, quando comparados com corpos de prova moldados na energia modificada e corpos de prova Marshall, respectivamente. Os volumes de vazios variaram entre 5% e 8%.

6.3 Resistência à Tração Indireta

Um dos principais parâmetros de avaliação da qualidade da camada reciclada é a resistência à tração indireta, medida nos corpos de prova Marshall após cura de 72 horas a 60°C. Considerando-se os teores adicionados de 1,5% de cimento e 3,5% de espuma de asfalto, as resistências seca e saturada encontradas, situaram-se em torno de 500 Kpa e 300 Kpa, respectivamente.

Entre as estacas 430 e 515, foram realizados testes com teores acima de 1,5% de cimento e 3,5% de espuma, verificando-se o aumento das resistências para valores médios de 620 Kpa seca e 490 Kpa saturada. Corpos de prova foram submetidos a ensaios de carga repetida, encontrando-se valores de até 5500 MPa de módulos resilientes. Em alguns locais, ocorreram trincamentos prematuros na fase de cura. Atribuiu-se o fato à elevação da rigidez da mistura.

Em análise técnica, mantiveram-se os teores de projeto.

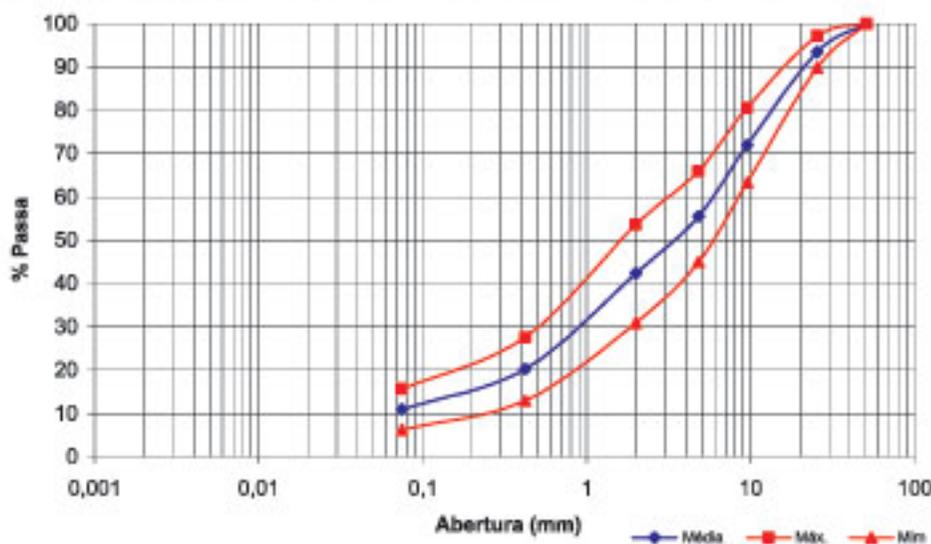
6.4 Controle Deflectométrico

Campanhas deflectométricas foram realizadas com o objetivo de aferir a regularidade do processo executivo e possibilitar o acompanhamento da redução das deflexões, na medida em que a nova estrutura fosse executada.

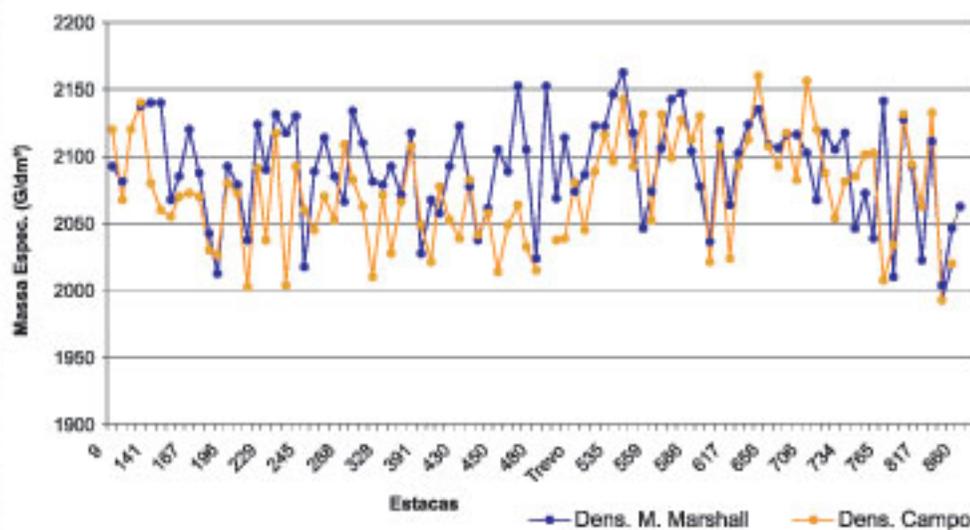
Os levantamentos foram executados de acordo com o Método DNER ME 024, com a utilização da viga Benkelman.

As medidas foram realizadas, a cada 20 metros, nas trilhas de roda interna e externa de cada semipista.

Quadro 01 - Distribuição granulométrica da camada reciclada



Quadro 02 - Massa específica aparente



As deformações elásticas na superfície de rolamento então existente da BR 354 apresentavam valores em torno de 75×10^{-2} mm, sendo que, logo após a execução da reciclagem, mantiveram-se praticamente idênticas. Posteriormente aos sete dias, constatou-se uma redução das deformações em torno de 37%. Essa redução ocorreu devido ao enrijecimento da mistura pela ação dos agentes estabilizadores, que contribuíram ativamente no aumento da resistência da mistura.

Esta redução nas deformações mostrou-se menos expressiva nos acostamentos onde se observou decréscimo de 23% em média. As

causas podem estar relacionadas provavelmente com a natureza dos materiais constituintes e a estrutura diferenciada do pavimento em relação à pista de rolamento.

Com a execução da camada betuminosa, na espessura de 7,5 cm na pista de rolamento, as deflexões regrediram a patamares inferiores à deflexão admissível (54×10^{-2} mm) estabelecida em projeto.

Entre as estacas 35 a 120 e 488 a 494, segmentos em corte, a camada reciclada não resistiu ao tráfego durante o período de cura. Observou-se excesso de umidade no sub-leito e a inexistência de dreno profundo,

optando-se pela reconstrução do pavimento após a execução do sistema de drenagem nestes intervalos.

Em novo levantamento realizado após dois anos de vida de serviço, verificou-se que as deformações elásticas características do pavimento ainda se mantêm próximas à prevista em projeto, com valores médios por volta de 41×10^{-2} mm.

6.5 Módulos Elásticos

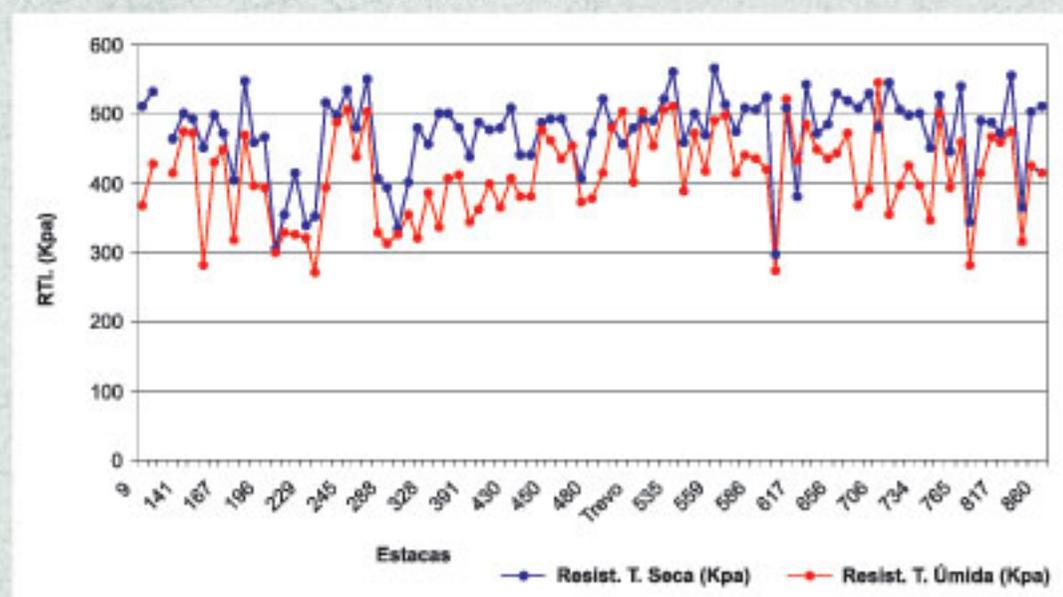
Uma série de corpos de prova foram submetidos a ensaios triaxiais de carga repetida, objetivando avaliar os módulos resilientes da mistura para os teores de cimento e asfalto de projeto, bem como para as experiências com teores variáveis realizadas na obra. Dessa forma, foi possível estabelecer uma comparação entre a resistência à tração indireta seca e os módulos elásticos, conforme Quadro 05.

7. CONCLUSÃO

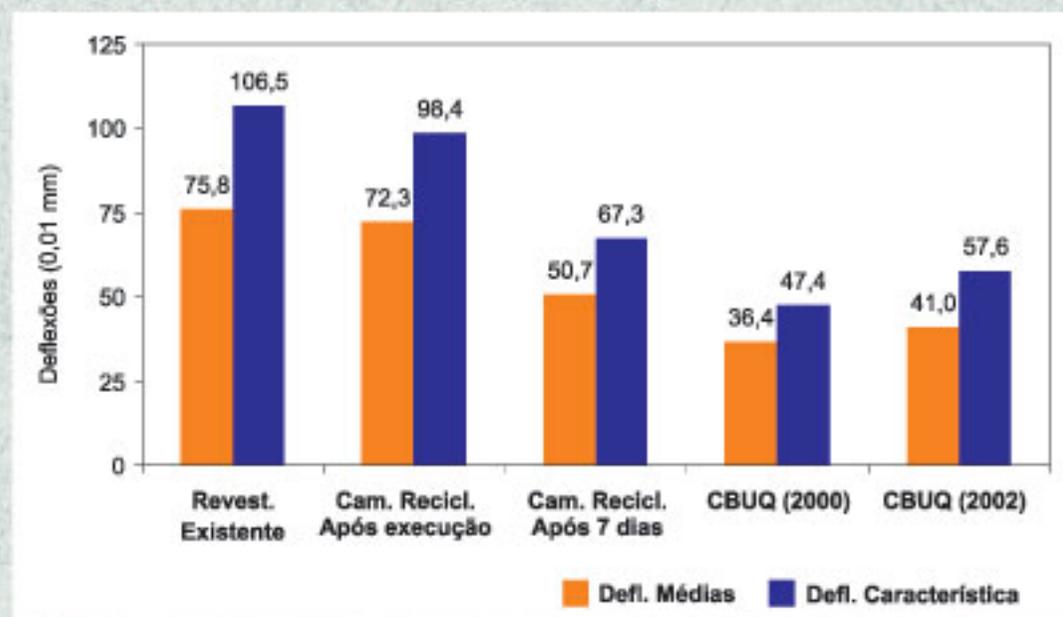
Para o alcance dos objetivos propostos no projeto de reabilitação de pavimentos, com utilização da técnica de reciclagem estabilizada com adição de cimento e espuma de asfalto, foram importantes alguns cuidados observados, conforme listados abaixo:

- controle adequado das quantidades e da uniformidade de aplicação do cimento;
- avaliação sistemática das propriedades de espumação do asfalto no que se refere à temperatura, taxa de expansão e meia vida;
- controle rigoroso da umidade da mistura reciclada durante o processo executivo, para facilitar adequada densificação do material, evitando o reprocesso;
- controle de compactação da mistura através do número adequado

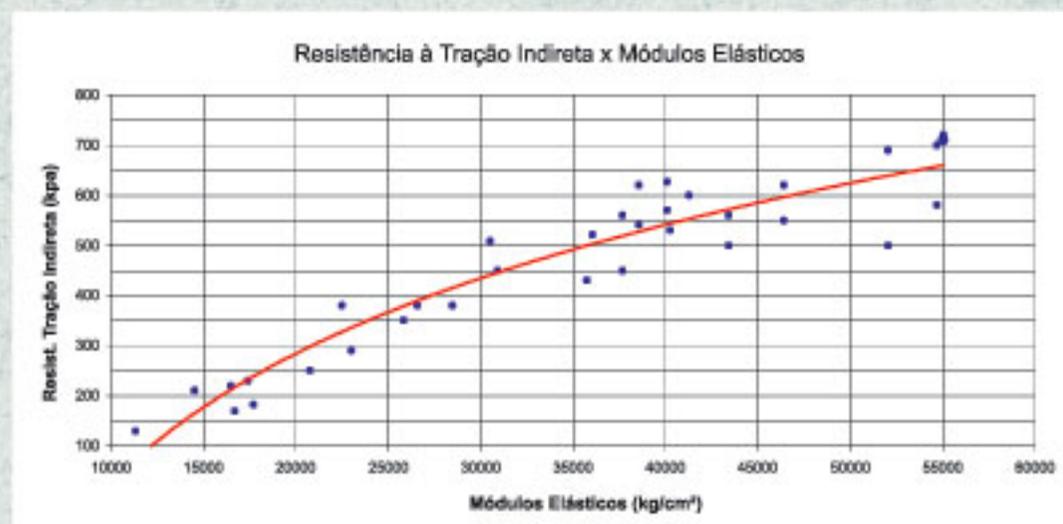
Quadro 03 - Resistência à tração indireta



Quadro 04 - Valores deflectométricos x tempo



Quadro 05 - Resistência à tração indireta x Módulos elásticos da mistura reciclada



de passadas do equipamento compactador,

- adoção da geogrelha nas juntas longitudinais de construção nos segmentos onde foram implantadas as terceiras faixas para tráfego pesado, com o objetivo de minimizar a reflexão de trincas

Na ocorrência de resistências à tração indireta muito acima dos valores mínimos previstos, é importante avaliar a compatibilidade da rigidez da camada reciclada com a estrutura do pavimento e o tráfego, para impedir o desenvolvimento de tensões e deformações acima do admissível na mesma.

A reabilitação do pavimento da BR 354, através da reciclagem com estabilização da camada de revestimento, atendeu plenamente o projeto. Após dois anos sob tráfego intenso e dois períodos de chuva, o seu desempenho funcional e estrutural apresenta-se satisfatório.

Ressalta-se a rapidez do processo executivo com pequena interferência no tráfego, não tendo sido registrada nenhuma ocorrência de acidentes durante a obra.

No tocante à preservação ambiental, a reciclagem proporcionou a total utilização da camada existente, evitando bota-foras e a abertura de áreas para a utilização de materiais naturais.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os envolvidos na obra, em especial ao Eng^o. Gutemberg Tourinho Fentanes, Eng^o. Alberto Aluísio da Silva, Eng^o. Marcio Eustáquio de Oliveira e Eng^o. Divino Ferreira, que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Os autores são engenheiros do DER/MG