

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA TÉCNICA DE
RECICLAGEM PROFUNDA NA RECUPERAÇÃO
DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Paulo César Arrieiro de Oliveira

**Campinas, SP
2003**

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA TÉCNICA DE
RECICLAGEM PROFUNDA NA RECUPERAÇÃO
DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Paulo César Arrieiro de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração de Transportes.

**Campinas, SP
2003**

OL4c Oliveira, Paulo César Arrieiro de
 Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem
 profunda na recuperação de pavimentos flexíveis / Paulo
 César Arrieiro de Oliveira. --Campinas, SP: [s.n.], 2003.

 Orientador: Cássio Eduardo Lima de Paiva.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

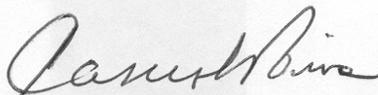
 1. Pavimentos de betume. 2. Pavimentos flexíveis. 3.
 Pavimentos de asfalto. I. Paiva, Cássio Eduardo Lima
 de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade
 de Engenharia Civil. III. Título.

**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil**

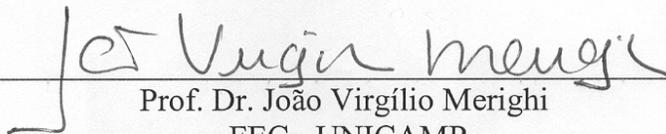
**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA TÉCNICA DE
RECICLAGEM PROFUNDA NA RECUPERAÇÃO DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Paulo César Arrieiro de Oliveira

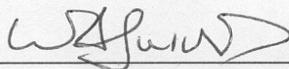
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora constituída por:



Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva
Presidente e Orientador/FEC - UNICAMP



Prof. Dr. João Virgílio Merighi
FEC - UNICAMP



Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*Dedico esse trabalho aos meus
queridos pais, Paulo Dayrell e
Terezinha.*

AGRADECIMENTOS

Chego ao final dessa jornada com a agradável sensação de vitória. Agradeço a Deus ter-me concedido mais esta conquista.

Meus sinceros agradecimentos à Fresar Tecnologia de Pavimentos, empresa do grupo Sant'anna, nas pessoas dos Eng^{os} Eduardo Vilela Sant'anna e Fernando Márcio Guimarães Sant'anna. Agradeço o apoio e o fato de terem permitido o meu aperfeiçoamento técnico.

Ao Eng^o Ismael Mendes Alvim, um dos grandes incentivadores na introdução de novas tecnologias de pavimento no país, agradeço o apoio e o incentivo, que foram fundamentais para a concretização desse trabalho.

Ao Prof^o Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva, meu professor e orientador, pelos ensinamentos recebidos e acompanhamento durante todo o tempo de pesquisa. Agradeço também a receptividade cordial em seu departamento.

Aos professores do curso de Pós-Graduação do Departamento de Geotecnia e Transportes da UNICAMP, em especial ao professor João Virgílio Merighi, pela sua generosidade na transmissão de conhecimentos técnicos e pela sua dedicação em prol do ensino, o meu profundo reconhecimento e admiração.

A toda a equipe da Fresar Tecnologia de Pavimentos, em especial ao Daílson, sempre disponível para compartilhar comigo seu conhecimento e experiência profissional; ao Anderson Eustáquio, pela colaboração nas atividades de campo e ao Anderson Luciano, pelas importantes “dicas” sobre a aplicação da espuma de asfalto.

Ao Eng^o Elilson Eustáquio Ribeiro, pela ajuda na edição do texto e pelas preciosas sugestões e idéias.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Objetivo do Trabalho.....	2
1.3 Organização do Trabalho.....	3
2 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO E DE RECUPERAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	5
2.1 Tipos de Pavimentos.....	5
2.2 Agentes Contribuintes na Degradação do Pavimento.....	6
2.3 Defeitos de Pavimentos e Metodologias de Avaliação.....	9
2.4 Tipos de Intervenções em Pavimentos Flexíveis.....	14
3 RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	16
3.1 Considerações Iniciais.....	16
3.2 Reciclagem Profunda.....	18
3.2.1 Definição.....	18
3.2.2 Aplicação da Técnica.....	18
3.2.3 A Camada Reciclada.....	21
3.2.4 Vantagens e Benefícios da Técnica da Reciclagem.....	23
3.3 Estabilização de Solos na Reciclagem Profunda.....	26
3.3.1 Definição.....	26
3.3.2 Usos da Estabilização.....	27
3.3.3 Vantagens do Emprego da Estabilização de Solos.....	27
3.4 Agentes Estabilizantes Usados como Aditivos.....	28
3.4.1 Conceito.....	28
3.4.2 Tipos de Agentes Estabilizantes.....	28
3.4.3 Vantagens e Desvantagens dos Agentes mais Usados em Reciclagem Profunda.....	34
3.4.4 Fatores a Serem Considerados na Escolha do Agente.....	37
4 INVESTIGAÇÃO DO PAVIMENTO PARA FINS DE RECICLAGEM PROFUNDA.....	39
4.1 Introdução.....	39
4.2 Avaliação do Pavimento.....	41
4.2.1 Considerações Iniciais.....	41
4.2.2 Levantamento do Histórico do Pavimento.....	41

4.2.3	Avaliação das Condições da Superfície.....	42
4.2.4	Avaliação Estrutural do Pavimento.....	43
4.2.5	Análise das Propriedades dos Materiais Existentes.....	44
4.2.6	Avaliação das Condições Geométricas.....	45
4.2.7	Identificação das Jazidas e Fontes de Recursos para a Execução da Obra.....	46
5	PROJETO DE MISTURAS RECICLADAS.....	48
5.1	Introdução.....	48
5.2	Tipos de Estabilização.....	48
5.3	Estabilização Mecânica.....	49
5.4	Estabilização Química.....	53
5.5	Estabilização Betuminosa.....	61
5.6	Estabilização Combinada.....	71
5.7	Controle de Qualidade no Campo.....	71
5.8	Controle de Qualidade no Laboratório.....	73
6	PROCESSO EXECUTIVO DA RECICLAGEM PROFUNDA.....	76
6.1	Equipamentos Necessários.....	76
6.2	Etapas Construtivas.....	84
6.3	Trem de Reciclagem.....	92
6.3.1	Conceito.....	92
6.3.2	Tipos de Configuração.....	93
6.4	Execução da Reciclagem com Tráfego.....	94
6.5	Início dos Serviços de Trituração.....	97
6.6	Cuidados Construtivos.....	103
7	ESTUDOS DE LABORATÓRIO PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO PRAZO DE TRABALHABILIDADE DO CIMENTO PORTLAND NA RESISTÊNCIA DA MISTURA À COMPRESSÃO.....	107
7.1	Introdução.....	107
7.2	Metodologia Adotada.....	108
7.3	Procedimentos para Alcançar o Objetivo.....	109
7.4	Materiais Empregados.....	112
7.4.1	Mistura Reciclada.....	112
7.4.2	Cimento.....	114
7.5	Ensaio de Laboratório.....	114
7.6	Apresentação e Análise dos Resultados.....	120
7.6.1	Análise Granulométrica por Peneiramento.....	120
7.6.2	Ensaio de Permeabilidade.....	124
7.6.3	Ensaio de Dosagem do Cimento.....	124
7.6.4	Moldagem dos Corpos-de-prova a Cada Duas Horas.....	127
7.6.5	Ensaio de Resistência.....	129

8 SUGESTÃO DE ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO PARA OBRAS DE RECICLAGEM PROFUNDA COM INCORPORAÇÃO DE CIMENTO PROTLAND.....	132
8.1 Considerações Iniciais.....	132
8.2 Objetivo.....	133
8.3 Referências.....	133
8.4 Equipamentos.....	134
8.5 Materiais.....	135
8.6 Condições Meteorológicas.....	137
8.7 Condições Específicas.....	137
8.7.1 Granulometria da Mistura Reciclada.....	137
8.8 Descrição do Processo Executivo.....	138
8.9 Controles de Qualidade.....	140
8.9.1 Controle de Qualidade do Material.....	140
8.9.2 Controle de Qualidade durante a Execução dos Serviços.....	140
8.9.3 Controle de Qualidade na Camada Concluída.....	141
8.10 Parâmetros de Aceitação ou Rejeição.....	143
8.11 Critérios de Medição e Pagamento.....	146
9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS ESTUDOS.....	147
9.1 Conclusões.....	147
9.1.1 Sobre a Reciclagem Profunda.....	147
9.1.2 Sobre os Ensaios de Laboratório.....	149
9.2 Sugestões para Novos Estudos.....	150
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152
BIBLIOGRAFIA DE CONSULTA.....	157

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials.</i>
ADEBA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos.
ARRA	Asphalt Recycling and Reclaiming Association.
BGS	Brita Graduada Simples.
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo.
CBR	<i>California Bearing Ratio.</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente.
CEPAGRI	Centro de Pesquisas Agrícolas da Unicamp.
CP	Corpo-de-prova.
CREMA	Programa de Recuperação e Manutenção da Rede Remanescente.
DCP	<i>Dynamic Cone Penetrometer.</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.
EUA	Estados Unidos da América.
FDR	<i>Full Depth Reclamation.</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer.</i>
GC	Grau de Compactação.
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo.
IGG	Índice de Gravidade Global.
ICP	Índice de Condição do Pavimento.
IP	Índice de Plasticidade.
IRI	Índice Internacional de Irregularidade.
ITS	<i>Indirect Tensile Strenght.</i>
Leit. Máx	Leitura máxima.
Leit. Min.	Leitura Mínima.
log	Logaritmo.
PNV	Plano Nacional de Viação.

QI	Quociente de Irregularidade.
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> (Material Fresado).
RC _{média}	Média das Resistências à Compressão Simples.
RC _{7 dias}	Resistência à Compressão Simples aos 7 dias.
RL – 1 C	Ruptura Lenta – 1 Cátion.
RM – 1C	Ruptura Média – 1 Cátion.
TSD	Tratamento Superficial Duplo.
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers.</i>

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

%	Porcentagem.
$\rho_{\text{máx.}}$	Massa específica aparente seca máxima.
σ_{Rs}	Resistência à Tração por Compressão Diametral de corpo-de-prova seco.
$\sigma_{\text{Rsat.}}$	Resistência à Tração por Compressão Diametral de corpo-de-prova saturado.
A	Área.
bar	Unidade de pressão.
°C	Grau Celsius.
cm	Centímetro.
g	Gramas.
Hz	Hertz.
k	Coeficiente de permeabilidade.
kg	Quilograma.
Kgf	Quilograma-força.
Km	Quilômetro.
KN	Quilonewton.
KPa	Quilopascal.
L	Altura do corpo-de-prova.
m	Metro.
ml	Mililitro.
min	Minuto.
mm	Milímetro.
MPa	Megapascal.
n°	Número.
Q	Vazão.
R	Relação.
RPM	Rotações por Minuto.

s	Segundo.
T	Temperatura.
ton	Tonelada.
w_o	Umidade Ótima.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Viga Benkelman.....	12
Figura 2.2	Levantamento deflectométrico com viga Belkeman.....	12
Figura 2.3	FWD – Falling Weight Deflectometer.....	13
Figura 2.4	Levantamento deflectométrico com o FWD.....	13
Figura 3.1	Máquina de reciclagem Profunda.....	17
Figura 3.2	Configuração do rolo fresador/misturador e sistemas de barra de aspersão.....	17
Figura 3.3	Pavimentos candidatos à reciclagem profunda (a,b,c,d).....	19
Figura 3.4	Estrutura de um pavimento antes e depois da reciclagem.....	22
Figura 4.1	Fluxograma detalhando a metodologia de investigação e projeto de pavimento para fins de Reciclagem Profunda.....	40
Figura 5.1	Lançamento de agregado novo na pista.....	51
Figura 5.2	Espalhamento de agregado novo.....	51
Figura 5.3	Reciclagem profunda com incorporação de agregados novos....	51
Figura 5.4	Lançamento de cimento em sacos na pista.....	55
Figura 5.5	Espalhamento manual de cimento.....	55
Figura 5.6	Reciclagem profunda com incorporação de cimento.....	55
Figura 5.7	Espalhador de agente estabilizante na forma de pó.....	56
Figura 5.8	Aplicação do agente estabilizante na forma de nata.....	56
Figura 5.9	Aplicação de agente estabilizante químico em solução aquosa..	59
Figura 5.10	Reciclagem profunda com Incorporação de emulsão asfáltica....	63
Figura 5.11	Produção de espuma de asfalto na câmara de expansão.....	64
Figura 5.12	Forma de aplicação da espuma de betume.....	66
Figura 5.13	Corpo-de-prova sendo submetido ao ensaio ITS.....	69
Figura 6.1	Tambor fresador para reciclagem.....	76
Figura 6.2	Ferramenta de corte com carboneto de tungstênio e cobalto na Ponta (bits).....	77
Figura 6.3	Recicladora Wirtgen WR 2500.....	77
Figura 6.4	Recicladora Wirtgen WR 2500 K.....	77
Figura 6.5	Recicladora Hamm RACO 350.....	78

Figura 6.6	Recicladora Hamm RACO 550.....	78
Figura 6.7	Recicladora Caterpillar RM 350.....	78
Figura 6.8	Recicladora Caterpillar RR 250.....	78
Figura 6.9	Recicladora CMI RS 800.....	78
Figura 6.10	Recicladora CMI RS 425.....	78
Figura 6.11	Motoniveladora.....	81
Figura 6.12	Rolo Pé-de-carneiro.....	82
Figura 6.13	Rolo liso.....	82
Figura 6.14	Rolo compactador de pneus.....	82
Figura 6.15	Caminhão-tanque de água.....	83
Figura 6.16	Recicladora triturando o pavimento existente.....	85
Figura 6.17	Estabilização da mistura com aplicação do agente estabilizante.....	86
Figura 6.18	Pré-compactação seguida do perfilamento geométrico.....	87
Figura 6.19	Compactação do material reciclado.....	88
Figura 6.20	Acabamento na superfície da camada reciclada.....	89
Figura 6.21	Aplicação do selante.....	90
Figura 6.22	Vista da superfície imprimada.....	90
Figura 6.23	“Salgamento” da superfície com areia.....	91
Figura 6.24	Aplicação do revestimento asfáltico sobre a camada reciclada...	92
Figura 6.25	Trem de reciclagem utilizando nata de cimento e emulsão asfáltica.....	93
Figura 6.26	Trem de reciclagem utilizando apenas espuma de asfalto.....	93
Figura 6.27	Arranjo físico da pista em obras de reciclagem.....	96
Figura 6.28	Controle da espessura de corte.....	98
Figura 6.29	Abertura da tampa traseira (<i>scraper</i>) da câmara de mistura.....	100
Figura 6.30	Ajuste da abertura da porta dianteira (barra de impactos).....	101
Figura 6.31	Capa asfáltica excessivamente trincada.....	102
Figura 7.1	Máquina recicladora de pavimentos CAT RM 350.....	110
Figura 7.2	Amostra do material coletado na SP 294.....	111
Figura 7.3	Amostra do material coletado na BR 040.....	111
Figura 7.4	Esquema do permeâmetro de nível variável.....	115

Figura 7.5	Misturas da SP 294 exposta ao sol.....	117
Figura 7.6	Misturas da BR 040 exposta ao sol.....	117
Figura 7.7	Cura de corpos-de-prova em câmara úmida.....	118
Figura 7.8	Corpo-de-prova sendo submetido ao ensaio de compressão.....	119
Figura 7.9	Distribuição granulométrica da SP 294.....	121
Figura 7.10	Distribuição granulométrica da BR 040.....	122
Figura 7.11	Curvas de compactação do material da SP 294 com teores de 3%, 4% e 5% de cimento.....	125
Figura 7.12	Curvas de compactação do material da BR 040 com teores de 3%, 4% e 5% de cimento.....	125
Figura 7.13	Cimentação das partículas do solo.....	127
Figura 7.14	Gráfico Resistência versus Prazo de Trabalhabilidade.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Conceitos de deterioração conforme o IGG do segmento homogêneo.....	10
Tabela 2.2	Valores limites de ICP que definem as faixas de classificação.....	10
Tabela 2.3	Classificação dos serviços de manutenção.....	14
Tabela 3.1	Metas de reciclagem.....	24
Tabela 3.2	Granulometria indicada para camadas estabilizadas com cinza volante.....	31
Tabela 3.3	Aditivo apropriado ao tipo de solo.....	34
Tabela 3.4	Vantagens e desvantagens do uso do cimento Portland na reciclagem profunda.....	35
Tabela 3.5	Vantagens e desvantagens do uso da emulsão de asfalto na reciclagem profunda.....	36
Tabela 3.6	Vantagens e desvantagens do uso da espuma de asfalto na reciclagem profunda.....	36
Tabela 4.1	Aplicação de vários métodos de projeto.....	44
Tabela 6.1	Características de algumas recicladoras.....	79
Tabela 6.2	Modelos de recicladoras adequadas ao tipo de estabilização.....	80
Tabela 6.3	Características de rolo compactador para obras de reciclagem profunda.....	81
Tabela 7.1	Condições fixadas para coleta das amostras.....	110
Tabela 7.2	Medidas dos CP's usadas no ensaio de permeabilidade.....	116
Tabela 7.3	Resultado da análise granulométrica das duas amostras.....	120
Tabela 7.4	Faixa granulométrica para o solo cimento.....	123
Tabela 7.5	Faixa granulométrica para o material reciclado com espuma de <u>asfalto</u>	123
Tabela 7.6	Resultados obtidos a partir do ensaio de permeabilidade.....	124
Tabela 7.7	Valores obtidos no ensaio de compactação.....	126
Tabela 7.8	Valores adotados para dar seqüência aos ensaios.....	128
Tabela 7.9	Resultados obtidos pela mistura da SP 294.....	128
Tabela 7.10	Resultados obtidos pela mistura da BR 040.....	129

Tabela 7.11	Resistência à compressão obtida pelo material da SP 294.....	130
Tabela 7.12	Resistência à compressão obtida pelo material da BR 040.....	130
Tabela 8.1	Tabela de amostragem variável.....	144

Resumo

OLIVEIRA, P. C. A. *Contribuição ao Estudo da Técnica de Reciclagem Profunda na Recuperação de Pavimentos Flexíveis*. Campinas, 2003. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação apresenta um estudo sobre as várias modalidades de reciclagem profunda através da abordagem de seus aspectos técnicos e operacionais, especialmente a execução de camada reciclada aditivada com cimento Portland. Também descreve os procedimentos de campo e de laboratório adotados para avaliar a influência do prazo de trabalhabilidade do cimento Portland na resistência de misturas recicladas.

O estudo foi baseado nas amostras de material reciclado coletadas nas rodovias SP 294, no município de Tupã/SP, e na BR 040, no município de Felixlândia/MG. O comportamento da mistura reciclada foi avaliado tendo como referência o ensaio de resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos.

A metodologia empregada para realização dos ensaios foi uma tentativa de simular em laboratório uma rotina que ocorre em campo: depois que o cimento é misturado com o material reciclado, não há controle sobre o prazo no qual a compactação deverá estar concluída. A falta de observância deste prazo pode prejudicar de forma significativa o comportamento da mistura.

É apresentada também uma proposta de especificação de serviço para obras de reciclagem profunda com adição de cimento Portland, como forma de contribuir para a qualidade do produto final.

Palavras chaves: pavimentação, técnicas de recuperação, reciclagem profunda.

ABSTRACT

This dissertation presents a study on various processes of flexible pavements' full depth reclamation through a technical and operational approach, especially the execution of recycled layers stabilized with Portland cement. The bearing capacity of the recycled layers is evaluated through the comparison of unconfined compressive strength test results acquired from cylindrical Marshall specimens, both with field and laboratory molded test specimens, where the influence of the curing of the Portland cement in the resistance of the recycled mix is also considered.

The study was based on samples of the recycled material collected from highway SP 294 in Tupã/SP and from highway BR 040 in Felixlândia/MG.

The procedure was an attempt to simulate what actually occurs in the field work; i.e., after the cement has been blended with the recycled material there normally is no control of the term for compaction before the cement hardens. Neglecting this period may seriously jeopardize the behavior of the mix.

A standard specification for flexible pavements' full depth reclamation with the addition of Portland cement has been proposed, as a form to contribute for the state-of-the-art.

Key words: paving, reclamation techniques, full depth reclamation.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A partir da década de 1950, houve uma expansão significativa na infra-estrutura do país, particularmente na malha rodoviária. Milhares de quilômetros foram construídos para atender às demandas crescentes de tráfego, fruto do aumento da população e do desenvolvimento da economia.

Quando a malha rodoviária estava em expansão, a maior preocupação dizia respeito ao custo inicial de construção e à pequena ou quase nenhuma atenção aos custos de manutenção do pavimento. No entanto, com o passar dos anos, o volume de tráfego e o peso bruto dos veículos aumentaram consideravelmente, contribuindo para a degradação precoce das rodovias. Tendo em vista que os recursos disponibilizados para as estradas são cada vez menores, foi dada maior ênfase à manutenção preventiva e à conservação do pavimento existente. Em muitos casos, as verbas disponíveis são insuficientes para atender ao aumento no ritmo de manutenção e preservar o pavimento à medida que este envelhece. Isso tem resultado na redução das condições e no nível de serviço oferecido pela malha rodoviária.

As estradas pavimentadas que constituem a malha rodoviária brasileira são compostas predominantemente por pavimentos do tipo flexível, e este tipo de estrutura se deteriora mais rapidamente quando comparado a outros. Isso resulta em medidas mais dispendiosas para a recuperação do pavimento, devido ao rápido declínio das condições de trafegabilidade.

É fato conhecido que o país necessita de uma eficiente infra-estrutura de transportes, especialmente boas rodovias para promover o seu desenvolvimento econômico. No caso do Brasil, onde os investimentos para construção e manutenção de rodovias caíram após a segunda

metade da década de 1980, muitas rodovias atingiram um nível de serventia tão baixo, que os processos convencionais de manutenção já não são suficientes para restabelecer os padrões de serviço, requerendo a reconstrução do pavimento, além de melhorias estruturais para satisfazer as demandas de tráfego.

Se os recursos disponíveis são insuficientes para investir na manutenção das rodovias, o problema se agrava quando há necessidade de reconstruir o pavimento, pois esta prática implica maior alocação de recursos financeiros. As limitações orçamentárias associadas a outros fatores acabaram estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias, como a reciclagem profunda.

O objetivo principal da técnica é reutilizar os materiais constituintes do pavimento degradado para transformá-lo em uma nova e homogênea estrutura capaz de suportar o tráfego previsto. Esse processo poderá constituir-se numa solução que promova redução de custos, pois minimiza consideravelmente o consumo de energia, além de economizar o uso de matéria-prima.

No Brasil, o emprego da técnica da reciclagem profunda na recuperação de pavimentos é relativamente novo e vem se intensificando graças à atuação de alguns órgãos públicos e da iniciativa privada, voltada para a busca de novas tecnologias que proporcionem maior economia na manutenção e conservação dos pavimentos.

O processo apresenta-se como uma técnica promissora e com grande campo de aplicação no país, tendo em vista a situação precária que se encontra atualmente nossas rodovias.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Embora haja na literatura técnica brasileira alguns trabalhos publicados sobre reciclagem de pavimentos, esse assunto ainda é pouco explorado, quando se levam em conta os aspectos técnicos e operacionais do processo. Na tentativa de suprir essa lacuna, o autor pesquisou as várias modalidades de reciclagem profunda com o objetivo de disponibilizar à comunidade

acadêmica e aos profissionais de pavimentação um estudo que sirva de orientação para novas pesquisas sobre o tema ou mesmo como fonte de consulta para quem se interessar pelo assunto.

Esse trabalho também tem o objetivo mais específico de avaliar a influência do tempo de trabalhabilidade do cimento na resistência da camada em obras de reciclagem com adição de cimento Portland, pois normalmente não há controle sobre o espaço de tempo entre a mistura do cimento e o término da compactação da camada.

O estudo não contempla os pavimentos de concreto de cimento Portland.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para atingir o seu objetivo, o presente trabalho foi dividido em 8 (oito) capítulos, que estão resumidos da seguinte forma:

O capítulo 1º apresenta as considerações e relevâncias do tema pesquisado.

O capítulo 2º focaliza os tipos de pavimentos e seus processos de degradação. Isso conduz a opções para sua recuperação e apresenta o conceito de reciclagem profunda, que é discutido no capítulo 3º.

A metodologia usada para caracterizar o pavimento para fins de reciclagem profunda está descrita no capítulo 4º e os ensaios de laboratório e os tipos de estabilização de solos para elaborar o projeto de misturas é o assunto do capítulo 5º.

O capítulo 6º é dedicado exclusivamente à parte operacional da reciclagem profunda. São descritos os equipamentos necessários para o emprego da técnica e as etapas construtivas.

No capítulo 7º está descrito o experimento da pesquisa cujo objetivo foi buscar a caracterização do tempo de trabalhabilidade do cimento Portland na resistência a compressão da

mistura reciclada. Foram realizadas duas experiências utilizando amostras de material reciclado de constituição diferente. As amostras foram extraídas pelo mesmo equipamento de reciclagem por ocasião das obras de recuperação do pavimento das rodovias SP 294, no município de Tupã/SP, e na BR 040, no município de Felixlândia/MG.

O capítulo 8º apresenta uma sugestão de especificação de serviço para obras de reciclagem com adição de cimento Portland e finalmente, no capítulo 9º são apresentadas as principais conclusões obtidas na pesquisa realizada e sugestões para a continuidade do trabalho.

Capítulo 2

PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO E DE RECUPERAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

O pavimento é uma estrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas (*layered system*) destinada a distribuir satisfatoriamente os esforços verticais advindos do tráfego ao terreno sobre o qual se assenta (subleito), resistir aos esforços horizontais atuantes na sua superfície e oferecer aos usuários condições seguras e confortáveis de trafegabilidade. Essa estrutura deverá ser concebida com a máxima qualidade e o menor custo e suas qualidades deverão permanecer inalteradas sob qualquer condição climática.

Geralmente a capacidade de suporte do subleito é pequena quando se levam em consideração as solicitações do tráfego rodoviário e, portanto, é necessário reduzir as tensões verticais de compressão até aos níveis que o terreno de fundação possa suportar sem que haja deformações excessivas na estrutura do pavimento.

As alternativas mais usadas para viabilizar essa transferência de tensões consistem no aumento do número de camadas ou no aumento das espessuras das camadas (normalmente granulares) ou pelo aumento da rigidez das camadas superiores. Esses mecanismos influenciaram na divisão dos pavimentos em dois grandes grupos: “Flexíveis” e “Rígidos”.

De acordo com PINTO & PREUSSLER [46], o pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalente entre as camadas.

Os pavimentos rígidos, segundo SILVEIRA [53] são constituídos basicamente por uma placa de concreto que praticamente absorve toda a solicitação, transmitindo-a tão-somente ao subleito de forma suficientemente amortecida (por efeito de um grande espalhamento das tensões verticais).

A classificação do pavimento em flexível e rígido é baseada originalmente na intenção de separar os pavimentos constituídos por uma placa de concreto de cimento Portland daqueles constituídos com bases granulares e capas com misturas betuminosas, representando assim uma excessiva simplificação.

Um novo grupo de pavimento também conhecido como semi-rígido, semiflexível ou composto é constituído por diversas camadas, pelo menos duas delas com propriedades elásticas muito diferentes, ou seja, materiais rígidos e flexíveis são postos em contato e solicitados simultaneamente, resultando num elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo de tensões e deformações.

Todavia, independentemente do tipo de estrutura usada para proteger o subleito das solicitações do tráfego, agentes externos contribuem para degradação do pavimento e suas conseqüências redundam em patologias e defeitos que se apresentam com o decorrer do tempo.

2.2 AGENTES CONTRIBUINTES NA DEGRADAÇÃO DO PAVIMENTO

Os principais agentes externos responsáveis pela degradação do pavimento são as condições climáticas e as cargas dos veículos, principalmente se ocorrer excesso.

O pavimento sofre ao longo do tempo agressões decorrentes da ação das intempéries. Segundo YODER & WITCZAK [65], a extensão de danos provocados pelas variações climáticas dependerá da combinação de fatores como tipo de revestimento, características do subleito, tipo de base e solicitações do tráfego.

Os principais fenômenos climáticos observados são:

- Sol;
- Chuva;
- Temperatura Ambiente;
- O Efeito do Congelamento.

A radiação ultravioleta produzida pelos raios solares provoca um endurecimento lento e continuado do asfalto. Com o endurecimento, vem uma redução na elasticidade, que resulta em trincamento quando a superfície se contrai, à medida que revestimento esfria [60].

Trincas na superfície devem ser evitadas, pois favorecem a entrada de água na estrutura do pavimento. Essa água livre contida no interior das camadas é expulsa através do bombeamento provocado pelo tráfego, acelerando o processo de deterioração.

A água da chuva também pode ser responsável pelo aumento do teor de umidade no subleito e conseqüente perda de suporte, principalmente nos períodos de chuvas intensas, quando a umidade absorvida pelo solo é maior do que em condições normais.

A variação da temperatura entre os períodos diurnos e noturnos gera esforços de dilatação e contração das camadas superficiais de um pavimento. Portanto, caso o pavimento esteja em regiões que apresentam grandes variações de temperatura ao longo do dia, esse efeito pode causar danos à sua superfície.

Nos países de clima temperados e frios, o gelo cria um fenômeno conhecido como “expansão induzida pelo gelo”. Ciclos repetidos de congelamento/degelo se constituem no agente mais agressivo para causar trincamento.

Nos países tropicais, o gradiente térmico pode atingir grande magnitude e eventualmente resultar na evaporação da umidade de compactação de camadas com significativa fração de solos. Esse fenômeno pode produzir trincas na camada e as mesmas serem propagadas ao revestimento.

O carregamento dos eixos rodoviários também é um fator relevante na degradação do pavimento, pois a estrutura do pavimento é afetada pela configuração e carga por eixo de roda. O excesso de carga aliado à canalização do tráfego pelo fluxo de veículos é responsável pelo desenvolvimento de trilhas de rodas e trincas que têm início dentro da estrutura do pavimento.

Essa deterioração é causada por dois mecanismos: Deformação permanente causada pela consolidação das camadas do pavimento e/ou por cisalhamento do revestimento asfáltico e trincas por fadiga provocada pela tensão de cisalhamento na camada de base. As trincas são propagadas até a superfície, facilitando o ingresso da água acumulada na camada de revestimento (que sofreu deformação permanente) para o interior da estrutura do pavimento.

Outro aspecto a ser considerado é a velocidade de operação do veículo. Dois fatores importantes, mas independentes, influenciam o comportamento do pavimento:

- Tempo de aplicação da carga transmitida pelo veículo ao pavimento: É fato conhecido que as faixas de tráfego em rampa apresentam mais defeitos em relação às faixas em contra-rampa. A duração de aplicação de uma carga por um veículo em movimento é da ordem de centésimos de segundo [55]. A variação da velocidade do veículo pode afetar a reação dos vários materiais componentes do pavimento e conseqüentemente seus estados de tensão, deformação e ruptura.
- A carga dinâmica imposta num pavimento com irregularidades superficiais (rugosidades) gera uma oscilação na configuração de eixos dos veículos refletindo num aumento de carga transmitida ao pavimento.

Portanto, em locais onde os veículos comerciais se deslocam com menor velocidade, ou em condição de fluxo canalizado, existe maior possibilidade de ocorrer deformações permanentes no pavimento.

O pavimento, ao longo do tempo, vai perdendo sua capacidade de servir ao tráfego satisfatoriamente, devido ao constante aparecimento de defeitos causados pelas solicitações do

tráfego e pelos efeitos climáticos, pois, conforme PONTES FILHO [48] salienta, os defeitos da superfície de pavimentos são desarranjos que contribuem para diminuir conforto ou segurança de viagens ou dificultar o tráfego de veículos.

O acompanhamento do processo de deterioração de um pavimento deve ser constante e pode ser feito através de metodologias que avaliam sua qualidade de rolamento e sua capacidade estrutural.

2.3 DEFEITOS DE PAVIMENTOS E METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO

A deterioração do pavimento pode manifestar-se sob diferentes formas: trincas (por fadiga, em blocos, nos bordos, longitudinais, por reflexão e transversais), remendos, panelas (buracos), distorções (acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda e corrugação), defeitos na superfície (desintegração ou desgaste, agregados polidos e exsudação), desnível entre pista e acostamento e bombeamento (saída de água pelas trincas do pavimento sob ação das cargas do tráfego) [23].

Os métodos de avaliação de pavimentos basicamente se dividem em dois grandes grupos:

- Avaliação Funcional;
- Avaliação Estrutural.

A Avaliação Funcional associa um índice (qualitativo ou quantitativo, ou uma combinação de ambos) aos diversos defeitos encontrados sobre a superfície de determinado segmento de pavimento. Essa avaliação pode ser Subjetiva ou Objetiva:

A Avaliação Funcional Subjetiva consiste em definir a qualidade do pavimento com base na opinião de uma equipe de avaliadores que atribuem notas ao pavimento, variando de 0 (péssimo) a 5 (ótimo). Essa avaliação reflete a opinião dos usuários quanto ao estado do pavimento.

A Avaliação Funcional Objetiva é realizada através do emprego de aparelhos que permitem quantificar a irregularidade na superfície do pavimento em estudo. As leituras registradas pelos aparelhos são convertidas em QI (Quociente de Irregularidade), que é o número de contagens de impactos por quilômetros ou em IRI (Índice Internacional de Irregularidade) que é o somatório dos deslocamentos ocorridos na suspensão do veículo dividido pela distância percorrida durante o teste (m/km ou mm/m).

Existem procedimentos usados para inventariar e quantificar numericamente os defeitos superficiais existentes num segmento pré-definido. Os mais usados no Brasil são o Índice de Gravidade Global (IGG) e o Índice de Condição do Pavimento (ICP). A sistematização desse levantamento resultará num índice que indicará o grau de deterioração na superfície do pavimento conforme indicado nas tabelas 2.1 e 2.2.

Conceito	Limites de IGG
Bom	100 - 20
Regular	20 - 80
Mau	80 - 150
Péssimo	> 150

Tabela 2.1 – Conceitos de deterioração conforme o IGG do segmento homogêneo.
Fonte: BALBO [6].

Conceito	Limites de ICP
Excelente	86 - 100
Muito Bom	71 - 85
Bom	56 - 70
Regular	41 - 55
Ruim	26 - 40
Muito Ruim	11 - 25
Péssimo	0 - 10

Tabela 2.2 – Valores limites de ICP que definem as faixas de classificação.
Fonte: SHAHIN [52] – Adaptado pelo autor.

O defeito funcional pode ou não ser acompanhado de falha estrutural, pois conforme salienta MARQUES [41], um pavimento, sob ação do tráfego, recebe cargas repetidas que provocam deformações, cuja magnitude depende de sua capacidade estrutural.

A avaliação funcional visa identificar os defeitos superficiais existentes no pavimento e a partir destes (tipo, grau de severidade e frequência de ocorrência) se desenvolve a avaliação do estado estrutural do pavimento.

A capacidade estrutural do pavimento é geralmente avaliada por métodos não destrutivos, que medem a deflexão sob um carregamento estático ou dinâmico, ou por métodos destrutivos que implicam coletar uma amostra do pavimento e ensaiá-la em laboratório [25].

Segundo HAAS, HUDSON & ZANIEWSKI [26], a avaliação destrutiva é assim chamada porque a estrutura original é destruída em razão da investigação do pavimento naquele local específico. Em geral, tal procedimento de avaliação é limitado a pavimentos que mostram evidências de falhas estruturais.

A avaliação não destrutiva é realizada com o auxílio de equipamentos que fazem medidas na superfície do pavimento com o objetivo de obter a deflexão recuperável máxima, que é um parâmetro importante para compreensão do comportamento da estrutura. A deflexão recuperável é aquela em que a superfície retorna ao seu estado inicial assim que cessa a aplicação da carga.

Dos equipamentos de ensaio estrutural não destrutivo, os mais conhecidos no Brasil são a viga Benkelman (figuras 2.1 e 2.2) e o FWD – *Falling Weight Deflectometer* (figuras 2.3 e 2.4). O FWD se destaca pela sua versatilidade e elevada produtividade; por outro lado, a viga Benkelman, apesar da sua simplicidade operacional e do seu baixo custo de aquisição e manutenção, é um ensaio lento e de baixa produtividade.



Figura 2.1 - Viga Benkelman

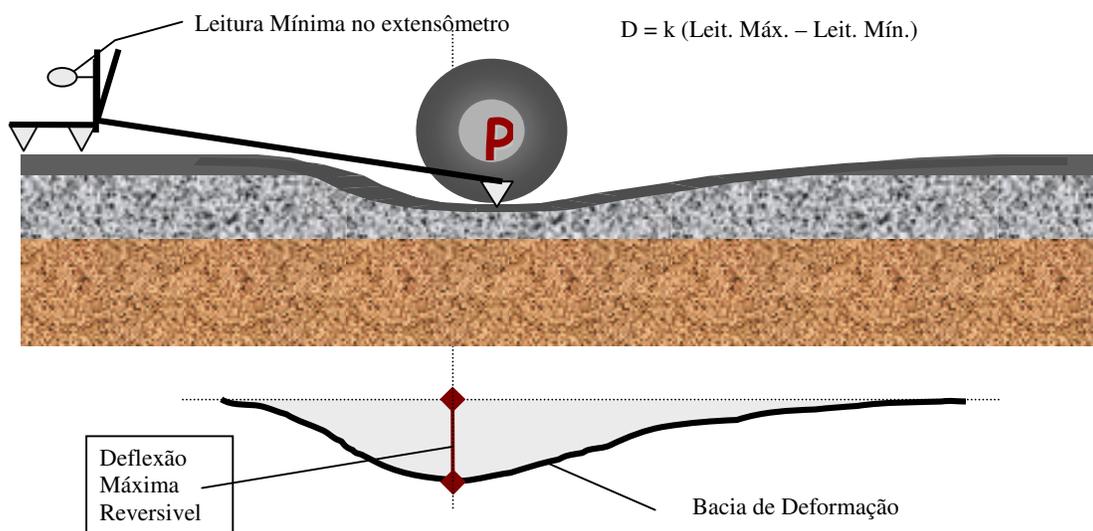


Figura 2.2 - Levantamento deflectométrico com viga Benkelman



Figura 2.3 - FWD - *Falling Weight Deflectometer*

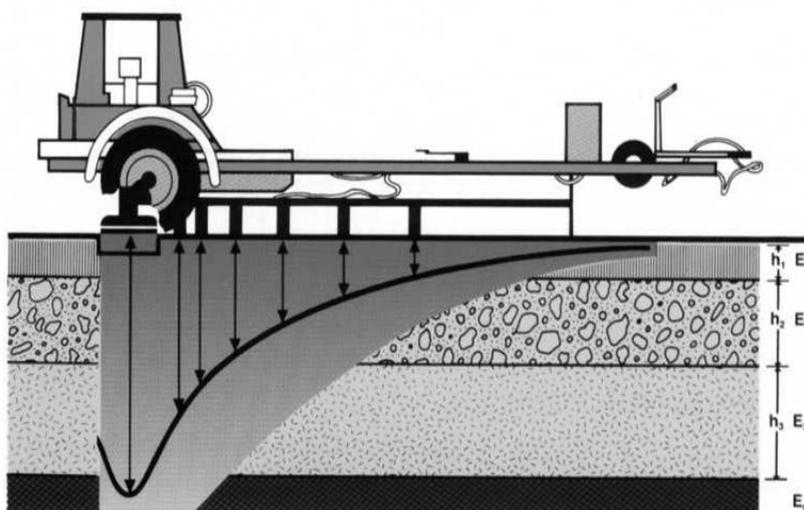


Figura 2.4 – Levantamento deflectométrico com FWD
Fonte: PINTO & PREUSSLER [46]

A metodologia utilizada para levantar os danos existentes em determinado segmento deverá permitir o entendimento da origem do defeito e do seu mecanismo de ocorrência para proposição de uma alternativa de recuperação eficaz.

Os pavimentos necessitam ser submetidos aos processos de manutenção, pois, caso contrário, sua vida útil poderá ser prematuramente reduzida face às solicitações oriundas do tráfego e aos fatores ambientais. O levantamento das condições do pavimento permitirá a

identificação do estágio de degradação e a seleção de materiais e métodos mais adequados para uma intervenção de manutenção.

2.4 TIPOS DE INTERVENÇÕES EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

THAGESEN [56] ressalta que o grande objetivo das intervenções de manutenção é preservar as condições originais do pavimento tanto quanto possível e de forma adequada para minimizar o custo total da sociedade com operações de veículos, custos com acidentes, mais o custo da própria manutenção do pavimento.

Os termos empregados para fazer referência às intervenções no pavimento podem ser definidos conforme indica a tabela 2.3.

Tipo de Intervenção	Definição
Manutenção de Rotina	Reparos localizados em pavimentos, limpeza, remoção de detritos, terra ou neve.
Manutenção Periódica	Atividades relacionadas ao melhoramento de condições superficiais com vistas à preservação da integridade estrutural e da qualidade de rolamento (com uso de reforços esbeltos em concreto asfáltico, tratamento superficial, lama asfáltica ou ainda banhos selantes)
Reabilitação	Reparos seletivos, reforços estruturais ou aplicação de camadas de regularização com a finalidade de restaurar a capacidade estrutural do pavimento ou a qualidade de rolamento.
Reconstrução	Renovação da estrutura de pavimento com remoção da estrutura danificada ou reciclagem profunda da estrutura do pavimento existente como resultado de negligência prolongada que resulta na impossibilidade de reabilitar o pavimento.
Restauração	Quando, para um mesmo projeto, serviços de reabilitação e de reconstrução são contemplados simultaneamente.
Melhoramento	Quando as atividades relacionadas às anteriores são presentes, o projeto contempla também serviços de duplicação, melhorias de traçado, ampliação, etc., exigindo a construção de novos pavimentos.

**Tabela 2.3 – Classificação dos serviços de manutenção. Fonte: Balbo [6].
Adaptado pelo autor.**

As intervenções para correção de defeitos devem ocorrer no momento certo a fim de prolongar ou manter em níveis desejáveis as características de desempenho, conforto e segurança dos pavimentos.

Se, durante a vida em serviço, não forem promovidas intervenções periódicas de manutenção, ao entrar na fase de fadiga a degradação do pavimento é acelerada, podendo ocorrer colapso na estrutura. Neste instante, já não se justifica promover o reforço, mas sim promover a reconstrução da estrutura do pavimento.

De acordo com FERNANDES JÚNIOR, ODA & ZERBINI [23], no passado a reconstrução consistia apenas na utilização de novos materiais, mas, recentemente, tem sido muito utilizada a reciclagem de pavimentos.

A reciclagem profunda, objeto do presente estudo, é uma técnica de reconstrução cujo objetivo principal é transformar um pavimento degradado em uma estrutura homogênea e apta a resistir às solicitações do tráfego. O processo consiste na reutilização dos materiais existentes na capa asfáltica e parte da base. Esses materiais são processados “in loco” por um equipamento especialmente desenvolvido para este fim, chamado recicladora de pavimentos.

Capítulo 3

RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A reciclagem profunda (*Full Depth Reclamation* – FDR) tem se mostrado uma excelente opção para recuperação de pavimentos flexíveis degradados e com insuficiência estrutural. Esse processo permite reconstruir parcialmente o pavimento velho, criando uma nova camada de base estabilizada de boa qualidade, homogênea e robusta, apta para receber novo revestimento.

A Reciclagem Profunda tem avançado rapidamente devido à chegada ao mercado de máquinas recicladoras autopropelidas, equipadas com motores de grande potência e com sistemas medidores para controlar a incorporação de água ou aditivos estabilizantes. Essas máquinas são capazes de executar a operação necessária de recuperação do pavimento numa única etapa.

As recicladoras atuais, como aquela representada na figura 3.1, evoluíram das fresadoras de asfalto e estabilizadoras de solo. São equipamentos de grande porte, altamente produtivos e podem cortar numa profundidade muito maior que suas predecessoras. Tais máquinas foram projetadas para ter capacidade de reciclar camadas espessas de pavimento. O equipamento fabricado e seus construtores têm sido pró-ativos no desenvolvimento de tecnologias e nos métodos de reciclagem.

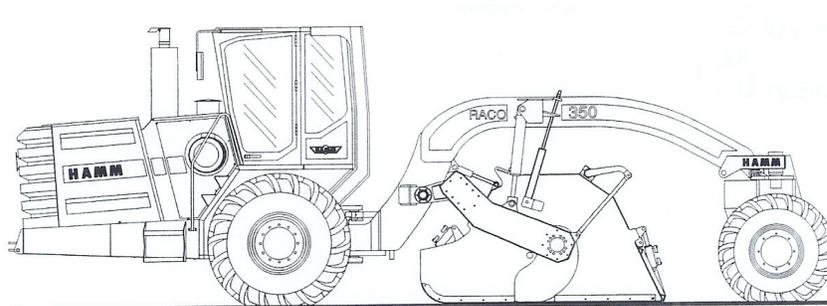


Figura 3.1 - Máquina de reciclagem profunda.
Fonte: HAMM GmbH [28]

Segundo a WIRTGEN GmbH [60], o coração dessas máquinas é um rolo misturador/fresador, equipado com um grande número de ferramentas de cortes especiais. O rolo gira, fresando o material no pavimento existente. À medida que o processo de fresagem é efetuado, água ou agentes estabilizantes líquidos são introduzidos na quantidade exata na câmara misturadora (figura 3.2).

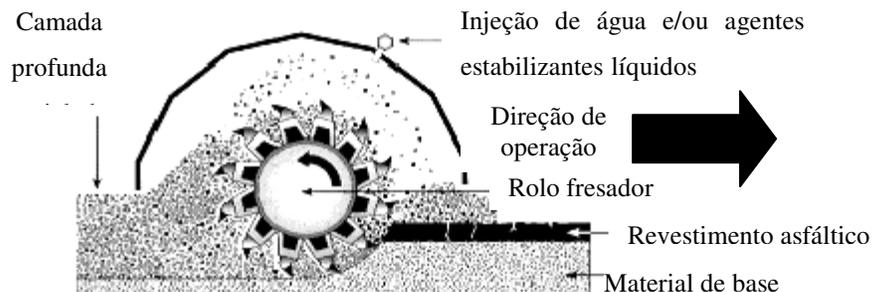


Figura 3.2 - Configuração do rolo fresador/misturador e sistemas de barra de aspersão.
Adaptado do Manual WIRTGEN [60].

A recicladora é equipada por um microprocessador que integra a variação de velocidade de deslocamento com a vazão de água ou aditivos líquidos, assegurando que o fluido poderá ser adicionado apenas quando a máquina estiver se movendo e na quantidade de aplicação necessária [42].

Os processos de reciclagem de capa asfáltica visam basicamente recuperar as propriedades reológicas do revestimento asfáltico, devolvendo-lhe suas características originais perdidas. A operação consiste na incorporação de aditivos nos materiais granulares da capa asfáltica. Na reciclagem profunda, a capa asfáltica é misturada com porção pré-determinada da base, não havendo necessariamente a aplicação de aditivos.

3.2. RECICLAGEM PROFUNDA

3.2.1 Definição

Reciclagem Profunda ou *Full Depth Reclamation* – FDR - é uma técnica de reabilitação na qual o revestimento asfáltico e uma quantidade pré-determinada de material subjacente (base, sub-base e/ou subleito) são pulverizados e misturados uniformemente para fornecer um material de base melhorado e homogeneizado [4], [10], [39] e [51].

Em vista do exposto, propõe-se a seguinte definição: a reciclagem profunda *in situ* (*Full Depth Reclamation*), ou simplesmente FDR, é um processo automatizado, no qual o revestimento asfáltico existente e parte do material subjacente são simultaneamente triturados e homogeneizados com o objetivo de serem reutilizados como uma nova camada estabilizada e homogênea, capaz de proporcionar ao pavimento novo ciclo de vida útil.

3.2.2. Aplicação da Técnica

Os tipos de defeitos que podem ser tratados pela reciclagem profunda de acordo com a ARRA – *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* [4] são:

- Trincas em bloco, longitudinais, transversais (figura 3.3 c), de bordo, trincas por fadiga (figura 3.3 a), por reflexão e pelo envelhecimento do ligante;
- Irregularidades no pavimento devido a empolamentos, afundamentos e depressões (figura 3.3 d);

- Deformações permanentes na forma de trilhas de roda, corrugações e escorregamento;
- Perda de aderência entre as camadas do pavimento e desagregações;
- Perda da integridade devido à desintegração da superfície, buracos (figura 3.3 b) e exsudação;
- Desnível excessivo do acostamento;
- Capacidade estrutural insuficiente.

Figura 3.3 - Pavimentos candidatos à reciclagem profunda



Figura 33 a – Trincas por fadiga



Figura 3.3 b - Defeito do tipo buracos



Figura 3.3 c - Defeitos do tipo trincas, buraco, desagregações



Figura 3.3 d - Deformação permanente por trilha de roda

O processo é recomendado para pavimentos que possuem problemas estruturais na base ou sub-base. Quando há necessidade de corrigir problemas no subleito, como, por exemplo, falta de suporte, o pavimento é triturado e depositado ao lado. Em seguida, o subleito é retrabalhado ou estabilizado. Estando o subleito tratado, o material reciclado volta para o local de origem, para incorporação de aditivo (se necessário) e para ser compactado e conformado geometricamente.

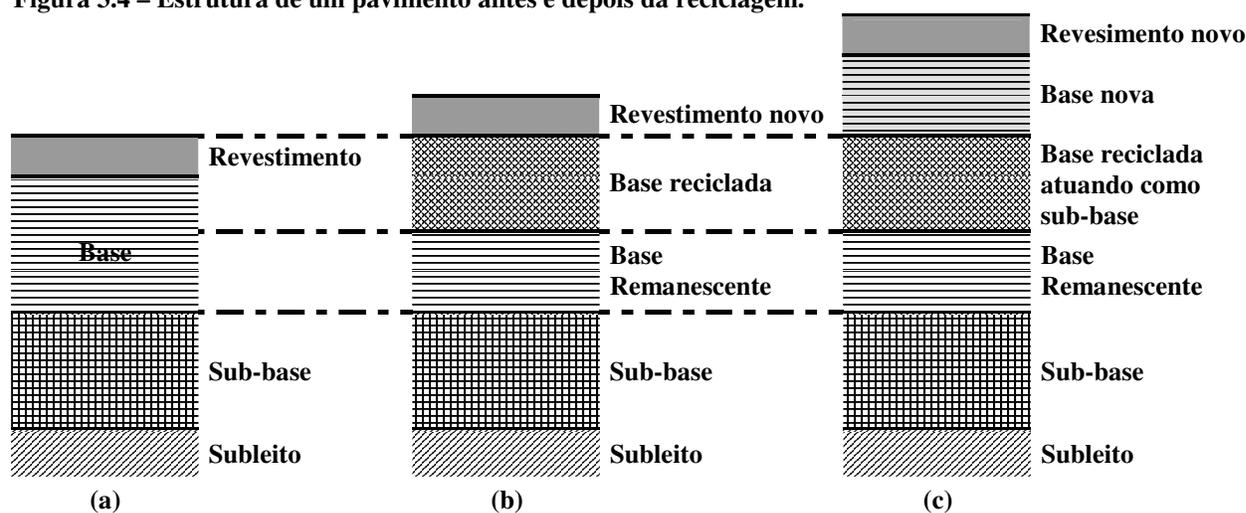
A reciclagem profunda, além de ser amplamente empregada em rodovias em geral, também pode ser usada em vias urbanas, estradas vicinais, pistas de aeroportos e de taxiamento de aeronaves, estacionamentos de veículos, áreas de armazenagem e acesso a indústrias. A profundidade da reciclagem varia normalmente de 150 a 300 mm.

3.2.3. A Camada Reciclada

A camada reciclada poderá ser transformada numa nova base ou sub-base, ou ainda poderá atuar como uma camada de reforço do subleito, quando a estrutura do pavimento antigo for composta apenas pela capa asfáltica e base.

A figura 3.4 representa esquematicamente o processo descrito. A seção (a) refere-se a um pavimento original deteriorado cujo revestimento e parte da base ao serem reciclados transformar-se-ão na seção (b). Por outro lado, se a espessura da base reciclada resultante for insuficiente para atender aos requisitos esperados, uma nova base suplementar pode ser acrescentada sobre a camada reciclada como é mostrado pela seção (c) da figura 3.4.

Figura 3.4 – Estrutura de um pavimento antes e depois da reciclagem.



- (a) Estrutura original do pavimento;
 (b) Estrutura do pavimento após reciclagem – Camada reciclada atuando como base;
 (c) Estrutura do pavimento após reciclagem – Camada reciclada atuando como sub-base.

A decisão sobre a espessura da camada e a função da mesma na estrutura do pavimento dependerá de fatores como a vida útil prevista em projeto, tipo e quantidade de agente estabilizante e a espessura do revestimento novo.

Nos casos em que a espessura do revestimento vier a ser muito grande, será necessário fresar primeiro para reduzir a espessura da camada de asfalto para uma espessura apropriada de tal modo que técnica de reciclagem profunda possa ser aplicada. Essa fresagem é também feita, às vezes, quando há restrições verticais, como meio fio e canaleta, ou para manter o greide antigo para aplicação de um revestimento asfáltico subsequente [9].

Quanto maior a espessura de capa asfáltica existente, maior será a quantidade de material fresado na mistura reciclada. Normalmente o fresado constitui-se num material de granulometria

irregular e com pouca adesão. O excesso desse material poderá prejudicar o comportamento da mistura e, portanto medidas preventivas deverão ser tomadas para evitar problemas futuros.

KAZMIEROWSKI [35] ressalta que a mistura reciclada deve conter no máximo 50% em peso de material fresado e, de acordo com JOFRÉ [34], ao aumentar a porcentagem em peso de material fresado na mistura se reduz o módulo de elasticidade. Esse fato está relacionado à dificuldade de adesão do aditivo estabilizante nos agregados cobertos de ligante betuminoso. Portanto, se a espessura do revestimento existente for tal, que, ao ser reciclado, vá produzir mais de 50% em peso de material fresado na mistura, deve-se reduzir previamente sua espessura através da fresagem.

3.2.4 Vantagens e Benefícios da Técnica da Reciclagem.

Os diversos tipos de defeitos que podem ser tratados pela reciclagem profunda por si sós justificam a validade do emprego da técnica. No entanto, além da viabilidade técnica e econômica, os benefícios ambientais são notáveis.

Em vários países já estão vigorando leis de caráter ambiental que obrigam o tratamento de resíduos em geral. Algumas legislações estabelecem que certas porcentagens deste material devem ser destinadas à construção e reabilitação de rodovias na forma de reciclagem ou se devem preferencialmente utilizar materiais reciclados, ao invés de explorar novas jazidas.

Os governos e indústrias de várias regiões do mundo estão trabalhando num projeto ambicioso para reciclar e reutilizar materiais de construção e demolição produzidos em seus países, como mostra a tabela 3.1. Na reconstrução de rodovias, grandes quantidades de materiais são adequadas para serem reutilizadas e, para isso, requerem regulamentação específica e rigorosa [50].

País	Metas
Austrália	Reduzir o material descartado em 50% no ano 2000.
Áustria	Atingir a longo prazo a reutilização de 90% de materiais de rodovias.
Bélgica	A partir de 1996, reciclar 70% de toda sobra de construção para reduzir em 30% o descarte de material.
Dinamarca	Reutilizar 54% da quantidade total de materiais refugados no ano 2000. Reutilizar 60% de restos de construção e demolição.
França	Reduzir a zero o descarte de materiais tradicionais no ano 2002.
Japão	Reduzir a geração de sobras de material para 10% e aumentar a sua reutilização de 42% a 80% até o ano 2000.
Países Baixos	Reutilizar 90% dos materiais de construção e demolição em 2000.
Reino Unido	Dobrar a utilização de materiais reciclados num prazo de 15 anos.

**Tabela 3.1 – Metas de reciclagem. Fonte: ROAD TRANSPORT RESEARCH [50].
Adaptado pelo autor.**

A sociedade, cada vez mais consciente da questão ecológica, encontra na reciclagem profunda um processo de construção ambientalmente responsável e que proporciona economia de energia e de recursos naturais não renováveis, como o óleo combustível e exploração de novas jazidas.

BRADBURY *et al* [10] salientam as seguintes vantagens e benefícios da reciclagem profunda:

- A estrutura do pavimento pode ser melhorada significativamente sem mudar a geometria do pavimento e reconstrução do acostamento;
- Pode recuperar o pavimento velho para o perfil desejado, elimina trilhas de rodas existentes, restaura a superfície e seção transversal, elimina buracos e irregularidades. Operações de alargamento de pavimento podem ser também adaptadas ao processo. A técnica fornece estrutura uniforme e com maior capacidade de suportar cargas;
- Elimina trincas do tipo couro de jacaré, transversais, longitudinais e de reflexão;
- A suscetibilidade do pavimento aos efeitos do congelamento pode ser reduzida;
- Baixo custo de produção comparado aos métodos tradicionais de reconstrução total;
- Materiais e energia são conservados. O processo é ambientalmente desejável, visto que o problema do bota-fora é evitado, e são eliminados os efeitos nocivos da baixa qualidade do ar resultante de pó, fumaça e gases.

Além do mais, a rapidez do processo permite que o pavimento seja recuperado num único dia. Assim o fluxo de veículos pode ser contínuo durante a construção, evitando a necessidade de desvios e maiores transtornos ao usuário.

Outro aspecto positivo: a seção transversal do pavimento pode ser mantida ou ajustada. Nos casos em que há limitações verticais, como meio-fio e canaletas, o greide do pavimento pode ser rebaixado para atender às necessidades de drenagem superficial. Também se pode dizer que a pequena quantidade de equipamentos necessários à execução da reciclagem profunda faz da técnica uma opção bastante atraente sob o ponto de vista operacional.

Segundo a BETTER ROADS [9], o material reciclado constitui-se numa base especialmente resistente, possibilita a aplicação de um revestimento menos caro e atinge a mesma vida útil ou ainda melhor do que seria possível com uma alternativa de reparo qualquer. Em alguns casos, pode-se usar um tratamento superficial em vez de CBUQ; em outros, poderia usar uma camada de CBUQ mais esbelta, sem comprometer a integridade da estrutura.

Um dos principais benefícios da reciclagem é a reutilização dos materiais existentes. O processo se torna possível através do emprego das modernas recicladoras, que são capazes de triturar o pavimento velho, incorporar novos materiais ou aditivos e homogeneizar a mistura ao mesmo tempo, ou seja, a reciclagem profunda é um método de construção similar à estabilização de solos e possui o mesmo objetivo: tratar o material existente com ou sem aditivos para melhorar suas propriedades físicas e mecânicas, a fim de aumentar sua capacidade de resistir às cargas aplicadas sobre o pavimento sem provocar deslocamentos apreciáveis.

As misturas resultantes da reciclagem são basicamente três:

- Misturas do material triturado com aglomerantes hidráulicos resultando numa camada rígida;
- Misturas do material triturado com ligantes betuminosos resultando numa camada flexível;

- Misturas do material triturado com agregados virgens, resultando numa camada granular.

As técnicas usadas para alcançar a estabilização ou a aditivação de misturas recicladas seguem os mesmos procedimentos normalmente empregados na estabilização de solos.

De acordo com a CMI [13], as técnicas de estabilização de solos produzem os mesmos resultados se forem aplicadas na reabilitação de pavimentos flexíveis por meio de reciclagem profunda.

3.3. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS NA RECICLAGEM PROFUNDA

3.3.1. Definição

Estabilização é o processo de homogeneização e mistura de materiais para melhorar certas propriedades do solo. O processo se dá pela homogeneização de solos para atingir a granulometria desejada ou a mistura de aditivos comercialmente disponíveis, que podem modificar a granulometria, textura, plasticidade ou agir como um ligante para cimentação [21].

De acordo com INGLES & METCALF [32], as propriedades dos solos podem ser alteradas de muitas formas diferentes dentre as quais se destacam as alterações químicas, térmicas, mecânicas e outros meios. Entretanto, deve ser ressaltado que apenas um método nem sempre é bem-sucedido para todos tipos de solo, pois existe uma grande variedade de solos.

Após compactação e cura, as misturas estabilizadas com aditivos proporcionam uma camada resistente, com alta capacidade de suportar cargas e tensões do tráfego. Além disso, os efeitos nocivos do excesso de umidade e ação do gelo/degelo podem ser atenuados pela melhoria das características do solo.

3.3.2 Usos da Estabilização

As técnicas de estabilização podem ser usadas para [21]:

•Melhoria das propriedades do solo

As melhorias mais comuns proporcionadas pela estabilização são:

- Ajuste da granulometria;
- Redução da expansão ou índice de plasticidade;
- Aumento da durabilidade e da resistência;
- Redução da permeabilidade.

•Redução da espessura da camada

A resistência e a rigidez da camada podem ser aumentadas com uso de aditivos. Os aditivos permitem reduzir a espessura da camada do material estabilizado quando comparado com um material não estabilizado.

O aditivo promove uma forte coesão entre as partículas do solo, resultando numa camada com maior resistência.

3.3.3. Vantagens do Emprego da Estabilização de Solos

As principais vantagens da estabilização conforme CMI [13] são:

- Permite usar diferentes solos inadequados;
- Elimina a necessidade e custo com escavação e remoção de solos inadequados, uma vez que não é necessária a mudança de solos;
- Elimina o custo com transporte e novos depósitos no local de trabalho de materiais mais caros;
- Reduz o custo pelo processo de mistura no local;

3.4. AGENTES ESTABILIZANTES USADOS COMO ADITIVOS

3.4.1 Conceito

Agente estabilizante é um produto usado para manter ou aumentar a resistência, durabilidade e reduzir a suscetibilidade do material à umidade ou ainda para melhorar propriedades mecânicas do material a ser tratado [4].

No caso da reciclagem profunda, o agente estabilizante atua sobre materiais de características diferentes, pois a mistura reciclada pode ser composta por solo, agregado e material fresado.

Muitas vezes, o material reciclado é por si mesmo suficiente para atuar como uma nova base do pavimento. No entanto, se não possuir as propriedades necessárias para atender às especificações de projeto, poderão ser adicionados agentes estabilizadores previamente ou durante o processo de reciclagem.

3.4.2. Tipos de Agentes Estabilizantes

De acordo com a SLURRY PAVERS [54], os principais agentes usados na reciclagem profunda são: emulsão de asfalto, asfalto expandido (espuma de asfalto), cloreto de cálcio, cal ou cimento Portland. Ao serem incorporados ao material existente, aumentam significativamente a capacidade do pavimento para suportar cargas.

Alguns agentes estabilizantes são mais eficazes para determinados materiais, outros oferecem maior vantagem de custo, mas todos têm um lugar no mercado e, na sua maioria, são mais bem aplicados quando utilizam modernas máquinas de reciclagem. Novos produtos estão sendo continuamente desenvolvidos, e é importante para a indústria que seja dada a eles oportunidade justa. A inovação deve sempre ser promovida, uma vez que nenhum agente estabilizador pode ser considerado o melhor para todas as aplicações [60].

Os agentes estabilizantes podem ser adicionados a seco ou em forma líquida, individualmente ou numa combinação de dois ou mais tipos diferentes. Esses métodos de estabilização fornecem economia considerável quando comparados a uma construção nova.

Os principais agentes estabilizadores utilizados em reciclagem profunda e na estabilização de solos são:

- Agregados;
- Cimento Portland;
- Cal;
- Cinza Volante (*Fly Ash*);
- Cloreto de Cálcio;
- Derivados de Polímeros Sintéticos;
- Emulsão de Asfalto;
- Espuma de Asfalto.

Os **agregados virgens** são adicionados para aumentar a espessura da camada, melhorar a resistência estrutural, a drenagem do pavimento ou ainda para corrigir a granulometria da mistura. Os materiais granulares mais comuns são: o cascalho, a pedra britada e o material fresado.

Quando **cimento Portland**, solo e água são misturados, uma ligação aglutinante entre as partículas do solo é formada imediatamente. Essa mistura tende a ficar cada vez mais resistente durante um longo período. A estabilização com cimento funciona melhor quando a base e/ou subleito é granular, com o índice de plasticidade baixo [11].

O cimento Portland é o agente estabilizante mais empregado nas obras de reciclagem. O fator que mais contribui para isso é a sua disponibilidade, pois pode ser encontrado em todas regiões do país.

A estabilização com **cal**, conforme CATERPILLAR [11] é um método comprovado para melhorar bases que possuem pelo menos 10% de argila reativa. Isso é verdadeiro até para bases de natureza predominantemente granular. Os benefícios se traduzem como maiores resistências à tração e à compressão, características reduzidas de contração e empolamento e resistência à penetração da água. No entanto, o benefício principal é a redução do índice de plasticidade - IP da base.

Em geral, todo solo fino tratado com cal apresenta redução de plasticidade, melhor trabalhabilidade e redução na expansão. No entanto, nem todos os solos apresentam ganho de resistência, pois as propriedades da mistura solo/cal dependem de muitas variáveis, como tipo de solo, tipo de cal, porcentagem de cal e condições de cura.

A **Cinza Volante** (*Fly Ash*) é um material residual proveniente da combustão do carvão. Contém uma combinação de sílica e alumínio que, quando misturada com cal e água, forma uma massa cimentícia endurecida capaz de obter altas resistências à compressão [21].

A cinza volante é produzida em grande escala por fábricas que utilizam como fonte de energia a combustão de materiais como carvão vegetal ou mineral e produtos betuminosos. Por ser um material abundante, pode ser adquirido a baixo custo.

Nem toda cinza volante é a mesma. A *Fly Ash* é classificada de acordo com o tipo do material da qual a queima derivou a cinza. Podem ser produzidos três tipos diferentes de cinzas: betuminosa, sub-betuminosa e lignita. A cinza volante com características de lignita e sub-betuminosa produzem material com propriedades cimentícias superiores [29].

A cinza derivada da queima da lignita ou de produtos sub-betuminosos é conhecida como *Fly Ash C*. Contém alta porcentagem de cal e é auto-reativa ou cimentícia na presença de água. *Fly Ash F* é derivada da queima de antracite ou de produtos betuminosos e contém baixo teor de cal. É necessária a adição de cal para que haja reação cimentícia, [21].

Na estabilização de solo, a cinza volante ou *Fly Ash* interage quimicamente com a cal para aumentar a resistência da camada, dando-lhe característica semelhante à do cimento Portland. Uma excelente base é produzida quando é feita mistura de cal / cinza volante e agregados virgens existentes no pavimento.

A tabela seguinte apresenta a granulometria indicada para o material ser estabilizado com cinza volante [21]:

Camada	Peneira	% Passando
Base	2"	100
	3/4"	70-100
	3/8"	50-80
	Nº 4	35-70
	Nº 8	25-55
	Nº 16	10-45
Sub-base	Nº 200	0-15
	1/2"	100
	Nº 4	45-100
	Nº 40	10-50
	Nº 200	0-15

Tabela 3.2 – Granulometria indicada para camadas estabilizadas com cinza volante.
Fonte: DEPARTMENT OF THE ARMY AND THE AIR FORCE [21].
Adaptado pelo autor

O **cloreto de cálcio** líquido é um aditivo normalmente usado em áreas onde o ciclo de congelamento e descongelamento pode causar solevamento na base. O cloreto de cálcio abaixa o ponto de congelamento do material da base recuperada e contribui também para aumentar sua capacidade de carga [11]. Segundo WITCZAK & YODER [65], os efeitos das temperaturas glaciais sobre o pavimento é um fenômeno extremamente complexo e está associado a fatores como suscetibilidade do solo ao congelamento, a diminuição lenta da temperatura do ar e a existência de água livre dentro da estrutura. Se qualquer um desses fatores descritos não estiver presente, o gelo não produzirá efeitos adversos ao pavimento. Estudos revelam que a incorporação de 0,5% de cloreto de cálcio ao material da base pode reduzir bastante ou mesmo eliminar os efeitos do congelamento. Também é dito que, quando o cloreto de cálcio é utilizado como estabilizante, menos esforços de compactação são necessários para atingir densidade máxima.

Os **derivados de polímeros sintéticos**, de acordo com WILMOT [57], são disponíveis como um pó de aparência semelhante a um cimento moído muito fino. O produto em geral consiste na mistura de um ligante térmico a base de polímero com um catalizador tipo *fly ash*. Embora o solo tratado com polímero pareça ficar enrijecido, o pavimento permanece realmente flexível, pois os polímeros não são estritamente ligantes.

WILMOT & RODWAY [58] salientam que o polímero age para preservar a resistência adequada ao material pelo processo de impermeabilização interna e externa quando este está sujeito à ação da água. O polímero envolve as partículas, criando um arranjo hidrofóbico entre o solo e os agregados, o qual reduz a permeabilidade, restringindo o ingresso de água (impermeabilização externa). O polímero também é fortemente atraído pelas partículas de argila, fazendo com que elas sejam cobertas e protegidas da água. Desse modo, os efeitos da lubrificação e amolecimento da água que entra no pavimento são muito reduzidos (impermeabilização interna).

Os polímeros são apropriados ao tratamento de solos granulares de baixa qualidade, que perdem considerável resistência em serviço quando submetidos ao excesso de umidade. Esse tipo de estabilização tem aplicação própria em regiões com alto índice pluviométrico e onde as águas da chuva inundam acostamentos.

A **emulsão de asfalto** consiste em dois líquidos não misturáveis, um disperso no outro em forma de pequenos glóbulos ou gotículas. As emulsões asfálticas padrão consistem em asfalto disperso como gotículas numa fase contínua de água, sendo que as partículas são impedidas de se juntar por um agente ativo na superfície (emulsificante), que forma uma película protetora ao redor das partículas. A maioria das emulsões usadas como agentes estabilizadores tem um componente de “asfalto residual” de 60%, o que significa que 60% do volume da emulsão é composto de asfalto disperso em 40% do volume que é água. Após a mistura com o material, a água se perde, e as partículas de asfalto são rejuntadas numa película contínua depositada na superfície do agregado [60].

A estabilização com emulsão incorpora e melhora as características de um solo através da coesão, atrito e impermeabilidade. Tem por função inibir os efeitos da ação da água. Em solos plásticos impede de se apresentarem expansivos. Já em solos não plásticos, impede de se manterem expansivos.

O uso da **espuma de asfalto** como agente estabilizante, conforme a ARRA [4], foi percebido primeiro pelo professor Ladis Csanyi na estação experimental de engenharia da Universidade do Estado de Iowa, em 1956/57, usando um processo de injeção de vapor para fazer espuma. A tecnologia foi posteriormente refinada e patenteada pela *Mobil Oil Company*, que desenvolveu a primeira câmara de expansão onde água pulverizada foi misturada com asfalto quente para produzir espuma. Quando a espuma de asfalto entra em contato com o material recuperado, as bolhas de betume explodem em milhões de "glóbulos" pequenininhos que procuram e aderem às partículas finas, especificamente a fração que passa na peneira N° 200 (0,075 mm). Essa atração preferencial pelas partículas finas cria uma ligação de "filler" que age como argamassa de ligação e adere às partículas grossas.

Essa modalidade de reciclagem tem sido utilizada com sucesso no tratamento de uma grande variedade de materiais. O fator preponderante para aplicação da técnica é a granulometria da mistura, pois, se um material for deficiente em agregados finos, a espuma não se dispersará bem entre as partículas. A literatura pesquisada [7], [24], [33] e [63] recomenda que, no mínimo, 5% da mistura reciclada passe pela peneira N° 200 (0,075 mm), uma vez que é na fração fina que a espuma de asfalto vai atuar com maior intensidade, devido à sua maior superfície específica.

A espuma de asfalto pode ser aplicada isoladamente ou em conjunto com cimento. A adição de cimento (aproximadamente 1 a 2%) confere à mistura melhor resistência à ação da água e também melhor capacidade estrutural na comparação com o uso da espuma isoladamente. O cimento pode ser aplicado a seco (na forma de pó) à frente da recicladora ou na forma de nata por equipamentos específicos.

A tabela 3.3 fornece um guia muito amplo de como começar a selecionar o agente mais adequado ao material existente. A partir daí deve-se fazer um projeto de mistura em laboratório para determinar a porcentagem de aditivo.

Agente	Brita	Pedregulho grosso	Silte argiloso	Areia*	Argila siltosa arenosa	Argila
Cimento	A	A	A	B	B	N
Cinza Volante (<i>Fly Ash</i>)	A	A	A	A	A	B
Cal hidratada	B	B	A	N	B	A
Cal hidratada + Cimento	N	N	B	N	B	A
Poliméricos	B	A	A	B	A	B
Betume	A	A	B	B	N	N
Espuma de Asfalto	B**	A	B	B**	A	A

Tabela 3.3 – Aditivo apropriado ao tipo de solo. Fonte: WILMOT [57], Adaptado pelo autor.

Normalmente muito adequado A
 Normalmente satisfatório B
 Normalmente inadequado N

* Depende da granulometria.

**Pode ser necessário adicionar material fino.

3.4.3. Vantagens e Desvantagens dos Agentes mais Usados na Reciclagem Profunda

Conforme já foi apresentado, uma série de agentes estabilizadores é disponibilizada atualmente e podem ser usados para melhorar as propriedades físicas e de resistência do solo. Em geral, todos cumprem bem sua principal função, que é a de aumentar a resistência da camada pela ligação das partículas do material. No entanto, algumas características indesejáveis se manifestam após a estabilização e podem influenciar no desempenho da camada.

Para selecionar o tipo de agente e a quantidade necessária, deve-se desenvolver um projeto de mistura racional e prático, como também avaliar a sua eficácia e o desempenho da mistura em campo [39].

Quanto aos aspectos de comportamento da mistura, as desvantagens do agente também deverão ser consideradas a fim de que sejam tomadas medidas preventivas para eliminar ou atenuar os efeitos que poderão acarretar posteriormente.

As principais vantagens e desvantagens do emprego de agentes estabilizantes de uso mais comum na reciclagem profunda estão descritas nas tabelas seguintes:

Cimento Portland	
Vantagens	Desvantagens
Disponibilidade: O cimento pode ser obtido em todo o mundo, ensacado ou a granel.	O trincamento por contração é inevitável, porém pode ser minimizado.
Custo: Comparado com asfalto, o cimento é normalmente barato.	Aumenta a rigidez, o que reduz as características de fadiga.
Facilidade de aplicação: O cimento pode sempre ser espalhado à mão, à falta de espalhadores e misturadores de suspensão.	Requer cura adequada. O tráfego prematuro pode causar danos à superfície.
Aceitação: O cimento é bem conhecido na indústria da construção. Geralmente acham-se disponíveis métodos de testes padrões e especificações.	
Melhoria significativa das propriedades de resistência à compressão com a maioria dos materiais.	
Melhora a resistência do material à água.	

Tabela 3.4 – Vantagens e desvantagens do uso do cimento Portland na reciclagem profunda.
Fonte: WIRTGEN GmbH [60].

O eventual trincamento de uma camada estabilizada com cimento é a principal desvantagem do emprego desde aditivo, principalmente se a camada aditivada venha a ficar imediatamente abaixo do revestimento, pois nesta situação este trincamento poderá se propagar para capa asfáltica.

Emulsão de Asfalto	
Vantagens	Desvantagens
<p>Pavimento flexível: A estabilização com asfalto cria um material visco-elástico com propriedades superiores de fadiga.</p> <p>Facilidade de aplicação: A recicladora é acoplada ao carro-tanque para aplicação através de uma barra de aspersão.</p> <p>Aceitação: As emulsões asfálticas são razoavelmente conhecidas na indústria da construção. Aham-se disponíveis métodos de testes padrões e especificações.</p>	<p>Custo: As emulsões asfálticas normalmente não são fabricadas no local – o processo requer um rigoroso controle de qualidade. Agentes emulsificantes são caros. Transporte de água, não apenas de asfalto.</p> <p>O teor de umidade do material no pavimento existente é às vezes muito elevado e torna-o saturado, quando é adicionada a emulsão.</p> <p>A cura pode levar muito tempo. O desenvolvimento da resistência está relacionado com a perda de umidade.</p> <p>Disponibilidade: É possível que a formulação necessária para o trabalho de reciclagem possa não ser obtida.</p>

Tabela 3.5 – Vantagens e desvantagens do uso da emulsão de asfalto na reciclagem profunda.

Fonte: WIRTGEN GmbH [60].

Espuma de Asfalto	
Vantagens	Desvantagens
<p>Facilidade de aplicação: Da mesma forma que a emulsão asfáltica, é aplicada através de uma barra de aspersão especial, depois de acoplado o carro-tanque de suprimento.</p> <p>Pavimento flexível e resistente: O material tratado com espuma de asfalto forma uma argamassa flexível, que liga as partículas mais espessas. Portanto, apresenta superior resistência à deformação e à fadiga.</p> <p>Custo: A espuma de asfalto utiliza um asfalto com grau de penetração padrão. Não há custos de fabricação.</p> <p>Taxa de ganho de resistência: O material pode ser submetido ao tráfego imediatamente após aplicado.</p>	<p>A espumação requer que o asfalto esteja quente, geralmente a 170°C, o que exige instalações especiais para aquecimento e precauções de segurança.</p> <p>Qualidade do asfalto: A qualidade do material estabilizado é determinada pelas características de espumação, que dependem principalmente da qualidade do asfalto.</p> <p>Tipo e condição do material: Material saturado e material deficiente de agregados finos não podem ser tratados com espuma de asfalto.</p> <p>A cura da camada deverá ser cuidadosa.</p>

Tabela 3.6 – Vantagens e desvantagens do uso da espuma de asfalto na reciclagem profunda.

Fonte: WIRTGEN GmbH [60] – Adaptado pelo autor

Pode-se dizer que a cal possui vantagens e desvantagens similares ao cimento Portland quando empregada na reciclagem profunda. Neste caso, normalmente é desnecessário o uso da cal, para baixar o índice de plasticidade do material reciclado, pois a capa asfáltica, depois de

triturada, transforma-se num material grosso e áspero e, ao ser incorporado ao solo, reduz substancialmente sua plasticidade.

A utilização de agregados na reciclagem profunda é vantajosa porque o processo operacional é mais simples e não requer controle tão acurado quando comparado a outras técnicas, como espuma de asfalto. A grande desvantagem é que se trata de recurso natural não renovável e a sua exploração se traduz em agressões ao meio ambiente.

Não há tradição no Brasil nas obras de reciclagem profunda, o emprego dos demais agentes estabilizantes citados: cinza volante, cloreto de cálcio e os derivados de polímeros sintéticos.

3.4.4. Fatores a serem Considerados na Escolha do Agente

Segundo a CMI [13], o tipo e a quantidade de agente estabilizador são ditados pelo tipo de solo, o tamanho das partículas (granulometria), teor de umidade e as especificações de suporte de carga prevista em projeto.

Mais de um agente pode ser usado para estabilizar o mesmo tipo de material; entretanto, existem algumas diretrizes como granulometria, plasticidade ou textura que ajudam escolher o estabilizador específico mais adequado.

O cimento Portland, por exemplo, é usado com uma variedade de tipos de solos, mas tem demonstrado mais eficiência para tratar solos granulares bem graduados, que possuem finos suficientes para produzir mistura homogênea. Para tratar materiais mais plásticos, o cimento Portland deve ser evitado. A cal reagirá com solos de média a alta plasticidade para produzir um decréscimo da plasticidade, reduzir a expansão e aumentar a resistência [21].

Os agentes cimentícios, como a cal, cimento Portland e a cinza volante, são muito eficientes para tratar materiais que apresentam excesso de umidade, pois, ao serem misturados, absorvem parte da umidade existente.

A WIRTGEN [60] acrescenta ainda que os seguintes aspectos também deverão ser observados na escolha do agente:

Preço: O custo unitário do estabilizador, expresso em metro quadrado de camada acabada, será sempre o ponto principal;

Disponibilidade: Agentes estabilizadores específicos podem não ser encontrados em algumas partes do mundo. Um exemplo é a emulsão asfáltica, que atualmente não é fabricada em alguns países;

Características do Material: Alguns agentes estabilizadores são mais eficazes que outros em certos tipos de material. Por exemplo, é preferível usar a cal em lugar do cimento, para estabilizar solos altamente plásticos;

Política: Algumas empresas rodoviárias têm tradição com referência ao uso de certos agentes estabilizadores, muitas vezes influenciadas por experiências.

Capítulo 4

INVESTIGAÇÃO DO PAVIMENTO PARA FINS DE RECICLAGEM PROFUNDA

4.1. INTRODUÇÃO

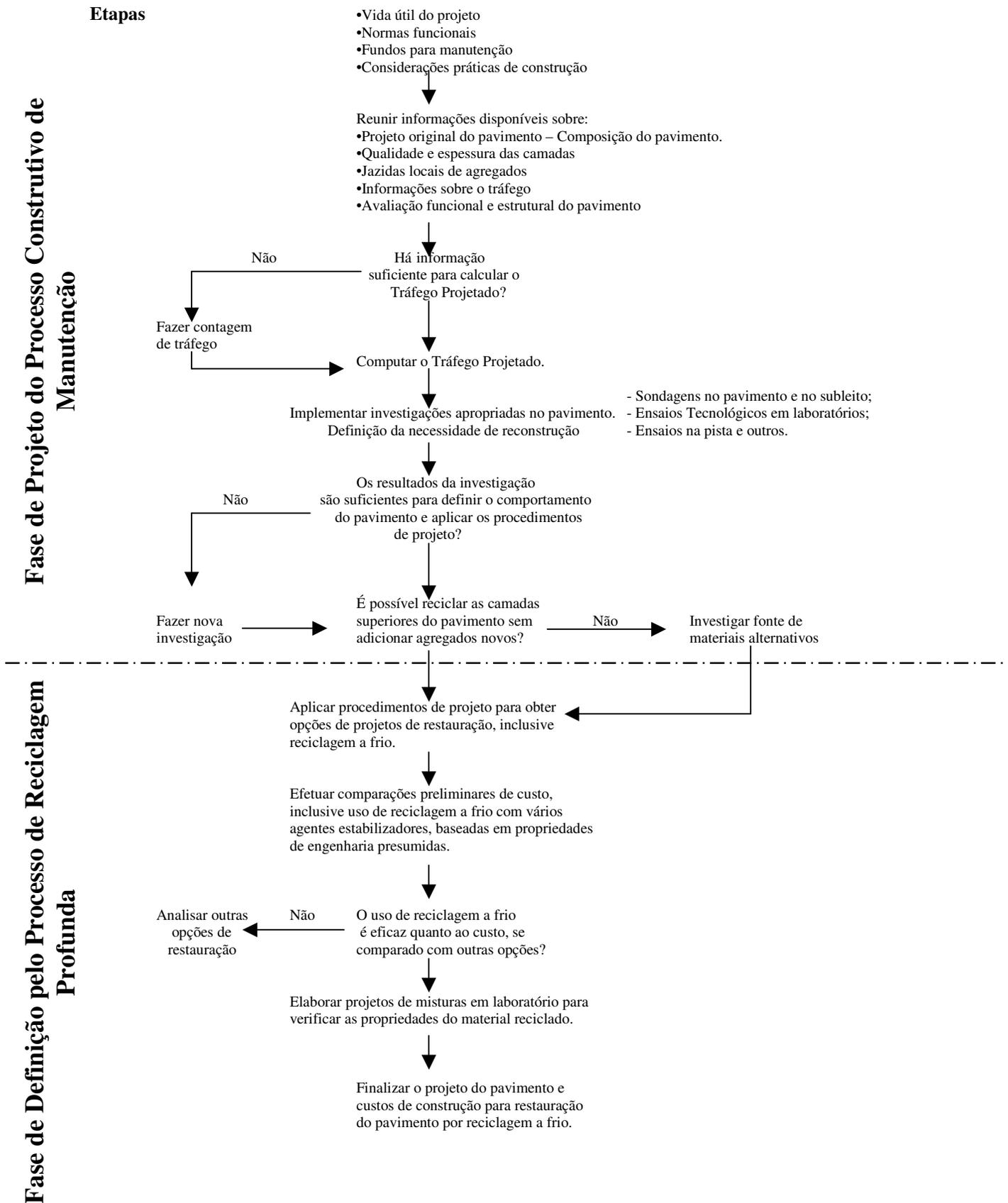
Antes da técnica de reabilitação ser escolhida, a raiz do problema deve ser cuidadosamente investigada. Essa investigação preliminar é crucial para assegurar que a técnica selecionada tratará adequadamente a causa ou as causas da deterioração do pavimento de forma viável sob o ponto de vista técnico e financeiro.

O propósito da investigação é adquirir informações suficientes para possibilitar um projeto de restauração apropriado a ser realizado no pavimento. O tipo e a extensão do trabalho de investigação serão bastante variados, dependendo das informações necessárias para um projeto específico e, portanto, uma estreita interação entre investigação e projeto é essencial [60].

A reciclagem profunda pode ser usada numa grande variedade de pavimentos deteriorados. Como outros métodos de reabilitação de pavimentos, o sucesso da técnica dependerá do conhecimento do desempenho do pavimento, do exame detalhado das condições existentes e de todas informações disponíveis e de um projeto de mistura adequado. Esses fatores são essenciais para alcançar os resultados previstos.

O fluxograma seguinte apresenta um modelo da metodologia que pode ser adotado para investigação e projeto do pavimento para reciclagem profunda.

Figura 4.1 - Fluxograma detalhando a metodologia de investigação e projeto de pavimento para fins de reciclagem profunda. Fonte: WIRTGEN GmbH [60] . Adaptado pelo autor.



4.2. AVALIAÇÃO DO PAVIMENTO

4.2.1 Considerações Iniciais

O pavimento será avaliado através de métodos adequados de investigação. As informações levantadas deverão fornecer um banco de dados suficiente para realizar um projeto de recuperação que satisfaça as exigências requeridas. O levantamento de campo consiste nos seguintes estudos:

- Levantamento do histórico do pavimento;
- Avaliação das condições da superfície;
- Avaliação estrutural do pavimento;
- Análise das propriedades dos materiais existentes;
- Avaliação das condições geométricas;
- Identificação das Jazidas e Fontes de Recursos para Execução da Obra.

4.2.2. Levantamento do Histórico do Pavimento

Esse levantamento tem por objetivo subsidiar o diagnóstico do segmento a ser recuperado através de informações históricas do pavimento. O Programa de Recuperação e Manutenção da Rede Remanescente – CREMA [19], do antigo DNER e atual DNIT, estabelece os critérios que devem ser observados neste levantamento:

- Identificação do trecho em relação ao PNV;
- Data da entrega do pavimento ao tráfego;
- Histórico do tráfego;
- Informações sobre o projeto original do pavimento: características do subleito, espessura e constituição das camadas de pavimento, natureza e período de execução, seção transversal, tipo do pavimento;
- Informações sobre as obras de restauração já executadas:
 - Período de execução;

- Tipo de solução;
 - Espessura das camadas;
 - Histórico dos resultados.
- Informação sobre as intervenções de manutenção:
- Período de execução;
 - Características dos serviços;
 - Histórico dos resultados.
- Outras informações julgadas necessárias.

4.2.3. Avaliação das Condições da Superfície

A avaliação das condições da superfície do pavimento consiste em identificar a situação em que se encontra a superfície de rolamento quanto à existência de defeitos superficiais e à frequência em que ocorrem. Quando possível, toda a extensão do pavimento é inspecionada, detalhando o tipo, severidade e frequência dos defeitos encontrados.

De acordo ainda com o CREMA [19], no levantamento das condições da superfície do pavimento, deverão ser cadastrados os seguintes tipos de desgastes:

- Cadastramento de buracos, exsudações, depressões, deformações, desagregações e outros defeitos da superfície de rolamento das pistas e acostamentos;
- Cadastramento dos segmentos com desnível entre pistas e acostamentos superiores a 5,0 (cinco) centímetros;
- Localização de caracterização dos materiais ou obstáculos, inclusive “quebra-molas” sobre as pistas ou acostamentos;
- Cadastramento das áreas de acostamento cobertas por vegetação;
- Cadastramento das áreas de acostamento com erosões ou depressões acentuadas.

4.2.4. Avaliação Estrutural do Pavimento

A avaliação da capacidade estrutural do pavimento é realizada para determinar a capacidade estrutural necessária ao tráfego previsto durante a vida futura do projeto e avaliar a capacidade de suporte do subleito e a espessura requerida para sua proteção.

As características de deformabilidade e resistência à ruptura por cisalhamento das camadas do pavimento e do subleito poderão ser avaliadas através de ensaios estruturais destrutivos e não destrutivos.

Segundo a ARRA [4], ensaios estruturais de carregamento dinâmico como o FWD também podem ser usados para avaliar a capacidade de carga do subleito e nas camadas do pavimento pela retroanálise dos módulos de resiliência.

Essa informação é usada para análise mecânica do pavimento. A análise mecânica é realizada nessa fase para examinar a capacidade estrutural do pavimento e para destacar qual segmento possui deficiência estrutural. O módulo usado na análise pode ter sido originado de resultados de laboratório obtidos a partir de amostras retiradas dos poços de inspeção ou da retroanálise de medidas de deflexão. As espessuras das várias camadas do pavimento também são usadas como dados de entradas à análise mecânica [36].

Um instrumento pouco utilizado no Brasil, porém de grande aceitação na Europa e Estados Unidos é o *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP). A literatura pesquisada, [4], [36] e [60], recomenda esse tipo de ensaio nas obras de reciclagem profunda para avaliar a capacidade de carga do subleito.

Vários métodos de avaliação estrutural podem ser utilizados na investigação do pavimento, desde métodos empíricos relativamente simples até modelos mais complexos, utilizando sofisticados programas computacionais. A tabela 4.1 apresenta um resumo dos vários métodos.

Ordem crescente de complexidade e confiabilidade	Métodos de projeto	Teste / Análise	Pesquisas necessárias
	Métodos de Projeto CBR	Testes CBR	Testes de laboratório
	Penetrômetro Cônico Dinâmico (PCD)	CBR/Resistência compressiva não confinada/módulo E	Sondagem de PCD
	Métodos de Projeto com deflexões baseadas em: Deflexão da superfície e Bacias de deflexão	Deflexão	Medições de deflexão superficial e bacias de deflexão
	Métodos de Projeto Mecanístico	Módulo E/coeficiente de Poison. Espessuras da camada	PCD Bacias de deflexão Teste de laboratório

Tabela 4.1 - Aplicação de vários métodos de projeto. Fonte: WIRTGEN Gmbh [60].

O projeto da mistura reciclada deverá ser sempre precedido da avaliação estrutural do estado atual de deterioração do pavimento. Conhecendo a capacidade estrutural do pavimento, a resistência da camada reciclada dar-se-á em função do tipo e quantidade de agente estabilizante.

4.2.5. Análise das Propriedades dos Materiais Existentes

Essa análise é feita em laboratório, podendo ser utilizado o material coletado dos poços de inspeção abertos durante a fase de avaliação estrutural do pavimento.

Os poços de inspeção constituem uma parte importante na investigação do pavimento. Além de permitirem boa avaliação visual do material das camadas do pavimento, expostas nas laterais, eles proporcionam a oportunidade de extrair amostras para ensaios em laboratório. Essas amostras podem ser testadas para avaliar a qualidade do material existente no pavimento, bem como para coletar amostras de material para projetos de mistura, sendo que os resultados indicarão o tratamento mais eficiente para os materiais a serem reciclados [60].

Os poços de inspeção são normalmente abertos nos locais onde o pavimento apresenta deficiência estrutural visível. Apesar da vantagem de obter amostras representativas, os poços de inspeção representam um método de ensaio de custo elevado, além de ter um impacto significativo no tráfego.

A ARRA [4] recomenda estabelecer um plano de coletas de amostras, utilizando um intervalo fixo qualquer ou métodos de ensaios para determinar locais aleatórios para coleta de material. As amostras devem ser obtidas numa frequência aproximada de 250 a 500 metros ou às vezes maior, se as condições justificarem. A quantidade de material a ser coletado dependerá do número de poços de inspeção, da quantidade de ensaios de laboratório e do tipo do projeto de mistura que será adotado.

De acordo com a mesma entidade, as amostras serão ensaiadas em laboratório para determinar:

- Teor de umidade;
- Granulometria resultante do revestimento asfáltico triturado;
- Teor residual de asfalto (se for usada emulsão de asfalto como agente estabilizante);
- Propriedades dos agregados, inclusive granulometria e angularidade;
- Propriedades do asfalto recuperado, penetração, viscosidade absoluta e/ou cinemática (se for usada emulsão de asfalto como agente estabilizante);
- Índice de plasticidade;
- Valor do equivalente de areia;
- CBR.

Para fins de amostragem do revestimento asfáltico, o ideal seria utilizar a própria recicladora que vai executar a reciclagem para coletar amostras desse material. Não sendo possível, pode-se utilizar uma fresadora de pequeno porte para esse fim. Uma das vantagens desse procedimento é que a granulometria resultante da amostra é similar à da recicladora.

4.2.6. Avaliação das Condições Geométricas

O processo de reciclagem profunda também pode ser usado com sucesso em projetos em que há necessidade de fazer remodelagem na pista. A recicladora é um equipamento manobrável e de grande mobilidade, capaz de se adaptar às características geométricas da estrada e fazer

correções ou melhorias nos perfis longitudinais e transversais concomitantemente à operação de recuperação do pavimento.

A avaliação geométrica deve ser feita observando se os seguintes parâmetros [4]:

- Necessidade de alargamento ou realinhamento da rodovia;
- Existência de dispositivos de drenagem no subsolo e sua profundidade;
- Necessidade de melhorar algum dispositivo subterrâneo;
- Necessidade de correções no perfil longitudinal;
- Necessidade de correções na inclinação transversal.

A correção dos perfis longitudinal e transversal ocorre após o material existente ser adequadamente triturado e misturado, com ou sem aditivos estabilizantes. Em seguida, o greide da camada reciclada é modelado por uma motoniveladora de acordo com os requisitos de projeto.

Em alguns casos, a espessura do pavimento existente pode ser insuficiente para criar a espessura desejada de base tratada. Nesse caso, deve-se lançar previamente sobre o pavimento a quantidade necessária de material importado para ser incorporada à base. Depois de incorporado e misturado, o material de base está pronto para conformação e compactação [42].

4.2.7. Identificação das Jazidas e Fontes de Recursos para a Execução da Obra

• Materiais importados

Materiais naturais como areia, cascalho e brita podem ser necessários à mistura reciclada para corrigir a granulometria final, melhorar as propriedades mecânicas ou ainda como material suplementar para correções geométricas da pista [36].

O projeto da mistura reciclada indicará a necessidade de incorporação de materiais e/ou agentes estabilizantes. Normalmente o material escolhido será preferencialmente o existente na região ou o mais próximo do local da obra. Devido à natureza dinâmica da operação de reciclagem, os materiais necessários deverão ser adquiridos continuamente e disponibilizados na

obra. Para tanto, deve-se estabelecer previamente jazida ou fornecedores de materiais capazes de atender ao consumo diário previsto. Amostras desses materiais deverão ser levadas ao laboratório, a fim de que sua qualidade seja avaliada.

•Água

Na maioria das obras de reciclagem profunda, o consumo de água é bastante significativo, principalmente em regiões muito secas ou áridas. A água utilizada no processo deverá estar limpa e isenta de impurezas.

O fornecimento contínuo de água é um aspecto importante na reciclagem. Antes de iniciar a obra, deve-se identificar uma fonte que atenda aos requisitos de qualidade, como também ao consumo necessário na operação e a outros consumos eventuais como, por exemplo, o espargimento de água nos desvios para reduzir a quantidade de poeira em suspensão. Também deverá ser avaliada a quantidade necessária de caminhões-pipa para atender à obra.

Capítulo 5

PROJETO DE MISTURAS RECICLADAS

5.1. INTRODUÇÃO

Usando os resultados da investigação do pavimento, das análises de laboratório dos materiais existentes e dos dados do tráfego, será possível determinar que tipo de mecanismo de estabilização ou combinação de agentes estabilizantes será empregado no projeto de recuperação do pavimento.

O projeto de mistura deverá contemplar as condições específicas do pavimento estudado. Para o sucesso da técnica, é fundamental que sejam feitos ensaios preliminares de laboratório, a fim de otimizar a quantidade de agente estabilizante e propriedades físicas e mecânicas da mistura recuperada.

A definição do traço da mistura representa um ponto de partida para a implementação da reciclagem. No entanto, não significa que o projeto de mistura vai reproduzir fielmente o que acontecerá no campo na hora da construção. Normalmente são feitos ajustes de campo baseados no controle de qualidade e nos resultados dos ensaios.

5.2 TIPOS DE ESTABILIZAÇÃO

Existem várias técnicas de estabilização de solo e elas variam muito de uma região para outra. O que é um processo comum numa determinada região pode ser totalmente desconhecido em outra. Como já foi visto, vários fatores podem influenciar na escolha do agente estabilizante e conseqüentemente no tipo de estabilização.

De acordo com a ARRA [4], existem quatro tipos diferentes de estabilização:

- Mecânica;
- Química;
- Betuminosa;
- Combinada.

Segundo a mesma entidade, a estabilização mecânica é obtida pela adição de materiais granulares, tais como agregados novos, material fresado ou concreto de cimento Portland britado. A estabilização química se dá com a incorporação de cal, cimento Portland, cinza volante, cloreto de cálcio ou de magnésio ou ainda com outros produtos químicos patenteados. A estabilização betuminosa é obtida com o uso de emulsão de asfalto ou ainda com asfalto expandido (espuma de asfalto). Para melhorar o desempenho da camada reciclada, poderá ser feita uma combinação entre mais de um tipo de estabilização (estabilização combinada).

5.3 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA

A estabilização mecânica se dá pelo entrosamento de partículas com tamanhos diferentes dentro da camada. O processo ocorre na forma de incorporação de materiais granulares, tais como cascalho, brita ou material fresado na estrutura do pavimento velho.

A quantidade e granulometria de materiais granulares dependem das condições existentes do pavimento e das propriedades do material reciclado. O material fresado e qualquer outro material granular que for adicionado deve agir de forma semelhante a uma base granular na reabilitação da estrutura do pavimento [4].

A adição de material granular para melhorar o desempenho da camada reciclada poderá incorrer em algumas limitações:

- **Manutenção do Greide do Pavimento:** Dependendo da quantidade de material granular a ser incorporado, a espessura da camada reciclada poderá aumentar a ponto de superar a altura de meios-fios, criar degraus entre a pista e acostamento, “afogar” dispositivos de drenagem e diminuir a altura livre sob pontes, viadutos e dentro de túneis.
- **Granulometria do Material Reciclado:** A granulometria do material fresado é inadequada e precisa ser corrigida. Muitas vezes, a mistura do revestimento triturado com a base requer uma composição de pedra britada com diferentes diâmetros para enquadrar a mistura dentro de uma faixa granulométrica de serviço. Isso representa um controle a mais na operação, pois o material britado deverá ser misturado previamente em quantidades proporcionais para atingir a granulometria desejada da mistura.
- **Espessura de Compactação:** As modernas recicladoras usadas no processo de reciclagem profunda podem triturar e misturar a estrutura do pavimento existente em profundidades significativamente maiores do que pode ser facilmente densificada com um auxílio de um equipamento de compactação comum. Quando a adição de materiais granulares resulta numa camada com espessura maior do que pode ser densificada adequadamente, a compactação deverá ser feita em mais de uma camada [4].

O agregado é lançado na pista previamente à passada da recicladora (figura 5.1) ou poderá ser aplicado após a primeira passada da recicladora. Nesse caso, a trituração e mistura do pavimento será feita em duas ou mais etapas.

O material deverá ser espalhado uniformemente em todo o segmento de trabalho (figura 5.2). Os equipamentos mais comuns utilizados para essa finalidade são a motoniveladora e o distribuidor de agregados. A quantidade aplicada normalmente é controlada pela espessura da camada de agregado espalhado na pista. Segue-se então a execução da reciclagem profunda, como pode ser visto na Fig. 5.3.



Figura 5.1 – Lançamento de agregado novo na pista

Figura 5.2 – Espalhamento de agregado novo



Figura 5.3 – Reciclagem profunda com incorporação de agregados novos

Os ensaios de laboratório para projeto de misturas estabilizadas mecanicamente consistem nas seguintes etapas:

- **Preparação das Amostras:** O material fresado e o material de base deverão ser coletados separadamente. Se não for possível retirar uma amostra do revestimento com uma recicladora ou fresadora, o caminho a ser tomado é retirar da pista um bloco do revestimento e triturá-lo na máquina de abrasão até atingir uma granulometria parecida com a do fresado.
- **Granulometria da Mistura:** O material fresado será misturado com o material de base em quantidades proporcionais. A quantidade de cada material é função das espessuras existentes de revestimento e da base, que serão usadas no processo. A amostra será misturada completamente e depois lavada para ser submetida ao ensaio de granulometria. Definindo-se a granulometria da mistura do fresado com a base, deve-se verificar se a mesma está atendendo a alguma faixa granulométrica de trabalho. Se atender, o projeto de mistura prosseguirá; caso contrário, a granulometria da mistura deverá ser ajustada com a adição de material granular.
- **Determinação da Umidade Ótima e Densidade Máxima:** Uma vez definida a granulometria da mistura, o teor de umidade ótima e a densidade máxima poderão ser determinados. Para isso, são usados métodos comuns, tais como o Proctor Modificado ou métodos similares.
- **Determinação do IP (Índice de Plasticidade):** Misturas que contenham capa asfáltica triturada dificilmente apresentam altos índices de plasticidade. O revestimento triturado se transforma num material grosso e áspero. No entanto, a plasticidade da mistura deverá ser conhecida, pois não se recomendam materiais de base que tenham um IP maior que seis.

- **Ensaio de Resistência:** De acordo com a ARRA [4], a resistência da mistura reciclada poderá ser verificada por métodos comuns, tais como o *Califórnia Bearing Ratio* - CBR, Resistência a Compressão Simples ou ensaios similares. Os resultados dos ensaios de resistência são usados para confirmar as propriedades mínimas de resistência da mistura reciclada ou usada pelo projetista para determinar toda a estrutura necessária ao pavimento.

Se apenas a trituração do pavimento ou a estabilização mecânica com a adição de agregados novos não atender aos requisitos de projeto, então a estabilização química ou betuminosa poderá vir a ser usada. Não há regras fixas com relação à escolha de um mecanismo de estabilização ou de agentes estabilizantes.

5.4 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

A estabilização química é um processo em que são adicionados agentes aglomerantes, tais como cimento Portland, cal, cinza volante (*Fly Ash*), cloreto de cálcio ou a mistura desses produtos, para aumentar a resistência do material reciclado através da coesão das partículas.

Nessa modalidade de estabilização, a adição de maior quantidade de agente estabilizante para obter resistências mais elevadas pode ser prejudicial ao desempenho da camada. O material tratado à base de cimento tende a ser quebradiço, com uma conseqüente redução nas propriedades de fadiga da camada estabilizada. Isso leva à proliferação de trincas (por contração e pela ação do tráfego), e trincas nas camadas de pavimento são sempre indesejáveis.

A reflexão das trincas por contração ou trincas futuras por fadiga pode ser administrada através de tratamentos especiais, tais como asfalto com borracha, mantas geossintéticas, asfaltos modificados, aplicação de camadas espessas de revestimento ou de camadas granulares. Esse fenômeno ocorre invariavelmente nas camadas estabilizadas com cimento Portland.

A aplicação de Cimento Portland, Cal e Cinza Volante se dá na forma de pó (a seco), na forma de nata (*slurry*) ou em estado líquido para os compostos químicos. Independentemente da forma de aplicação, o agente deverá ser aplicado uniformemente em todo o segmento de trabalho e na taxa correta.

Segundo a WIRTGEN GmbH [60], a aplicação desses agentes pode ocorrer conforme três diferentes métodos:

- **Espalhamento Manual:** Fornecido em sacos e espalhado a mão. Esse método é tradicional em países em desenvolvimento, onde a mão-de-obra é farta e barata. Pode ser conseguida notável precisão se a área a ser coberta pelo conteúdo de um saco for cuidadosamente demarcada com placas.

As figuras 5.4 e 5.5 mostram a técnica de espalhamento manual sendo empregada na rodovia SP 351, na região de Bebedouro/SP, e, na seqüência, a figura 5.6 mostra o pavimento sendo reciclado com o cimento que foi espalhado previamente.



Figura 5.4 – Lançamento de cimento em sacos na pista.



Figura 5.5 - Espalhamento manual de cimento.



Figura 5.6 - Reciclagem profunda com incorporação de cimento.

- **Espalhamento Mecanizado:** O espalhamento mecanizado pode ser realizado das seguintes formas:

- Em pó, conforme figura 5.7;
- Em nata, conforme figura 5.8.

O espalhamento do cimento/cal em pó na superfície do pavimento se dá através de correias transportadoras, alimentadores helicoidais ou sopradores pneumáticos. Geralmente são realizados testes para verificar a taxa de aplicação.

De acordo com a WIRTGEN GmbH [60], as características importantes de todos os espalhadores são:

- Largura variável para suprir as variações da largura da reciclagem (recobrimentos);
- Capacidade de serem calibrados (kg/m^2) para produzir uma taxa precisa de espargimento;
- Capacidade suficiente (ton.) para atender aos requisitos da operação de reciclagem.



Figura 5.7 – Espalhador de agente estabilizante na forma de pó.

O espalhamento de cimento seco é afetado pelas condições do tempo, especialmente vento e chuva. Sendo um pó fino, o cimento é sensível ao vento e é levado rapidamente pelo ar quando sopra uma brisa, inclusive o efeito de ondas provocadas pela passagem de caminhões. Essas perdas reduzem a taxa de aplicação de forma não uniforme.

O espalhamento do cimento/cal na forma de nata (*slurry*) na superfície do pavimento se dá pela injeção da mistura de água com cimento/cal. O processo ocorre por meio de equipamentos especiais dotados de tanque onde o cimento Portland com a água são pré-misturados, a fim de formar uma suspensão, onde o volume de água adicionado é igual à quantidade necessária para atingir a umidade ótima. Dependendo da forma de aplicação, o tanque deverá ser conectado à frente da recicladora para que ela aplique o agente na taxa correta. O próprio equipamento também poderá fazer a aplicação caso disponha de sistema automatizado que assegure que a taxa de aplicação do fluido está sendo correta, independentemente da variação da sua velocidade de deslocamento.



**Figura 5.8 – Aplicação do agente estabilizante na forma de nata.
Misturador WIRTGEN WM 1000.
Fonte: WIRTGEN AMERICA INC. [59].**

De acordo com a WIRTGEN GmbH [60], esta técnica permite atingir melhores resultados principalmente onde as condições do local exigirem:

- Alto grau de exatidão na taxa de aplicação de cimento;
- Nenhuma contaminação de pó de cimento trazida pelo vento (como, por exemplo, em regiões urbanas).

Na obras de reciclagem profunda no Brasil, o cimento é espalhado a seco, seja pelo processo manual, seja pelo mecanizado. O equipamento apresentado na figura 5.8 ainda não se encontra disponível no país.

A empresa RECLAMATION INC. [49] salienta que os pavimentos recuperados com cloreto de cálcio podem resistir a tensões e impactos e distribuir melhor as cargas do tráfego. O cálcio lubrifica as partículas finas do solo, permitindo a adesão entre elas e aos agregados. O grau de compactação da camada reciclada torna-se mais fácil de ser atingido pela adição do cálcio, que por sua vez mantém o pavimento denso e compacto sob qualquer nível de tráfego. O cloreto de cálcio é muito usado nos países de climas temperado e frio para reduzir os efeitos do congelamento.

Segundo a mesma empresa, o cloreto de cálcio é aplicado na seguinte seqüência:

- Trituração inicial do pavimento pela recicladora;
- Aplicação do agente na taxa de 75% do teor ótimo de cloreto de cálcio em solução aquosa;
- Nivelamento e conformação geométrica da mistura;
- Compactação com rolo vibratório;
- Segunda aplicação do cloreto de cálcio na taxa de 25% do teor ótimo para selar a superfície;
- Aplicação do revestimento.



**Figura 5.9 – Aplicação de agente estabilizante químico em solução aquosa.
Fonte: ALL STATES ASPHALT INC. [3].**

Segundo a ALL STATES ASPHALT INC. [3], o distribuidor de cloreto de cálcio deverá ser capaz de aplicar o agente em estado líquido na superfície do pavimento em quantidades corretamente medidas para qualquer taxa entre 0,5 a 0,9 litros por metro quadrado, através de uma barra de espargidora de até 6,1 metros de comprimento. O distribuidor deverá ser capaz de manter a taxa de distribuição uniforme no segmento de trabalho. Também deverá ser equipado com um acumulador volumétrico digital capaz de medir a litragem aplicada e a distância percorrida. O dispositivo de medição de volume será equipado com um conjunto motor-bomba para que aplicação seja por pressão e não por gravidade. Os bicos espargidores e o sistema de pressão fornecerão um leque de pulverização suficiente para cobrir toda largura e extensão do material reciclado.

Não há registro, no Brasil, da aplicação de produtos à base de cloreto de cálcio na estabilização de misturas recicladas.

A seqüência de ensaios de laboratório para projeto de mistura aqui apresentada se restringe apenas à estabilização com cimento ou cal por serem os métodos de estabilização química mais comuns no Brasil.

Para estabilização com cimento ou cal, as seguintes etapas deverão ser cumpridas [60]:

- **Preparação das Amostras:** O material resultante da trituração do revestimento será misturado completamente com o material de base na quantidade proporcional às espessuras que serão processadas no pavimento existente.
- **Determinação do Teor de Agente Estabilizante:** Normalmente são adotados três teores diferentes de estabilizador, nos quais serão feitas as amostras para determinar a resistência à compressão. Esses teores geralmente variam com aumento de dois pontos entre si; por exemplo: 2%, 4% e 6% em relação ao peso do total de material secado em forno. Para cada teor é calculada a umidade ótima e a densidade máxima.
- **Teor de Umidade e Densidade Máxima:** O agente estabilizante é adicionado à mistura de solo com o fresado e misturado até formar um material de características homogêneas. Em seguida é feita a adição de água.

A WIRTGEN Gmbh [60] recomenda fazer a compactação da mistura (solo-fresado-cimento-água) após quatro horas, a fim de simular condições de campo. O material úmido deve ser coberto com lona úmida e misturado a cada meia hora com uma pá.

A determinação da umidade ótima e a densidade máxima poderão ser feitas através de métodos comuns, tais como o Proctor Modificado ou métodos similares.

- **Ensaio de Resistência:** Para cada teor de cimento Portland são moldadas amostras em moldes cujo diâmetro é a metade da altura e curadas por sete dias em local adequado à umidade relativa de 95 a 100% e temperatura de 22° a 25°C.

Após o prazo de cura, as amostras são mergulhadas em água por um período de quatro horas e, em seguida, submetidas ao ensaio em equipamento apropriado para testar a resistência à compressão.

A fim de estabelecer o teor de cimento/cal para produzir a resistência desejada, é necessário moldar pelo menos três CP's para cada teor a fim de se obter a média das resistências.

5.5 ESTABILIZAÇÃO BETUMINOSA

A estabilização betuminosa ocorre com a adição e mistura de materiais betuminosos, como a emulsão de asfalto ou a espuma de asfalto no pavimento a ser recuperado. O material estabilizado com agentes betuminosos produz uma camada flexível com melhores propriedades de fadiga quando comparada a uma camada estabilizada quimicamente.

A mistura estabilizada não possui trincas por retração e pode ser aberta ao tráfego imediatamente após a compactação e acabamento da camada. Reciclagem profunda com um agente estabilizante betuminoso cria um material betuminoso estabilizado com um teor de vazios superior, entre 10 e 20 por cento. O material betuminoso estabilizado tende a agir em parte como um material granular com atrito entre partículas e em parte como um material visco-elástico [4].

Existem basicamente dois tipos de estabilização betuminosa:

- Solo-emulsão;
- Espuma de asfalto.

Segundo a ADEBA – Associação Brasileira das Empresas distribuidoras de Asfaltos [2], a estabilização solo-emulsão é o produto resultante da mistura de solos, geralmente locais, com emulsão asfáltica, na presença ou não de "filler" (minerais ativos) em equipamentos apropriados, espalhados e compactados a frio.

A emulsão asfáltica é um processo de emulsificação do cimento asfáltico de petróleo. A coloração típica da emulsão de asfalto é marrom, mas quando ocorre a separação da fase água da fase asfalto acontece uma modificação intrínseca conhecida como ruptura da emulsão e a coloração passa a ser a típica do CAP. Na estabilização da camada, depois que a emulsão rompe,

o asfalto residual promove uma adesão entre os grãos finos do solo. Esse mecanismo cria um fenômeno de impermeabilização na mistura.

Normalmente é usado um agente pozolânico em conjunto com emulsão asfáltica neste tipo de estabilização. Além de melhorar a resistência retida, o agente pozolânico age como uma forma de catalisador, aumentando as propriedades de resistência e, dessa forma, auxiliando na acomodação do tráfego [60]. É prática comum [4] adicionar em torno de um a três por cento em peso de cimento Portland, cal ou cinza volante, para aumentar significativamente a resistência da mistura sem afetar adversamente as propriedades de fadiga do material estabilizado com betume.

O tipo de emulsão asfáltica e as características do material recuperado têm uma grande influência na estabilidade e no "tempo de ruptura" da emulsão. Portanto, é importante confirmar a compatibilidade da emulsão com o material recuperado durante o projeto de mistura.

Normalmente as misturas recicladas são estabilizadas no Brasil com emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta, tipo RL-1C, porém, dependendo da quantidade de finos reativos e/ou plásticos, passando na peneira de 75 microns, poderá ser empregada emulsão não iônica e/ou "filler" (cal ou cimento Portland) [2]. MOREIRA et. al. [44], ressaltam que para os solos granulares é possível utilizar a emulsão catiônica RM-1C.

A aplicação do estabilizante é feita por um caminhão carregado de emulsão asfáltica engatado à frente da recicladora, tendo uma mangueira de alimentação conectada ao tanque e ao equipamento de reciclagem, como pode ser visto na figura 5.10.

Nesse caso, a recicladora deverá ser equipada com um sistema computadorizado de adição de fluido, capaz de registrar a taxa de fluxo e a quantidade total adicionada na mistura. Também é necessário que o equipamento tenha um dispositivo que integre a velocidade de deslocamento com a vazão do agente, assegurando que o fluido seja adicionado na quantidade desejada, independentemente da variação de velocidade da recicladora.



Figura 5.10 – Reciclagem profunda com incorporação de emulsão asfáltica.
Fonte: E. J. BRENEMAN [22]

Os estudos de laboratório para projeto de mistura, segundo MOREIRA et. al. [44], têm por objetivo definir a dosagem de misturas estabilizadas com betume para encontrar o teor ótimo que defina a máxima densidade, umidade ótima e máxima resistência da camada. As etapas a serem cumpridas são:

- Determinação da porcentagem de emulsão: Normalmente varia entre 1 a 5 por cento em relação ao peso total do solo seco. Eventualmente, utilizam-se valores acima dessa faixa;
- Determinação da porcentagem de água de diluição: A água de diluição facilitará a dispersão da emulsão no material, como também permitirá seu rompimento mais lento;
- Determinação da água de dispersão: A quantidade de água de dispersão visa a umedecer o solo e deverá ser próxima do teor de umidade ótima apurada pelo ensaio de compactação do solo. Pode ser determinada pelo ensaio de compactação;
- Determinação da porcentagem de fluido (água + ligante) para a compactação.

A estabilização com espuma de asfalto é o processo mais econômico quando comparado à estabilização com emulsão asfáltica. Isso se deve ao fato de que, quando se injeta uma pequena quantidade de água pulverizada no asfalto quente, ocorre uma expansão considerável, o que faz aumentar em muitas vezes a superfície de contato do asfalto.

No estado de espuma, a viscosidade do asfalto é reduzida significativamente, permitindo facilmente a sua dispersão por todas as partes do material reciclado. Esse fenômeno permite que o pavimento seja misturado com agregados frios e úmidos, sem ter o custo adicional de colocação de solventes ou emulsificantes.

O processo de espumação do asfalto acontece na câmara de expansão (figura 5.11) a bordo da recicladora, de onde se injeta uma quantidade limitada de água vaporizada no asfalto quente, sendo a causa de que o asfalto se expanda, formando películas delgadas. Um microprocessador a bordo, equipado com um teclado padrão, controla o fluxo de asfalto expandido, que é sincronizado com a velocidade de avanço e a profundidade de corte. Esse controle automatizado permite aplicar a taxa correta de agente conforme as especificações da mistura estabelecidas em projeto [62].

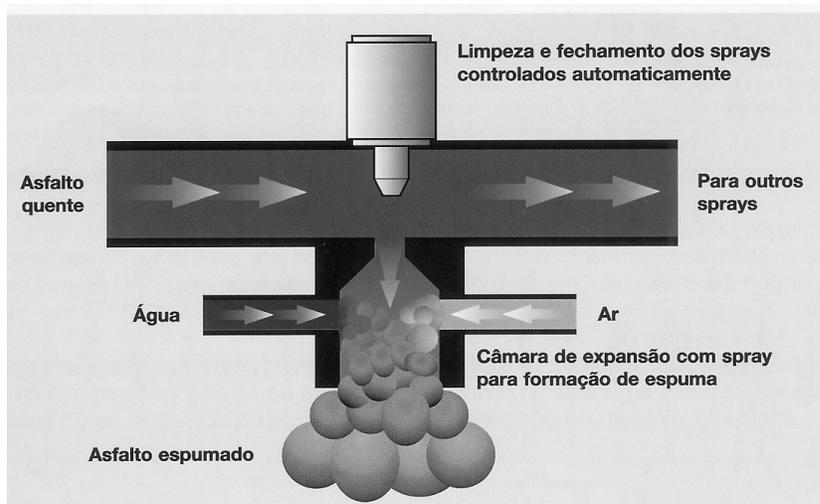


Figura 5.11 – Produção de espuma de asfalto na câmara de expansão.
Fonte: WIRTGEN GROUP [62].

Da mesma forma que na estabilização com emulsão asfáltica, o material tratado com espuma de asfalto recebe normalmente pequenas quantidades de cimento ou cal. Além de melhorar a resistência retida, a adição desse material ajuda a dispersar o asfalto, aumentando a fração menor que 0,075 mm do material [60].

Segundo a LOUNTON & PARTNERS [37], a espuma de asfalto é caracterizada em função da taxa de expansão e vida média. A taxa de expansão é definida como a relação entre o volume máximo que o asfalto alcançou no estado de espuma e o volume de asfalto sem espumar. A vida média é o tempo gasto em segundos que a espuma leva para sedimentar-se até a metade do volume máximo atingida.

As características de espuma de asfalto são influenciadas por uma série de variáveis. De acordo com a ARRA [4], as mais importantes são:

- Temperatura do asfalto: A temperatura mais elevada do asfalto aumenta as características da espuma. Normalmente, o asfalto tem de ser mais quente que 160 °C;
- A quantidade de água adicionada ao asfalto quente: Geralmente, a taxa de expansão aumenta com quantidades crescentes de água, mas há uma correspondente diminuição na meia-vida. A quantidade de água adicionada é geralmente 2 +/- 1 por cento em peso do asfalto;
- Pressão sob a qual o asfalto quente é injetado na câmara de expansão: Pressão baixa, abaixo de 45 libras por polegada quadrada (3,06 kgf/cm²), diminuiu a expansão e a meia-vida;
- Proporção de asfaltenos no asfalto. Geralmente, quanto maior a quantidade de asfaltenos, mais deficiente a espuma;
- Presença de agentes antiespumantes tais como silicone misturado no asfalto.

A espuma de asfalto ideal é a que otimiza a expansão e a vida média. Quanto maior forem a expansão e a vida média, melhor será o desempenho da camada estabilizada. Normalmente, a qualidade da mistura é afetada quando uma espuma é produzida com uma taxa de expansão muito alta ou uma vida média muito longa.

ISAAC PINTO [33] descreve que, na aplicação da espuma, o asfalto é distribuído de forma homogênea nos materiais a serem reciclados por meio de um sistema específico instalado na máquina recicladora, onde a espuma é injetada na câmara de mistura via uma barra de aspersão com 16 bicos que cobrem uma largura total de trabalho do equipamento de aproximadamente 2,5 metros. O processo de espumação e as quantidades de ligante são monitorados por microprocessadores do sistema de controle central da máquina (figura 5.12).

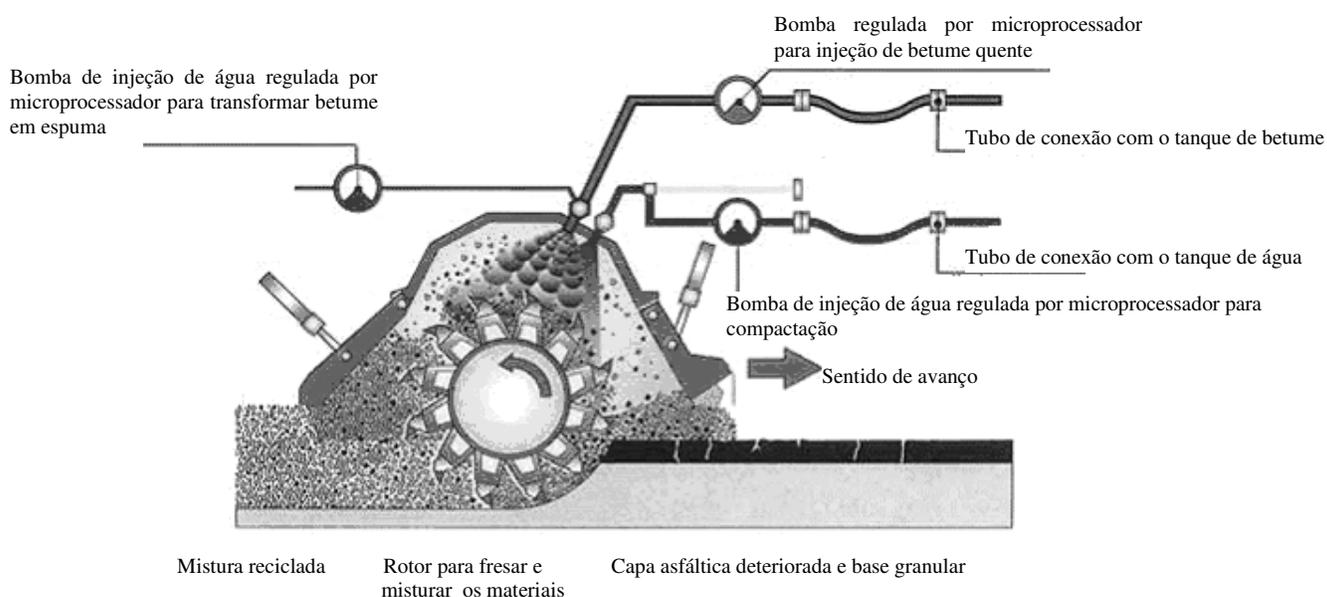


Figura 5.12 – Forma de Aplicação da Espuma de Betume. Fonte WIRTGEN GmbH [61]. Adaptado pelo autor

Durante a operação, a recicladora empurra ou puxa dois caminhões-tanques acoplados a ela, um contendo CAP aquecido e o outro, água. Normalmente os caminhões estão à sua frente, sendo o primeiro carregado de CAP e o segundo, de água. Os dois tanques são ligados à recicladora através de mangueiras de sucção. O asfalto aquecido é introduzido na câmara de expansão para produzir espuma, e a água proveniente do caminhão-tanque é incorporada à mistura na quantidade suficiente para atingir a umidade ótima. Durante o processo, podem ser introduzidos agentes estabilizadores, como cimento, cal ou agregados novos. Geralmente esses agentes são espalhados previamente à frente da recicladora.

O CAP utilizado no Brasil para produção da espuma é o mesmo usado na construção de pavimentos asfálticos, normalmente CAP classes 7 ou 20.

Algumas desvantagens e dificuldades também podem ser notadas no uso da espuma de asfalto [5]:

- O projeto de mistura e a operação da reciclagem requerem um nível avançado de experiência para produzir uma mistura de qualidade satisfatória;
- Os procedimentos para o projeto de mistura não são tão bem formulados quanto misturas betuminosas frias. Conseqüentemente, é mais difícil adquirir a necessária e relevante experiência para produção e especificações da mistura;
- Alguns insumos usados para fabricação de betume podem requerer a adição de antiespumantes, na qual reproduzirá um betume menos adequado para usar na estabilização;
- Sem prognósticos confiáveis do desempenho do pavimento a longo prazo, é difícil determinar o custo/benefício da vida útil. Por essa razão, muitos contratantes geralmente não estão preparados para aceitar o risco de usar um produto pouco pesquisado profundamente.

As etapas para ensaio da mistura aqui apresentadas foram baseadas no Manual de Reciclagem a Frio Wirtgen [60].

• **Estudo da Composição Granulométrica da Mistura:** São retiradas amostras da base e do revestimento de preferência com a própria recicladora. A mistura deverá se enquadrar na faixa granulométrica especificada. Se necessário, poderão ser feitos ajustes com a adição de agregados novos para correção da curva.

• **Determinação da Umidade Ótima e Densidade Máxima:** Estando a mistura enquadrada na faixa granulométrica especificada, o projeto pode prosseguir. O passo seguinte é definir a umidade ótima e a densidade máxima. O ensaio é feito com a mistura sem espuma e pode ser definida pela curva de compactação do ensaio Proctor Modificado.

- **Determinação do Teor Residual de Betume:** Através de ensaio químico, é feita a extração de betume da amostra do revestimento para determinação do teor residual médio.

- **Determinação das Características da Espuma:** As características da espuma devem ser investigadas através da determinação da temperatura e da porcentagem ótima de injeção de água.

Um equipamento móvel de laboratório poderá ser usado para verificar as propriedades da espuma. O princípio de funcionamento é o mesmo desempenhado pela recicladora durante a construção. Os testes simulam de perto a espuma produzida no campo.

O laboratório móvel é constituído basicamente de uma caldeira para aquecer o asfalto e dois sistemas de bombas calibradas, um para o asfalto quente e outro para água que produzirá a espuma [63]. O CAP, ao atingir a temperatura de trabalho (170 °C a 180 °C), juntamente com a água a temperatura ambiente, é injetada dentro de uma câmara de expansão especialmente projetada para produzir espuma.

O objetivo desse ensaio é definir as características ótimas da espuma, nessa oportunidade, a espuma poderá ser misturada com amostra de material triturado.

- **Moldagem dos Corpos-de-Prova:** Após a mistura do material reciclado com a espuma, parte-se para a moldagem dos corpos-de-prova. Nesse procedimento, é usado o método Marshall. Os corpos-de-prova são curados durante 72 horas numa estufa com a temperatura de 60 °C e, em seguida, a temperatura é reduzida e estabilizada em 25 °C. O corpo-de-prova seco é imediatamente submetido ao ensaio de resistência à tração e um outro corpo-de-prova é preparado para ser saturado. A saturação se dá numa câmara de vácuo fechada com água sob pressão de aproximadamente 1,50 kgf/cm² a 25 °C durante uma hora.

O asfalto contribui para a impermeabilizar o material reciclado, mas não o suficiente para impedir a absorção de água pelo CP durante o processo de saturação.

Já em estado saturado, determina-se imediatamente a resistência à tração do corpo-de-prova.

- **Determinação da Resistência à Tração Indireta (ITS) – *Indirect Tensile Strength*:** Os corpos-de-prova são levados a uma prensa para determinação da resistência à tração indireta (figura 5.13). O objetivo é verificar se houve ganho de resistência ao longo do tempo.

O ensaio padrão de ITS é usado para testar os corpos-de-prova em estado seco e saturado. O ITS é determinado medindo-se a carga de ruptura de amostra que é submetida a uma taxa de deformação constante de 50,8 mm/minuto em seu eixo diametral [62].

Deve-se calcular a relação (R) entre a resistência à tração dos corpos-de-prova nas condições seca ($\sigma_{R\text{seca}}$) e saturada ($\sigma_{R\text{saturada}}$), conforme a fórmula:

$$R = \frac{\sigma_{R\text{saturada}}}{\sigma_{R\text{seca}}} \times 100$$



Figura 5.13 – Corpo-de-prova sendo submetido ao ensaio de ITS
Fonte: WIRTGEN GROUP [64].

- **Determinação do Teor Ótimo de Asfalto de Projeto:** Para determinação do teor ótimo de asfalto [62], deve-se plotar um gráfico de ITS versus o teor de asfalto (asfalto adicionado) para

todas as amostras (secas e saturadas) no mesmo conjunto de eixos. O asfalto adicionado, no qual o ITS saturado é máximo, é considerado o Teor de Asfalto do Projeto para a mistura tratada com espuma de asfalto. O teor ótimo de asfalto é aquele em que o valor de “R” é igual ao superior a 70%.

A estabilização com polímeros é uma técnica bastante conhecida na Austrália e no Reino Unido; no Brasil, porém, ainda não há registros da aplicação dessa técnica.

O polímero aumenta a resistência da mistura e age semelhantemente a um agente cimentício, apesar de o pavimento continuar flexível. Sua ação dentro da camada é física, e não cimentícia, portanto não produz trincas devido à rigidez. Uma vez que o teor de umidade ótima é alcançado, o agente evita o ingresso de água para dentro da camada, pois cobre as partículas do solo, formando uma matriz hidrofóbica que impermeabiliza o material.

Os desenvolvimentos recentes de projeto de mistura para materiais estabilizados com agentes poliméricos ainda não estão detalhados na literatura técnica [57]. No entanto, alguns procedimentos podem ser executados, a fim de verificar a adequação do material.

Como o tratamento com polímero [57] é um tratamento físico do solo, uma taxa padrão de aplicação é normalmente feita. Para averiguar se o material existente é adequado, o teste mais rápido é observar a ascensão da capilaridade do material no estado natural e misturado com polímero. Esse teste pode ser facilmente realizado pela compactação de cada material num molde, utilizando a energia de compactação padrão e observando a amostra assentada numa bandeja que contenha aproximadamente 30 ml de água. O tratamento bem-sucedido do solo mostrará que a capilaridade se eleva ao mínimo ou nada, uma vez que a amostra não tratada mostrará provavelmente considerável elevação da capilaridade e possivelmente um colapso total do material. Sendo constatado nesse teste que o material é adequado para ser misturado com polímero, realizam-se outros ensaios da mistura para determinar outras características, tais como CBR no estado saturado ou o módulo de resiliência.

5.6 ESTABILIZAÇÃO COMBINADA

Os projetos de mistura de estabilização combinada normalmente consistem numa combinação de projetos de mistura química e betuminosa. A estabilização mecânica é incorporada a projetos de mistura química e betuminosa quando se decide usar ou não materiais granulares. O método mais comum de estabilização combinada é quando se faz uso de um agente estabilizante cimentício, tal como cal ou cimento Portland, com um agente estabilizante betuminoso [4].

A forma de aplicação do agente e os procedimentos para o projeto de mistura são os mesmos, apesar de o agente estabilizante cimentício ser considerado. Geralmente consiste em:

- Determinar a adequação do material recuperado;
- Selecionar a porcentagem do agente estabilizante cimentício a ser adicionado;
- Determinar o teor de umidade ótima e densidade máxima;
- Estabelecer o teor ótimo de betume;
- Confirmar as propriedades mecânicas da mistura estabilizada.

Normalmente a combinação de cimento Portland e espuma de asfalto é muito comum nas obras de reciclagem no Brasil.

5.7 CONTROLE DE QUALIDADE NO CAMPO

O controle de qualidade da reciclagem em campo é similar ao controle de qualidade para estabilização de camadas de pavimentos. As especificações de projeto para cada tipo de mistura precisam ser detalhadas, estabelecendo-se as tolerâncias de projeto e os ensaios que deverão ser executados.

De acordo com a ARRA [4], os controles de qualidade que precisam ser tratados durante o processo de reciclagem profunda são:

- Espessura da camada reciclada;
- Granulometria da mistura;
- Taxa de aplicação do agente;
- Umidade ótima da mistura;
- Homogeneidade;
- Grau de compactação;
- Acabamento da superfície.

A **espessura** deverá ser medida fisicamente em ambos os lados do corte para assegurar que a recicladora trate a camada na profundidade correta. As medidas deverão ser contínuas e em intervalos regulares. Se as espessuras do pavimento existente forem variáveis, os intervalos deverão ser menores.

A **granulometria** deverá ser verificada periodicamente para assegurar que o revestimento existente se triture no tamanho adequado e a mistura reciclada se enquadre na faixa granulométrica especificada.

A **taxa de aplicação do agente** estabilizante deverá ser verificada regularmente, visto que a variação na aplicação da taxa resulta na variação das propriedades do material e conseqüentemente na sua resistência. O controle pode ser feito aleatoriamente durante a operação ou mediante o cálculo da taxa média, usando o volume diário e a correspondente área tratada.

Umidade ótima da mistura: Durante a operação, um técnico experiente poderá verificar a umidade através do simples contato da mistura com as mãos. Outros recursos, como o *speedy* e o fogareiro, também são empregados. Ou ainda: para um resultado mais acurado, são recolhidas amostras da mistura e levadas ao laboratório de campo para detecção do teor de umidade.

Homogeneidade: A verificação da homogeneidade da mistura é basicamente uma avaliação visual. Os locais onde a mistura não está homogênea deverão ser misturados novamente, com a recicladora ou motoniveladora. É importante assegurar que as larguras de

sobreposição das juntas longitudinais e transversais sejam suficientes e estejam devidamente homogeneizadas.

Grau de compactação: A compactação da camada é uma das variáveis mais importantes que influenciam no desempenho da mistura reciclada a longo prazo e deve ser continuamente verificada. É importante confirmar o grau médio de compactação para toda espessura tratada. Normalmente, no exterior, são usados densímetros nucleares para determinar o teor de umidade e a densidade máxima [4]. No Brasil, o grau de compactação é geralmente determinado através da relação entre a massa específica aparente *in situ* e a massa específica aparente seca obtida no processo de compactação pela metodologia Proctor Modificado. O ensaio em campo é feito usando-se o frasco de areia conforme descreve o método de ensaio ME DNER 092/94 [18].

Acabamento da superfície: A superfície da camada reciclada deverá ser regular, livre de partículas soltas e conformada geometricamente de acordo com os parâmetros do projeto. A verificação do nivelamento é feita com o auxílio de referências fixas, como piquetes e estacas.

5.8 CONTROLE DE QUALIDADE NO LABORATÓRIO

O controle de qualidade no laboratório é essencial para assegurar que o produto final esteja de acordo com o que foi planejado. Deve também assegurar que a execução seja desempenhada em conformidade com as especificações de projeto [4].

Os ensaios feitos em laboratório também constituem uma importante ferramenta para adequar as condições de campo aos requisitos de projeto, principalmente em se tratando de um pavimento com características heterogêneas. Em alguns casos, um projeto de dosagem única em trecho de grande variação na estrutura, tanto em espessura quanto em materiais, pode apresentar substancial heterogeneidade de resultados.

Os ensaios mais usuais para **camadas estabilizadas mecanicamente** estão descritos abaixo:

Granulometria: A granulometria da mistura é a característica mais importante na estabilização mecânica. Se a mistura reciclada não estiver enquadrada numa faixa granulométrica de trabalho, a camada não será estável. A falta de estabilidade na camada acelera o processo de deterioração do pavimento.

Resistência: Este ensaio é feito para confirmar as propriedades mínimas de resistência da mistura reciclada. Pode ser feito usando-se a metodologia CBR – *Califórnia Bearing Ratio*, módulo de resiliência ou ensaios similares. O ensaio mais comum para camadas estabilizadas com agentes cimentícios para efeito de controle de qualidade é o de Resistência à Compressão Simples. Segundo a WIRTGEN GmbH [60], ele é mais usado porque o ensaio CBR não é considerado suficientemente sensível para testar materiais de alta resistência. O ensaio de resistência é normalmente determinado para amostras preparadas que foram curadas em câmara úmida por 7 dias à temperatura ambiente de 22° C e umidade relativa do ar de 95%. O teor de cimento que resulta num valor de resistência entre 1,5 e 3 MPa é normalmente o ideal para material reciclado na parte superior do pavimento.

As propriedades mais importantes a serem avaliadas nas **camadas estabilizadas com emulsão asfáltica** deverão ser alcançadas quando a taxa de aplicação de emulsão asfáltica for ótima, conforme determinado pelo projeto de mistura.

O material estabilizado com emulsão é geralmente avaliado através do teste de Resistência à Tração Indireta, em lugar do ensaio Marshall. O ensaio é realizado em corpos-de-prova padrão Marshall a temperatura única (25°C), sendo normais os seguintes valores de resistência (em estado seco) [60]:

- RAP / pedra britada (mistura de 50/50)	350 a 750 KPa
- Pedra britada	400 a 800 KPa
- Cascalho natural (IP <10, CBR >30)	250 a 500 KPa

De acordo com a WIRTGEN Gmbh [60], o módulo elástico do material estabilizado com emulsão é medido submetendo-se uma amostra a repetidos testes de carga. Os valores normais são:

- RAP / pedra britada (mistura de 50/50)	2500 a 5000 MPa
- Pedra britada	3000 a 6000 MPa
- Cascalho natural (IP <10, CBR >30)	2000 a 4000 MPa

Assim como na estabilização com emulsão asfáltica, as propriedades mais importantes nas camadas estabilizadas com espuma de asfalto serão alcançadas quando a aplicação da espuma de asfalto for ótima.

Com relação à **granulometria**, a estabilização com espuma de asfalto será bem-sucedida se a granulometria da mistura for controlada. A mistura deverá enquadrar-se na faixa granulométrica de trabalho. Portanto, amostras da mistura coletadas em campo precisam ser submetidas continuamente ao ensaio de granulometria.

O teor de ligante deverá ser determinado, pois esta análise é feita para verificar se o teor ótimo de betume da mistura foi alcançado.

Determinação da densidade aparente: A densidade aparente é definida comparando-se a densidade de corpos-de-prova retirados da pista com o auxílio da sonda rotativa com a densidade dos corpos-de-prova moldados no laboratório.

Determinação da resistência à tração indireta seca e saturada: As amostras coletadas no campo são moldadas em corpos-de-prova e submetidas ao ensaio de resistência à tração seca e saturada. Posteriormente, os resultados serão comparados com os resultados obtidos na fase de projeto. A resistência de campo deverá ser maior ou igual à de projeto.

PROCESSO EXECUTIVO DA RECICLAGEM PROFUNDA

6.1. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

Os equipamentos utilizados no processo de reciclagem profunda são praticamente os mesmos usados nas construções de rodovias. A patrulha mínima necessária compõe-se de recicladora autopropelida, motoniveladora e um ou mais rolos compactadores.

Segundo a ARRA [4], a recicladora deve ter capacidade de triturar e misturar uma espessura mínima de 300 mm de revestimento asfáltico e material de base. O tambor fresador (figura 6.1) deve possuir controle manual e/ou automático de profundidade de corte e ser equipado com ferramentas de corte substituíveis – bits (figura 6.2). O tambor fresador deve ter diferentes velocidades de rotação para triturar e misturar vários tipos e espessura de materiais. O sistema de propulsão deve ter um mecanismo sensível à resistência do pavimento para controlar automaticamente a velocidade de avanço da recicladora.



Figura 6.1 – Tambor fresador para reciclagem

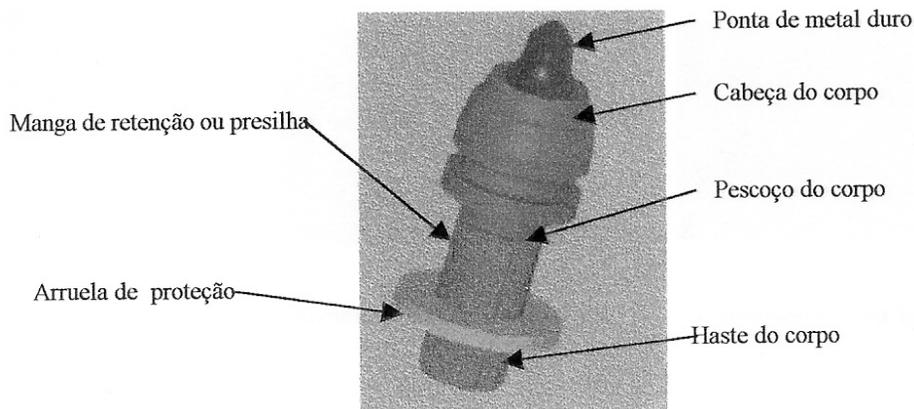


Figura 6.2 – Ferramenta de corte com carboneto de tungstênio e cobalto na ponta (Bits)

Os fabricantes disponibilizam atualmente vários modelos de equipamentos de reciclagem para atender às exigências de mercado. As modernas recicladoras variam de médio a grande porte e com maior ou menor tecnologia embarcada.

Destacam-se como os principais fabricantes mundiais de recicladoras as empresas alemãs Wirtgen e Hamm e as americanas Caterpillar e CMI Corporation. A seguir alguns modelos de recicladoras:



Figura 6.3 – Recicladora Wirtgen WR 2500



Figura 6.4 – Recicladora Wirtgen WR 2500 K
Fonte: WIRTGEN AMERICA INC. [59].



Figura 6.5– Recicladora Hamm RACO 350
Fonte: HAMM GmbH [28]



Figura 6.6 – Recicladora Hamm RACO 550
Fonte: HAMM GmbH [27]



Figura 6.7 – Recicladora Caterpillar RM 350



Figura 6.8 – Recicladora Caterpillar RR 250



Figura 6.9 – Recicladora CMI RS 800
Fonte: CMI CORPORATION [14]



Figura 6.10 – Recicladora CMI RS 425
Fonte: CMI CORPORATION [13]

A tabela seguinte apresenta algumas características dessas recicladoras

Fabricante	Modelo	Potência do Motor (hp)	Corte		Velocidades de Rotação do tambor (rpm)
			Largura Máxima (mm)	Espessura Máxima (mm)	
WIRTGEN	WR 2500	601	2438	508	103 / 155 / 131 / 196
	WR 2500 K	601	2438	508	103 / 155 / 131 / 196
HAMM	RACO 350	495	2400	520	120 / 145
	RACO 550	600	2400	520	111 / 138
CATERPILLAR	RR 250	335	2438	330	124 / 168 / 284
	RM 350 B	500	2438	508	115 / 160 / 215
CMI	RS 425	425	2440	406	108 / 151 / 209
	RS 800	800	3048	406	86 / 112 / 137 / 169

Tabela 6.1 – Características de algumas recicladoras. Fonte: catálogo do fabricante.

As principais recicladoras que estão em operação atualmente no Brasil são as Caterpillar RR 250 e RM 350, Hamm RACO 250 e a Wirtgen WR 2500.

A escolha da recicladora está associada às características do pavimento e ao tipo de estabilização que será empregado. De maneira geral, os pavimentos que possuem revestimento de CBUQ muito espesso ou bases rígidas do tipo solo/cimento oferecem significativa resistência ao corte. Nestas condições, são requeridas máquinas com motores mais potentes, principalmente se houver uma conjunção desses fatores com grandes profundidades de corte.

A granulometria resultante da mistura reciclada é em grande parte influenciada pela velocidade de rotação do tambor fresador. A adequação da granulometria tende a ser mais fácil quando a máquina possui maior número de opções de ajuste de velocidades. Nota-se também que a rotação mais rápida facilita a dispersão do agente estabilizador na camada e a rotação mais baixa aumenta o torque do motor, facilitando a trituração de pavimentos mais duros.

Com relação ao tipo de estabilização empregada, a técnica da espuma de asfalto é a que requer maior tecnologia embarcada, pois o processo de espumação exige que a recicladora possua câmara de expansão e dispositivos capazes de aquecer o CAP a temperatura de trabalho.

Na tabela 6.2, estão relacionados alguns modelos de recicladoras com o tipo de estabilização que são capazes de executar.

Fabricante	Modelo	Tipo de Estabilização			
		Estabilização Mecânica	Estabilização Química	Estabilização Betuminosa	
				Emulsão de Asfalto	Espuma de Asfalto
WIRTGEN	WR 2500	A	A	A	A
	WR 2500 K	A	A	A	A
HAMM	RACO 350	A	A	A	NA
	RACO 550	A	A	A	A
CATERPILLAR	RR 250	A	A	A	NA
	RM 350 B	A	A	A	NA
CMI	RS 425	A	A	A	NA
	RS 800	A	A	A	A

Tabela 6.2 – Modelos de recicladoras adequadas ao tipo de estabilização.
A = Adequado. NA = Não Adequado

Os equipamentos complementares mais utilizados em obras de reciclagem profunda são:

- Motoniveladora;
- Rolos Compactadores;
- Caminhões-tanques;
- Caminhões Espargidores;
- Espalhadores de Aditivos;
- Misturadores.

As motoniveladoras, como as da figura 6.11, devem ter potência suficiente para espalhar, aplicar e nivelar o material reciclado.



Figura 6.11 – Motoniveladora.

A motoniveladora é um dos equipamentos mais solicitados na operação de reciclagem. É responsável pela conformação geométrica da camada, acabamento da superfície e espalhamento do material importado, quando este se faz necessário. Também é usada para ajudar a aerar o material quando há excesso de umidade.

Devido à espessura e às propriedades da mistura reciclada, os rolos compactadores usados são normalmente grandes e pesados. Podem ser utilizados rolos vibratórios corrugados e lisos (figuras 6.12 e 6.13) e rolos de pneus (figura 6.14).

Ao ser selecionado o tipo e o tamanho de rolo, deve ser analisado o seguinte [60]:

Tipo de Rolo		
	Aço	Pneus
Características	10 a 15 ton. de capacidade para compactar camadas recicladas até 200 mm de profundidade; 15 a 20 ton. de capacidade para compactar camadas recicladas com profundidade maior que 200 mm; Escala de frequência de vibração de 29 a 35 Hz; e; Escala de amplitude de vibração de 1.66 a 0.91 mm.	12 a 30 ton. de peso estático; Mínimo de quatro rodas, na frente e atrás; Mínimo de 50 mm de recobertura de cada trilha de roda; e Distribuição de carga uniforme sobre cada pneu.

**Tabela 6.3 – Características de rolo compactador para obras de reciclagem profunda.
Fonte: Wirtgen GmbH [60].**



Figura 6.12 – Rolo pé-de-carneiro.



Figura 6.13 – Rolo liso.



Figura 6.14 – Rolo compactador de pneus.

Além dos serviços de compactação e acabamento da superfície, o rolo de pneus pode ser usado para identificar pontos de baixa resistência na camada reciclada ou no subleito.

Na maioria das obras de reciclagem, são necessários caminhões-tanque (figura 6.15) para adicionar água à mistura, a fim de atingir o teor ótimo de umidade e o grau de compactação desejado. Caminhões-tanque de variadas configurações podem ser utilizados para o fornecimento de água. A maioria dos projetos requer, no mínimo, dois tanques com 8.000 litros de capacidade para o fornecimento de água de compactação, independentes de quais agentes estabilizadores serão utilizados. Enquanto um está trabalhando, o outro é abastecido de água na fonte apropriada mais próxima.



Figura 6.15 – Caminhão-tanque de água

Na estabilização betuminosa, além dos tanques de água, também são utilizados tanques para armazenar asfalto. Na reciclagem com espuma de asfalto, os tanques de armazenamento do CAP devem ser cuidadosamente selecionados, a fim de evitar problemas. A temperatura do CAP armazenado é muito elevada, o que aumenta o risco de acidentes durante o processo.

6.2. ETAPAS CONSTRUTIVAS

Originalmente, a reciclagem profunda era empregada apenas em rodovias de baixo a médio volumes de tráfego, pois não havia nenhum meio eficaz para triturar revestimentos espessos normalmente encontrados em rodovias com alto volume de tráfego. No entanto, com o advento de equipamentos maiores e mais modernos, a reciclagem profunda tem sido usada também em pavimentos com volume de tráfego superiores [4]. Com a evolução dos equipamentos de reciclagem, camadas espessas de pavimentos podem ser processadas numa única etapa. Portanto a reciclagem profunda pode ser aplicada a todos tipos de pavimentos flexíveis.

Após a escolha da recicladora e dos equipamentos auxiliares, procede-se à obra de acordo com os seguintes passos:

- Trituração do pavimento existente;
- Estabilização da mistura;
- Pré-compactação;
- Perfilamento da superfície e compactação final;
- Acabamento da superfície;
- Aplicação do selante;
- Execução do revestimento.

A **trituração** (figura 6.16) é um processo mecânico que fisicamente quebra o revestimento asfáltico para uma granulometria adequada e o mistura com uma quantidade pré-definida de material da base [42].

De acordo com HUFFINAN & PERFETTI [30], a trituração preliminar do pavimento na profundidade especificada pode ser uma opção. Materiais importados poderão ser adicionados nessa hora. Também pode ser adicionada água; com isso obtém-se umidade ótima na mistura. No caso de a mistura estar muito úmida, é feita uma aeração.

Normalmente esse processo ocorre quando há necessidade de a recicladora dar mais de uma passada para submeter o material triturado à granulagem desejada. No entanto, mesmo que seja possível processar o pavimento de uma só vez, há engenheiros que preferem sejam dadas múltiplas passadas. A trituração prévia do pavimento também pode ser uma boa opção para eliminar as irregularidades superficiais. Nesse caso, o material triturado é conformado pela motoniveladora para posterior aplicação do agente estabilizante.

Em obras onde não há presença de veículos em trânsito, a trituração preliminar possui grande vantagem: a possibilidade de monitorar a granulometria da mistura. Como o tráfego não precisa ser liberado no mesmo dia no trecho reciclado, a mistura processada na pista poderá ser ensaiada no laboratório. Se a granulometria não for satisfatória, poderá ser corrigida posteriormente com a adição de agregados com a graduação faltante.



Figura 6.16 – Recicladora triturando o pavimento existente
Fonte: MID STATE RECLAMATION & TRUCKING [42].

Na **estabilização da mistura**, o material triturado é misturado com o agente estabilizante pela recicladora (figura 6.17). Se uma única passada não for suficiente para assegurar mistura satisfatória, deverão ser executadas outras passadas. A espessura da camada deverá ser cuidadosamente controlada devido à sua influência sobre a quantidade

de aditivo e para obter a espessura reciclada desejada. A mistura do material triturado com agente estabilizante na proporção exata é obtida sem nenhum problema porque as recicladoras modernas têm computadores de bordo que controlam a porcentagem necessária de fluido [16].



Figura 6.17 – Estabilização da mistura com aplicação de agente estabilizante
Fonte: ROTO MILL SERVICES [51].

A **pré-compactação** pode ser vantajosa, pois ajuda a manter a umidade da mistura com valores próximos ao do teor ótimo, à medida que a recicladora avança. Essa atividade é recomendável principalmente em dias muito quentes e quando o segmento de trabalho possui extensão superior a 200 metros. O equipamento de compactação vem imediatamente atrás da recicladora para dar consistência à mistura antes que qualquer conformação geométrica seja feita pela motoniveladora [9], como pode ser visto na figura 6.18. Nesse processo, a escolha do equipamento de compactação vai depender da espessura da camada e composição da mistura. Normalmente utiliza-se um rolo pneumático para comprimir o material ou um compactador vibratório liso pesado para assentar o agregado solto pela recicladora.



Figura 6.18 – Pré-compactação seguida do perfilamento geométrico.
Fonte: ROTO MILL SERVICES [51].

A **compactação final** da mistura é concluída usando-se vários tipos de rolos (figura 6.19). Durante a compactação, será necessário conformar geometricamente a pista por uma motoniveladora [30].

À medida que se processa a compactação, a motoniveladora vai modelando a superfície conforme indicado pelo projeto geométrico. O formato desejado pode ser obtido com a ajuda de uma referência fixa (piquetes e estacas). O objetivo da compactação é atingir a maior densidade na camada reciclada antes de dar início ao acabamento da superfície.



Figura 6.19 – Compactação do material reciclado.

O **acabamento da superfície** da camada reciclada requer a criação de textura de superfície firmemente unida, capaz de escoar a água. Isso é normalmente conseguido através de método criterioso de aspersão de água e rolagem pneumática (também conhecido como “lubrificação”), destinado a trazer partículas finas suficientes à superfície e, assim, preencher os vazios entre as partículas mais grossas. Essas operações geralmente constituem a parte final do processo de compactação [60], como pode ser visto na figura 6.20.

A superfície deverá estar devidamente alisada para receber o revestimento. No entanto, em razão das características do material fresado e/ou da base, a mistura reciclada poderá ter problemas com a falta de finos. Quando isso ocorre, o acabamento torna-se mais difícil, pois a superfície fica áspera e sem adesão. Para atenuar os problemas de acabamento, pode ser adicionado material fino durante o processo de reciclagem como forma de modificar as características da mistura. Esse recurso poderá ser empregado desde que a mistura continue se enquadrando na faixa granulométrica estabelecida pelo projeto.



Figura 6.20 – Acabamento na superfície da camada reciclada

Concluída a operação de acabamento, a superfície é imprimada com a **aplicação de selante** que pode ser asfalto diluído ou emulsão de asfalto sobre a base concluída. O objetivo é impermeabilizar e aumentar a coesão da superfície pela penetração do material asfáltico e promover as condições de aderência entre a base e o revestimento [31], conforme pode ser visto nas figuras 6.21 e 6.22. Essa selagem é aplicada à superfície para aglutinar partículas soltas e proteger a camada do tráfego e das intempéries.

Para liberar o tráfego mais rápido sobre a camada reciclada, normalmente é feito um “salgamento” na superfície imprimada. O processo se dá pela distribuição de areia grossa ou pedrisco sobre o ligante rompido, como mostra a figura 6.23.

Em alguns casos, quando há previsão de que a camada reciclada ficará exposta ao tráfego por um período prolongado, a superfície deve ser protegida por um tratamento superficial ou uma camada esbelta de massa asfáltica. Essa medida protegerá a base dos efeitos nocivos do tráfego.



Figura 6.21 – Aplicação do selante.



Figura 6.22 – Vista da superfície imprimada.



Figura 6.23 - “Salgamento” da superfície com areia

O passo final do processo de reciclagem profunda é a aplicação do revestimento asfáltico novo sobre a camada reciclada.

Na preparação da superfície, a base imprimada é varrida por uma vassoura mecânica, ficando livre de todo material solto. A escolha do tipo de revestimento depende principalmente do tráfego previsto, capacidade estrutural necessária, condições climáticas locais e o tipo de agente estabilizante usado. Desde que a camada reciclada tenha grande capacidade de suportar as cargas do tráfego, pode-se usar uma camada esbelta de mistura betuminosa ou um tratamento superficial, tal como um TSD [4].

A **execução do revestimento** segue o mesmo procedimento executivo de uma capa nova convencional e pode ser vista na figura 6.24.



Figura 6.24 – Aplicação do revestimento asfáltico sobre a camada reciclada

6.3. TREM DE RECICLAGEM

6.3.1. Conceito

O “Trem de Reciclagem” é uma referência à configuração dada pela união da recicladora a outros equipamentos, como a unidade de agente estabilizante, caminhão-tanque de água e/ou asfalto, que atuam simultaneamente e de forma seguida sobre a pista em reciclagem.

A máquina recicladora age como locomotiva, empurrando ou puxando o equipamento que está acoplado a ela por meio de barras de impulsionar ou barras de tração, chamados cambões [60].

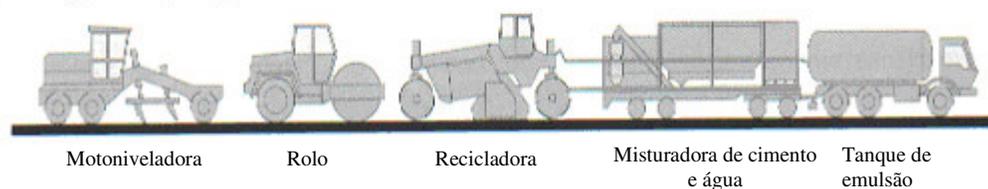
Os trens de reciclagem são normalmente empregados para reciclar pavimentos usando-se cimento em forma de nata, espuma de asfalto ou uma combinação de ambos.

6.3.2. Tipos de Configuração

Os trens de reciclagem são configurados diferentemente. O que define a forma de configuração é o tipo de estabilização empregada.

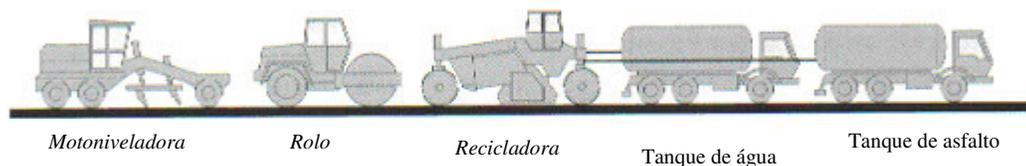
Em obras onde a estabilização da mistura é feita incorporando-se nata de cimento e emulsão, o trem de reciclagem é montado tendo à frente da recicladora a misturadora de cimento e o caminhão-tanque carregado de material betuminoso (figura 6.25).

Figura 6.25 - Trem de reciclagem utilizando nata de cimento e emulsão asfáltica. Fonte: WIRTGEN Gmbh (60).



De forma similar, quando a estabilização é feita com espuma de asfalto, a recicladora empurra dois caminhões-tanque à sua frente sendo o primeiro carregado com CAP aquecido e o segundo contendo água (figura 6.26).

Figura 6.26 - Trem de reciclagem utilizando apenas espuma de asfalto. Fonte: WIRTGEN Gmbh (60).



A instalação do trem de reciclagem é feita após a verificação dos seguintes itens [60]:

- Verificação da temperatura do agente estabilizante betuminoso;
- Verificação da água e/ou agentes estabilizantes contidos nos vários tanques, espargidores e misturadores, se são suficientes para o segmento de trabalho;
- Ligação de todos os tubos de alimentação à recicladora e extração de todo o ar do sistema, assegurando que todas as válvulas estejam completamente abertas;
- Verificação do seguinte: se o operador tem todos os dados relativos à taxa de aplicação de agentes estabilizadores para entrada no computador, se há uma diretriz precisa para toda a extensão do corte e se todos os procedimentos de partida estão perfeitamente entendidos.

Das configurações apresentadas, a única empregada no Brasil é a da figura 6.26. Diversos trechos de rodovias importantes foram recuperados utilizando-se a técnica da espuma de asfalto, como, por exemplo, BR 381/MG, BR 277/PR, BR 153/GO, RJ 124, SP 330 e outras.

6.4. EXECUÇÃO DA RECICLAGEM COM TRÁFEGO

Segundo a ARRA [4], no processo de reciclagem, o transtorno provocado ao tráfego é minimizado devido ao curto prazo de construção quando comparado aos métodos convencionais de reconstrução. Se for possível, é vantajoso desviar completamente o tráfego para permitir tratar toda largura do pavimento ao mesmo tempo. Caso contrário, é possível manter a metade da pista aberta ao tráfego durante a operação de reciclagem, pois o processo executivo é unidirecional com os equipamentos ocupando apenas uma pista do pavimento. Dessa maneira, em rodovias de pista simples, uma das faixas de tráfego pode ficar livre para receber o fluxo veículos.

Por questões de segurança, o segmento de trabalho deverá ser balizado por dispositivos de demarcação de pista, como também sinalizado por placas alertando sobre a realização dos

serviços. O controle do tráfego será feito por um “bandeirinha”, a fim de orientar os usuários sobre o momento certo de seguir ou parar.

Normalmente a reciclagem é feita no período diurno, mas, se por algum motivo de força maior, o segmento de trabalho não for liberado ao tráfego no mesmo dia, o trecho deverá ser demarcado por sinalização noturna adequada. Nessa condição, o usuário perceberá a sinalização a tempo de reduzir a velocidade aos níveis indicados.

A figura 6.27 apresenta croqui de sinalização de um segmento de rodovia sendo reciclado.

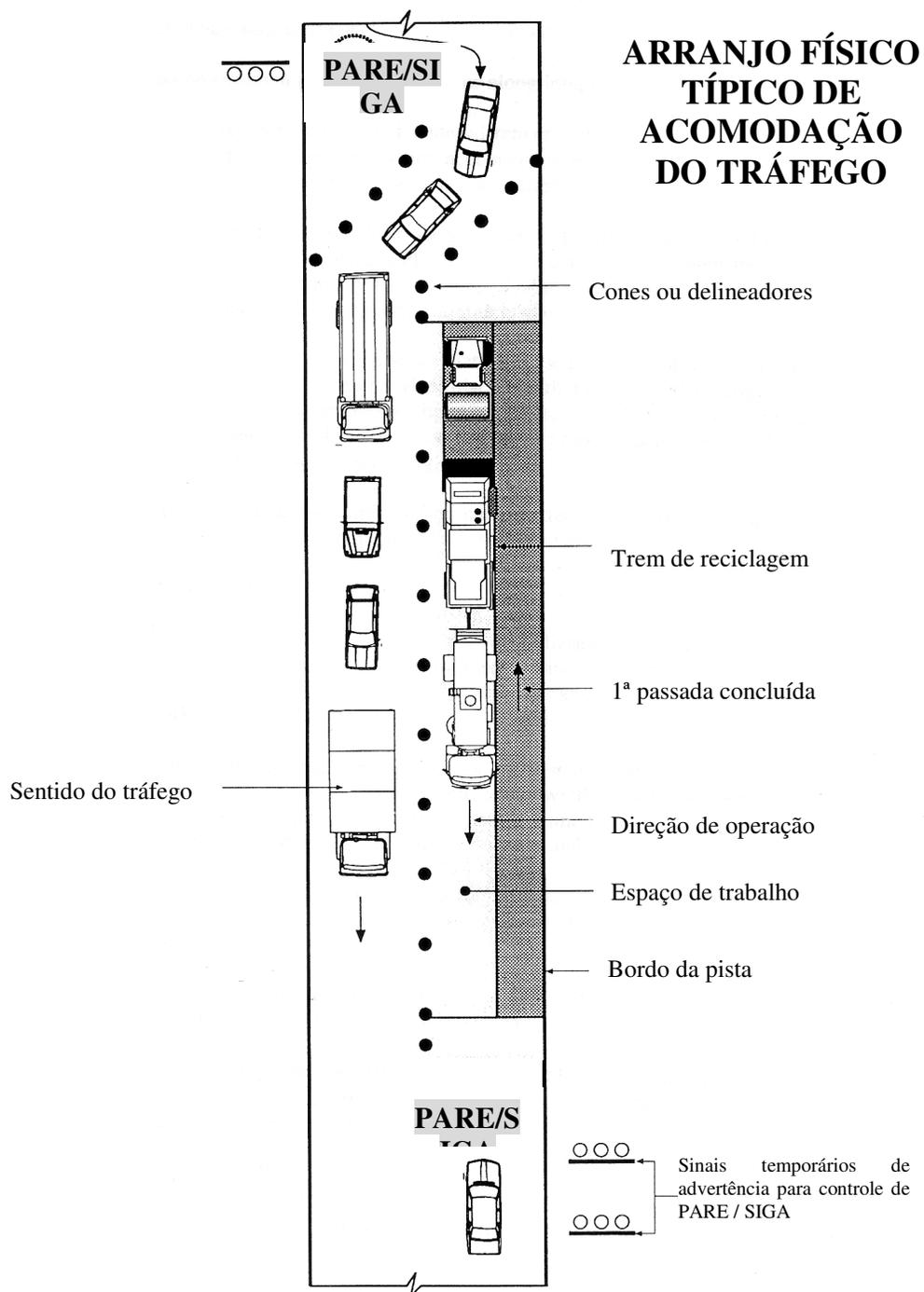


Figura 6.27 –Arranjo físico da pista em obras de reciclagem.
 Fonte: LOUDON & PARTNERS [36].

6.5. INÍCIO DOS SERVIÇOS DE TRITURAÇÃO

No primeiro dia de serviço, é recomendável que seja feito um trecho experimental. O trecho experimental é uma “pista de testes” que permite ao pessoal envolvido no processo conhecer melhor o comportamento do material sem as pressões de demanda de produção. Nesta oportunidade, todas as etapas construtivas da reciclagem profunda deverão ser cumpridas. Assim será possível adequar os equipamentos às condições requeridas de trabalho.

Sendo a recicladora o principal equipamento presente no processo, os seguintes aspectos deverão ser observados por ocasião da pista experimental:

- Profundidade de corte;
- Largura do corte;
- Controle da granulometria;
- Teor de umidade;
- Teor de agente estabilizante.

A profundidade de corte deve ser a mesma especificada pelo projeto. A operação começa com recicladora se posicionando paralelamente ao alinhamento do bordo ou do eixo da pista. Com a máquina parada, o tambor em rotação é abaixado, penetrando continuamente no pavimento até atingir a profundidade desejada.

De acordo com a CATERPILLAR [11], o controle da profundidade de corte durante a operação pode ser feito manual ou automaticamente. No modo de controle manual, o operador controla a profundidade do rotor através dos cilindros hidráulicos de profundidade. No controle automático, os cilindros de profundidade são controlados por um microinterruptor e um excêntrico que ajustam automaticamente a profundidade do rotor de modo que a profundidade de corte seja constante.

Assim que a profundidade for atingida, a recicladora se deslocará paralelamente ao alinhamento da pista numa velocidade de trabalho adequada. Durante a operação, deve-se verificar continuamente se a profundidade de corte está sendo atingida em ambos os lados da recicladora.

A verificação da profundidade é feita através de medidas físicas e diretas, como mostra a figura 6.28.



Figura 6.28 – Controle da espessura de corte

O operador deve ter uma referência fixa bem definida para alinhar a recicladora longitudinalmente e para evitar que porções estreitas do pavimento não sejam trituradas entre passadas adjacentes. Normalmente, essa referência pode ser faixas pintadas na pista, guias existentes no pavimento ou um alinhamento feito com corda, barbante ou arame, desde que seja fácil de ser seguido. Sendo o operador experiente, a primeira passada é suficiente para definir o alinhamento do corte que servirá de referência para a passada subsequente [4].

A largura do rotor, geralmente, é menor que a da pista, portanto mais de uma passada deve ser dada para cobrir completamente toda a largura. Nesse caso, é necessário fazer sobreposições entre passadas, e isso resulta numa série de juntas longitudinais.

Na primeira passada da recicladora, toda a largura do tambor de corte é utilizada. Nas passadas subseqüentes, a largura de corte vai sendo reduzida à medida que vai fazendo sobreposições [4].

As sobreposições da recicladora não incorrem em variações substanciais na granulometria da mistura. O que pode ocorrer neste caso é uma redução na graduação do material fresado, favorecendo ainda mais a homogeneidade do material reciclado. A fração fina da mistura permanece praticamente inalterada.

A granulometria do material produzido pela recicladora deverá ser examinada para verificar se é similar às amostras que foram usadas nos ensaios de laboratório. Existem mecanismos para controlar a granulometria da mistura, porém a recicladora não reduzirá os fragmentos da capa asfáltica para um tamanho menor do que os existentes na base ou no revestimento.

Segundo a ARRA [4], a granulometria do material reciclado pode ser influenciada por:

- Abertura da porta traseira;
- Ajuste da distância entre o tambor de corte e a barra de esmagamento;
- Velocidade de rotação do tambor de corte;
- Velocidade de deslocamento da recicladora;
- Condições do pavimento existente;
- Temperatura ambiente.

Esses aspectos devem ser avaliados, a fim de se chegar à melhor combinação para alcançar a granulometria necessária.

A posição da porta traseira (*scraper*) da câmara de mistura possui grande efeito sobre a graduação. Quanto mais fechada, maior será o tempo em que o material fica retido no interior da câmara, havendo assim maior contato do material com os dentes cortadores e com a barra de

esmagamento alojada dentro da câmara. Desta forma, quanto mais fechada estiver a porta, mais fina será a mistura; por outro lado, quanto mais aberta, mais grossa será [11].

A porta traseira (*scraper*) também garante a colocação limpa e parelha do solo misturado para sua imediata compactação. (Figura 6.29).



Figura 6.29 – Abertura da tampa traseira (*scraper*) da câmara de mistura

Como mostra a figura 6.30, a distância entre a barra de esmagamento (*break bar*) ou barra de impactos e o tambor fresador é regulável. A abertura entre ambos pode ser ajustada para restringir o tamanho das partículas e obter a granulometria desejada. Quanto mais próxima do rotor, mais fina será a granulometria da mistura.

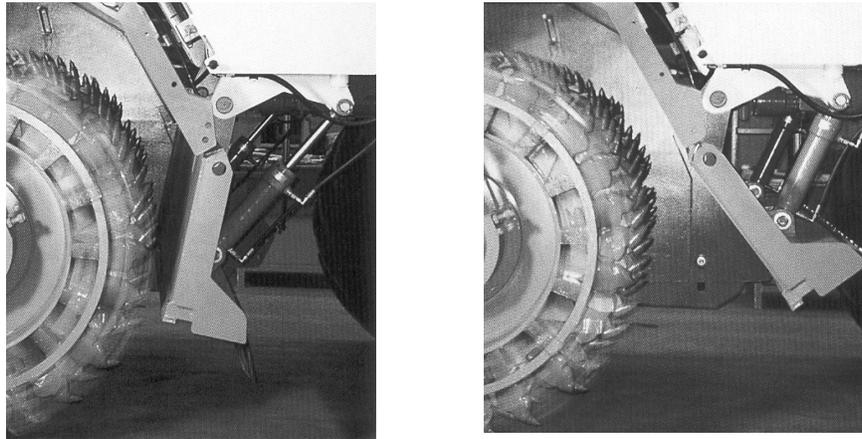


Figura 6.30 – Ajuste da abertura da porta dianteira (barra de impactos)
Fonte: WIRTGEN GmbH [61].

Como regra geral, quanto mais alta a velocidade de rotação do tambor, mais fina a mistura.

De acordo com a CATEPILLAR [11], a velocidade mais baixa do rotor, aquela com maior torque, é comumente usada para misturar o revestimento com material denso da base.

A rotação intermediária é usada ao se trabalhar com espessuras médias de revestimento e a velocidade de rotação mais rápida é usada quando se querem triturar espessuras de revestimento muito delgadas ou em passadas para misturar agente estabilizante [4].

A velocidade de trabalho da recicladora também tem influência direta na granulometria da mistura. Geralmente, quanto mais baixa a velocidade, mais fino o material produzido.

Uma velocidade baixa de deslocamento significa que a mistura estará em contato com os dentes por um tempo maior. Portanto, a velocidade da máquina nem sempre é determinada pela dificuldade do corte. Ela pode ser influenciada também pela necessidade de controlar a granulometria [11].

Quando o revestimento existente está muito trincado, como o da figura 6.31, fica mais difícil enquadrar a granulometria da mistura. O tambor fresador em operação tende a deslocar as placas do revestimento, dificultando sua fragmentação. Normalmente o tamanho das placas acompanha o desenho das trincas no pavimento.



Figura 6.31 – Capa asfáltica excessivamente trincada.

De acordo com a ARRA [4], neste caso, as seguintes técnicas podem ser usadas:

- Reduzir a velocidade de operação;
- Aumentar a velocidade de rotação do tambor;
- Reduzir a abertura da tampa traseira e dianteira;
- Elevar o rotor para o fundo do revestimento.

Tomando essas providências, o material permanece por mais tempo na câmara de mistura, aumentando o número de impacto com as ferramentas de corte. Assim, as placas podem ser fragmentadas para um tamanho aceitável.

Segundo a ARRA [4], as propriedades físicas do revestimento são afetadas pela temperatura ambiente. Se o pavimento está frio, o revestimento fica muito rijo, mas também muito quebradiço e pode ser triturado em pequenos fragmentos.

A temperatura elevada (acima de 32° C) aumenta a possibilidade de o corte gerar placas de pavimento na frente do cortador. As placas de asfalto assim retiradas serão mais difíceis de ser fragmentadas numa única passada [11].

Quando a temperatura ambiente aumenta, o revestimento fica mais plástico. Por um lado, isso reduz o consumo de ferramentas de corte, pois a resistência do pavimento é atenuada; por outro, fica mais difícil triturar a placa.

A umidade ótima permite atingir a densidade máxima da mistura com o esforço mínimo de compactação. No trecho experimental, a recicladora deverá ser ajustada para incorporar água na medida exata. Para isso é necessário que um profissional verifique o teor de umidade *in situ*. Dependendo da experiência do profissional, essa avaliação poderá ser feita na hora pelo simples contato da mistura com as mãos.

6.6. CUIDADOS CONSTRUTIVOS

Conhecidas as condições de trabalho às quais o processo estará submetido, a obra deverá ser dividida em segmentos que sejam exequíveis sob o ponto de vista da qualidade e capacidade de produção.

O comprimento “ideal” de corte que deverá ser processado antes da reversão (ou volta) da recicladora para passada subsequente é em geral determinado pelo tipo de agente estabilizante que está sendo usado.

Além do aspecto técnico, ao dividir o trecho em segmentos de trabalho, a utilização dos equipamentos é maximizada, pois um maior número de máquinas pode trabalhar

simultaneamente. Em obras bem planejadas, o sincronismo entre as etapas de trabalho é tão grande, que a eficiência dos equipamentos chega a ser de 90%.

Na operação de reciclagem, dois tipos de juntas são produzidas: juntas longitudinais e juntas transversais. As juntas longitudinais se formam paralelamente ao eixo da estrada e as transversais se formam em ângulo reto com o eixo. A correta execução das juntas é um fator importante durante a operação, pois, se não forem devidamente tratadas, podem afetar a integridade estrutural da camada.

Numa reciclagem, várias juntas longitudinais poderão ser formadas em função da quantidade de sobreposições de cortes adjacentes para cobrir toda a largura da pista. Normalmente o primeiro corte é o único a receber agente estabilizador na largura total do rolo. Nas passadas subseqüentes, deve-se tomar cuidado para não aplicar aditivo na largura da sobreposição, pois ela já foi tratada no corte anterior.

Cada vez que a operação de reciclagem é iniciada ou parada, juntas transversais são formadas. Mesmo nas paradas que levam apenas alguns minutos para mudar os tanques, cria-se uma junta que é essencialmente uma alteração na uniformidade do material reciclado. Portanto, deve-se ter atenção no sentido de minimizar as paradas e, quando for inevitável, tratar cuidadosamente a junta formada [60].

Se houver alguma paralisação temporária, deverá ser feita uma marca no local exato onde a recicladora parou. Quando a operação for retomada, a recicladora voltará alguns metros e reiniciará o corte sem adição de agente estabilizador e/ou água. No momento em que chegar ao local marcado, o operador deverá acionar o sistema de incorporação de aditivo. Esse procedimento evitará aplicação de quantidade maior ou menor de aditivo na junta.

A recicladora, portanto, somente deve ser interrompida quando os tanques estiverem vazios, ou por alguma outra necessidade imperiosa.

De acordo com a CATERPILLAR [11], se for efetuada mais de uma passada numa mesma área (para obter granulometria correta ou para misturar agente estabilizante), a profundidade de corte deve ser reajustada. Durante a primeira passada, a recicladora trabalha numa superfície dura e compacta; na passada seguinte, ela opera sobre o material solto, num nível mais alto do que a linha de greide original. Essa variação pode fazer com que o tambor fresador corte mais raso, de modo que a segunda passada não misture completamente todo o material. Para compensar, o tambor deve ser ajustado para cortar mais profundo, numa profundidade igual à diferença em altura.

Durante o espalhamento manual do agente estabilizante, deve-se tomar cuidado especial para que não haja excesso ou falta na área em que está sendo distribuído. A falta de homogeneidade na aplicação pode acarretar pontos fragilizados na camada pela falta de aditivo ou falta de umidade na mistura nos pontos onde foi aplicado em excesso.

Nos casos em que o agente é aplicado com espuma de asfalto, deve-se ter cuidado ao fazer a pré-mistura do cimento, cal ou outro agente semelhante através de uma passada inicial. O processo de cimentação, que começa assim que o pó seco entra em contato com a umidade, poderá ocasionar a aglomeração dos agregados finos, reduzindo efetivamente a fração de 0,075 mm (peneira n° 200). A qualidade da mistura, após a adição de espuma de asfalto, será inferior devido à insuficiência de agregados finos disponíveis para dispersar as partículas de asfalto [60].

O período de tempo máximo entre a mistura do material reciclado com um agente estabilizador e a compactação do material aplicado deve ser determinado pelo tipo de agente empregado. Quando forem associados dois ou mais agentes estabilizadores diferentes, o limite de tempo será o mais curto para cada agente individual [60]:

A WIRTGEN [60] recomenda:

- Cimento: Três (3) horas;
- Cal: Vinte e quatro (24) horas, se mantida úmida;
- Emulsão asfáltica: Antes da ruptura da emulsão;

- Espuma de asfalto: Sete (7) dias, se mantida úmida;
- Produtos químicos patenteados: Conforme instruções do fabricante.

Porém levando-se em conta as dimensões continentais, recomenda-se realizar estudos com relação a prazos.

Ao final de cada jornada de trabalho, o local exato onde termina o corte deve ser cuidadosamente marcado. Esta marca deverá coincidir com a posição do centro do rotor. O corte seguinte deverá começar no mínimo a 1,0 m atrás dessa marca para garantir a continuidade da camada estabilizada.

Capítulo 7

ESTUDOS DE LABORATÓRIO PARA VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO PRAZO DE TRABALHABILIDADE DO CIMENTO PORTLAND NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.

7.1 INTRODUÇÃO

A reciclagem profunda com adição de cimento é uma alternativa de construção empregada no Brasil e em todo mundo para recuperação de pavimentos. Essa modalidade de reciclagem é a mais comum porque o cimento é um aglomerante econômico e disponível em todas regiões. O processo se dá pela mistura do material triturado na pista (capa asfáltica constituída por misturas betuminosas ou tratamentos superficiais e parte da base composta por solos naturais, solo-cimento, solo-brita, BGS ou brita corrida) com cimento Portland e água, produzindo nova camada estabilizada hidraulicamente e com capacidade estrutural para atender às solicitações do tráfego.

Normalmente, nas obras de reciclagem com cimento Portland, não há controle sobre o espaço de tempo compreendido entre o momento em que o material reciclado é misturado com cimento até o término da compactação. Esse fato está relacionado a aspectos operacionais da obra como também pela falta de norma técnica que estabeleça o tempo máximo de processamento da mistura cimentada sem que haja prejuízo para o desempenho da camada.

Segundo JOFRÉ [34] à medida que ocorre o processo de hidratação do cimento, começa a formar um certo número de ligações cristalinas entre os grãos presentes na mistura, os quais poderão ser destruídos sem poder regenerar-se devido aos esforços advindos da energia de compactação.

Portanto a compactação de uma camada reciclada com cimento deverá ser concluída antes da formação das ligações cristalinas.

O mesmo autor chama o intervalo de tempo máximo no qual poderão efetuar-se as operações de compactação de prazo de maneabilidade.

O objetivo deste capítulo é verificar em laboratório a influência do prazo de trabalhabilidade ou maneabilidade do cimento Portland na resistência de misturas recicladas avaliada através de ensaios a compressão simples.

7.2 METODOLOGIA ADOTADA

A metodologia adotada foi uma tentativa de simular em laboratório uma rotina que ocorre em campo onde o cimento é misturado com o material reciclado e, depois de algumas horas, a mistura é compactada e conformada geometricamente sem a observância do prazo de maneabilidade do cimento.

Para representar essa situação foram preparadas várias misturas nas condições pré-determinadas de umidade ótima e teor de cimento. O material ficou exposto ao sol por um período máximo de seis horas, sendo que a cada duas horas a partir do instante em que ocorreu a mistura, três corpos-de-prova eram moldados e posteriormente curados por sete dias em câmara úmida.

Cumprido o prazo de cura, os corpos-de-prova moldados a cada duas horas foram rompidos e suas resistências comparadas com os corpos-de-prova moldados na condição convencional para verificar se houve variação significativa na tensão de ruptura.

7.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Para atingir o objetivo, foram executados procedimentos de campo e de laboratório:

• Procedimentos de Campo:

Os procedimentos de campo foram realizados com amostras recolhidas de obras de recuperação do pavimento das seguintes rodovias:

- Rodovia estadual SP 294 – Rodovia Comandante João Ribeiro de Barros, no município de Tupã/SP;
- Rodovia federal BR 040 – Rodovia Presidente Juscelino Kubstcheck de Oliveira, no município de Felixlândia/MG.

O projeto de recuperação do pavimento nas rodovias citadas consistia em reciclagem profunda com adição de cimento Portland, e a finalidade do procedimento de campo foi coletar na pista amostras de misturas recicladas durante a operação da recicladora.

As seguintes etapas foram cumpridas:

- Verificação das espessuras das camadas processadas (capa asfáltica e base);
- Coleta de material para ensaios de laboratório: O material coletado foi a mistura resultante da trituração da capa asfáltica e parte da base numa espessura de 18 cm de profundidade.

As amostras coletadas nas duas obras foram extraídas pela recicladora marca Caterpillar modelo RM 350 (fig. 7.1) e, associadas à máquina, foram fixadas duas variáveis que são preponderantes na graduação da mistura (tabela 7.1):

- Velocidade de avanço da recicladora;
- Velocidade de rotação do tambor fresador.

Amostra	Espessura de corte (cm)	Equipamento	Variáveis Fixadas	
			Deslocamento (m/min)	Rotação do tambor (rpm)
BR 040	18	CAT RM 350	8	215
SP 294	18	CAT RM 350	8	215

Tabela 7.1 – Condições fixadas para coleta das amostras



Figura 7.1 – Máquina recicladora de pavimentos CAT RM 350

Outros fatores intervenientes na granulometria da mistura, como o estado de trincamento da superfície, temperatura ambiente, abertura da tampa traseira (*scraper*) e dianteira (barra de impactos), não foram consideradas dadas as dificuldades inerentes à avaliação de tais perspectivas.

Cabe ressaltar que a pesquisa não foi prejudicada por desconsiderar tais parâmetros, pois a granulometria usada do material reciclado para execução dos ensaios ficou compreendida entre 19,1 mm (peneira ¾”) e 4,8 mm (peneira nº 4) .

As figuras 7.2 e 7.3 exibem as amostras que foram coletadas em campo:



Figura 7.2 – Amostra do material coletado na SP 294.



Figura 7.3 – Amostra do material coletado na BR 040

• Procedimentos de Laboratório:

Os procedimentos de laboratório foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos e Estradas da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. As amostras coletadas nas rodovias SP 294 e BR 040 foram submetidas aos seguintes ensaios:

- Ensaio de Granulometria de Solos segundo o DNER-ME 080/94 – Solos: Análise Granulométrica por Peneiramento;
- Ensaio de Permeabilidade conforme a ABNT NBR 14545/2000 – Solo: Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos a Carga Variável;
- Ensaio de dosagem do cimento de acordo com a ABNT NBR 12253/92 – Solo Cimento: Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento;
- Ensaio de Compactação conforme prescrito na ABNT NBR 12023/90 – Solo Cimento: Ensaio de Compactação;
- Moldagem e cura de CP's de acordo com a ABNT NBR 12024/92 – Solo Cimento – Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos;
- Ruptura de CP's segundo a ABNT NBR 12025/90 – Solo Cimento – Ensaio de Compressão Simples de Corpos-de-Prova Cilíndricos.

7.4 MATERIAIS EMPREGADOS**7.4.1 Mistura Reciclada**

Os fatores que motivaram a escolha das amostras recolhidas na SP 294 e BR 040 foram os seguintes:

- Recicladora: As duas obras estavam sendo executadas no mesmo período por dois equipamentos de reciclagem de mesma marca e modelo. Essa condição permitia padronizar os parâmetros de velocidade de deslocamento e de rotação do cilindro fresador;

- Característica dos materiais: O revestimento asfáltico, nas duas obras, era em CBUQ, no entanto, os materiais que compunham as bases originais dos pavimentos eram diferentes, sendo que na SP 294 a base era de solo cimento, enquanto na BR 040 a base era de cascalho laterítico. A diferente constituição entre os materiais permitiu avaliar o comportamento da mistura quanto a suas características.

• Local de Coleta das Misturas

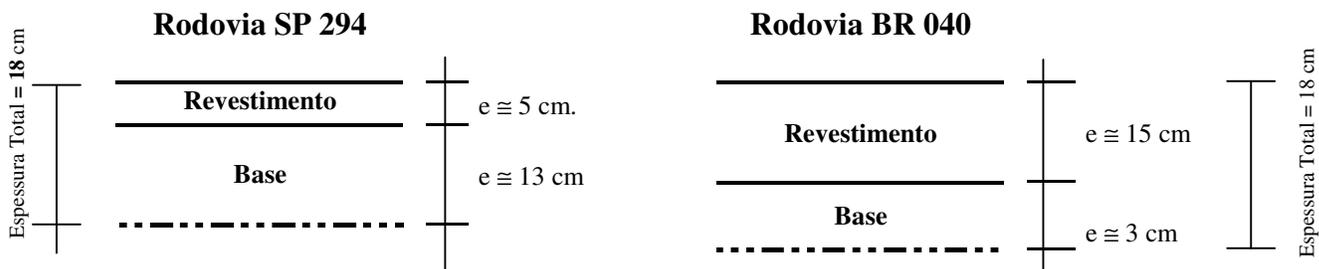
Foram coletadas cerca de 200 kg de cada material para o desenvolvimento de toda a pesquisa. A mistura proveniente da SP 294 foi coletada no km 517 (estaca 3915) município de Tupã/SP e a da BR 040 no km 404 (estaca 20202) no município de Felixlândia/MG.

Os materiais foram armazenados em sacos plásticos e devidamente identificados para serem posteriormente encaminhados ao laboratório de Mecânica dos Solos da UNICAMP.

• Seção Transversal dos Pavimentos

As espessuras médias de capa e base encontradas em toda a extensão do trecho da SP 294 eram homogêneas, com valores próximos a 5 cm e 13 cm, respectivamente. Já na BR 040, as espessuras médias ficaram próximas a 8 cm para capa e 10 cm para base.

No entanto, as seções transversais das camadas nos locais onde os materiais foram coletados para o experimento eram as seguintes:



O local onde a amostra foi coletada na BR 040 era próximo de um “encabeçamento” de ponte, motivo pelo qual se explica a elevada espessura de capa cuja origem se deu pelas sucessivas operações de recapeamento à medida que o aterro da ponte ia se recalçando até se consolidar.

7.4.2 Cimento

A escolha do tipo de cimento foi determinada pela disponibilidade do material no comércio da região de Campinas. Foi escolhido o cimento do tipo CP II - E 32 da marca Lafarge, adquirido em embalagem de 50 kg. Durante o desenvolvimento da pesquisa, o cimento foi armazenado em sacos plásticos para evitar sua hidratação.

O CP II - E 32 é um cimento Portland composto com escória e, segundo a norma ABNT NBR 11578/91 [1], cimentos classificados nesta categoria são constituídos de 56 a 94% de clínquer e sulfatos de cálcio, 6 a 34% de escória granulada de alto-forno e 0 a 10% de material carbonático.

7.5 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratório foram realizados com o seguinte objetivo:

- **Análise granulométrica por peneiramento**

As amostras foram submetidas ao ensaio de granulometria conforme prescrito no método de ensaio DNER-ME 080/94. O objetivo desse ensaio foi conhecer a granulometria resultante do material coletado na pista. Esse ensaio limita-se apenas a um dado informativo.

• **Ensaio de Permeabilidade**

O objetivo desse ensaio foi comparar a velocidade de escoamento da água nas duas misturas a partir da determinação do coeficiente de permeabilidade (k). Esse ensaio também se limita apenas a um dado informativo.

O ensaio foi realizado com o auxílio de permeâmetro de nível variável (figura 7.4), onde foi medida a passagem total de água sob ação da gravidade pelo corpo-de-prova num dado período de tempo e numa dada temperatura ambiente.

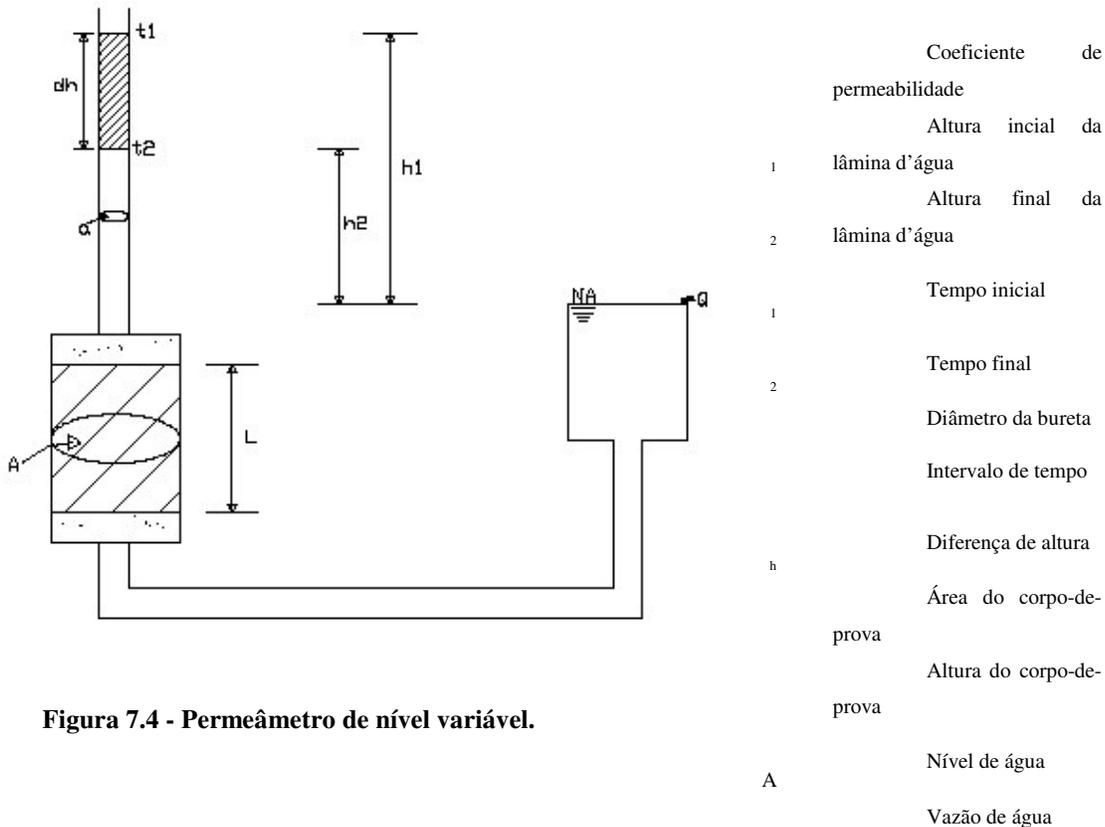


Figura 7.4 - Permeâmetro de nível variável.

O cálculo de k foi dado a partir da seguinte equação:

$$k = \frac{2,3 \times L \times a}{A \times \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2}$$

A tabela 7.2 apresenta as medidas usadas na confecção dos corpos-de-prova para realização do ensaio:

Características	Amostras SP 294/BR 040
Altura (cm)	11,5
Diâmetro (cm)	15,20
Área (cm ²)	181,5
Volume (cm ³)	2078

Tabela 7.2 - Medidas do CP's usadas no ensaio de permeabilidade

• **Determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima**

Nesta etapa foram realizados ensaios de compactação para obtenção da umidade ótima e massa específica seca máxima de cada material estudado.

Preliminarmente foi realizado o ensaio de dosagem das misturas, adotando-se para isso três diferentes teores de cimento calculados em relação a massa de solo (capa + base) seco ao ar. Os ensaios foram realizados conforme preconiza a norma ABNT NBR – 12253/92.

As misturas dos materiais com cimento nos teores indicados apresentaram resistências à compressão simples após o período de cura de sete dias próximos ao padrão mínimo de 2,1 MPa exigido pela norma em questão.

Fixados os teores de cimento, foram realizados em seguida os ensaios de compactação, na energia Proctor Normal, conforme os procedimentos da norma ABNT – NBR 12023/90. Os valores encontrados de teor de umidade (w_o) e massa específica seca máxima (ρ_{dmax}), orientaram a moldagem dos corpos-de-prova usados para a determinação da resistência à compressão simples.

- **Moldagem de corpos-de-prova cilíndricos a cada duas horas**

Foram preparadas nove misturas de cada material (SP 294 e BR 040) nos teores pré-definidos de cimento e umidade ótima. As misturas ficaram expostas ao sol como pode ser visto nas figuras 7.5 e 7.6 por um período máximo de 6 horas, sendo que a cada duas horas três misturas eram moldadas para serem submetidas ao ensaio de resistência a compressão simples após o período de cura na câmara úmida (figura 7.7).



Figura 7.5 – Misturas da SP 294 expostas ao sol



Figura 7.6 – Misturas da BR 040 expostas ao sol



Figura 7.7 – Cura dos corpos-de-prova na câmara úmida

Previamente às moldagens dos corpos-de-prova, eram calculadas as massas de água perdidas durante o período de exposição ao sol. A água perdida foi restituída durante a preparação dos CP's a fim de possibilitar a compactação das amostras na umidade ótima obtida nos estudos preliminares.

Os CP's foram moldados em moldes cilíndricos com 5,1 cm de diâmetro por 10,2 cm de altura, através de 26 golpes de soquete em três camadas iguais na energia Proctor Normal. O diâmetro máximo dos grãos contidos na mistura foi de 9,52 mm (passante na peneira 3/8"). Antes de se iniciar a compactação da mistura, os cilindros eram lubrificados com vaselina para facilitar a posterior extração dos corpos-de-prova.

• Ensaio de resistência

As misturas foram submetidas ao ensaio de compressão simples sob carregamento contínuo à velocidade 1,27 mm/min (figura 7.8). Cada mistura originou um CP. Como eram moldadas três misturas a cada duas horas, foram produzidos, portanto, três corpos-de-prova a cada duas horas.

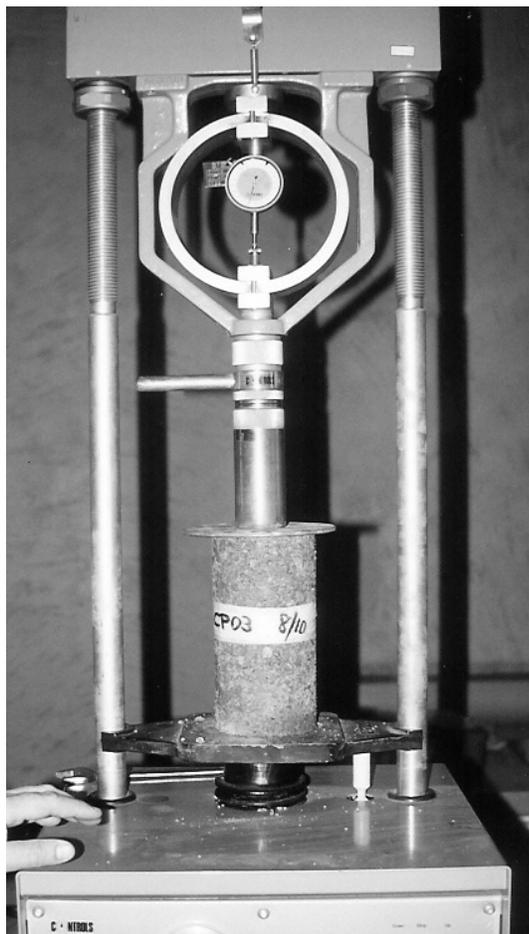


Figura 7.8 – Corpo-de-prova sendo submetido ao ensaio de compressão.

O desempenho das misturas foi comparado, tendo como referência a resistência à compressão simples de corpos-de-prova cilíndricos e os procedimentos adotados para execução do ensaio foram baseados na norma ABNT NBR 12025/90.

Os resultados obtidos dos ensaios serão apresentados e analisados a seguir:

7.6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.6.1 Análise Granulométrica por Peneiramento

A análise granulométrica demonstrou que os dois materiais apresentam granulações distintas, conforme pode ser visto na tabela 7.3.

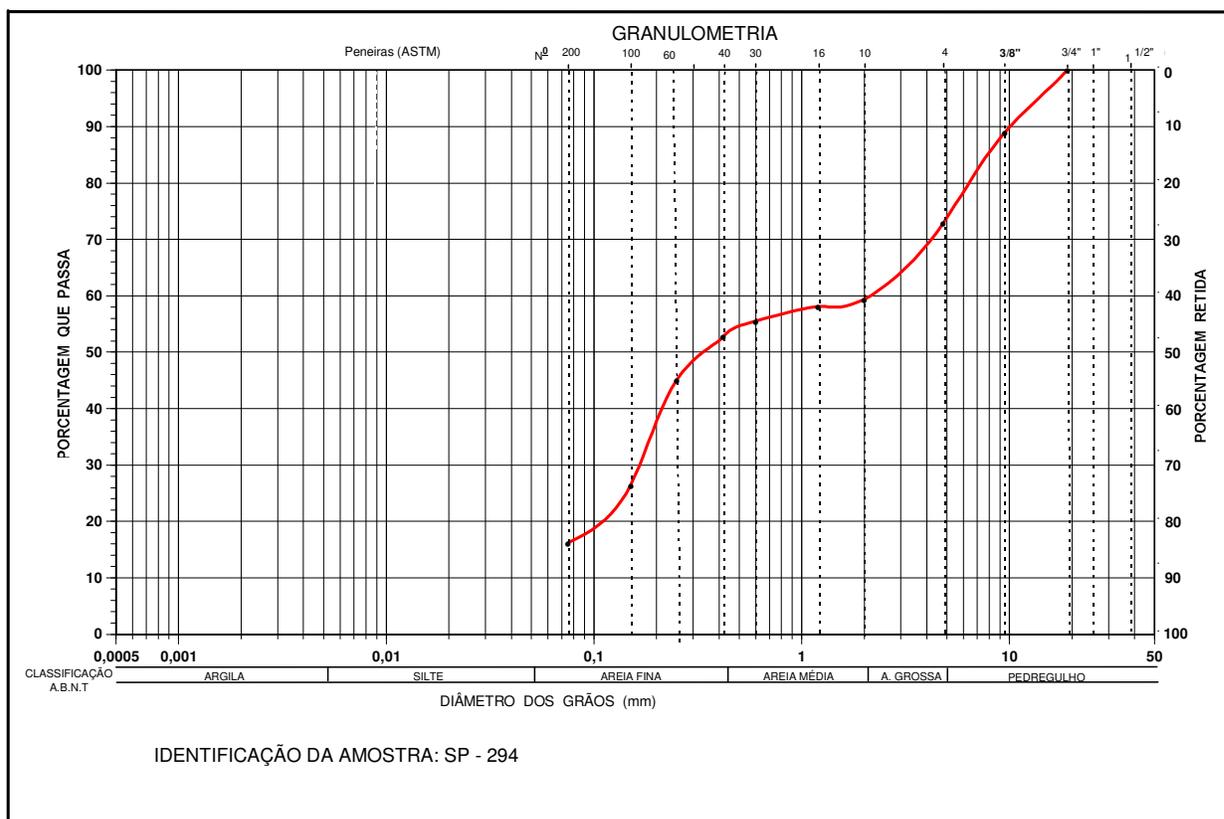
Peneiras		Porcentagem que passa em massa (%)	
ABNT	Abertura (mm)	Amostra SP 294	Amostra BR 040
2"	50,8	100	100
1 ½"	38,1	100	100
1"	25,4	100	100
¾"	19,1	100	100
3/8"	9,52	88,94	81,20
Nº 4	4,80	72,83	59,59
Nº 10	2,00	59,36	40,35
Nº 16	1,20	58,11	33,45
Nº 30	0,59	55,50	21,51
Nº 40	0,42	52,77	15,58
Nº 60	0,25	44,99	12,31
Nº 100	0,148	26,47	9,97
Nº 200	0,075	16,21	8,88

Tabela 7.3 – Resultado da análise granulométrica das duas amostras.

A combinação entre as velocidades de deslocamento e de rotação do cilindro fresador foi satisfatória para as duas amostras, levando-se em conta que o tamanho máximo dos grãos ficou compreendido entre 1 e 2 cm.

Vale lembrar que a capa asfáltica, depois de trituração, atua na mistura como agregado, e as placas de asfalto normalmente produzidas durante o processo de reciclagem são indesejáveis, visto que seu formato lamelar e alongado tende a quebrar-se no interior da camada quando esta se encontra sob carregamento. Esse fato pode ocasionar trincas na superfície do pavimento.

O material da SP 294 apresentou uma granulometria mal graduada ou descontínua, conforme mostra a figura 7.9. Pode-se observar uma predominância de areia devido ao fato de a base original ser em solo cimento e esta, ao ser triturada, ficou semelhante à sua condição primitiva de solo.

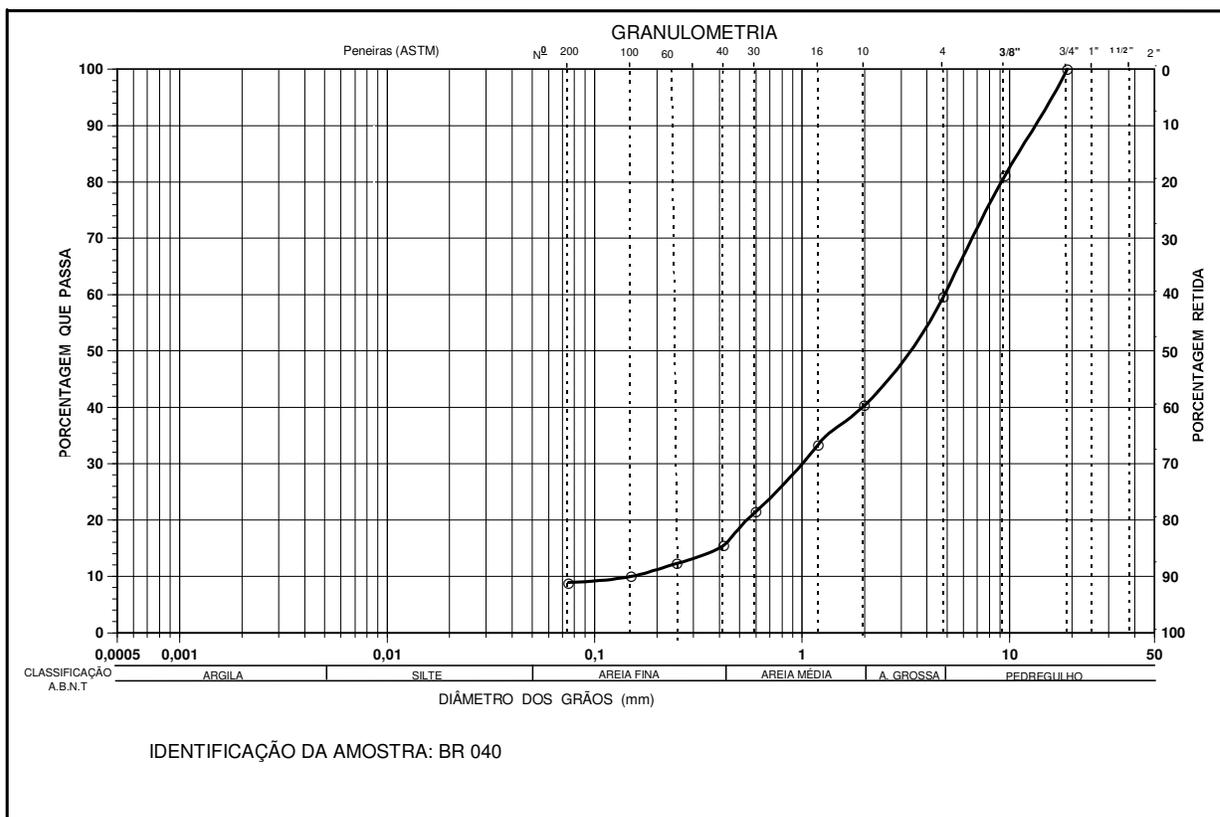


Classificação – ABNT NBR 6502/95

Argila	Silte	Areia			Pedregulho				
		Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso		
0,0%	0,0%	36,7%	18,8%	4,4%	18,1%	21,9%	0,0%		
		Diâmetro das Partículas (mm)							
		0,002	0,06	0,2	0,6	2	6	20	60

Figura 7.9 – Distribuição Granulométrica da amostra da SP 294

No caso da amostra da BR 040 o material apresentou uma curva granulométrica bem graduada ou contínua conforme pode ser visto na figura 7.10. Diferente do material da SP 294, aqui a predominância foi de pedregulho. Isso se explica devido ao fato de a amostra ser predominantemente de capa asfáltica, pois, durante o processo de coleta, a camada de base praticamente não foi atingida.



Classificação – ABNT NBR 6502/95

Argila 0,0%	Silte 0,0%	Areia 40,7%			Pedregulho 59,3%			
		Fina 11,1%	Média 10,1%	Grossa 19,5%	Fino 25,7%	Médio 33,4%	Grosso 0,1%	
0,002		0,06	0,2	0,6	2	6	20	60
Diâmetro das Partículas (mm)								

Figura 7.10 – Distribuição Granulométrica da amostra da BR 040

Também foi observado que na amostra da BR 040 a fração de solo que passa na peneira nº 200 (0,075 mm) é praticamente a metade em relação à amostra da SP 294. Tendo em vista que a amostra da BR 040 é constituída basicamente de capa asfáltica triturada era de se esperar que o material de enchimento fosse inferior a 10% em peso. Isso porque, de acordo com a especificação de serviço DNER ES 313/97 [17], de todas as faixas granulométricas especificadas para o CBUQ, a faixa “C” é a que apresenta a maior quantidade de "filler", ou seja, entre 5% a 10% em peso passando na peneira nº 200.

Outro fato constatado foi que a granulometria das duas amostras mostraram-se adequadas para serem estabilizadas com cimento. Tomando-se como referência a tabela 7.4 conclui-se que tanto o material da SP 294 quanto o da BR 040 se enquadraram na faixa granulométrica estabelecida pela AASHTO para solo cimento.

Peneiras		Faixa da AASHTO	Porcentagem que passa em massa (%)	
ABNT	Abertura (mm)		Amostra SP 294	Amostra BR 040
3"	75,00	100	100	100
Nº 4	4,76	50 – 100	72,83	59,59
Nº 40	0,42	15 – 100	52,77	15,58
Nº 200	0,075	5 - 35	16,21	8,88

Tabela 7.4 – Faixa granulométrica para o solo-cimento. Fonte: BATISTA [8]. Adaptado pelo autor.

Por outro lado, se o projeto previsse a estabilização das duas amostras com espuma de asfalto, as duas granulometrias teriam que ser corrigidas. Pela tabela 7.5 pode-se observar que a granulometria do material da BR 040 foi o que mais se aproximou da faixa granulométrica sugerida por ISAAC PINTO [33].

Peneiras		Faixa da Espuma de Asfalto (ISAAC PINTO)	Porcentagem que passa em massa (%)	
ABNT	Abertura (mm)		Amostra SP 294	Amostra BR 040
2"	50,8	100	100	100
1 ½"	38,1	92 – 100	100	100
1"	25,4	78 – 100	100	100
¾"	19,1	63 – 100	100	100
3/8"	9,52	45 – 76	88,94	81,20
Nº 4	4,80	33 – 60	72,83	59,59
Nº 10	2,00	22 – 50	59,36	40,35
Nº 40	0,42	10 – 33	52,77	15,58
Nº 200	0,075	5 - 20	16,21	8,88

Tabela 7.5 – Faixa granulométrica para material reciclado com espuma de asfalto. Fonte: ISAAC PINTO [33]. Adaptado pelo autor

7.6.2 Ensaio de Permeabilidade

Os resultados obtidos a partir do ensaio de permeabilidade estão apresentados na tabela 7.6.

Dados do ensaio	Amostra SP 294	Amostra BR 040
Área da bureta (cm ²)	5,75	5,75
Altura inicial (cm)	88,1	88,10
Altura final (cm)	82,10	68,10
Tempo médio do ensaio (nin)	8614,80	206,20
Coef. de permeabilidade (k)	$2,97 \times 10^{-6}$	$4,53 \times 10^{-4}$
Temperatura (°C)	25	25
Coef. de correção	0,887	0,887
Coef. de permeabilidade (k) a 20 °C (cm/s)	$2,63 \times 10^{-6}$	$4,01 \times 10^{-4}$

Tabela 7.6 - Resultados obtidos a partir do ensaio de permeabilidade

Conforme apresenta a tabela 7.6, as amostras apresentaram coeficientes de permeabilidade completamente diferentes, com destaque para o material da BR 040, que apresentou velocidade de escoamento de água muito maior que o da SP 294, sendo, portanto, mais permeável.

A permeabilidade de um solo está associada ao seu índice de vazios, tamanho médio dos seus grãos e da sua estrutura. Essas características justificam o fato de o material da BR 040 ser mais permeável, pois, no ensaio de granulometria, ficou constatada maior presença de pedregulho na amostra da BR 040.

7.6.3 Ensaio de Dosagem do Cimento

A definição do teor de cimento foi feita a partir de ensaios de compactação na energia Proctor Normal, utilizando-se teores de 3%, 4% e 5% de cimento Portland em relação à massa do material. Esses teores foram arbitrados a partir dos valores adotados nas obras de recuperação da SP 294 e BR 040, que foram de 3,5% e 4% respectivamente.

As figuras 7.11 e 7.12 ilustram as curvas de compactação dos materiais para cada teor de cimento.

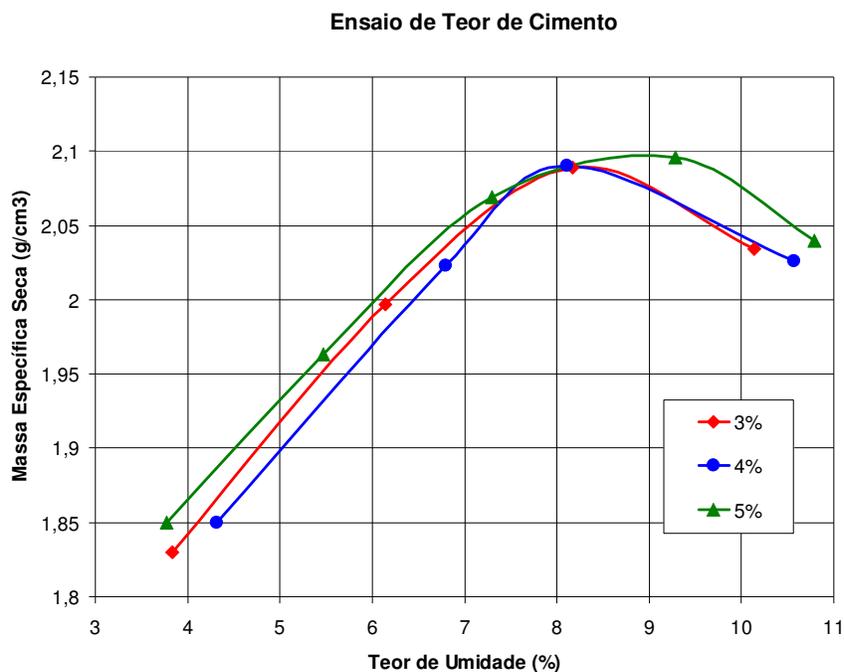


Figura 7.11 – Curvas de compactação do material da SP 294 com teores de 3%, 4% e 5% de cimento.

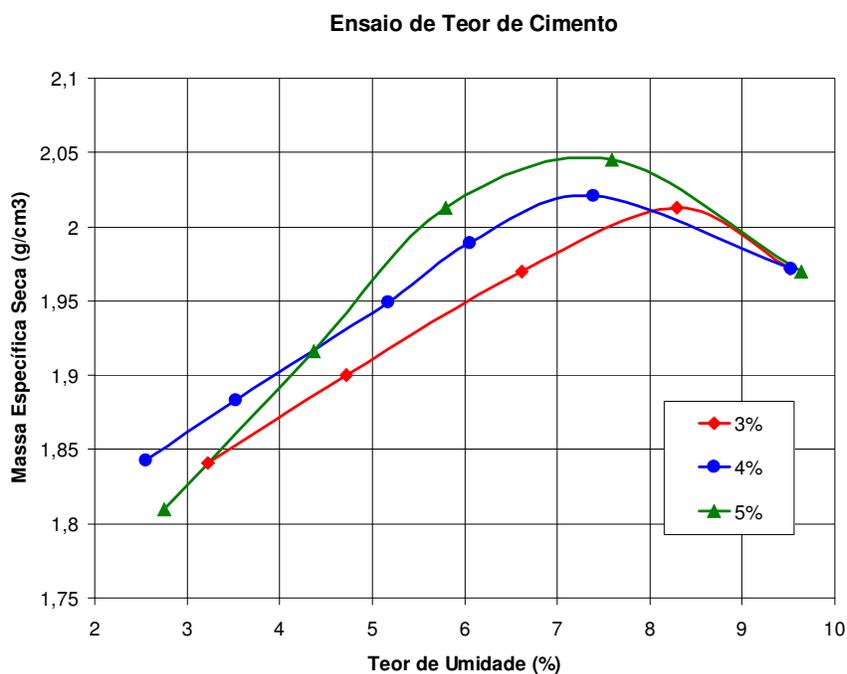


Figura 7.12 – Curvas de compactação do material da BR 040 com teores de 3%, 4% e 5% de cimento.

A tabela 7.7 apresenta os valores de teor ótimo de umidade (w_o), massa específica seca máxima ($\rho_{dm\acute{a}x}$), grau de compactação (GC) e resistência à compressão média ($RC_{m\acute{e}dia}$) a partir do teor de cimento adotado.

Teor de cimento	Características	Amostras	
		SP 294	BR 040
3%	w_o (%)	8,30	8,15
	$\rho_{m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	2,08	2,01
	GC (%)	99,5	100
	$RC_{m\acute{e}dia}$ (MPa)	2,41	1,33
4%	w_o (%)	8,50	7,48
	$\rho_{m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	2,09	2,02
	GC (%)	99,8	100
	$RC_{m\acute{e}dia}$ (MPa)	2,53	1,82
5%	w_o (%)	8,69	7,19
	$\rho_{m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	2,09	2,04
	GC (%)	99,5	99,5
	$RC_{m\acute{e}dia}$ (MPa)	2,82	2,11

Tabela 7.7 – Valores obtidos no ensaio de compactação

Cada valor apresentado de resistência à compressão é a média aritmética dos resultados do ensaio de três corpos-de-prova.

Para os materiais de Tupã/SP e Felixlândia/MG adotou-se como teor ótimo de cimento os valores de 3% e 5%, respectivamente, pois apresentaram uma resistência à compressão após sete dias de cura, um valor imediatamente superior ao padrão mínimo de 2,1 MPa ou 21 kgf/cm², conforme previsto na norma ABNT NBR – 12253/92.

Observa-se que teores crescentes de cimento conduziram a maiores valores de resistência para os dois materiais, entretanto, quando se comparam as resistências considerando os mesmos

teores de cimento, fica constatado que o material da SP 294 comporta-se significativamente melhor em relação ao da BR 040.

Uma das razões que justificam esta constatação pode ser explicada tendo como referência o estudo realizado por MOURA [43], onde o autor menciona que a interação entre o cimento e as partículas granulares do solo difere do que ocorre entre o cimento e as partículas finas. Nos solos granulares a cimentação é similar a que ocorre no concreto com a diferença que no solo a pasta de cimento não preenche os vazios do agregado, cimentando apenas os pontos de contato das partículas como mostra a figura 7.13.

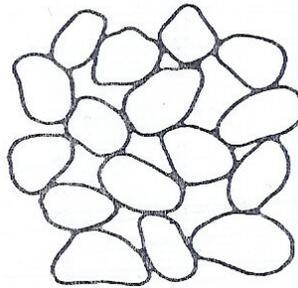


Figura 7.13 – Cimentação das partículas do solo. Fonte: Moura [43]

Como há uma predominância de partículas finas na amostra da SP 294, o índice de vazios é menor em relação ao material da BR 040, onde a fração de pedregulho é a predominante (conforme pôde ser observado no ensaio de permeabilidade). Logo a menor resistência obtida pela amostra da BR 040 está associada à ausência de finos necessários para preencher os interstícios do material.

7.6.4 Moldagem dos corpos-de-prova a cada duas horas

A tabela 7.8 apresenta os valores adotados de teor de cimento, umidade ótima e massa específica seca máxima usadas para preparar as misturas.

Características	Amostra	
	SP 294	BR 040
Teor de cimento	3 %	5 %
w_o (%)	8,30	7,19
$\rho_{m\acute{a}x}$ (g/cm ³)	2,08	2,04

Tabela 7.8 – Valores adotados para dar seqüência aos ensaios

O ensaio foi realizado em dias diferentes para cada tipo de material. As misturas foram preparadas em bandejas com dimensões de 30 cm x 50 cm e colocadas ao sol. Os dados referentes à temperatura ambiente e a umidade relativa do ar foram fornecidos pela CEPAGRI – Centro de Pesquisas Agrícolas da UNICAMP [12]. As tabelas 7.9 e 7.10 mostram os resultados obtidos pelos dois materiais.

Data: 24/09/03 Temperatura do ar = 27 a 32° C Umidade relativa do ar = 15,8 %

Horário (h)	Tempo de Exposição ao Sol	Mistura	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Diferença (g)
11:00	02 horas	01	4440	4080	360
		02	4440	4120	320
		03	4440	4100	340
13:00	04 horas	04	4440	4030	410
		05	4440	4000	440
		06	4440	4060	380
15:00	06 horas	07	4440	3930	510
		08	4440	3970	470
		09	4440	4030	410

Tabela 7.9 – Resultados obtidos pela mistura da SP 294

Data: 01/10/03 Temperatura do ar = 24 a 29,4 °C Umidade relativa do ar = 36%					
Horário (h)	Tempo de Exposição ao Sol	Mistura	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Diferença (g)
11:00	02 horas	01	4475	4280	195
		02	4475	4240	235
		03	4475	4320	155
13:00	04 horas	04	4475	4240	235
		05	4475	4200	275
		06	4475	4200	275
15:00	06 horas	07	4475	4200	275
		08	4475	4200	275
		09	4475	4200	275

Tabela 7.10 – Resultados obtidos pela mistura da BR 040

Os pesos iniciais das misturas eram a soma de pesos do solo, cimento e água no teor ótimo. Ao serem retiradas do sol, as misturas foram pesadas novamente para verificar as massas de água perdida. Observa-se que a perda de água foi crescente para os dois materiais na medida em que ficaram expostos. No entanto, a variação da umidade não seguiu um padrão bem definido quando se compararam as duas amostras.

A razão disso está associada às características do material, temperatura e umidade relativa do ar. Ficou constatado que esses três aspectos têm influência direta na perda da umidade.

Finalmente a água evaporada foi restituída, a fim de possibilitar a homogeneização da mistura na umidade ótima e, em seguida, os corpos-de-prova foram moldados como previsto na norma ABNT NBR 12024/92.

7.6.5 Ensaio de resistência

As tabelas 7.11 e 7.12 e a figura 7.14 apresentam os valores obtidos a partir do ensaio de resistências à compressão simples dos corpos-de-prova moldados a cada duas horas:

Horário (h)	Tempo de exposição ao sol	Mistura	Água restituída (g)	RC _{7 dias} (MPa)	RC _{média} (MPa)
11:00	02 horas	01	360	1,42	1,50
		02	320	1,54	
		03	340	1,54	
13:00	04 horas	04	410	1,26	1,22
		05	440	1,22	
		06	380	1,18	
15:00	06 horas	07	510	0,94	0,97
		08	470	0,96	
		09	410	1,00	

Tabela 7.11 – Resistência à compressão obtida pelo material da SP 294.

Horário (h)	Tempo de exposição ao sol	Mistura	Água restituída (g)	RC _{7 dias} (MPa)	RC _{média} (MPa)
11:00	02 horas	01	195	2,17	2,17
		02	235	2,16	
		03	155	2,19	
13:00	04 horas	04	235	1,42	1,37
		05	275	1,37	
		06	275	1,32	
15:00	06 horas	07	275	1,11	1,13
		08	275	1,11	
		09	275	1,19	

Tabela 7.12 – Resistência à compressão obtida pelo material da BR 040.

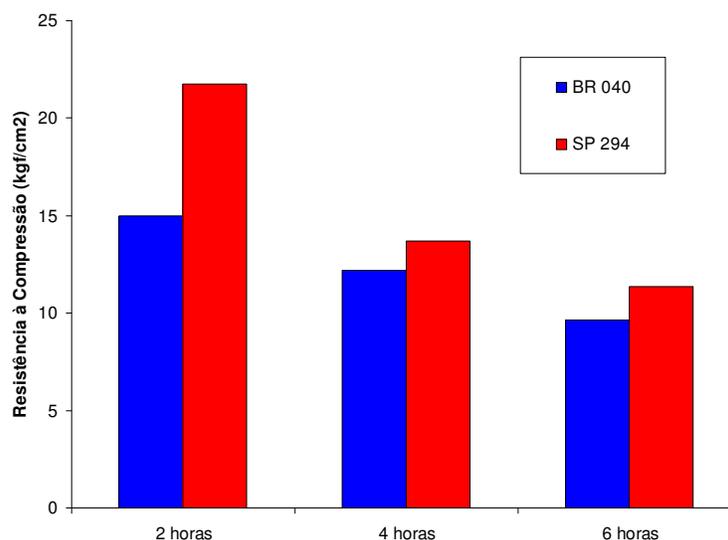


Figura 7.14 – Gráfico resistência versus prazo de trabalhabilidade

Tomando-se os valores das tabelas 7.11 e 7.12, observa-se que a resistência dos dois materiais sofreu drástica redução na medida em que se aumentou a quantidade de água.

Considerando-se que a resistência obtida nas condições normais de moldagem foi de 2,63 MPa, a perda de resistência do material da SP 294 foi da ordem de 43%, a partir das duas horas iniciais, 54% a partir das quatro primeiras horas e 63% nas últimas seis horas de ensaio.

De maneira similar, a resistência do material da BR 040 também apresentou a mesma tendência de queda, sendo que, nas condições normais de moldagem, o valor atingido foi de 2,2 MPa e, nas horas subseqüentes (2, 4 e 6 horas), houve decréscimo de resistência da ordem de 1,3%, 38 %, 48 % respectivamente. Nota-se que nas duas primeiras horas praticamente não ocorreu variação da resistência, esse fato pode estar associado a perda de água que foi relativamente pequena no mesmo período.

Analisando os resultados, conclui-se que a queda de resistência verificada nas misturas está fortemente associada à relação água/cimento. De maneira análoga ao concreto de cimento Portland, pode-se dizer que, quanto maior a relação água/cimento, piores são as características desejadas da mistura, principalmente a resistência à compressão.

Mantidas as devidas proporções, nas obras de reciclagem com cimento também ocorre perda de água na mistura quando esta não é compactada em tempo hábil. Evidente que a perda de água não segue as mesmas proporções encontradas no experimento até porque a massa de material reciclado no campo é infinitamente maior que a massa das misturas adotadas nos ensaios. Fica consignado pela prática realizada que o aumento da relação água/cimento sem o correspondente acréscimo no teor de cimento pode produzir efeitos indesejáveis na camada face ao decréscimo de resistência, podendo assim resultar no colapso prematuro do pavimento.

Capítulo 8

SUGESTÃO DE ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO PARA OBRAS DE RECICLAGEM PROFUNDA COM INCORPORAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

8.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A reciclagem profunda com incorporação de cimento já é uma alternativa de recuperação de pavimentos consagrada em vários países e vem conquistando cada vez mais espaço no Brasil.

Os materiais reutilizados do pavimento normalmente têm mais variabilidade nas suas propriedades do que os materiais usados na construção original, assim como as condições operacionais e climáticas. A execução de serviços de reciclagem com adição de cimento deve ser acompanhada de controle tecnológico especialmente esmerado, em virtude da heterogeneidade do material cuja procedência é do revestimento original e parte da base. A capacidade estrutural dessa nova camada só será apreciável à proporção que o material reciclado se torne homogêneo.

A fim de assegurar o sucesso da técnica, é recomendável que o contratante adote uma especificação de serviço que estabeleça requisitos básicos, tais como: materiais usados, equipamentos aptos para a execução do serviço, definição das condições meteorológicas aceitáveis, descrição do processo, controles de qualidade, parâmetros de aceitação e/ou rejeição da camada reciclada e critérios de medição e pagamento.

8.2 OBJETIVO

Como a nossa literatura técnica ainda não dispõe de uma especificação de serviço para estabelecer tais critérios, o presente capítulo apresenta uma proposta de especificação para a construção de uma nova camada de pavimento utilizando material reciclado e cimento Portland. A proposição a ser apresentada baseou-se na pesquisa bibliográfica e nos resultados obtidos pelos ensaios de laboratório realizados neste trabalho.

8.3 REFERÊNCIAS

Para aplicação desta proposta de especificação é necessário consultar:

- a) ABNT – NBR 8547/84 – Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos: Delineamento da Linha de Influência da Bacia de Deformação por Intermédio da Viga Benkelman;
- b) ABNT – NBR 7185/86 – Solo: Determinação da Massa Específica Aparente “in situ”, com o Emprego do Frasco de Areia;
- c) ABNT – NBR 12950/93 - Execução de Imprimação Impermeabilizante;
- d) ABNT – NBR 12951/93 - Execução de Imprimação Ligante;
- e) ABNT – NBR 12253/92 - Solo Cimento: Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento;
- f) ABNT NBR 12023/90 – Solo Cimento: Ensaio de Compactação;
- g) ABNT NBR 12025/90 – Solo Cimento: Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos;
- h) ABNT – NBR 6118/80 – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado;
- i) ABNT - NBR 11579/91 - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (número 200).
- j) ABNT NBR 12024/92 – Solo Cimento – Moldagem e Cura de Corpos-de-prova cilíndricos.
- k) DNER-PRO 273/96 - Determinação de deflexões utilizando Deflectômetro de Impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)";
- l) DNER-ME 305/97 – Pavimentação – Base de Solo-cimento

8.4 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos necessários para execução do serviço constam das seguintes unidades:

- **Recicladora**

O equipamento de reciclagem deverá ser uma máquina autopropelida, com capacidade de fresar profundidades de pelo menos 300 mm numa única passada e capaz de triturar e misturar os materiais existentes até produzir uma mistura homogênea. A máquina deverá ser equipada com um controlador de profundidade e deve manter a largura e espessura de corte constante.

O equipamento deverá possuir controle de granulometria, a fim de possibilitar a fragmentação do material para uma graduação aceitável como também dispositivo para regular a aplicação de água em relação à velocidade de avanço da recicladora.

{Nota: As características da recicladora são as mesmas indicadas pelo Departamento de Transportes de Maine/EUA - MAINE DOT [38]}.

- **Caminhão espalhador de cimento**

Nas obras de reciclagem, dever-se-á utilizar sempre equipamentos de espalhamento de cimento na forma de pó ou em nata para fazer cumprir os requisitos de legislação ambiental e de proteção à saúde.

Os equipamentos deverão possuir largura variável para suprir as variações de recobrimento, precisão na aplicação da taxa de cimento e capacidade suficiente (ton) para atender às necessidades operacionais.

- **Rolos compactadores**

Devido à espessura e propriedades da mistura reciclada, os rolos compactadores usados são normalmente grandes e pesados. Podem ser utilizados rolos de pneus e vibratórios lisos ou pé-de-carneiro, desde que a mistura seja compactada na densidade requerida.

- **Caminhão-tanque de água**

Recomenda-se a utilização de caminhões-tanque com a capacidade mínima de 10.000 litros para suprir a recicladora durante a operação. Cada tanque deve ser equipado com engates tipo “cambão” para permitir que sejam empurrados pela recicladora.

- **Motoniveladora**

A motoniveladora usada no processo deverá ter potência suficiente para espalhar material, conformar geometricamente a camada, nivelar e dar acabamento na superfície.

8.5 MATERIAIS

- **Material a reciclar**

O material a reciclar será resultante do processo de desagregação ou trituração do pavimento existente na profundidade estabelecida, não deverá conter grãos com diâmetro superior a 2” (50,8 mm) e estar isento de matéria orgânica e produtos que podem prejudicar a reação química do cimento.

O limite de liquidez será menor ou igual a 35% e o índice de plasticidade menor ou igual a 15%, caso o material não cumpra essas condições, pode-se recorrer ao tratamento prévio com cal.

{Nota: Os valores de Limite de Liquidez e de Plasticidade são os mesmos indicados por MARÍN & ÁLVAREZ [40]}.

- **Cimento Portland**

Deve obedecer às especificações da norma ABNT NBR-6118/80:

Todo carregamento de cimento que chegar à obra deve vir acompanhado de certificado de fabricação com informações sobre a data de fabricação, origem, sigla correspondente, a classe, a denominação normalizada, a massa líquida entregue e outras informações convenientes.

Da época da compra até a utilização, o cimento deverá ser armazenado em local coberto e protegido da umidade, conforme recomendações do fornecedor.

- **Água**

Deve ser isenta de teores nocivos de sais, ácidos, álcalis, de matéria orgânica e outras substâncias prejudiciais.

- **Material importado**

Chama-se material importado ao material usado para corrigir a granulometria da mistura ou para suplementar o material reciclado necessário para corrigir o formato da camada. Esse material normalmente compõe-se de material natural como, por exemplo, areia e cascalho e/ou pedra britada.

Os requisitos específicos para os materiais importados deverão estar descritos em detalhes nas especificações de projeto.

8.6 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Não será permitida a execução de reciclagem profunda com adição de cimento nas seguintes condições:

- Temperatura ambiente na sombra superior a trinta e cinco graus Celsius (35 °C) ou inferior a cinco graus Celsius (5 °C);
- Quando ocorrer possibilidade de chuva.

{Nota: As condições meteorológicas adotadas são as mesmas estabelecidas por MARÍN & ÁLVAREZ [40]}.

8.7 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

8.7.1 Granulometria da mistura reciclada

O material reciclado deverá consistir na mistura do revestimento asfáltico triturado e quantidade pré-definida de material subjacente, tendo como parâmetro as seguintes graduações:

Peneiras		Porcentagem que passa em massa (%)
ABNT	Abertura (mm)	
2"	50,8	100
Nº 4	4,8	55

{Nota: Os parâmetros adotados são os mesmos indicados pela PCA – PORTLAND CEMENT ASSOCIATION [45] para materiais reciclados com cimento}.

8.8 DESCRIÇÃO DO PROCESSO EXECUTIVO

O processo de execução deverá consistir nas seguintes etapas:

- **Trituração do material**

A trituração é um processo mecânico que fisicamente quebra o revestimento asfáltico para uma granulometria utilizável e o mistura com uma quantidade pré-definida de material subjacente.

Caso o material triturado não apresente uma granulometria adequada para uma boa estabilização, deverá ser adicionado material importado para facilitar o entrosamento entre os grãos.

- **Nivelamento do material triturado e espalhamento do cimento**

O material triturado será nivelado pela motoniveladora para possibilitar o espalhamento do cimento na taxa indicada pelo projeto. Na etapa anterior ao espalhamento do cimento, pode-se usar o rolo compactador liso no modo estático para melhor acomodar o material solto.

O espalhamento do cimento sobre a superfície deve ser o mais uniforme possível. Para reduzir as perdas de cimento provocadas pelo vento é conveniente que haja uma boa sincronização entre a aplicação do cimento e a mistura pela recicladora, de forma que o trecho em o que cimento foi espalhado seja o menor possível.

- **Homogeneização da mistura**

A recicladora promoverá a mistura do material reciclado com cimento e água no teor ótimo para se transformar numa massa homogênea e em condições de obter a densidade máxima de compactação. Mais de uma passada poderá ser necessária para atingir a uniformidade desejada da mistura.

- **Compactação, proteção e cura da camada**

Procedimentos:

- O equipamento de compactação deve ter dimensões, forma e peso adequados, de modo que se obtenha a massa específica aparente máxima prevista para a mistura. O andamento das operações deve ser estabelecido, de modo que a faixa em execução seja uniformemente compactada em toda a largura da faixa reciclada;
- Antes da fase final de compactação, deve ser feita a conformação geométrica da camada ao greide e ao abaulamento desejados, com o emprego de equipamento adequado;
- O segmento a ser compactado deverá ter uma extensão tal que as operações de compactação sejam concluídas num prazo inferior a 2 horas, dependendo da especificidade da obra;
- Após a conclusão da compactação, é feito o acerto final da superfície, de modo que satisfaça o projeto, pela eliminação de saliências, com o emprego da motoniveladora. As depressões não poderão ser corrigidas pela adição de material. A superfície da base é comprimida até que se apresente lisa e isenta de partes soltas ou sulcadas;
- A energia de compactação deve ser no mínimo a do ensaio Proctor Modificado correspondente à massa específica aparente seca máxima;
- A superfície da camada reciclada e acabada deve ser levemente molhada com frequência para que permaneça continuamente úmida até que seja imprimada;
- O processo de cura será feito pela aplicação da imprimação, a fim de que a camada seja protegida contra a perda rápida de umidade;
- No caso de proteção à cura com o emprego de material betuminoso, este deve ser usado de acordo com as normas NBR 12950/93 ou NBR 12951/93.

8.9 CONTROLES DE QUALIDADE

8.9.1 Controle de qualidade do material

Todos os materiais a serem aplicados na obra devem ser examinados em laboratório, obedecendo-se à metodologia indicada pela ABNT, e satisfazendo as especificações em vigor, como a seguir:

- **Cimento Portland**

Deve atender à seguinte granulometria, quando ensaiado pelo método ABNT NBR 11579/91:

Peneira de Malha Quadrada		% Passando em massa
ABNT	Abertura (mm)	
Nº 40	0,42	100
Nº 80	0,18	95 – 100
Nº 200	0,075	65 - 100

- **Água**

Deve ser examinada sempre que houver dúvida sobre sua qualidade.

8.9.2 Controle de qualidade durante a execução dos serviços

Os controles de execução da mistura devem ser realizados a cada 200 metros de extensão de faixa de tráfego, como a seguir:

- **Mistura**

- Ensaio de granulometria do material reciclado segundo o método de ensaio DNER-ME 080/94;
- Homogeneidade da mistura;
- Verificação da espessura de corte;
- Verificação da quantidade do cimento incorporado através do ensaio de titulometria;
- Ensaio de compactação para determinação da massa específica aparente seca máxima, com a energia do ensaio Proctor Modificado;
- Determinação do teor de umidade depois da adição da água e homogeneização da mistura;
- Determinação da densidade "in situ" após compactação na pista para verificação do grau de compactação pelo método ABNT NBR 7185/86 (determinação da massa específica aparente "in situ", com emprego do frasco de areia) o que deve ser realizado a cada 200 metros de extensão de faixa de tráfego, ou por jornada de 8 horas de trabalho. O grau de compactação deverá ser, no mínimo, 100% em relação à massa específica aparente seca, máxima, obtida no ensaio ABNT NBR 12025/90.
- Verificação da espessura da camada nos furos onde se efetuou o ensaio do frasco da areia, para determinação da densidade "in situ";
- Moldagem de corpos-de-prova cilíndricos com o material coletado na pista para determinação da resistência à compressão simples, após sete dias de cura, conforme prescrito na norma ABNT NBR 12025/90.

8.9.3 Controle de qualidade na camada concluída

Os controles de qualidade na camada concluída consistirão nas seguintes avaliações:

- **Geometria**

Após a execução da base reciclada, proceder à relocação e ao nivelamento do eixo e dos bordos, permitindo as seguintes tolerâncias:

- ± 10 cm quanto à largura da plataforma;
- $\pm 10\%$ quanto à espessura do projeto.

• Resistência à compressão simples

As dimensões a serem consideradas para avaliar a resistência a compressão da camada deverão ser feitas adotando-se o menor dos três critérios apresentado por:

- Quinhentos metros (500 m) de extensão;
- Três mil e quinhentos metros quadrados (3.500 m²);
- A extensão construída diariamente.

Deverão ser extraídos corpos-de-prova cilíndricos em pontos localizados aleatoriamente em número não inferior ao estabelecido pela fiscalização.

{Nota: O critério adotado é o mesmo indicado por MARIN & ÁLVAREZ [40]}

• Controle deflectométrico

Em caráter complementar, para garantia de qualidade na execução do serviço, deve-se proceder à determinação de deflexões sobre a superfície acabada, segundo o método ABNT NBR 8547/84, com o auxílio de viga Benkelman ou FWD (Falling Weight Deflectometer) DNER-PRO 273/96. Deve ser executada pelo menos uma medida da deflexão máxima a cada 100 metros, (ou espaçamento diferente conforme projeto) alternando-se, aleatoriamente, entre os bordos (direito e esquerdo) e o centro da pista.

A deflexão obtida sobre cada camada deve ser inferior ao valor considerado no dimensionamento do pavimento constante do projeto. Os segmentos que apresentarem valores superiores aos considerados no projeto devem ser pesquisados individualmente, para se tentar definir a causa do aumento nos valores da deformabilidade elástica. Caso o aumento tenha sido

causado por falha executiva ou uso de material inadequado, ou presença de material com excesso de umidade, o serviço deve ser refeito e corrigido o problema, antes da execução da camada seguinte.

8.10 PARÂMETROS DE ACEITAÇÃO OU REJEIÇÃO

• Ensaios de Granulometria da mistura

Quando forem especificadas as faixas de valores mínimos e máximos de granulometria do material reciclado antes da adição do cimento Portland, deve-se verificar o seguinte:

$\bar{X} - ks < \text{valor mínimo admitido}$ ou $\bar{X} + ks > \text{valor máximo admitido} \Rightarrow$ rejeita-se o serviço

$\bar{X} - ks \geq \text{valor mínimo admitido}$ ou $\bar{X} + ks \leq \text{valor máximo admitido} \Rightarrow$ aceita-se o serviço

Sendo:

$$\bar{X} = \sum \left(\frac{X_i}{n} \right)$$

$$s = \sqrt{\sum \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

onde:

X_i = valores individuais

\bar{X} = média da amostra

s = desvio-padrão da amostra

k = coeficiente tabelado em função do número de determinações (n - número de determinações).

• **Ensaio e determinações do Grau de Compactação – GC**

Para os ensaios e determinações de grau de compactação – GC, deve-se verificar a condição seguinte:

Se $\bar{X} - ks < \text{valor mínimo admitido} \Rightarrow$ rejeita-se o serviço

Se $\bar{X} - ks \geq \text{valor mínimo admitido} \Rightarrow$ aceita-se o serviço

Estes controles estatísticos serão realizados para aceitação ou rejeição de segmentos contínuos concluídos e realização da medição do serviço.

Para tal, embora tenham sido fixadas as quantidades mínimas de ensaios a serem realizados para os controles de qualidade, em termos de espaçamentos ou número de ensaios por jornada de trabalho, o número de ensaios ou determinações poderá ser reduzido (caso haja homogeneidade de materiais ou constância de resultados), ou até mesmo aumentado, caso seja necessário.

A responsabilidade pela redução no número de ensaios ou determinações será exclusivamente do executante da obra. Assim, o número de ensaios ou determinações será definido em função do risco de rejeição de um serviço de boa qualidade, a ser assumido pelo executante da obra, conforme a tabela seguinte:

Tabela da Amostragem Variável

n	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	19	21
k	1,55	1,41	1,36	1,31	1,25	1,21	1,16	1,13	1,11	1,10	1,08	1,06	1,04	1,01
α	0,45	0,35	0,30	0,25	0,19	0,15	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01

n = nº de amostras k = coeficiente multiplicador α = risco do Executante

Para cada segmento contínuo a ser analisado, deve-se ter no mínimo 5 determinações.

Tabela 8.1 – Tabela de amostragem variável

Fonte: DNER PRO 277/97 [20]

{Nota: Os controles estatísticos usados como critério para aceitação ou rejeição da camada reciclada com cimento Portland foram baseados no procedimento DNER PRO 277/97 – Metodologia para controle estatístico de obras e serviços [20]}.

- **Espessura da camada**

Deverão ser observadas as seguintes condições:

Furos isolados = $\pm 12\%$ da espessura de projeto;

Média dos furos = $\pm 8\%$ da espessura de projeto.

{Nota: O critério adotado é o mesmo indicado por PITTA [47] para bases de solo cimento}

- **Ensaio de Resistência a Compressão Simples**

O critério a ser usado para aceitação ou rejeição do valor mínimo a ser atingido de resistência à compressão de corpos-de-prova moldados na pista e curados após 7 dias em câmara úmida será o seguinte:

$$\bar{R} - \frac{1,29 \times s}{n} \geq 0,80 \times R_{\text{mín. esp.}}$$

Sendo:

\bar{R} = Resistência média de corpos de prova;

s = Desvio padrão das resistências;

n = Número de valores individuais na amostra ($9 \leq n \leq 30$)

$R_{\text{mín. esp.}}$ = Resistência mínima especificada no projeto

{Nota: O critério adotado é o mesmo indicado por PITTA [47] para bases de solo cimento}

Os serviços rejeitados devem ser corrigidos, complementados ou refeitos e os resultados do controle estatístico da execução serão registrados em relatórios periódicos de acompanhamento.

8.11 CRITÉRIOS DE MEDIÇÃO E PAGAMENTO

O executor receberá pelo preço unitário por metro quadrado (R\$/m²) de área reciclada de acordo com a espessura prevista em projeto.

O pagamento será feito pelo preço unitário contratual, incluindo-se o fornecimento, o transporte, a aplicação dos materiais, toda a mão-de-obra e encargos sociais incidentes, os custos com o uso de equipamentos e ferramentas, as despesas fiscais e eventuais necessárias à execução e ao controle de qualidade da obra, se devidamente aprovadas pela fiscalização.

{Nota: O critério adotado é o mesmo prescrito pelo Departamento de Transportes de Connecticut/EUA – DOT STATE CT [15]}.

Capítulo 9

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS ESTUDOS

9.1 CONCLUSÕES

A seguir, estão listadas as principais conclusões obtidas no trabalho, de modo a permitir uma apreciação global do tema estudado.

9.1.1 Sobre a Reciclagem Profunda

- A reciclagem profunda é na realidade um processo semelhante à estabilização de solos convencional. O grande diferencial da reciclagem é a possibilidade de transformar diferentes materiais existentes no pavimento num material similar a um solo homogêneo. A partir daí a técnica segue os mesmos procedimentos empregados nas operações de estabilização de solos.
- A reciclagem constitui-se numa técnica relativamente simples, porém passível de mau resultado. É de crucial importância investigar o pavimento preliminarmente para tornar possível a proposição de um projeto de mistura adequado. Também é recomendável o acompanhamento da obra através de controles tecnológicos especialmente esmerados, haja vista a heterogeneidade dos materiais e as espessuras das camadas do pavimento antigo.
- A escolha entre as várias modalidades de reciclagem profunda depende de certos fatores como: tipo de defeito, resistência estrutural necessária, tráfego, custo e disponibilidade de agente estabilizante, geometria da estrada e características do material a ser reciclado.

- A coleta de material na pista para ensaios de laboratório deverá ser feita preferencialmente pela recicladora. Na ausência desse equipamento, é recomendável a utilização de uma fresadora de asfalto, tendo em vista que os dois equipamentos produzem granulometrias similares quando trabalham nas mesmas condições de velocidade de deslocamento.
- O projeto de mistura representa um ponto de partida para implementação da reciclagem. No entanto, a técnica deve ser tratada de forma bastante flexível, pois várias modificações no projeto de mistura e no processo operacional poderão ocorrer no desdobramento da obra. O contratante deve estar consciente de que normalmente são feitos ajustes de campo baseados no controle de qualidade e nos resultados dos ensaios.
- A obtenção de um produto final de qualidade deriva da observação das características da mistura produzida pela recicladora. Portanto é fundamental que no primeiro dia de serviço seja executada um trecho experimental, a fim de possibilitar os ajustes necessários para melhorar a qualidade da mistura sem a pressão de demanda de produção.
- Embora a técnica já esteja sendo empregada há alguns anos no país, muitos profissionais ligados ao meio rodoviário desconhecem a viabilidade da reciclagem como uma alternativa de recuperação de rodovias. A falta de conhecimento da técnica, normalmente, conduz o profissional da engenharia a optar por soluções às vezes mais onerosas e que poderiam ser satisfeitas pelo emprego da reciclagem a um custo bem menor e integrado ao meio ambiente.
- Atualmente a reciclagem com adição de cimento Portland é a modalidade de reciclagem mais comum no Brasil. Fatores como disponibilidade de cimento em todas regiões do país e os bons resultados obtidos na maioria das obras, tem contribuído para a difusão da técnica.
- Devido à rigidez dos materiais reciclados com cimento, as tensões que se originam na camada podem gerar trincas, em consequência do tráfego, variações térmicas ou ainda

trincas espontâneas geradas pela retração do cimento. Também é comum a formação de trincas nas juntas longitudinais e transversais devido à falta de solidarização na junção dos segmentos reciclados. Portanto é recomendável adotar precauções como, por exemplo, a aplicação de uma camada de bloqueio para inibir a propagação de trincas para superfície.

- Levando-se em conta o estado de degradação em que se encontra a malha viária, é cada vez mais promissor o futuro da reciclagem profunda em nosso país. Pode-se dizer que a técnica segue um caminho irreversível no campo da recuperação estrutural de pavimentos.

9.1.2 Sobre os ensaios de laboratório

- Na experiência realizada, foi possível observar que o material triturado estabilizado com cimento produz uma camada de característica rígida e com coesão entre as partículas;
- O material fresado presente na mistura pode apresentar problemas que precisam ser contornados:
 - a) A granulometria do fresado é inadequada e precisa ser corrigida;
 - b) Aumentando a quantidade de fresado na mistura, diminui-se a resistência à compressão, como pôde ser visto no experimento realizado.
- A recicladora deve ser ajustada para não produzir placas durante a trituração do pavimento. As placas tendem-se a quebrar no interior da camada, como também dificultam o acabamento quando ficam na superfície. Também se observou que a trituração do pavimento deverá ser suficiente e adequada para a mistura fácil com o cimento.
- Devido à grande variabilidade na proporção de solo e fresado e na diversidade de materiais usados nas camadas do pavimento, fica difícil estabelecer uma faixa granulométrica padrão para todas as obras de reciclagem profunda com cimento. Deve-se fixar o diâmetro máximo do fresado e, a partir daí, ajustar a curva granulométrica através da adição de materiais importados. A nova composição da granulometria deverá facilitar o

entrosamento entre as partículas, proporcionando o maior contato possível entre elas e sem provocar separação interna. As propriedades mecânicas são diretamente influenciadas pelo esqueleto granular da mistura reciclada.

- Os resultados obtidos no ensaio para escolha do teor de cimento devem conduzir para a escolha do teor cuja média de resistência ficou imediatamente acima do valor de projeto. Diferente do que ocorre em laboratório, a mistura preparada em campo não é realizada com tanta exatidão e, portanto, os resultados obtidos são menos satisfatórios.
- Foi observado, durante os procedimentos de campo, que a recicladora não é capaz de regular a produção de finos no material reciclado. Os dispositivos de controle de granulometria são eficientes apenas para restringir o diâmetro máximo do fresado.
- A perda de umidade da mistura reciclada com cimento está associada a vários fatores como: temperatura ambiente, umidade relativa do ar e características do material reciclado. Esses fatores não podem ser controlados pelo engenheiro; portanto, estabelecer o limite de horas na qual a compactação deverá estar concluída após a hidratação do cimento torna-se uma tarefa impraticável. A melhor maneira de administrar o problema seria executar segmentos pequenos de reciclagem para não expor a mistura ao sol por muito tempo. Além disso, é recomendável que a recicladora seja acompanhada de perto por um rolo compactador, a fim de promover uma pré-compactação na camada, pois desta forma a umidade ficaria confinada no interior da mistura e a sua evaporação seria mais lenta.

9.2 SUGESTÕES PARA NOVOS ESTUDOS

Estão listadas abaixo algumas sugestões que poderão contribuir para o desenvolvimento de futuros estudos relativos à técnica de reciclagem profunda.

- Realizar novos ensaios de laboratório utilizando a mesma metodologia empregada no capítulo 7 para avaliar o comportamento mecânico de misturas recicladas com cimento através da determinação da resistência a tração e módulo de resiliência.
- Estudar a influência da granulometria no comportamento de misturas recicladas com cimento em simuladores de tráfego. Esse estudo teria a finalidade de avaliar como a mistura se comporta com a liberação imediata da camada.
- Desenvolvimento de um algoritmo que permita definir o diâmetro máximo dos grãos a partir das variáveis que influenciam a granulometria da mistura no processo de trituração.
- Comparar o comportamento mecânico de amostras de material reciclado utilizando diferentes tipos de agentes estabilizantes como, por exemplo, cal, cimento, espuma de asfalto e outros.
- Estudar a viabilidade de utilizar aditivos empregados em concreto de cimento Portland nas obras de reciclagem com cimento. O objetivo seria avaliar se é possível melhorar certas características da mistura como, por exemplo, trabalhabilidade, reduzir permeabilidade e acelerar o desenvolvimento da resistência nas idades iniciais.
- Determinar o coeficiente de equivalência estrutural para camadas recicladas com diferentes tipos de agentes.
- Desenvolver uma metodologia de ensaio para determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima para misturas recicladas para um dado teor de cimento, pois o método empregado foi uma adaptação da norma de ensaio do solo cimento.
- Determinação da vida de fadiga de misturas recicladas com cimento, considerando-se granulometrias diferentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland Composto** ABNT – NBR 11578/91. São Paulo, 1991.
- [2] ADEBA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas. Soluções para pavimentar sua cidade.** Rio de Janeiro – RJ: 2001.
- [3] ALL STATES ASPHALT INC. **Full Depth Pavement Reclamation (Calcium Chloride) Specifications.** Disponível em: < <http://www.allstateasphalt.com/pdf/sp/sp-3-3.pdf> > [acesso em 26 Mar. 2003].
- [4] ARRA - ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **Basic Asphalt Recycling Manual**, Annapolis, Maryland: 2001.
- [5] ASPHALT ACADEMY. **The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials - Technical Guideline.** África do Sul: 2002.
- [6] BALBO, J. T. **Pavimentos Asfálticos – Patologias e Manutenção** São Paulo, Plêiade, 1997.
- [7] BARRENO, I. P. y SAIZ G. **Estudio en Laboratorio de la Aplicacion de la Espuma de Betún en el Reciclado de Mezclas Bituminosas.** 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Sevilla, España. 1999.
- [8] BATISTA, C. F. N. **Pavimentação – Tomo II.** Editora Globo. Porto Alegre, 1976.
- [9] BETTER ROADS. **What is Full-Depth Reclamation?** Better Roads Magazine. July, 2001. Disponível em: <<http://www.betterroads.com/articles/brjul01b.htm>> [acesso em 29 Dez. 2002].
- [10] BRADBURY, R. L. et al. A Laboratory Study of Full Depth Reclamation (FDR) Mixes. In: 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board. **ANAIS.** Washington, DC: 2002.
- [11] CATERPILLAR. **Manual de Recuperação de Rodovias.** Minneapolis, Minesota: 1996.
- [12] CEPAGRI – CENTRO DE PESQUISAS AGRÍCOLAS DA UNICAMP. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/prev.html>> [acesso em 25 Set. 2003].
- [13] CMI CORPORATION. **A Pratical Guide To Soil Stabilization & Road Reclamation Techniques.** Oklahoma City, 1998.

- [14] CMI CORPORATION. **RS 800 - Reclaimer/Stabilizer**. CMI 7541. Catálogo. Oklahoma City, 1998.
- [15] CONNECTICUT DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Full Depth Reclamation – Local Roads**. Disponível em: <<http://www.dot.state.ct.us/bureau/eh/eheh/desserv/Processing/Sprovisions/0403873A.DOC>> [acesso em 29 Dez. 2002].
- [16] CONSTRUCTORA CAINGE, C.A. **Reciclaje de Profundidad Total de Asfalto en sitio Etapas Constructivas**. Disponível em: <<http://www.cainge.net/Reciclaje.html>> [acesso em 04 Jan. 2003].
- [17] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Pavimentação – Concreto Betuminoso**. DNER ES 313/97. Rio de Janeiro, 1997.
- [18] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Determinação da Massa Específica Aparente, “in situ”, com o Emprego do Frasco de Areia**. - DNER-ME 092/94. Rio de Janeiro, 1994.
- [19] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Programa de Recuperação e Manutenção da Rede Remanescente - CREMA** – Instrução de Serviço DG/DNER N° 02. Rio de Janeiro, 2001.
- [20] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Metodologia para Controle Estatístico de Obras e Serviços**. DNER-PRO 277/97. Rio de Janeiro, 1997.
- [21] DEPARTMENTS OF THE ARMY AND THE AIR FORCE. **Soil Stabilization for Pavements**. Technical Manual n° 5-822-14. Washington, DC, 1994.
- [22] E. J. BRENEMAN. **Reclamation**. Disponível em <<http://www.ejbreneman.com>> [acesso em 22 Jan. 2003].
- [23] FERNANDES JÚNIOR, J. L.; ODA, S.; ZERBINI, L. F. **Defeitos e Atividades de Manutenção e Reabilitação em Pavimentos Asfálticos**. Ed . EESC - USP – 1999.
- [24] FRÖBEL, T., VEITH, G. Cold Recycling with Foamed Bitumem: An Innovative Technology for Structural Road Rehabilitation. **European Roads Review**. Special Issue RGRA 2. p. 43 – 47. 2002.
- [25] GARBER, J. N.; HOEL, L. A. **Traffic And Highway Engineering**. PWS Publishing Company, 2nd Edition, University of Virginia
- [26] HAAS, R.; HUDSON, W.R.; ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. Krieger Publishing Co. Malabar, Flórida, 1994.
- [27] HAMM Gmbh. **Hamm in Action**. Job Report n° 19. Alemanha, 2001.

- [28] HAMM GmbH. **Soil Stabilizer/Asphalt Recycler**. RACO 350 01.97.E1. Catálogo. Alemanha, 2001.
- [29] HOWLEY, J., WOHLERS, C. **Upgrading Unpaved Roads – Road Base Stabilization Using Lime and Fly Ash**. U. S. Department of Transportation. United States Government. 1981.
- [30] HUFFINAN, J. B.; PERFETTI, E. J. **Reciclagem Fria no Local (*In Situ*) para Recuperação de Pavimento Betuminoso**. Disponível em: <<http://www.constructordecaminos.com/reciclagem.html>> [acesso em 22 Jan. 2003].
- [31] IBP - INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. **Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos**. IBP / Comissão de Asfalto - Rio de Janeiro, 2000.
- [32] INGLES, O. G., METCALF J. B. **Soil Stabilization - Principles and Practice**. New York: Halsted Press, 1973.
- [33] ISAAC PINTO, E. **Estudo das Características Físicas e Mecânicas de Misturas Recicladas com Espuma de Asfalto**. São Paulo, 2002. 205 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [34] JOFRÉ, C. **La Técnica del Reciclado de Firmes con Cemento**. 1^o imposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firmes con emento. Salamanca, España, 2001.
- [35] KAZMIEROWSKI, T. **In Place Pavement Rehabilitation: The MTO Perspective**. Disponível em: < http://www.seeleyandarnill.com/data_files/tomk.pdf> [acesso em 03 Jan. 2003].
- [36] LOUDON A. A. & PARTNERS CONSULTING ENGINEERS. **Cold Deep In Place Recycling – Technical Recommendations And Application Specifications**. Kloof, África do Sul: 1995.
- [37] LOUDON A. A. & PARTNERS CONSULTING ENGINEERS. **Deep In Place Recycling with Foamed Bitumen**. Kloof, África do Sul: 1998.
- [38] MAINE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Division 200 – Earthwork: Section 307 – Full Depth Recycled Pavement**. Disponível em <<http://www.state.me.us/mdot/project/design/ss%20division%20300.pdf>> [acesso em 29 Dez. 2002].
- [39] MALLICK, R. B. **Development of a Rational and Practical Mix design System for Full Depth Reclamation (FDR)**. Quarterly Report for Recycled Materials Resource Center Research - Project n° # 17. University of New Hampshire, U.S.A. 1999.

- [40] MARÍN, C. B., ÁLVAREZ, M. G. **Reciclado In Situ con Cemento. Futuras Prescripciones Técnicas de La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento de España.** 1^o Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firmes con Cemento. Salamanca, España, 2001.
- [41] MARQUES, J. R. F., **Dimensionamento de Reforço Mediante Retroanálise de Avaliações Estruturais Não Destrutivas.** São Carlos, 2002 (193 p). Dissertação (Mestrado) – EESC - USP – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [42] MID STATE RECLAMATION & TRUCKING. **Sample Specifications.** Disponível em: <<http://www.midstatecompanies.com/specil.html>> [acesso em 29 Dez. 2002].
- [43] MOURA, P.R.M. **Estudo Comparativo do Comportamento de Solo-cimento feito com um Solo Laterítico e um Solo Saprolítico.** São Paulo. 92p. dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [44] MOREIRA et. al. **Estabilização Betuminosa como Alternativa para Pavimentação de rodovias Vicinais e Municipais.** Publicação do centro nº 3 do IPC – DER /MG. Belo Horizonte, 1996.
- [45] PCA - PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Full Depth Reclamation With Cement.** Disponível em <<http://www.secpa.org/sr995.pdf>> [acesso em 29 Dez. 2002].
- [46] PINTO, SALOMÃO; PREUSSLER, ERNESTO, **Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis.** Ed. Copiarte, Rio de Janeiro, 2.002.
- [47] PITTA, MÁRCIO ROCHA. **Controle e Fiscalização de Obras de Solo-cimento ET-36.** 3^a ed. São Paulo, ABCP, 1986.
- [48] PONTES FILHO, G; **Séries Temporais e Estudos Sobre Comportamento de Pavimentos.** São Carlos - SP, 1999. Tese (Doutorado) – EESC - USP – Escola de Engenharia de São Carlos.
- [49] RECLAMATION INC. **Liquid Calcium Chloride Stabilization.** Disponível em <<http://www.reclamationic.com/lcc.htm>> [acesso em 29 Dez. 2002].
- [50] ROAD TRANSPORT RESEARCH. **Recycling Strategies for Road Works.** OECD, Paris, 1997.
- [51] ROTO MILL SERVICES. **Full Depth Reclamation/Stabilization.** Disponível em <<http://www.roto-millservices.com/e.htm>> [acesso em 29 Dez. 2002].
- [52] SHAIN, M. Y. **Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots.** Chapman & Hall, New York, 1994.

- [53] SILVEIRA, ARAKEN, **Introdução ao Estudo do Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis – Notas de Aula**, UNICAMP, Campinas, 1993.
- [54] SLURRY PAVERS. **Road Reclamation / Soil Stabilization**. Disponível em: <http://www.slurrypavers.com/road_reclamation.htm> [acesso em 29 Dez. 2002].
- [55] SOUZA, M. L. **Pavimentação Rodoviária** – 2ª. ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A, DNER – Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1980.
- [56] THAGESEN, BENT. **Highway and Traffic Engineering in Developing Countries**. First Edition. Publisher by E & FN. London, 1995.
- [57] WILMOT, T. **Selection of Additives for Stabilisation and Recycling of road Pavements**. Proc. 17th ARRB Conference. Gold Coast, 1994.
- [58] WILMOT, T.; RODWAY, B. **Stabilised Pavements – Selecting the Additive: Cementitious, Polymer or Bitumen**. Paper from International Congress on local Government Engineering & Public Works. Sidney, Austrália, 1999.
- [59] WIRTGEN AMERICA INC. **Recycling & Stabilization**. Disponível em <<http://www.wirtgenamerica.com>> [acesso em 29 Dez. 2002].
- [60] WIRTGEN GmbH. **Manual Wirtgen de Reciclagem a Frio** – Windhagen, Alemanha: 1998.
- [61] WIRTGEN GmbH. **Máquina Recicladora WR 2500 – Prestaciones Convicentes para Múltiples Aplicaciones** . Windhagen, Alemanha: 2001.
- [62] WIRTGEN GROUP. **Espuma de Asfalto – O Ligante Inovador para a Construção de Rodovias**. Windhagen, Alemanha, 2001.
- [63] WIRTGEN. **Reciclagem in situ a Frio – Wirtgen WR 2500. V 1 e V 2**. (Relatório de Serviços). Wirtgen GmbH, Hohner Stasse 2 – D 53578. Windhagen, Alemanha, 1998. (ISBN 3-00-003577)
- [64] WIRTGEN GROUP. **Rehabilitation of a Heavily Trafficked Road – Pavement Investigation and Construction Report**. Windhagen, Alemanha, 2001.
- [65] YODER E. J., WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design** - Ed. John Wiley – 1975.

BIBLIOGRAFIA DE CONSULTA

- ABNT – NBR 8547/84 – Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos: Delineamento da Linha de Influência da Bacia de Deformação por Intermédio da Viga Benkelman;
- ABNT – NBR 7185/86 – Solo: Determinação da Massa Específica Aparente “in situ”, com o Emprego do Frasco de Areia;
- ABNT – NBR 12950/93 - Execução de Imprimação Impermeabilizante;
- ABNT – NBR 12951/93 - Execução de Imprimação Ligante;
- ABNT – NBR 12253/92 - Solo Cimento: Dosagem para Emprego como Camada de Pavimento;
- ABNT NBR 12023/90 – Solo Cimento: Ensaio de Compactação;
- ABNT NBR 12024/92 – Solo Cimento – Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos;
- ABNT NBR 12025/90 – Solo Cimento: Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos;
- ABNT – NBR 6118/80 – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado;
- ABNT - NBR 11579/91 - Cimento Portland - Determinação da Finura por Meio da Peneira 75 μm (número 200).
- DNER-ME 080/94 – Solos: Análise Granulométrica por Peneiramento;
- DNER-ME 305/97 – Pavimentação – Base de Solo-cimento
- DNER-PRO 273/96 - Determinação de deflexões utilizando Deflectômetro de Impacto Tipo "Falling Weight Deflectometer" (FWD).