

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DA SERRAGEM DE COURO CURTIDO AO CROMO NO MICRORREVESTIMENTO ASFÁLTICO.

Karine Krummenauer(1); Jairo José de Oliveira Andrade(2)
(1) Técnica Química em Couro, Arquiteta, Mestre em Engenharia.
karinekruarq@ig.com.br

(2) Professor Doutor. Universidade Luterana do Brasil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Energia, Ambiente e Materiais. (ULBRA/PPGEAM); Pontifícia Católica do Rio Grande do Sul (PUC/RS)
jairo@cpgec.ufrgs.br

RESUMO

Efetou-se um estudo sobre a incorporação do resíduo serragem de couro curtido ao cromo no microrrevestimento asfáltico a frio (MRA), através do processo de mistura seca, ou seja, como parte da composição dos agregados. Este resíduo, oriundo da operação de rebaixe, apresenta-se em grande volume (média de 4 kg por couro), e contém de 3 a 6% de cromo III. Segundo a norma brasileira NBR 10004/87 da ABNT é classificado como resíduo classe I – perigoso, necessitando disposição em aterro de resíduos industriais perigosos (ARIP). A opção por este estudo justifica-se pela necessidade de estabelecer condições sustentáveis aos processos industriais, em vista que 90% das indústrias coureiras contribuem para o agravamento dos problemas ambientais com a geração deste tipo de resíduo. Foram realizados projetos laboratoriais de MRA, de acordo com métodos especificados pela NBR 14948/2003, com adições, em relação à massa asfáltica, de 0,3%; 0,5%; e 0,7% de resíduo e sem adição de fibra. De acordo com a especificação técnica de serviço DNER-ES 389/1999 fez-se a aplicação experimental do MRA num trecho de 320 metros da rodovia Hélio M. Salles (km 215) na cidade de São Sebastião da Gramma – SP. Os resultados analisados demonstraram a potencialidade técnica e econômica da incorporação do resíduo no MRA.

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais é relevante a necessidade de estabelecer condições sustentáveis aos processos industriais. Tendo em vista que toda indústria coureira contribui significativamente para o agravamento dos problemas ambientais com a geração de resíduos sólidos, o tema proposto busca como alternativa de disposição a incorporação da serragem de couro curtido ao cromo no microrrevestimento asfáltico a frio (MRA).

O processo de curtimento utilizado por cerca de 90% das indústrias de processamento de couros é o curtimento mineral com sais de cromo, gerando resíduos com a presença do metal cromo (TEIXEIRA et al., 1999).

A serragem de couro curtido ao cromo é um resíduo oriundo da operação de rebaixe, que tem como função uniformizar a espessura do couro (BASEGIO e BERGMANN, 1999), após a operação de curtimento, neste caso ao cromo, o que é feito pelo lado carnal. É de grande preocupação ambiental, pois se apresenta em grande volume (média de 4kg por couro), contendo de 3 a 6% de óxido de cromo trivalente que, conforme ABNT – NBR

10004/87, faz parte dos resíduos classe I – perigosos, o mesmo tem uma composição química estável de difícil biodegradação, necessitando tratamento e disposição adequada (OLIVEIRA e VILELA, 1999).

Conforme dados da AICSUL (Associação da Indústria e Curtumes do Rio Grande do Sul), em 2004 houve uma produção nacional de aproximadamente 26 milhões de couros curtidos ao cromo, correspondendo a aproximadamente 104 mil toneladas de serragem, que geralmente são descartados em aterros como solução paliativa ao problema.

Paralelamente ao problema de destinação do resíduo em questão, destaca-se a necessidade de manutenção de rodovias, que é uma operação problemática e de alto custo, porém absolutamente vital para o conforto, economia e segurança dos usuários que trafegam pelas mesmas (REIS e SANTO, 1999).

Dentre os processos empregados para a recuperação das rodovias está o microrrevestimento asfáltico (MRA) que combina a tecnologia dos asfaltos modificados com copolímeros e a opcional adição de fibras. O MRA é uma mistura a frio, de emulsão modificada por polímeros do tipo copolímero de butadieno estireno (SBS) ou borracha de butadieno estireno (SBR), agregado mineral, material de enchimento (também denominado filer), água, aditivos químicos para controle da velocidade de ruptura da emulsão e, dependendo do projeto, aditivos sólidos como fibras. As fibras proporcionam melhoria das propriedades mecânicas de flexibilidade do revestimento. Esta mistura é de consistência fluída, espalhada sobre uma superfície preparada. O MRA pode ser empregado como camada selante, impermeabilizante, rejuvenescedora ou como camada antiderrapante do pavimento (DNER-ES 389/1999).

No Brasil, do total de extensão rodoviária, apenas 9,5 % (164.246 km de rodovias) são pavimentadas e 90,5 % (1.560.678 km) não são pavimentadas. Na Região Sul do Brasil, abrangendo os Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, 7% correspondem a rodovias pavimentadas (32.443 km) e 93% a rodovias não pavimentadas (443.648 km). A partir desses dados, constata-se a necessidade de implementar programas federais e estaduais de pavimentação da rede rodoviária (ABEDA, 2001).

Este estudo, dependendo dos resultados de desempenho do sistema, poderá tornar-se uma alternativa de disposição, viável técnica e econômica, evitando a disposição do resíduo em aterros sanitários como solução paliativa ao problema.

2. OBJETIVO

O presente trabalho objetiva o estudo da viabilidade técnica da utilização da serragem de couro curtido ao cromo, quanto à potencialidade de aplicação como fibra no microrrevestimento asfáltico a frio, de modo comparativo ao projeto sem adição de fibras.

Através de ensaios laboratoriais avaliar as seguintes propriedades do sistema, de acordo com os métodos:

- ▶ determinação de perda por abrasão úmida - WTAT – (NBR 14746/2001);
- ▶ determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT – (NBR 14841/2002);

- ▶ determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro – (NBR 14798/2002);
- ▶ ensaio de lixiviação – (NBR 10005/1987).

A partir dos resultados dos ensaios de projeto com relação ao melhor percentual de resíduo obtido, proceder-se-á a execução em nível prático, com a aplicação em um trecho rodoviário

E, a partir da determinação do teor ótimo de emulsão asfáltica nos projetos de MRA, verificar a viabilidade econômica da incorporação da serragem de couro curtido ao cromo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Identificação dos Materiais Utilizados

A Tabela 1 apresenta dados de identificação quanto ao tipo e natureza dos materiais constituintes no MRA.

Tabela 1 – Identificação dos materiais constituintes no MRA.

Material	Tipo	Natureza
Agregados	Pó de pedra	Mineral basáltico
	Pedrisco fino	Mineral basáltico
	Pedrisco grosso	Mineral basáltico
Filer	Hidróxido de cálcio	Inorgânico, com teor máx. de 5% de CO ₂
Fibra	Resíduo – Serragem de couro curtido ao cromo	Material orgânico com curtimento mineral, de carga catiônica.
Emulsão asfáltica	Emulsão asfáltica RL – 1C	Orgânico, catiônico de ruptura lenta com 3% polímero SBS.
Aditivo	Retardador de ruptura	Material orgânico

3.1.2 Resíduo (Serragem de Couro Curtido ao Cromo)

Por ser um resíduo oriundo de diferentes indústrias coureiras, resultante de diferentes processos, não pode ser considerado como um produto padronizado, portanto fez-se análise química comparando-o aos parâmetros de análise de couro wet-blue.

Na Tabela 2 pode-se observar os valores obtidos nos ensaios químicos do resíduo.

Tabela 2 – Análise química da serragem de couro curtido ao cromo.

Ensaio	Resultados	Unidade	Parâmetros para couro wet-blue NBR13525/1995
Caracterização química			
Teor de óxido de cromo	3,92	% em massa	mín. 3,5%
pH	3,34	-	não inferior a 3,5
Cifra diferencial	1,13	-	não superior a 0,7
Substâncias voláteis	46,8	% em massa	50 a 60%
Cinza total sulfatada	7,66	% em massa	máx. 12%

3.1.3 Agregados

A Tabela 3 apresenta os valores dos ensaios dos agregados. As especificações dos agregados para MRA são normalizadas pela NBR 14948/2003.

Tabela 3 – Valores dos ensaios realizados nos agregados.

Ensaio	Pó de pedra	Pedrisco fino	Pedrisco grosso	Especificações
				NBR 14948/03
Equivalente de areia (%)	70	-	-	mín. 60%
Resistência da abrasão Los Angeles(%)	-	-	17	máx.40%
Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio (%)	-	6	8	máx. 15%
Caracterização da fração fina por meio da absorção de azul-de-metileno (mg/g)	4	-	-	máx. 10
Determinação da massa unitária (g/cm ³)	1,585	1,410	1,358	-

3.1.4 Emulsão Asfáltica

Os dados apresentados na Tabela 4 são valores dos ensaios realizados na emulsão asfáltica e no resíduo da mesma, fornecidos mediante laudo pelo fabricante do produto.

Tabela 4 – Valores dos ensaios realizados na emulsão asfáltica.

Ensaio	Resultados	Unidades	Limites NBR (14948/2003)
Determinação da viscosidade Saybolt Furol	25	segundos	máx. 70
Determinação da peneiração	0,02	%	0,15
Determinação da sedimentação	1,5	%	5
Determinação da carga de partícula	Positiva	-	Positiva
Determinação do resíduo de destilação	62,3	%	62,0
Recuperação elástica no dutilômetro	77,5	%	60
Determinação da penetração	66	mm	mín. 45
Determinação do ponto de amolecimento-método anel bola	56	°C	mín. 55

3.1.5 Filer – Hidróxido de Cálcio

O hidróxido de cálcio empregado é do tipo CH –1, cuja composição obedece à norma brasileira NBR 7175/1992, com tolerância quanto ao teor de CO₂ de até 5%, ou seja, uma cal com baixo teor de impurezas (GUIMARÃES, 2002).

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos nos ensaios realizados do hidróxido de cálcio.

Tabela 5 – Análise química do hidróxido de cálcio.

Ensaio	Resultados	Unidade	Metodologia
Hidróxido de cálcio	86,2	% em massa	Titulometria
Teor de óxido de cálcio disponível	65,2	% em massa	Titulometria
pH	12,5	-	-

3.2 MÉTODO

3.2.1 Determinações Preliminares

As determinações preliminares compreendem procedimentos para verificação da viabilidade da incorporação do resíduo, necessários para o desenvolvimento dos ensaios experimentais definitivos nos projetos de mistura do MRA.

3.2.1.1 Determinação do tipo de incorporação do resíduo no MRA

O resíduo foi utilizado na composição de mistura do MRA através do processo de mistura seca, ou seja, como parte da composição dos agregados, por referência ao processo com utilização de fibras, utilizadas para aumentar a flexibilidade e a resistência do sistema de MRA (REIS e SANTO, 1999).

3.2.1.2 Tratamento preliminar do resíduo

a) Enquadramento do resíduo em relação a granulometria especificada para os agregados conforme DNER ES 389/1999

Para que o resíduo apresentasse uma granulometria homogênea, com enquadramento na granulometria especificada aos agregados, o material foi previamente moído.

Para determinação da composição granulométrica dos materiais, os mesmos foram submetidos ao ensaio de análise granulométrica por peneiramento (DNER-ME 083/1998).

A Tabela 6 apresenta a composição granulométrica dos seguintes materiais constituintes do MRA: pó de pedra, pedrisco fino; pedrisco grosso; a cal; e o resíduo.

Tabela 6 – Composição granulométrica dos materiais constituintes do MRA.

Peneira (DNER-EM 035/95)		Pó de pedra	Pedrisco Fino	Pedrisco Grosso	Resíduo	Cal
ABNT	mm					
3/8'	9,5	-	100,0	100,0	-	
Nº 4	4,75	100,0	91,0	70,4	99,3	
Nº 8	2,36	79,8	37,6	14,0	92,61	
Nº 16	1,18	60,2	16,0	5,4	78,72	
Nº 30	0,60	44,2	8,4	4,3	59,27	
Nº 50	0,30	32,3	5,7	3,8	36,7	
Nº 100	0,15	22,8	4,2	2,6	13,96	100,0
Nº 200	0,075	16,2	3,1	1,9	3,18	98,5

Observando a Tabela 6 pode-se verificar que a granulometria do resíduo apresenta uma maior similaridade granulométrica com o pó de pedra em relação aos demais materiais.

b) Determinação da sedimentação – NBR 6570/2000

Com a finalidade de verificar a compatibilidade do resíduo com a emulsão, submeteu-se o resíduo ao ensaio de sedimentação. Realizou-se este ensaio de modo comparativo, ou seja, com adição de 0,3% ; 0,5%; 0,7% e 1,0%, em massa, do resíduo em 550g de emulsão asfáltica catiônica e colocados em provetas. Conforme a NBR 6570/2000,

após cinco dias determinou-se os resíduos asfálticos de porções da amostra do topo e do fundo da proveta (Figura 1). O resultado da sedimentação é a diferença entre os resíduos de topo ou de fundo expresso em porcentagem.



Figura 1 – Preparação do ensaio de sedimentação.

Verifica-se que, conforme os valores apresentados na Tabela 7, nenhum dos percentuais de adições de resíduo empregados excedeu a especificação máxima de 5% estabelecida pela NBR 14948/2003. O bom desempenho talvez se atribua ao fato do resíduo possuir a mesma carga química da emulsão asfáltica, ou seja, catiônica.

Tabela 7 – Ensaio de sedimentação 5 dias na emulsão asfáltica com adição do resíduo.

Material		Valores da sedimentação
550g emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta – RL 1C	0,3% resíduo	0,6 %
	0,5% resíduo	1,1 %
	0,7% resíduo	1,3 %
	1,0% resíduo	1,6 %
Especificação máx. 5% de resíduo precipitado ou flotado – NBR 14948/2003		

c) Estabelecimento dos percentuais de resíduos a serem incorporados na composição de mistura dos projetos, a partir do ensaio de determinação do tempo mínimo de mistura – NBR 14758/2001.

Este ensaio permite verificar o tempo em que se desestabiliza a mistura dos constituintes do MRA, para posterior desenvolvimento laboratorial de projeto e avaliação do desempenho do sistema.

Realizou-se este ensaio com adições de 0,3 % ; 0,5%; 0,7% ; 1,0% ; 1,5%, em massa, de resíduo e sem resíduo na mistura base composta de agregados, emulsão asfáltica, filer, aditivo e água (Figura 2).



Figura 2 – Execução do ensaio de mistura.

De acordo com a NBR 14948/2003, o tempo de estabilidade de mistura mínima é de 120 segundos. Os valores de tempo apresentados na Tabela 8 mostram que somente as amostras com adições de 0,3 % ; 0,5%; 0,7% de resíduo e sem resíduo alcançaram o tempo mínimo especificado pela norma. Portanto, resolveu-se trabalhar nos projetos com estas adições, excluindo os projetos de mistura com adições de 1,0% e 1,5% de resíduo.

Tabela 8 – Ensaio da determinação do tempo mínimo de misturação.

Material		Valores
Mistura base (Tabela 9)	Sem resíduo	Maior que 120 seg
	0,3% resíduo	Maior que 120 seg
	0,5% resíduo	Maior que 120 seg
	0,7% resíduo	Maior que 120 seg
	1,0% resíduo	110 seg
	1,5% resíduo	30 seg
Especificação NBR 14948/2003		Tempo mín. 120 segundos

3.2.1.3 Composição do traço de mistura dos projetos de MRA

A composição granulométrica da mistura dos materiais constituintes do MRA deve satisfazer os requisitos das faixas (percentagem em massa passando nas respectivas peneiras) que, conforme a especificação de serviço DNER-ES 389/1999, podem ser: faixa II, III, ou IV, bem como as tolerâncias representadas pela faixa de trabalho, que representam o estreitamento da faixa granulométrica.

A composição do traço de mistura dos projetos, apresentada na Tabela 9 , é realizada a partir do ensaio granulométrico dos materiais constituintes da mistura (Tabela 6), e posterior a isto, ajustam-se os percentuais correspondentes destes materiais incorporados na mistura até o enquadramento na faixa requerida indicada pelo projetista. A *International Slurry Seal Association* (ISSA) recomenda a faixa III para restauração da camada de revestimento do pavimento (BETUNEL, 1994).

Tabela 9 – Composição do traço da mistura dos projetos de MRA.

MATERIAIS	PROJETOS			
	1	2	3	4
	s/ resíduo	0,3% resíduo	0,5% resíduo	0,7% resíduo
Pó de pedra (%)	49,0	48,7	48,5	48,3
Pedrisco fino (%)	25,0	25,0	25,0	25,0
Pedrisco grosso (%)	25,0	25,0	25,0	25,0
Resíduo (%)	0,0	0,3	0,5	0,7
Cal (%)	1,0	1,0	1,0	1,0
(% sobre a massa da mistura seca)				
Aditivo - 0,4%				
Água - 10%				
Emulsão %				
<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio WTAT (NBR 14841/2002) - 10%,12%, 14% e 16% • Ensaio LWT (NBR 14841/2002) - 12%,14%, 16% e 18% • Ensaio de coesão (NBR 14798/2002) - % teor ótimo de emulsão 				

Na tabela 10 mostra-se que a composição granulométrica de todos os projetos de mistura enquadraram-se na faixa III da especificação de serviço do DNER-ES 389/1999.

Tabela 10 – Composição granulométrica dos projetos de mistura do MRA.

Peneira (DNER-EM 035/95)		PROJETOS				Faixa III	Faixa de Trabalho
ABNT	mm	1	2	3	4		
		Sem resíduo	Resíduo				
			0,3%	0,5%	0,7%		
3/8'	9,5	100	100	100	100	100-100	100-100(±5)
Nº 4	4,75	90,4	90,3	90,3	90,3	70-90	85-90 (±5)
Nº 8	2,36	53,0	53,0	53,1	53,1	45-70	48-58 (±5)
Nº 16	1,18	35,8	35,9	36,9	36,0	28-50	31-41 (±5)
Nº 30	0,60	25,8	25,9	25,9	25,9	19-34	21-31 (±5)
Nº 50	0,30	19,2	19,2	19,2	19,2	12-25	14-24 (±5)
Nº 100	0,15	13,9	13,8	13,8	13,8	7-18	11-17 (±3)
Nº 200	0,075	10,2	10,1	10,1	10,1	5-15	8-12 (±2)

3.2.2 Ensaio Experimental de Desempenho

Definido o tipo de processo de incorporação do resíduo no MRA (processo seco), o tratamento preliminar do resíduo e o traço de mistura dos materiais constituintes dos projetos do MRA (sem resíduo e com 0,3%, 0,5% e 0,7% de resíduo), foram realizados os ensaios experimentais para verificação do desempenho dos referidos projetos.

3.2.2.1 Determinação de perda por abrasão úmida – WTAT (NBR 14746/2001)

É um ensaio de desempenho que determina o desgaste de mistura de MRA sob condições de abrasão úmida, que por diferença de massa se verifica a perda de material pétreo do corpo-de-prova, onde se estabelece o teor ótimo de emulsão de uma dada mistura que

compõe o MRA. Sua designação também é abreviada pela sigla WTAT, que significa *Determination of Wet Track Abrasion Test*.

A mistura dos materiais, conforme cada projeto (Tabela 9), foi preparada e moldada em 4 corpos-de-prova por projeto (Figura 3), num total de 16 corpos-de-prova, com diâmetro de 279 mm.



Figura 3 – Corpos-de-prova.

Medem-se as massas iniciais dos corpos-de-prova (M1), antes de serem submetidos ao desgaste mecânico em equipamento do ensaio de abrasão úmida (Figura 4a e 4b).



Figura 4a – Equipamento do ensaio de perda por abrasão úmida.



Figura 4b – Detalhe do equipamento do ensaio de perda por abrasão úmida.

Após o desgaste, é medida as massas finais dos respectivos corpos-de-prova (M2). A perda de massa é expressa em total de gramas perdidas por unidade de área desgastada.

A perda por abrasão se dá pela expressão: $M = (M1 - M2)$, sendo o valor obtido em M multiplicado pela área da amostra submetida ao desgaste.

3.2.2.2 Determinação de excesso de asfalto e adesão de areia (NBR 14841/2002)

Este ensaio permite avaliar o efeito da compactação, as características de deformação de camadas de mistura do microrrevestimento, e o limite máximo do teor de asfalto da mistura, com o objetivo de evitar exsudações sob ação do tráfego, simulando-se a ação do tráfego, em um equipamento LWT (*Loaded Wheel Tester*) (Figura 5).



Figura 5 – Equipamento LWT operação.

Realizou-se este ensaio num total de 16 corpos-de-prova (Figura 6), com dimensões de 76 mm de largura e 400 mm de comprimento, entre os projetos de mistura descritos na Tabela 9.



Figura 6 – Preparação dos corpos-de-prova.

Este ensaio compreende duas etapas. Primeiramente submete-se o corpo-de-prova, a ação compactadora do movimento de uma roda de borracha sob condições de carga e de número de ciclos fixos (1000 ciclos), para que ocorra a exsudação da emulsão asfáltica (Figura 7).

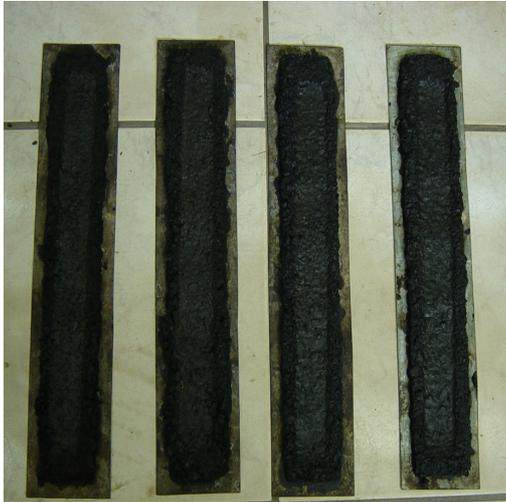


Figura 7 – corpos-de-prova preparados para etapa de exsudação.

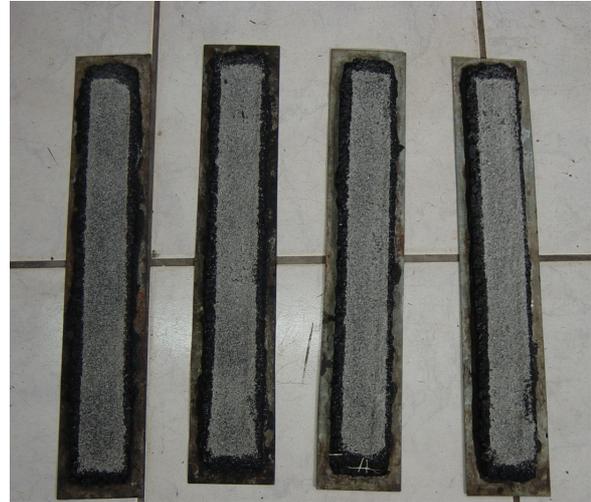


Figura 8 – corpos-de-prova preparados para etapa da adesão de areia.

Após esta primeira etapa, faz-se a determinação da massa do corpo-de-prova em ensaio, e registra-se como massa inicial (M1).

Na segunda etapa espalha-se de modo uniforme 200 gramas de areia aquecida a 80°C no corpo-de-prova (Figura 9), e submete-o novamente a 1000 ciclos no equipamento LWT (Figura 8). Após a execução desta etapa, faz-se a medição de massa do corpo-de-prova e registra-se como massa final (M2).



Figura 9 – Colocação da areia no corpo-de-prova.

O resultado do ensaio é obtido pelo cálculo de adesão de areia, a partir da diferença de massa, relatado em gramas. A adesão de areia é dada pela expressão: $AA = M1 - M2$.

3.2.2.3 Determinação do teor ótimo de emulsão asfáltica

O teor ótimo de emulsão asfáltica a ser aplicado no projeto de mistura de MRA é o ponto onde ocorre a intersecção das curvas a partir dos valores obtidos nos ensaios de perda por abrasão úmida e de excesso de asfalto e adesão de areia em relação ao percentual de emulsão incorporada, projetados em gráfico (Figura 10).

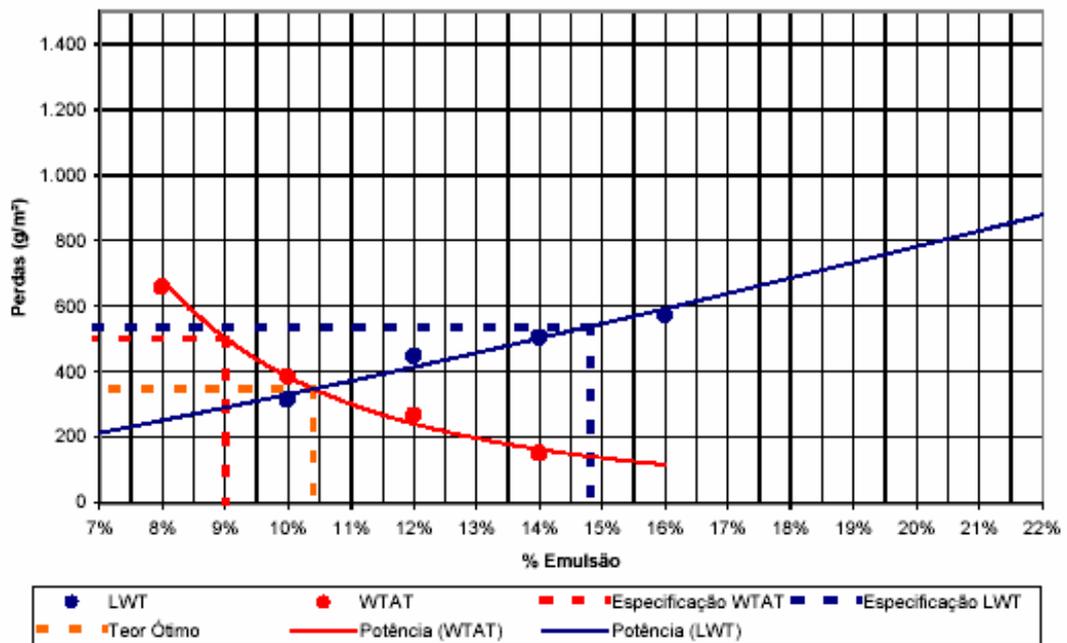


Figura 10 – Determinação do teor ótimo de emulsão asfáltica a partir da relação dos valores obtidos nos ensaios de perda por abrasão úmida e excesso de asfalto e adesão de areia, com adição de 0,3% (em massa) de resíduo incorporado no MRA.

Para exemplo desta determinação, aplicou-se em gráfico os valores obtidos nos ensaios da determinação de perda por abrasão úmida e da determinação de excesso de asfalto e adesão de areia do projeto de mistura com adição de 0,3% de resíduo incorporado no MRA descritos na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados obtidos nos ensaios de perda por abrasão úmida e de excesso de asfalto e adesão de areia do projeto com adição de 0,3% de resíduo incorporado no MRA, para exemplificação do gráfico mostrado na Figura 10.

Teores de emulsão (%)	8	10	12	14	16
Ensaio de perda por abrasão úmida Desgaste (g/m ²)	658	384	268	150	-
Ensaio excesso de asfalto/adesão de areia Absorção (g/m ²)	-	314	448	505	571
Teor ótimo de emulsão asfáltica	10,40 %				
Ligante residual ótimo	6,45 %				

3.2.2.4 Determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro – NBR 14798/2002

Por este ensaio se determina a resistência ao torque superficial (coesão) de uma mistura de MRA durante seu processo de cura, submetida ao equipamento coesímetro (Figura 11).



Figura 11 – Equipamento coesímetro.

Realizou-se este ensaio num total de 16 corpos-de-prova, moldados em anéis metálicos com altura de 10 mm e diâmetro interno de 60 mm, que se coloca sobre uma chapa de fundo metálica (Figura 12), entre os projetos de mistura descritos na Tabela 9.



Figura 12 – Preparação dos corpos-de-prova.

Nos tempos determinados, posiciona-se o corpo-de-prova no coesímetro, girando o conjunto torquímetro-haste do equipamento, num movimento firme horizontal num arco de 90° dentro de um período de até 1 segundo. Anota-se o valor de torque obtido, ou seja, o resultado é apresentado no relógio mostrador do equipamento.

3.2.2.5 Ensaio de Lixiviação – (NBR 10005/1987)

Conforme a norma NBR 10005 (1987), este ensaio requer a moagem do corpo-de-prova, reduzindo-o a pó. Uma vez que inicialmente não houve condições operacionais para tal, em função da alta dureza do material pétreo, a análise de detecção de cromo total e cromo hexavalente foi realizada no banho residual do ensaio de abrasão.

Posteriormente, conseguiu-se a redução do corpo-de-prova a uma granulometria adequada para a realização do ensaio de lixiviação. Então foi realizado a análise no lixiviado do corpo-de-prova com adição de 0,3% de resíduo, considerando o percentual de melhor desempenho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DO ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DE PERDA POR ABRASÃO ÚMIDA (WTAT) – NBR 14746/2001

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos no ensaio da determinação de perda por abrasão úmida para os 4 projetos de mistura com 4 diferentes percentuais de adição de emulsão asfáltica, conforme especificação da norma NBR 14746/2001.

Tabela 12 – Valores obtidos no ensaio de perda por abrasão úmida nos projetos de MRA.

Projeto	Tipo	Teores de Emulsão			
		8 %	10%	12%	14%
Projeto – 1	Sem resíduo	1237 g/m ²	539 g/m ²	297 g/m ²	197 g/m ²
Projeto – 2	0,3% resíduo	658 g/m ²	384 g/m ²	268 g/m ²	150 g/m ²
Projeto – 3	0,5% resíduo	903 g/m ²	663 g/m ²	479 g/m ²	274 g/m ²
Projeto – 4	0,7% resíduo	2487 g/m ²	1347 g/m ²	921 g/m ²	561 g/m ²
Especificação máx. g/m²		500	500	500	500

Conforme os resultados apresentados na Tabela 12 e Figura 13, quanto ao ensaio de abrasão úmida constata-se que:

►Dentro das variáveis do ensaio, quanto maior o teor de emulsão adicionada na mistura, melhor a resistência do material ao desgaste. Neste caso as misturas com 14% de emulsão asfáltica apresentaram um melhor desempenho;

►Com o aumento da adição de resíduo houve uma absorção excessiva da emulsão pelo resíduo, resultando numa menor agregação dos materiais constituintes, por consequência menor resistência ao desgaste;

►A adição de resíduo em um teor de 0,3% apresentou melhores resultados em relação à mistura sem resíduo, com uma menor perda de material pétreo em todos os teores de emulsão ensaiados;

►Os valores de desgaste nas diferentes misturas apresentam um comportamento análogo em relação aos diferentes teores de emulsão asfáltica ensaiadas.

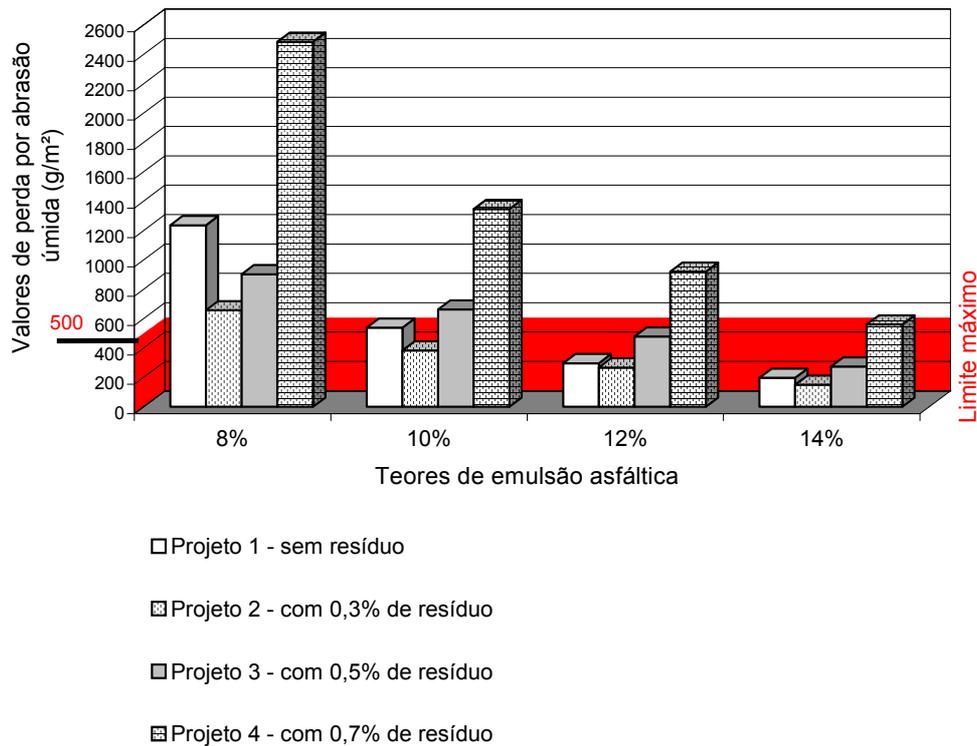


Figura 13 – Valores obtidos no ensaio da determinação de perda por abrasão úmida nos projetos de MRA.

4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DE EXCESSO DE ASFALTO E ADESÃO DE AREIA PELA MÁQUINA LWT – NBR 14841/2002

Na Tabela 13 pode-se verificar os resultados referentes ao ensaio da determinação do excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT, com variação do teor de emulsão asfáltica incorporada nos 4 projetos de mistura, conforme especificação da norma NBR 14841/2002.

Tabela 13 – Valores obtidos na determinação de excesso de asfalto e adesão de areia.

Projetos	Tipos	Teores de Emulsão			
		10%	12%	14%	16%
Projeto – 1	Sem resíduo	343 g/m ²	448 g/m ²	486 g/m ²	571 g/m ²
Projeto – 2	0,3% resíduo	314 g/m ²	448 g/m ²	505 g/m ²	571 g/m ²
Projeto – 3	0,5% resíduo	324 g/m ²	495 g/m ²	543 g/m ²	590 g/m ²
Projeto – 4	0,7% resíduo	429 g/m ²	467 g/m ²	543 g/m ²	600 g/m ²
Especificação máx. g/m ²		Tráfego pesado – 538 g/m ²			
		Tráfego leve – 646 g/m ²			

Conforme a Tabela 13 e Figura 14 pode-se constatar que:

► Com o aumento do teor de emulsão, há um aumento da plasticidade da mistura, com tendência a uma maior deformação;

► Com as diferentes adições de resíduo os valores obtidos no ensaio foram satisfatórios para a especificação de tráfego leve com valores inferiores a 646 g/m^2 (valor limite), prescrito pela norma -NBR 14841/2002;

► Apenas os projetos de mistura com adição de 0,3% de resíduo e sem adição de resíduo enquadraram-se na especificação para tráfego pesado até um percentual de 14% de emulsão asfáltica.

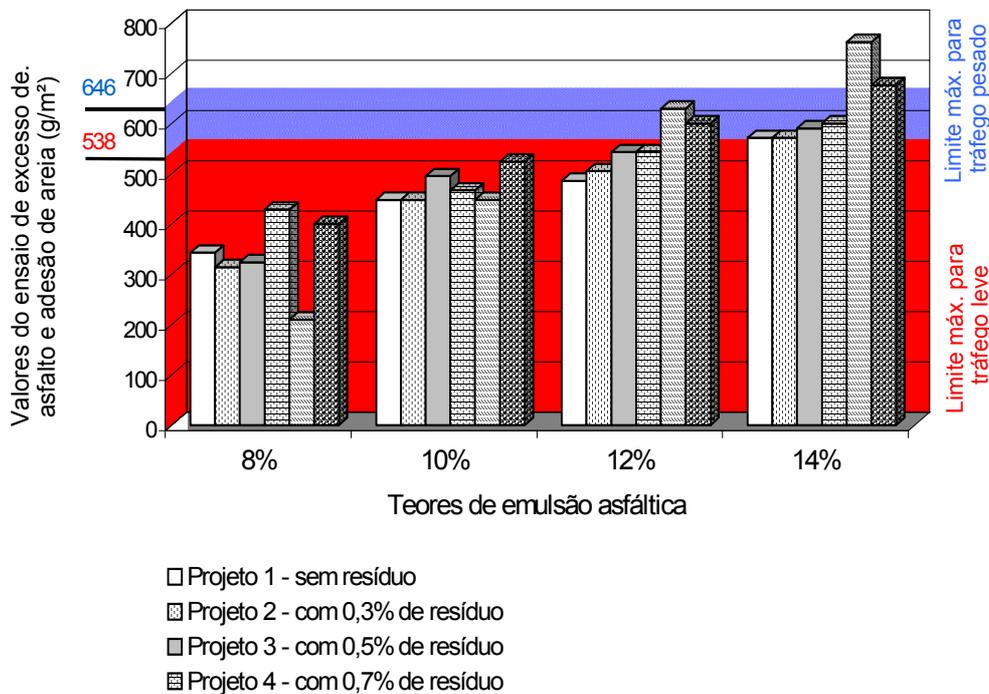


Figura 14 – Valores obtidos do ensaio de excesso de asfalto e adesão de areia nos projetos de MRA

4.3 RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE EMULSÃO ASFÁLTICA

A Tabela 14 apresenta os teores ótimos recomendados de emulsão asfáltica para cada projeto de mistura, a partir dos resultados dos ensaios de perda por abrasão úmida e da determinação do excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT.

Tabela 14 – Teores de emulsão asfáltica recomendados aos projetos correspondentes.

Projeto	Tipo	Emulsão asfáltica	
		Teor ótimo %	Variação aceitável ($\pm 0,5\%$)
Projeto – 1	Sem resíduo	11,20	10,70 a 11,70
Projeto – 2	0,3% resíduo	10,40	9,90 a 10,90
Projeto – 3	0,5% resíduo	11,90	11,40 a 12,40
Projeto – 4	0,7% resíduo	14,30	13,80 a 14,80

A emulsão asfáltica é o produto que agrega maior valor ao custo do projeto de MRA, pode-se verificar na Tabela 14 que, o projeto de mistura realizado com a adição de 0,3% de resíduo foi o mais econômico, em função do menor teor de emulsão asfáltica necessária na mistura.

4.4 RESULTADO DO ENSAIO DA DETERMINAÇÃO DA CURA PELO COESÍMETRO – NBR 14798/2002

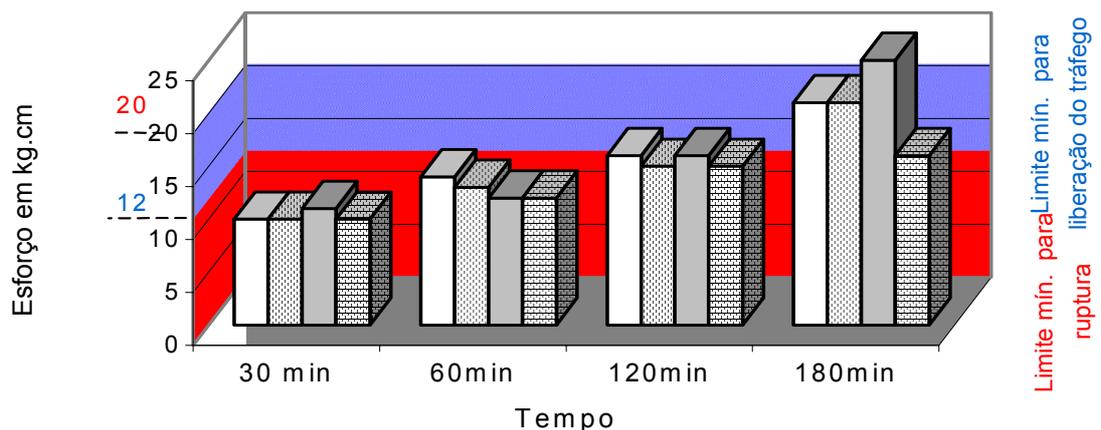
A Tabela 15 apresenta os resultados do ensaio da determinação da cura pelo coesímetro dos diferentes projetos de mistura, com a incorporação da emulsão asfáltica no seu teor ótimo, cujos valores estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 15 – Valores obtidos no ensaio da cura pelo coesímetro.

Projeto	Tipo	Teor ótimo de emulsão %	Esforço em kg.cm			
			30 min	60min	120min	180min
Projeto – 1	Sem resíduo	11,20	10	14	16	21
Projeto – 2	0,3% resíduo	10,40	10	13	16	21
Projeto – 3	0,5% resíduo	11,90	11	12	16	25
Projeto – 4	0,7% resíduo	14,30	10	12	15	16
Especificação da NBR 14948/2003: 30 minutos (p/ ruptura) mínimo 12 kg.cm 60 minutos (p/ tráfego) mínimo 20 kg.cm						

Com base nos resultados apresentados na Tabela 15 e Figura 15, pode-se afirmar que:

- ▶ A coesão aumenta com o tempo, ou seja, ocorre o processo de cura do material;
- ▶ O aumento do percentual de resíduo adicionado na mistura até 0,5% melhora a resistência do material ao rompimento;
- ▶ O projeto de mistura com 0,5% de resíduo apresentou o melhor desempenho no ensaio;
- ▶ Nenhum dos projetos de mistura enquadraram-se nas especificações da NBR 14948/2003, quanto aos valores de ruptura em 30 minutos e liberação para tráfego em 1 hora.



- Projeto 1 - sem resíduo
- ▒ Projeto 2 - com 0,3% de resíduo
- Projeto 3 - com 0,5% de resíduo
- ▓ Projeto 4 - com 0,7% de resíduo

Figura 15 – Valores obtidos no ensaio da cura pelo coesímetro nos projetos de MRA.

4.5 RESULTADO DO ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO - NBR 10005/1987

Foram realizadas as análises de cromo total e cromo hexavalente no banho do ensaio de perda por abrasão úmida correspondente ao corpo-de-prova com adição de 0,7% de resíduo, e no lixiviado do corpo-de-prova com adição de 0,3% de resíduo (Tabela 16).

Tabela 16 - Resultados do ensaio de análise de cromo total e cromo hexavalente.

Amostra	Análise	
	Cr Total	Cr VI
Banho do ensaio de perda por abrasão úmida no corpo-de-prova com adição de 0,7% de resíduo	0,34 mg l ⁻¹	Nd*
Lixiviação no corpo-de-prova com adição de 0,3% de resíduo.	0,22 mg l ⁻¹	Nd*
Metodologia	Absorção atômica	UV/Visível (sensibilidade 0,05 mg/l)

*Nd – não detectado

A partir dos resultados apresentados pelas análises pode-se dizer que:

►No ensaio realizado no banho, necessita-se um estudo das condições normais a que um pavimento está sujeito, uma vez que o ensaio simula uma camada de asfalto submersa em água sofrendo desgaste abrasivo constante;

►Os valores de cromo total detectados no banho do ensaio WTAT foi maior que o detectado no lixiviado da amostra com adição de 0,3% de resíduo, mesmo tendo valor de cromo total maior, não houve detecção de cromo hexavalente na referida amostra;

►Não foi detectado cromo hexavalente nos corpos-de-prova com adições de 0,3% e 0,7 % de resíduo, submetidos ao ensaio.

4.6 EXECUÇÃO DO TRECHO

A execução do trecho experimental de MRA foi na rodovia Hélio M. Salles, no km 215, na cidade de São Sebastião da Gramma – SP, divisa com o município de Divinolândia – MG (Figura 16).



Figura 16 – Rodovia em que se executou o trecho experimental.

Esta aplicação teve como finalidade promover a restauração do pavimento existente por recapeamento com MRA que apresentava problemas de trincas na capa de rolamento (Figura 17).



Figura 17 – Problemas de trincas no pavimento.

Fez-se a marcação para execução do trecho experimental no pavimento rodoviário por meio de estacas, sendo a estaca inicial nº 6377 e estaca final nº 6361, correspondendo a 320 metros de extensão de pavimento.

Para que se pudesse avaliar numa igual condição, demarcou-se meia pista (3,5 metros) para aplicação do MRA sem adição de resíduo, considerando esta como a prova em branco. Paralelamente a pista do projeto sem adição de resíduo, fez-se o recapeamento do pavimento com o projeto de mistura de MRA com adição de 0,3% de resíduo (Figura 18).



Figura 18 – Pista à direita recapeada sem resíduo, e à esquerda com 0,3% de resíduo.

O trecho experimental foi executado no dia 13 de janeiro de 2004, sendo o material fotográfico, bem como a avaliação visual realizada no dia 31 de março de 2004, ou seja, um período de 77 dias após a execução.

A Figura 19 mostra o desgaste do pavimento por ação do tráfego, no trecho executado com MRA sem adição de resíduo.

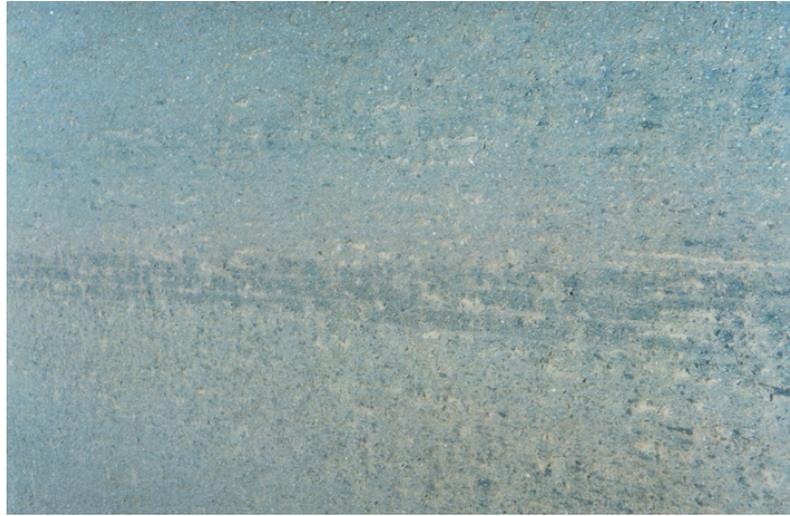


Figura 19 – Visualização do desgaste da camada de revestimento.

A aplicação do MRA foi executada com caminhão usina móvel. Esta aplicação constou das seguintes etapas:

- a) Carregamento do caminhão usina com os materiais constituintes do MRA conforme projeto de mistura;
- b) Homogeneização da mistura sem a emulsão asfáltica;
- c) Entrada da emulsão asfáltica seguido do aditivo, e água;
- d) Mistura e homogeneização;
- e) Descarga da massa na caixa espalhadora;
- f) Espalhamento sobre a superfície (Figura 20).



Figura 20 – Aplicação do MRA no trecho rodoviário.

A aplicação do MRA no pavimento se fez com uma espessura total de 13mm, porém foi realizada em duas aplicações de 6,5mm. Pela especificação de serviço DNER-ES 389/1999 a taxa de aplicação da mistura asfáltica para faixa granulométrica III é de 8 a 16 kg/m², com espessuras aplicadas de 6 a 20mm (Figura 21a e 21b).



Figura 21 – (a) Espessura do MRA com adição de resíduo ; (b) detalhe da camada de MRA sobreposta na pista.

Conforme cálculos, por base nos percentuais e nas densidades respectivas dos materiais constituintes do MRA, obteve-se uma taxa de aplicação de 14,40 kg/m², sendo a incorporação do resíduo na ordem de 0,045 kg/m², representando 36kg por km de rodovia pavimentada (pista simples).

Considerando que 164.246 km de rodovia Brasileira são pavimentadas e sujeitas a necessidade de restauração, estima-se uma demanda de 11.825,7 ton de resíduo.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados até o presente momento, pode-se concluir que:

- ▶ Houve viabilidade técnica e econômica da incorporação do resíduo no MRA;
- ▶ O resíduo pode ser efetivamente incorporado no projeto de MRA num percentual em torno de 0,3%;
- ▶ No ensaio de determinação de excesso de asfalto e adesão de areia apenas o projeto 1 (sem adição de resíduo) e o projeto 2 (com adição de 0,3% de resíduo) enquadraram-se na especificação para tráfego pesado até um percentual de 14% de emulsão asfáltica;
- ▶ De acordo com o ensaio de perda por abrasão úmida obteve-se o melhor resultado no projeto 2 (com adição de 0,3% de resíduo), representando aproximadamente 73% a menos de perda de material pétreo em relação ao projeto 4 (com adição de 0,7% de resíduo), para um teor de 14% de emulsão asfáltica;
- ▶ Os resultados obtidos a partir do ensaio da determinação da cura pelo coesímetro indicam que, para um tempo de 180 minutos, o projeto 1 (sem adição de resíduo),

o projeto 2 (com adição de 0,3% de resíduo) e o projeto 3 (com adição de 0,5% de resíduo) apresentaram melhor desempenho de resistência que o projeto 4 (com adição de 0,7% de resíduo);

▶ Não foi detectado cromo hexavalente nos corpos-de-prova com adições de 0,3% e 0,7 % de resíduo, submetidos ao ensaio;

▶ O projeto com menor custo de mistura foi o projeto 2 com 0,3% de resíduo, em função do menor teor de emulsão incorporado no projeto;

▶ O projeto de MRA de melhor resultado quanto aos ensaios de desempenho foi o projeto 2 com adição de 0,3% de resíduo;

▶ A avaliação visual dos trechos após 77 dias de execução, mostra que os trechos com adição de fibras apresentaram melhor aspecto visual, pois o trecho sem adição de fibras apresenta desgaste por ação do tráfego.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS. **Manual básico de emulsões asfálticas**: soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001. 136 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987. 63 p.

BASEGIO, T. M.; BERGMANN, C. P. Análise da influência da temperatura em materiais refratários produzidos a partir da cinza da serragem de couro curtido ao cromo. In: Encontro Nacional dos Químicos e Técnicos da Indústria do Couro, 14., 1999, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1999. Não paginado.

BETUNEL Indústria e Comércio Ltda. **Manual técnico de pavimentação**. 6. ed. São Paulo: BETUNEL, 1994. 144 p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de ensaio DNER-ME 035/95**: peneiras de malhas quadradas para análise granulométricas de solos. Rio de Janeiro, 1995. 6 p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de ensaio DNER-ME 083/98**: agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998. 5 p.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de ensaio DNER-ME 089/94**: avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio. Rio de Janeiro, 1994. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6570**: emulsões asfálticas – determinação da sedimentação. Rio de Janeiro, 2000. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 1992. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14746**: microrrevestimento a frio e lama asfáltica – determinação de perda por abrasão úmida (WTAT). Rio de Janeiro, 2001. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14758**: microrrevestimento asfálticos – determinação do tempo mínimo de mistura. Rio de Janeiro, 2001. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14798**: microrrevestimento asfálticos – determinação da coesão e características da cura pelo coesímetro. Rio de Janeiro, 2002. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14841**: microrrevestimento a frio – determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT. Rio de Janeiro, 2002. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14948**: microrrevestimento asfálticos a frio modificados por polímero – materiais, execução e desempenho. Rio de Janeiro, 2003. 8 p.

OLIVEIRA, N. M.; VILELA, A. C. F. Caracterização da serragem de couro ao cromo antes e após a queima com ênfase nas concentrações de cromo (III, VI e total). In: Encontro Nacional dos Químicos e Técnicos da Indústria do Couro, 14., 1999, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1999. Não paginado.

REIS, R. M.; SANTO, N. R. E. **Microrrevestimento asfáltico a frio**: uma inovação tecnológica para tratamentos de superfícies. 3. ed. São Paulo: Ipiranga Asfaltos, 1999. 94 p.

TEIXEIRA, R. C.; BASEGIO, T. M.; BERGHMANN, C. P. Caracterização química de resíduos sólidos de curtume (serragem de couro ao cromo) e sua aplicação como carga em materiais cerâmicos. In: Encontro Nacional dos Químicos e Técnicos da Indústria do Couro, 14., 1999, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1999. Não paginado.

