

UTILIZAÇÃO DO REJEITO DO CORTE DE MÁRMORES E GRANITOS COMO FÍLER EM CONCRETO ASFÁLTICO¹

Cláudio Luiz Dias Leal²
Protasio Ferreira e Castro³

Resumo

A geração, o manuseio e o armazenamento seguro de rejeitos sólidos têm se tornado uma grande preocupação no Brasil. Enquanto o volume de rejeitos continua a crescer, a aprovação de instalações de processamento de rejeitos e de adequado armazenamento está se tornando cada vez mais difícil de ser obtida. Existem diferenças enormes nos tipos e nas características dos diferentes rejeitos sólidos, assim como também de aplicações para quais eles são adequados. Além disso, as experiências no uso dos rejeitos em estradas de rodagem pode variar consideravelmente dependendo das diferenças climáticas e dos procedimentos construtivos. O principal objetivo desse estudo foi investigar a potencialidade do uso de rejeitos industriais como fíler em misturas asfálticas. O potencial de uso do rejeito industrial é mostrado por meio de uma comparação de resultados de ensaio entre uma mistura de controle e misturas com diferentes teores de rejeito. O comportamento das misturas foi caracterizado por meio de um programa experimental utilizando diferentes teores de rejeitos e alguns métodos de ensaio. Estabilidade Marshall, tração indireta, módulo de resiliência e ensaio de velocidade do pulso ultra-sônico foram executados. Análise estatística foi aplicada aos resultados de ensaio. Por fim, os rejeitos industriais são um fíler barato, que podem ser utilizados em misturas betuminosas.

Palavras-chave: Concreto asfáltico; Resiliência; Rejeitos industriais; Fíler

¹ Trabalho a ser apresentado no 60º Congresso Anual Internacional da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – 25 a 28 de julho de 2005 – Belo Horizonte – MG.

² MSc Eng. Civil, Professor e Pesquisador do Núcleo de Pesquisa Aplicada à Arquitetura e Construção Civil, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos – RJ.

E-mail: cleal@cefetcampos.br

³ PhD, UNIFOA - Centro Universitário de Volta Redonda

E-mail: pcastro@iis.com.br

1 INTRODUÇÃO

O mau estado das rodovias brasileiras aumenta significativamente o custo de nossos produtos, fazendo com que o país perca competitividade no mercado internacional. A busca por novos materiais, técnicas de projeto e construção, é fundamental para melhorar o desempenho das rodovias, em resposta ao aumento do número de solicitações impostas pelo volume crescente de tráfego e maior peso dos veículos.

O concreto asfáltico pode ser o material de maior custo em um pavimento flexível, portanto a substituição de um de seus componentes, ou parte deles, por rejeitos industriais pode contribuir para redução de custo sem alterar significativamente as suas propriedades, além de diminuir o impacto ambiental causado pela deposição dos rejeitos.

Esta pesquisa tem como principal objetivo verificar a viabilidade técnica aproveitamento do rejeito do corte de mármore e granitos (RCMG) como fíler no concreto asfáltico.

Nos últimos anos, o conceito de desenvolvimento sustentável tem sido cada vez mais aplicado pelos setores produtivos. A consciência de que o gerenciamento dos rejeitos é uma questão estratégica para as empresas, tem levado muitos pesquisadores a buscar alternativas para o aproveitamento dos rejeitos industriais.

A Indústria da Construção Civil apresenta um dos maiores potenciais para aproveitamento de rejeitos não só os de seus próprios processos, como também os de outras indústrias. Na pavimentação, alguns rejeitos já são usados com sucesso como o resíduo de construção e demolição (RCD), cinza volante, material fresado de revestimentos, grânulos de pneus, escória de aciaria, etc.

O rejeito do corte de mármore e granitos é originado do processo de serragem dos blocos mármore e granitos, para produção de placas semi-acabadas. No Brasil, são geradas cerca de 240.000 toneladas de RCMG por ano, criando problemas ambientais, de estocagem e de manutenção de depósitos (MOURA, GONÇALVES E LEITE, 2002 apud BIGNO, 2002).

O corte dos blocos é feito com auxílio da lama do próprio processo, que tem o objetivo de resfriar as lâminas e servir como veículo abrasivo. A lama é constituída de pó, granelha e água. Quando a viscosidade da lama torna-se inadequada ao uso como veículo abrasivo, é descartada em lagoas ou barragens de deposição e até mesmo diretamente nos rios, causando sérios problemas ambientais.

Ultimamente com a crescente escassez dos recursos naturais, o aproveitamento do RCMG como fíler no concreto asfáltico poderá contribuir para a preservação ambiental, deixando-se de agredir o meio ambiente com a exploração de uma nova pedra para obtenção de fíler.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Em primeiro lugar foram coletados os materiais necessários à produção do concreto asfáltico e executados os ensaios de caracterização. Depois foi feita a dosagem do concreto asfáltico, usando-se o método Marshall, para obtenção de uma mistura de referência. Por fim, foi adicionado o rejeito e realizados os ensaios previstos no programa experimental: velocidade do pulso ultra-sônico, estabilidade, tração indireta e módulo de resiliência.

2.1 Caracterização dos Materiais

Os agregados, cimento asfáltico e o rejeito do corte de mármore e granitos, utilizados nessa pesquisa, foram coletados, respectivamente, na usina de asfalto da Empresa Imbé Construções e Comércio Ltda e IMIL. Em seguida os materiais foram submetidos a ensaios de caracterização, cujos resultados encontram-se nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1. Características dos agregados e rejeito

Abertura (mm)	Porcentagem passando (%)				
	Brita 1	Brita 0	Pó de Pedra	Fíler Calcário	RCMG
19	97,9	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	54,2	100,0	100,0	100,0	100,0
9,5	18,0	98,6	99,6	100,0	100,0
4,8	0,5	17,3	97,3	100,0	100,0
2,0	0,4	1,5	84,4	100,0	100,0
0,42	0,4	1,3	43,7	100,0	98,3
0,18	0,3	1,1	23,0	97,5	96,4
0,074	0,2	0,7	8,3	80,3	90,7
Índice de Forma	2,0	2,0	-	-	-
Massa Específica Real (kg/m ³)	2736	2716	2682	2791	2775
Abrasão Los Angeles(%)	40	40	-	-	-
Equivalente de Areia (%)	-	-	72,1	-	-

Tabela 2. Características do CAP 20

Ensaio	Resultado
Viscosidade Absoluta (p)*	2420
Viscosidade Saybolt-Furoll a 135 °C (s)	190,9
Dutilidade a 25 °C (cm)*	>150
Penetração (0,1 mm)	54
Ponto de Amolecimento (°C)	55,5
Índice de Suscetibilidade Térmica	0,3
Ponto de Fulgor (°C)*	348
Densidade Relativa a 25/25 °C	1,049

* Ensaios feitos pelo fabricante

Tabela 3. Composição química do RCMG

Composto	% em peso
CaO	49,86
SiO ₂	24,03
MgO	11,98
Al ₂ O ₃	5,46
Fe ₂ O ₃	3,78
K ₂ O	3,16
SO ₃	1,21
TiO ₂	0,42
MnO	0,06
SrO	0,03
ZrO ₂	0,02
RB ₂ O	0,01

2.2 Dosagem do Concreto Asfáltico e Adição do Rejeito

Para dosagem do concreto asfáltico foi usado o Método Marshall, com granulometria da mistura de acordo com a faixa “C” do DNER. As características da mistura obedeceram os limites estabelecidos pela especificação DNER-ES 313/97. Assim, o traço encontrado foi: 11,4% de brita 1; 32,9% de brita 0; 51,7% de pó de pedra e 5,7% de CAP.

Após a fixação do traço de referência, foram moldados 3 corpos de prova para cada ensaio do programa experimental: estabilidade Marshall, tração indireta (compressão diametral), módulo de resiliência e velocidade do pulso ultra-sônico. O rejeito foi adicionado ao concreto asfáltico, em quantidades crescentes, até a completa substituição do filer calcário. Dessa maneira, os percentuais de rejeito foram 35, 50, 70 e 100% em relação ao filer do traço de referência. Após as adições os corpos de prova foram submetidos aos ensaios do programa experimental.

2.3 Ensaios do Programa Experimental

2.3.1 Velocidade do pulso ultra-sônico

O ensaio de velocidade do pulso ultra-sônico baseia-se na variação da velocidade de propagação da onda sonora através de um meio sólido. Trata-se de um ensaio não destrutivo, que determina homogeneidade, vazios, fissuras, o módulo de elasticidade dinâmico e coeficiente de Poisson. O aparelho é constituído por um gerador e um receptor de pulso, dois transdutores (transmissor e receptor), um circuito medidor de tempo e um mostrador para leitura do tempo de propagação da onda (Figura 1).



Figura 1. Ensaio de velocidade do pulso ultra-sônico

A primeira fase do ensaio é a calibração do aparelho com uma barra metálica, já aferida. A superfície do corpo de prova deve ser plana e isenta de poeira, uma camada de vaselina ou graxa deve ser aplicada aos transdutores, para funcionar como acoplante. Depois os transdutores são arranjados, numa das três formas: transmissão direta, transmissão indireta e transmissão semi-direta. Na pesquisa o tipo de arranjo usado foi o de transmissão direta. Para cada corpo de prova foram feitas duas leituras, sendo a velocidade final a média das duas determinações.

Para o cálculo da velocidade do pulso ultra-sônico, utiliza-se a expressão:

$$V = \frac{L}{t}, \text{ onde:}$$

V = Velocidade do pulso ultra-sônico (km/s);
 L = Distância entre os dois pontos de acoplamento (mm);
 t = Tempo de propagação do pulso (μ s).
O ensaio foi executado de acordo com a NBR 8802/94.

2.3.2 Estabilidade Marshall

A estabilidade Marshall, apesar de contestada por alguns autores pela dispersão dos seus resultados e confinamento do corpo de prova (SENÇO, 1997), ainda é um dos parâmetros mais usados, no Brasil, para dosagem e controle de qualidade de misturas asfálticas. O equipamento para realização do ensaio é relativamente simples e barato, permitindo sua instalação em qualquer laboratório de campo. De acordo com o método DNER ME 043/95, os corpos de prova são colocados em um banho-maria a 60 °C por 30 minutos. Após esse período, eles são transferidos para o molde de ruptura, já aquecido, e levados à prensa Marshall, onde são submetidos a um carregamento com velocidade de 5 cm por minuto, até o rompimento. O valor da leitura, no instante do rompimento, é anotado para o cálculo da estabilidade. O resultado final é a média de pelo menos 3 resultados, expresso em N.

2.3.3 Tração por compressão diametral

A resistência à tração do concreto pode ser determinada pelo denominado método brasileiro, proposto por Lobo Carneiro e adotado por várias instituições normalizadoras internacionais (SOBRAL, 1984). Nesse método, a carga vertical é aplicada ao longo da geratriz do cilindro, fazendo com que ele fique sujeito a uma tensão de tração horizontal. Para o ensaio com misturas asfálticas é usada a prensa Marshall. Os corpos de prova devem ser mantidos em estufa na temperatura adotada para o ensaio: 25, 30, 45 ou 60 °C, por duas horas. Na pesquisa a temperatura de ensaio foi 30 °C. São necessários dois frisos metálicos curvos, interpostos entre o corpo de prova e os pratos da prensa, com objetivo de garantir a distribuição do carregamento ao longo das duas geratrizes opostas do corpo de prova. O corpo de prova é submetido a um carregamento com velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até sua ruptura (DNER ME 138/94).

A resistência à tração é determinada pela expressão:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH}, \text{ onde:}$$

σ_r – resistência à tração;
 F – carga de ruptura;
 D – diâmetro do corpo de prova;
 H – altura do corpo de prova.

2.3.4 Módulo de resiliência

O módulo de resiliência de um concreto asfáltico, é definido como a relação entre a tensão de tração normal ao plano vertical e a deformação específica resiliente neste mesmo plano, numa determinada temperatura (DNER ME 133/94).

$$MR = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t}, \text{ onde:}$$

MR – Módulo de Resiliência;

σ_t – Tensão de tração;

ε_t – Deformação específica recuperável.

SCHIMIDT et al. apud PINTO E PREUSSLER (1980), mostraram que o ensaio de tração indireta, é o mais indicado para avaliação das características resilientes de um concreto asfáltico. Para a realização do ensaio, o corpo de prova é colocado num gabarito apropriado, onde são montados os dois transdutores eletromecânicos do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transducer). Depois, o corpo de prova é colocado no pórtico e o conjunto levado para câmara termostática, onde permanece na temperatura de ensaio por duas horas. Nessa pesquisa a temperatura de ensaio foi 30 °C. A primeira etapa do ensaio, condicionamento do corpo de prova, é constituída pela aplicação de uma carga vertical repetida por 200 vezes, para determinar a menor carga capaz de fornecer um registro no oscilógrafo. A frequência de aplicação da carga é de 60 ciclos por minuto com duração de 0,10 segundo. Em seguida são feitas 300, 400 e 500 aplicações de carga, o resultado do ensaio é dado pela média dos valores de módulo correspondentes às aplicações dessas cargas. A figura 2 mostra detalhes do aparelho triaxial dinâmico.



Figura 2. Câmara termostática

O módulo de resiliência é calculado pela expressão:

$$MR = \frac{F(0,9976\mu + 0,2692)}{100\Delta H}, \text{ onde:}$$

MR – Módulo de resiliência, MPa;

F – Carga vertical repetida aplicada diametralmente no corpo de prova, N;

Δ – Deformação elástica ou resiliente registrada no oscilógrafo para 300, 400 e 500 aplicações de carga (F), cm;

H – Altura do corpo de prova, cm;

μ – Coeficiente de Poisson.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Para testar a hipótese da pesquisa: o efeito da adição do rejeito do corte de mármore e granito como filler ao concreto asfáltico, foi analisada a influência do fator controlável, adição do rejeito, nas variáveis de resposta: estabilidade Marshall, tração indireta, módulo de resiliência e velocidade do pulso ultra-sônico. Na análise foram empregadas ferramentas estatísticas, para facilitar a compreensão do efeito das adições nas propriedades do concreto asfáltico. A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios do programa experimental, média de três corpos de prova.

Tabela 4. Resultados dos ensaios do programa experimental

Misturas	Rejeito (%)	Densidade (kg/dm ³)	UPV (km/s)	Estabilidade (kgf)	Tração Indireta (kPa)	Módulo de Resiliência (MPa)
Referência	0	2,398	3,78	1066	790,6	2144
	35	2,401	3,78	959	748,1	2319
RCMG	50	2,391	3,78	949	764,8	3299
	70	2,403	3,79	1037	747,9	2610
	100	2,399	3,80	1076	691,9	2813

As Figuras 4 e 5 apresentam as relações entre o percentual de rejeito e os ensaios de velocidade do pulso ultra-sônico e estabilidade Marshall.

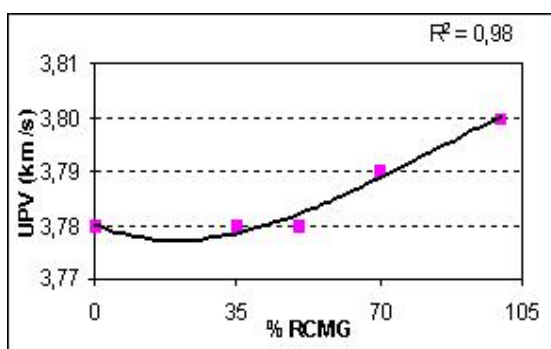


Figura 3. UPV X % RCMG

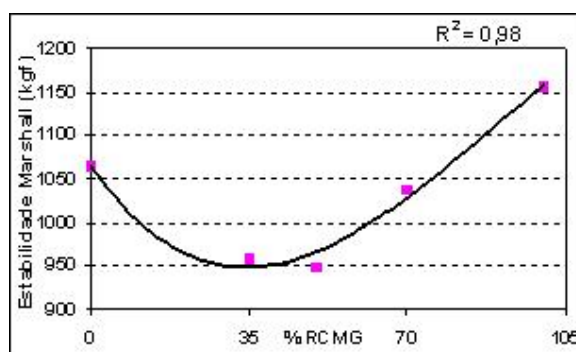


Figura 4. Estabilidade X % RCMG

3.1 Análise da Adição do Rejeito do Corte de Mármore e Granitos ao Concreto Asfáltico

3.1.1 Velocidade do pulso ultra-sônico

A velocidade do pulso ultra-sônico, por ser um ensaio não destrutivo, permitiu a análise de uma maior quantidade de resultados. Dessa forma, a ferramenta estatística empregada foi o teste ANOVA fator único do Microsoft Excel. A hipótese testada é:

H_0 : A adição do RCMG não causa alteração na velocidade do pulso ultra-sônico.

H_1 : A adição do RCMG causa alteração na velocidade do pulso ultra-sônico.

De acordo com a ANOVA do Excel, $F_{calculado} = 0,912$ e $F_{crítico} = 2,540$. Como $F_{calculado} < F_{crítico}$, a hipótese nula deve ser aceita, portanto a adição do RCMG não causa alteração significativa na velocidade do pulso ultra-sônico.

Para verificar as possíveis alterações na estabilidade, resistência à tração e módulo de resiliência, causadas pela adição do rejeito do corte de mármore e granitos, foi elaborado o seguinte teste de hipóteses para média:

H_0 : A adição do RCMG *não altera* a característica do concreto asfáltico.

H_1 : A adição do RCMG *altera* a característica do concreto asfáltico.

Nesse caso, α : 5%, gl: 3 e $t_{crítico} = 3,182$.

3.1.2 Estabilidade Marshall

Para os resultados da estabilidade Marshall, $t_{calculado} = 1,923$. Como $|t_{calculado}| < t_{critico}$, verifica-se que a hipótese nula deve ser aceita, portanto a adição do RCMG não causa alteração significativa na estabilidade Marshall.

3.2.3 Tração por compressão diametral

Para os resultados da resistência à tração, $t_{calculado} = 6,202$. Como $|t_{calculado}| > t_{critico}$, verifica-se que a hipótese nula deve ser rejeitada, assim a adição do RCMG causa alteração significativa na resistência à tração.

3.2.4 – Módulo de resiliência

Para os resultados de módulo de resiliência, $t_{calculado} = 3,241$. Como $|t_{calculado}| > t_{critico}$, verifica-se que a hipótese nula deve ser rejeitada, assim a adição do RCMG causa alteração significativa no módulo de resiliência.

3.3 Correlações

São apresentadas, a seguir, as correlações entre os ensaios do programa experimental e os percentuais de rejeito. Foram testados dois modelos, no primeiro fez-se correlações entre os ensaios do programa experimental e no segundo modelo acrescentou-se o percentual de rejeito. Para análise das correlações usou-se a ANOVA do Microsoft Excel. As Tabelas 5, 6 e 7 mostram os resultados obtidos, onde:

- d – Densidade aparente;
- v – Velocidade do pulso ultra-sônico;
- MR – Módulo de resiliência;
- t – Resistência à tração;
- m – Estabilidade Marshall;
- r – Porcentagem de rejeito;
- a, b e c – Coeficientes.

Tabela 5. Correlações para adição do RCMG

Correlação	Modelo	Resultado	Erro padrão
Densidade Aparente X UPV	$d = ae^{bv}$	$d = 1,338e^{0,154v}$	1,003
	$d = ae^{bv} e^{cr}$	$d = 2,917e^{-0,053v} e^{0,00006r}$	1,003
Módulo de Resiliência X UPV	$MR = ae^{bv}$	-	-
	$MR = ae^{bv} e^{cr}$	$MR = (1,19E+39)e^{-21,786v} e^{0,007r}$	1,141
Módulo de Resiliência X Resistência à Tração	$MR = ae^{bt}$	-	-
	$MR = ae^{bt} e^{cr}$	$MR = 224,638e^{0,00295t} e^{0,00509r}$	1,172
Módulo de Resiliência X Estabilidade Marshall	$MR = ae^{bm}$	-	-
	$MR = ae^{bm} e^{cr}$	$MR = 9162,33e^{-0,00139m} e^{0,00317r}$	1,161

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Faz-se necessário notar que as considerações finais aqui elaboradas estão limitadas aos materiais utilizados e à quantidade de ensaios realizados. Nesse sentido, a análise estatística permite afirmar que:

- a adição do rejeito do corte de mármore e granitos não causa alteração significativa nas propriedades do concreto asfáltico;
- a estabilidade aumenta com o aumento do percentual do RCMG;
- o módulo de resiliência aumenta com o aumento do percentual do RCMG.

Conclui-se finalmente que o objetivo principal dessa pesquisa, o aproveitamento do RCMG como fíler no concreto asfáltico, foi alcançado. A análise dos resultados do programa experimental permitiu concluir que o aproveitamento do RCMG é tecnicamente viável, em laboratório. Além do benefício ambiental através do aproveitamento do rejeito, menor necessidade de exploração dos recursos naturais e criação de novas áreas de deposição, existe a redução do custo do concreto asfáltico.

Sugere-se a continuidade desse trabalho de pesquisa por meio:

- da execução de trechos experimentais, com desempenho monitorado através de ensaios com corpos de prova extraídos “in situ” e ensaios não destrutivos como velocidade de pulso ultra-sônico, viga Benkelman, e Falling Weight Deflectometer (FWD).
- da utilização do ensaio de velocidade do pulso ultra-sônico para avaliação da densidade aparente e da estabilidade Marshall do concreto asfáltico no campo.
- da utilização do ensaio de velocidade do pulso ultra-sônico para inspeção do concreto asfáltico, com objetivo de promover manutenção preventiva.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET-CAMPOS e ao CNPq pelo apoio a essa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802. **Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultra-Sônica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1994.
- 2 BIGNO, I. C. **Aproveitamento do Resíduo de Corte de Rochas Ornamentais como Fíler Mineral em Materiais Compósitos de Matriz Polimérica e Cimentícia**. Niterói, 2002. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2002.
- 3 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral** – Método de Ensaio, DNER ME 138/94 – Rio de Janeiro – 1994.
- 4 _____. **Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência** – Método de Ensaio, DNER ME 133/94 – Rio de Janeiro – 1994.
- 5 _____. **Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall** – Método de Ensaio, DNER ME 043/95 – Rio de Janeiro – 1995.
- 6 _____. **Pavimentação – Concreto Betuminoso** – Especificação de Serviço, DNER ES 313/97 – Rio de Janeiro – 1997.

- 7 OLIVEIRA, T. M. **Rejeito em Plástico: Um Estudo do Potencial de Aplicação na Construção**. Niterói, 2002. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2002.
- 8 PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Módulos Resilientes de Concretos Asfáltico**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1980.
- 9 SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Editora Pini, 1997.
- 10 SANTANA, H. **Considerações Sobre os Nebulosos Conceitos e Definições de Fíler em Misturas Asfálticas**. Reunião Anual de Pavimentação, 29., 1995, Cuiabá. Anais... Cuiabá: Associação Brasileira de Pavimentação, 1995.
- 11 SOBRAL, H. S.– **Propriedades do Concreto Endurecido**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1984.
- 12 THE ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. Second Printing. Manual Series nº 4 (MS - 4), Maryland, 1966.

USE OF MARBLE AND GRANITE WASTE DUST IN THE ASPHALT CONCRETE AS FILLER

*Cláudio Luiz Dias Leal
Protasio Ferreira e Castro*

Abstract

The generation, handling and safe disposal of solid wastes has become a major concern in Brazil. While the volume of wastes continues to grow, approval of facilities for waste processing and proper disposal is becoming more difficult to obtain. There are vast differences in the types and characteristics of different solid waste materials, as well as the applications for which they may be suitable. Experiences concerning waste materials usage in highways can vary considerably depending on climatic differences and construction procedures. The primary objective of this study was to investigate the feasibility of using industrial waste as filler to asphalt mixtures. The potential use of industrial waste is shown through a comparison of test results between a control mix and mixes of different waste content. The mixture's behavior was characterized through an experimental program consisting of different industrial waste content and several test methods. Marshall stability, diametral indirect tensile test, resilient modulus and Ultrasonic Pulse Velocity tests were carried out. Statistical analyses were applied to the test results. Finally, waste materials are a cheap filler that can be used in bituminous mixes.

Key-words: Asphalt Concrete; Resilience; Industrial Rejects; Filler.