

Taís Sachet

Controle Tecnológico de Obras Rodoviárias Envolvendo a Reciclagem *In Situ* de Bases Granulares de Pavimentos Asfálticos



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

Taís Sachet

Controle Tecnológico de Obras Rodoviárias Envolvendo a Reciclagem *In Situ* de Bases Granulares de Pavimentos Asfálticos

Passo Fundo
2007

Taís Sachet

**Controle Tecnológico de Obras Rodoviárias Envolvendo a Reciclagem *in situ* de Bases
Granulares de Pavimentos Asfálticos**

Orientador: Professor Fernando José Pugliero Gonçalves, Dr.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia para obtenção do grau
de Mestre em Engenharia na Faculdade de
Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo
Fundo na Área de concentração Infra-estrutura e
Meio Ambiente

Passo Fundo

2007

Taís Sachet

Controle Tecnológico de Obras Rodoviárias Envolvendo a Reciclagem *in situ* de Bases Granulares de Pavimentos Asfálticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo na Área de concentração Infra-estrutura e Meio Ambiente

Data de aprovação: Passo Fundo, _____.

Os membros componentes da Banca Examinadora abaixo aprovam a Dissertação.

Fernando José Pugliero Gonçalves, Dr.
Orientador

Régis Martins Rodrigues, D. Sc.
Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

Antônio Thomé, Dr.
Universidade de Passo Fundo

Aguida Gomes de Abreu, Dra.
Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo
2007

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,

ao meu filho Tiago, por ter
compreendido a minha ausência
em muitos momentos de sua vida.

Pelo seu carinho e seu amor
verdadeiro.

AGRADECIMENTOS

Externo meus agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

- Ao Professor Fernando Pugliero Gonçalves, pelos ensinamentos, pelas palavras de incentivo, pela amizade e dedicação durante todo o trabalho. Levarei o exemplo de competência e profissionalismo que vivenciei durante o tempo que trabalhamos juntos.
- Ao DAER por disponibilizar informações e dados importantes para o desenvolvimento do trabalho.
- Aos amigos e colegas que sempre estiveram juntos, apoiando e dando incentivo. Especialmente minha amiga querida Aline, sempre companheira e atenciosa.
- A secretária do mestrado Marli Tagliari e a secretária da Graduação Jussara Zanolla por terem sido amigas, companheiras e sempre eficientes em seu trabalho.
- Aos meus pais Aldemir e Gisselda, ao meu irmão Charles e a minha vó Nereides por terem sido fundamentais na educação do Tiago dando-lhe amor e atenção em todas as horas, principalmente, nas horas que não me fiz presente.

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho, resultados de um estudo que visou a obtenção e introdução de elementos auxiliares, para assegurar o controle tecnológico de obras de restauração rodoviária, que envolvam a reciclagem *in situ* de bases granulares, empregando-se a técnica de verificação de CBR *in situ*, através do uso do DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) e a verificação do enquadramento granulométrico de materiais reciclados através da curva de Talbot. As investigações foram realizadas a partir de aplicações práticas em trechos rodoviários no norte do estado do Rio Grande do Sul. Estes envolveram, de forma experimental, a restauração de pavimentos através da reciclagem da base com a incorporação da camada de revestimento existente. O comportamento da base granular reciclada foi verificado a partir de ensaios de DCP, granulometria (curva de Talbot), CBR e densidade *in situ*. Os intervalos e a frequência dos ensaios foram definidos com base no atendimento às exigências impostas pelas especificações de serviço do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), para execução de base granular. Finalmente, através do processamento dos dados obtidos nos ensaios, foi possível a elaboração da proposta de especificação técnica aplicável a obras de restauração de rodovias envolvendo a reciclagem *in situ* de bases granulares. As conclusões apresentadas, através dos resultados obtidos nos ensaios realizados no campo, demonstram que o uso do DCP mostra-se altamente positivo no que se refere à obtenção de parâmetros de capacidade de suporte das camadas recicladas, sendo uma técnica pouco dispendiosa e de fácil execução. As medidas propostas para o controle tecnológico de bases granulares recicladas, quando aplicadas nas obras de restauração dos pavimentos, mostraram-se eficazes, assegurando a adequação estrutural das bases recicladas.

Palavras-chaves: Especificações técnicas, DCP (*Cone de Penetração Dinâmica*), Base Granular, Restauração de pavimentos flexíveis.

Abstract

This work presents the results of a study intended the obtaining and introduction of the auxiliary elements to assure the road pavements technological control of rehabilitation which involves the recycling in place of granular bases. This verification was made using two techniques, the CBR in place verification, through the use of DCP (Dynamic Cone Penetrometer), and the granulometric framing, through the curve of Talbot, for recycled materials. The investigations were accomplished starting from practical applications in roads in the north of the state of Rio Grande do Sul, which involved, in an experimental way, the pavements rehabilitation through the base course recycling, incorporating the surface layer. The recycled granular base behavior was verified starting from DCP, gradation (curve of Talbot), CBR and density in place tes. The tests intervals and frequency, for granular base execution, was defined based on the observance to imposed demands of the Infrastructure Transports National Department (DNIT) specification service. Finally, through the data processing obtained in the tests, it was possible the elaboration of the technical specification proposal. The presented conclusions, through the obtained results in the field tests, demonstrate that the use of DCP has been shown highly positive, being a low cost and easy execution technique. The measures proposed for the recycled granular bases technological control, when applied on pavements rehabilitation works, have been showed effective, assuring the recycled bases structural adaptation.

Keywords: Pavement recycling, DCP (Dynamic Cone Penetrometer, Granular bases, Flexible pavements rehabilitation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	16
2.2 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	22
2.3 HISTÓRICO DA RECICLAGEM DE PAVIMENTOS.....	25
2.4 TIPOS DE RECICLAGEM DE MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO	28
2.4.1 A QUENTE NA USINA	28
2.4.2 A QUENTE <i>IN SITU</i>	28
2.4.3 A FRIO NA USINA	29
2.4.4 A FRIO <i>IN SITU</i>	30
2.4.5 FULL DEPTH RECLAMATION - FDR.....	36
2.5 ABORDAGEM DO PROJETO DO PAVIMENTO.....	47
2.5.1 CATÁLOGOS DE SOLUÇÕES.....	49
2.5.2 MÉTODO DO NÚMERO ESTRUTURAL (SN)	50
2.5.3 MÉTODOS BASEADOS NA DEFLEXÃO	50
2.5.4 MÉTODOS MECANÍSTICOS DE PROJETO.....	51
2.6 SELEÇÃO DE PAVIMENTOS E ESTRATÉGIAS DE RECICLAGEM	51
2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONSTRUÇÃO E EQUIPAMENTOS	52
2.7.1 PLANEJAMENTO DA RECICLAGEM	54
2.8 PROCESSO DE RECICLAGEM.....	56
2.9 CONTROLE DE QUALIDADE	59
2.10 CONTROLE TECNOLÓGICO	60
2.10.1 CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA (DCP).....	61
2.10.2 ENSAIO CBR.....	73
3 MÉTODOS E MATERIAIS.....	76
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS	76
4 AVALIAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES PARA RECICLAGEM.....	83
4.1 AVALIAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	83
4.1.1 ALTERNATIVAS PARA RESTAURAÇÃO DOS TRECHOS	93
4.2 SOLUÇÕES ADOTADAS	99
5 CONTROLE TECNOLÓGICO DAS OBRAS DE RECICLAGEM	101
5.1 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS BRASILEIRAS.....	101
5.2 PROPOSTA INICIAL DA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	108
5.3 APLICAÇÃO PRÁTICA DA PROPOSTA	115
5.3.1 COLETA DE DADOS	115
5.3.1.1 ENSAIO DCP	115
5.3.1.2 ENSAIO DE GRANULOMETRIA	119
5.3.1.3 DENSIDADE E EQUIVALENTE DE AREIA.....	123
5.3.1.4 TRATAMENTO SUPERFICIAL DUPLO (TSD)	124
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	126
6.1 ADEQUAÇÃO DOS TRECHOS EXECUTADOS AOS CRITÉRIOS PROPOSTOS	126
6.2 IDENTIFICAÇÃO DE NECESSIDADES DE ALTERAÇÕES/ADAPTAÇÕES NA ESPECIFICAÇÃO DE SERVIÇO PROPOSTA	138
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	149
REFERÊNCIAS	153

ANEXO 1 – ENSAIOS DE DCP REALIZADOS NOS TRECHOS TR01, TR02, TR21 E TR22 (DAER, 2005)	157
ANEXO 2 – EXEMPLO DE PLANILHA DE CAMPO – CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA	162
ANEXO 3 – EXEMPLO DE PLANILHA DE DADOS – CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA.....	163
ANEXO 4 – ENSAIOS DE GRANULOMETRIA REALIZADOS NOS TRECHOS TR01, TR02, TR21 E TR22 (DAER, 2005)	164
ANEXO 5 – EXEMPLO DE PLANILHA DE DADOS – ENSAIO DE GRANULOMETRIA.....	171
ANEXO 6 – EXEMPLO DE PLANILHA DE EXECUÇÃO DA RECICLAGEM.....	172

SIMBOLOGIA

AASHO - *American Association of State Highway Officials*

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AR – Agente Reciclador

ARRA – Asphalt Recycling & Reclaiming Association

ASTM - American Society for Testing and Materials

BG – Brita graduada

CAP – Concreto Asfáltico de Petróleo

CBR – California Bearing Ratio

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado à Quente

CG – Grau de compactação

CTB – Base tratada com cimento

CV – Coeficiente de Variação

d - tamanho do agregado

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DCP – *Dynamic Cone Penetrometer* (Cone de Penetração Dinâmica)

DER – Departamento de Estradas de Rodagem

Dmáx – Diâmetro máximo do agregado

Dmín – Diâmetro mínimo do agregado

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

DPI – Dynamic Penetrometer Index

EA – Equivalente de Areia

ES – Especificação de Serviço

ESAL's – Eixo padrão rodoviário

ET – Especificação Técnica

FCM – Federation of Canadian Municipalities

FDR – Full Deph Reclamation

FHWA – Federal Highway Administration

FWD – Failling Weight Deflectometer

HC – Espessura do revestimento + parte da base
HDM - Highway Design and Maintenance Standards Model
HMA – Hot Mix Asphalt
HR – Espessura do revestimento
IDS – Índice de Defeitos de Superfície
IP – Índice de Plasticidade
IRI – International Roughness Index
ISC – Índice de Suporte Califórnia
LL – Limite de Liquidez
LVC – Levantamento Visual Contínuo
 $n_{máx}$ – grau de homogeneidade máximo do material
 $n_{mín}$ – grau de homogeneidade mínimo do material
N – Número de pontos do ensaio
 $P_{máx}$ – Porcentagem máxima passando
 $P_{mín}$ – Porcentagem mínima passando
PMF – Pré-misturado a Frio
PSI - *Present Serviceability Index*
PSR – *Present Serviceability Rating*
QI – Quarter Index
RAP – Pavimento Asfáltico Recuperado
RAR – Revestimento Asfáltico Recuperado
SGM – Sistema de Gerência de Manutenção
SGP – Sistema de Gerência de Pavimentos
SN – *Structural Number* (Número Estrutural)
STH – Subtrecho Homogêneo
TR – Trecho
TRRL – Transport and Road Research Laboratory
USACE – United States Army Corps of Engineers
VDM – Volume Diário Médio
 σ_D – Desvio padrão do diâmetro máximo de agregados
 σ_n - Desvio padrão do expoente n da Curva de Talbot

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia uma das estratégias para assegurar o crescimento sustentável de uma sociedade é a reciclagem, a reutilização e a redução do uso de recursos naturais. A disponibilidade deste tipo de recurso é limitada e cada vez mais escassa, o que faz com que, Engenheiros apontem propostas para a valorização dos materiais existentes, em vez do recurso sistemático à utilização de novos materiais ou a conseqüente deposição em aterros de materiais não reutilizáveis. (FONSECA, 2002).

As considerações iniciais dessa dissertação estão baseadas na preocupação com as questões ambientais, que estão sendo abordadas de forma bastante acentuada nos dias atuais. Neste contexto, a evolução da tecnologia está tomando caminhos que a levam a ter uma afinidade com o meio ambiente, minimizando os impactos ambientais e também o custo de obras civis.

A engenharia rodoviária, também responsável por parte desses impactos, vem inovando gradativamente no desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem minimizar os danos ao meio ambiente.

No Brasil, a inexistência de especificações técnicas desenvolvidas e/ou adotadas pelos órgãos rodoviários, para execução de serviços de restauração de pavimentos contemplando a reciclagem *in situ* da base granular, torna difícil a elaboração de projetos deste tipo como alternativa para a manutenção das rodovias. Neste sentido, o estudo apresenta procedimentos de campo e de laboratório que podem ser aplicados como elementos auxiliares para assegurar a qualidade de obras rodoviárias que envolvam a restauração de estruturas de pavimentos através da reciclagem da base granular existente. Discute-se a técnica de verificação de CBR (*California Bearing Ratio*) *in situ*, através do uso do DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) durante a execução das obras de restauração dos pavimentos. As investigações acerca do comportamento da base granular reciclada foram realizadas a partir de aplicações práticas de

ensaios e procedimentos de análise, num conjunto de rodovias que estão sendo restauradas de modo experimental no estado do Rio Grande do Sul desde o ano de 2005.

O problema de pesquisa sustenta-se no fato de que, no Brasil, ainda são poucos os estudos voltados ao desenvolvimento de especificações técnicas, que possam ser adotadas pelos órgãos rodoviários, para execução de serviços de restauração de pavimentos contemplando a reciclagem *in situ* da base granular. Tal ausência tem impedido na prática a elaboração de projetos e a conseqüente adoção de medidas desse tipo pelos órgãos públicos responsáveis pela manutenção das rodovias em nosso país. Nesse contexto surgem os seguintes questionamentos principais:

- a) Quais os parâmetros essenciais a serem identificados no campo para assegurar o desempenho adequado de obras de restauração de rodovias envolvendo a reciclagem de materiais granulares?
- b) Com qual freqüência ou intervalos esses parâmetros devem ser obtidos?

A justificativa central para o desenvolvimento dessa pesquisa é a preocupação com as questões ambientais, que é um fator importante e que está sendo abordado de forma bastante acentuada nos dias atuais, nas obras de engenharia.

Devido à importância econômica e ao valor patrimonial representado pelas rodovias, a conservação dos pavimentos rodoviários deve ser atualmente a preocupação mais séria e urgente do setor. Essa tarefa, entretanto, vem se tornando cada vez mais difícil devido à redução de orçamentos, problemas institucionais além das deficiências técnicas e operacionais das vias. Incorpora-se a isso, também, a idade dos pavimentos e a intensa solicitação do tráfego devido ao desenvolvimento da indústria automobilística, que resultou no aumento da capacidade de carga dos veículos, compõem o problema principalmente nas rodovias federais, onde grande parte da malha superou sua vida útil de projeto.

Um aspecto importante, a ser destacado nesse contexto, é o fato de que as obras rodoviárias geram grandes quantidades de material fresado quando da restauração dos pavimentos. Nesse sentido, a técnica de reciclagem *in situ* viabiliza a reutilização desse material evitando, dessa forma, uma maior agressão ao meio ambiente.

Apesar disto, o Brasil ainda não desenvolveu técnicas nem especificações que possibilitem utilizar a reciclagem como alternativa de restauração de pavimentos. Este,

embora, seja um assunto bastante enfatizado no mundo atual, ainda não ganhou destaque no meio rodoviário brasileiro.

Devido a estes fatores, ainda não se pode projetar obras rodoviárias que destaquem o método da reciclagem de material granular de base, sendo este, um método que apresenta bons resultados, nas obras realizadas em todo mundo, quanto a economias na construção e materiais.

Neste contexto, *o objetivo geral dessa pesquisa é o estabelecimento de critérios aplicáveis ao controle tecnológico de obras rodoviárias, que envolvam a restauração da estrutura do pavimento existente, através da reciclagem in situ de materiais de bases granulares e revestimentos asfálticos.*

Os objetivos específicos são:

- Investigar procedimentos para controle tecnológico de reciclagem de bases granulares *in situ*;
- Analisar de modo crítico os procedimentos atuais adotados pelos órgãos rodoviários brasileiros para a execução de serviços envolvendo a reciclagem de pavimentos;
- Definir intervalos/frequência para realização do controle tecnológico;
- Avaliar a viabilidade de se utilizar a Curva de Talbot para enquadramento da granulometria do material reciclado de base;
- Verificar a aplicabilidade do DCP (*Cone de Penetração Dinâmica*) para controle da compactação de camadas granulares recicladas *in situ*;
- Elaborar uma proposta inicial de especificação técnica para o controle tecnológico da execução de obras rodoviárias que envolvem reciclagem *in situ* de bases granulares;
- Realizar aplicações práticas da metodologia proposta;
- Coletar dados de obras já realizadas que utilizaram o processo de reciclagem;
- Avaliar os resultados obtidos e promover as adequações necessárias à especificação técnica proposta.

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

- a. No capítulo I são apresentados conceitos básicos acerca da reciclagem de pavimentos, a justificativa do trabalho e seus objetivos geral e específicos;

- b. No capítulo II é apresentada uma Revisão Bibliográfica abordando os seguintes assuntos principais: manutenção de pavimentos, reciclagem de pavimentos (histórico, tipos, processo de reciclagem), controle de qualidade e controle tecnológico de obras rodoviárias.
- c. No capítulo III é descrita a metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho;
- d. No capítulo IV discute-se a avaliação e o dimensionamento das soluções para a reciclagem, envolvendo a avaliação dos pavimentos, as alternativas para restauração e as soluções adotadas;
- e. No capítulo V é apresentada a proposta inicial de especificação para o controle tecnológico das obras de reciclagem, incluindo a aplicação da proposta e a coleta de dados;
- f. No capítulo VI é apresentada a análise dos resultados;
- g. No capítulo VII são evidenciadas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manutenção de pavimentos rodoviários

A deterioração de estruturas de pavimentos rodoviários ocorre gradualmente através da deterioração de seus componentes físicos, ocasionando a queda de sua serventia ao longo do tempo. Este processo é acionado pela ação repetida das cargas de serviço, das intempéries, pelas alterações físicas e químicas naturais dos materiais. O controle da degradação dos pavimentos é efetuado pela especificação dos materiais, pelo dimensionamento estrutural e pela própria concepção da estrutura.

De acordo com Rodrigues (2003), nos pavimentos, as velocidades de deterioração tendem a ser maior que nas demais estruturas, em vista de sua grande exposição aos agentes climáticos e ao seu modo de utilização pelas cargas do tráfego. Portanto, não é suficiente construir-se um pavimento de forma adequada e ignorar as consequências econômicas e funcionais de seu desempenho a médio e longo prazo. Nesse sentido, é fundamental, que a manutenção do pavimento seja feita no momento certo e utilizando técnicas adequadas. O autor destaca um aspecto importante nesse processo, que enfatiza o nível crítico ultrapassado de extensão e severidade originado pela degradação, gera perda econômica na medida em que a reconstrução torna-se a única medida factível.

O tráfego rodoviário é muito variado quanto ao tipo de veículos e cargas transportadas. Uma das dificuldades no dimensionamento de pavimentos é a previsão na evolução do tráfego ao longo do tempo e a avaliação do poder de destruição, de modo comparativo, exercem as várias cargas a diferentes níveis de repetição (MEDINA e MOTTA, 2005).

A manutenção de um pavimento compreende todas as intervenções que afetem direta ou indiretamente, o nível de serventia atual e/ou o desempenho futuro do pavimento. Os objetos de manutenção podem ser a restituição de características funcionais ou a proteção de

componentes e caráter preventivo visando estender a sua vida de serviço. A conservação se traduz por intervenções de custos bem inferiores aos da restauração, além de suas intervenções serem mais recorrentes ou freqüentes. Pode ser de três tipos fundamentais:

Conserva rotineira: quaisquer intervenções que não se refiram diretamente ao pavimento, como: desobstrução dos sistemas de drenagem, limpeza da pista, capina e manutenção dos taludes em cortes e aterros;

Conserva leve: consiste da execução de reparos em áreas localizadas danificadas da pista ou dos acostamentos, abrangendo remendos superficiais e profundos, selagem de juntas e trincas, correção de exsudação de asfalto ou de escorregamento de massa, quando elas se encontram restritas a pequenas áreas;

Conserva pesada: é a aplicação contínua, nas faixas de rolamento, de alguma camada de pequena espessura que tenha uma ou mais das seguintes funções: selagem de trincas, rejuvenescimento do revestimento asfáltico, proteção contra oxidação ou correção da resistência à derrapagem. O exemplo típico no Brasil é a Lama Asfáltica sendo também, aplicáveis com as mesmas finalidades, os Tratamentos Superficiais.

A restauração de um pavimento é o processo de se trazer a sua condição funcional a níveis aceitáveis por meio de intervenções que sejam técnicas e economicamente adequadas e eficazes, o que implica em que a durabilidade e o desempenho da solução implementada devem atender a requisitos mínimos, além de levarem a um retorno máximo do investimento realizado, dentro das restrições técnicas e operacionais existentes. Conforme Rodrigues (2003), os objetivos específicos a serem atingidos quando se projeta a restauração de um pavimento são os seguintes:

- Trazer a condição funcional (conforto ao rolamento e segurança) a níveis compatíveis com a de um pavimento novo;
- Garantir uma vida de serviço mínima para o pavimento restaurado, de modo que uma nova intervenção desse mesmo porte seja requerida apenas após este período;
- Utilizar técnicas disponíveis e aplicáveis, e que atendam a requisitos operacionais e às restrições orçamentárias;
- Controlar mecanismos pelos quais a deterioração das estruturas de pavimento vem se processando ao longo do tempo (trincamento por fadiga das camadas asfálticas

e cimentadas, afundamentos plásticos por acúmulo de deformações permanentes em todas as camadas, drenagem sub-superficial deficiente, consolidação de solos moles sob cargas estáticas e repetidas, densificação sob cargas repetidas de camadas com deficiência de compactação, materiais com problemas construtivos).

Reconstrução: Consiste da remoção total do pavimento existente e é utilizada quando:

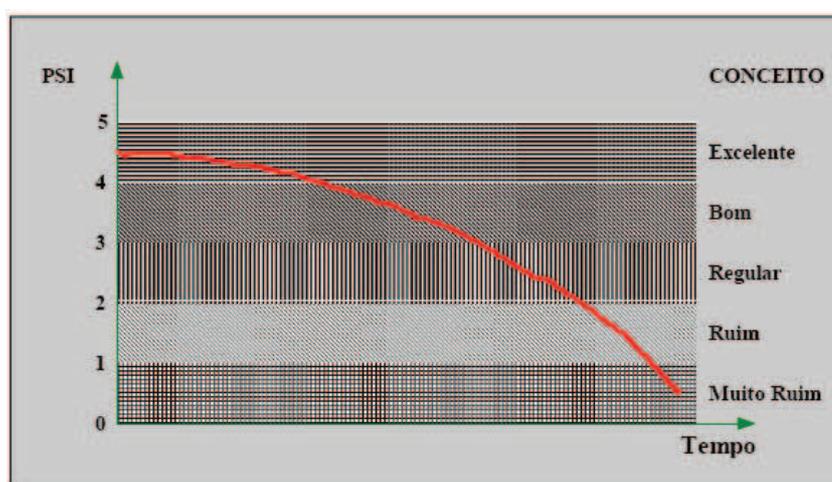
- Os custos de uma restauração superam o da reconstrução do pavimento;
- Não há confiabilidade suficientemente aceitável para o desempenho do pavimento restaurado;
- Pavimento deve ser restaurado e haverá também uma mudança de traçado na rodovia, motivada, por exemplo, pela necessidade de uma elevação de padrão operacional.

A decisão de se restaurar um pavimento, pode ser tomada a partir de uma série de parâmetros indicativos, tais como: custos de conservação elevados, necessidade muito freqüente de intervenções, irregularidade elevada e degradação de superfície acentuada. Um dos benefícios que vêm sendo obtidos com a aplicação de Sistemas de Gerência de Pavimentos (SGP) em todo o mundo é a determinação do momento mais eficaz, em termos econômicos, para se executar a restauração dos pavimentos de uma rede viária (RODRIGUES, 2003).

Para melhor compreensão do nível com que um pavimento atende as exigências mínimas para as quais fora concebido inicialmente é preciso o entendimento de dois conceitos fundamentais estabelecidos nesse processo:

- *Serventia*: É o grau com que o pavimento atende aos requisitos de conforto ao rolamento e segurança, nas velocidades operacionais da via e em um determinado momento de sua vida de serviço. No método da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), adota-se uma escala de 0 a 5, para se quantificar o nível de serventia, com 5 indicando um pavimento “perfeito” e 0 indicando um pavimento “impassável”. Este grau é avaliado subjetivamente, sendo denominado de *Present Serviceability Rating* (PSR). Quando o PSR é calculado por meio de correlações com defeitos de superfície ou com a irregularidade, é denominado *Present Serviceability Index* (PSI);

- *Desempenho*: É a variação da serventia ao longo do tempo, como ilustrado na Figura 1. Em algumas situações, especialmente em SGP's em nível de rede, é conveniente quantificar o desempenho através da área sob a curva de variação do PSI ao longo do tempo. Em outras situações, principalmente em um SGP em nível de projeto, existe a preocupação adicional com relação ao desempenho estrutural, entendido como o tempo em que um pavimento resiste ao trincamento e ao acúmulo de deformações plásticas, quando submetido a certo tráfego.



Fonte: Gonçalves (1999), p.10

Figura 1 – Desempenho de um pavimento

De acordo com Gonçalves (1999), a elaboração de um diagnóstico possibilita elaborar medidas de restauração capazes de não apenas solucionar as deficiências funcionais, mas também de representarem um investimento economicamente eficaz, o que será função do desempenho que o pavimento restaurado irá apresentar. O diagnóstico implica, então, em esclarecer ou compreender os mecanismos através dos quais a sua deterioração vem se processando ao longo do tempo.

Quando se trata da elaboração de um diagnóstico confiável, o autor ressalta que é necessário aplicar-se uma série de modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico às condições de cada Subtrecho Homogêneo, a fim de se comparar suas previsões com desempenho real observado. Informações confiáveis quanto à idade do pavimento e ao histórico do tráfego atuante são cruciais para que essa comparação tenha significado. O resultado dessa análise será:

1. O esclarecimento do(s) mecanismo(s) de degradação predominante(s);
2. A seleção do(s) modelo(s) de previsão de desempenho mais apropriados à realidade da rodovia;
3. A calibração do(s) modelo(s), para se dimensionar o pavimento restaurado.

Os seguintes tipos de modelos devem ser considerados:

1. Modelos para se prever o trincamento por fadiga das camadas asfálticas e/ou cimentadas;
2. Modelos para se prever os afundamentos em trilha de roda decorrente das deformações plásticas sob cargas repetidas nas camadas do pavimento.

Os defeitos que apresentam os pavimentos durante a sua vida de serviço incluem trincas em revestimento que podem ser descritas, às vezes, de acordo com a sua geometria, como: longitudinal, transversal, poligonal (couro-de-crocodilo ou em mapa), e em bloco. Às vezes, as trincas já são descritas em função do mecanismo que as causou, tal como nos casos das trincas de escorregamento, de retração e de reflexão.

Os afundamentos em trilha de roda são defeitos que se apresentam especialmente sob tráfego mais canalizado e que decorrem da consolidação volumétrica e de deformações plásticas sob tensões de cisalhamento em todas as camadas do pavimento. Ainda são defeitos apresentáveis em pavimentos asfálticos, o envelhecimento e o desgaste, que ocorrem quando o asfalto passa por um processo de oxidação já durante a mistura na usina. Ao longo da vida de serviço, este processo continua sendo mais intenso na superfície que no interior da camada, devido a maior presença de ar e à incidência da luz solar.

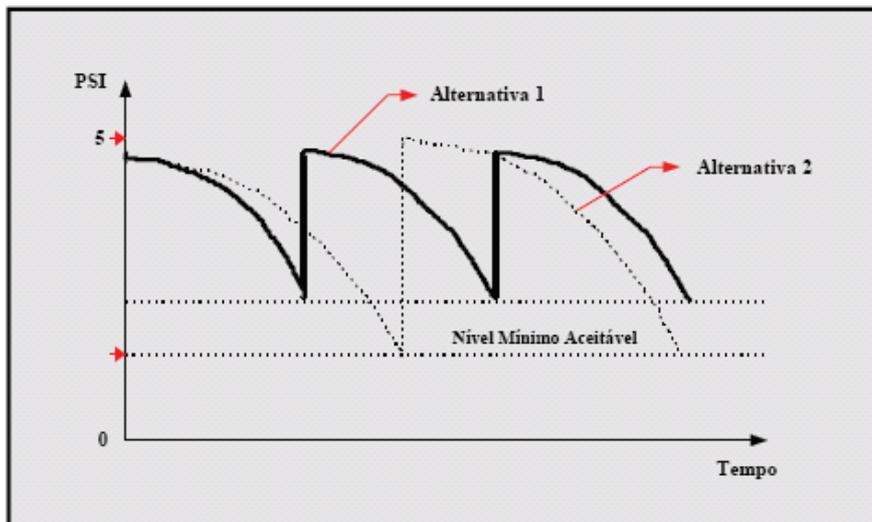
A desagregação superficial pode se manifestar na forma de arrancamento de agregados da superfície (em tratamentos superficiais ou em Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) muito oxidado) ou na forma de painéis (buracos). Este tipo de defeito deve ser reparado imediatamente por levar a situações de risco para o tráfego.

A restauração desses tipos de defeitos se apresenta em diversas alternativas. No Brasil, as mais utilizadas são as apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Tipos de Medidas de Restauração mais Usuais no Brasil (Gonçalves, 1999).

CÓDIGO	DESCRIÇÃO
RS(H_R)	Recapeamento simples em CBUQ, na espessura H _R (espessura do revestimento)
FR(hc)+RC(H_R)	Fresagem total ou parcial do revestimento e aplicação de camada em CBUQ que aumente a capacidade estrutural do pavimento
CI+RC(H_R)	Colocação de camada intermediária especial contra reflexão de trincas, seguida de recapeamento (“Sistema Anti-Reflexão de Trincas”)
FR(hc)+CI+RC(H_R)	Fresagem parcial do revestimento, seguida de aplicação de camada intermediária contra reflexão de trincas e coberta com novo revestimento em CBUQ. Considera-se em dois níveis: 1 e 2, com o nível 2 envolvendo maiores espessuras.
RECL	Reciclagem do revestimento e da base granular, formando-se uma base tratada com emulsão ou cimento e construindo-se um novo revestimento.
TSD	Aplicação de Tratamento Superficial Duplo sobre o tratamento existente
REC+TSD	Remoção e reconstrução (com ou sem reciclagem) do revestimento em tratamento e da camada de base, seguida de aplicação de camada de TSD
REC+CBUQ	Remoção e reconstrução (com ou sem reciclagem) do revestimento existente e da camada de base, seguida de aplicação de camada de CBUQ
RECRV+RC(H_R)	Remoção e reconstrução total do revestimento asfáltico existente, nas condições do projeto original, seguida de complementação da espessura da capa em CBUQ (reforço estrutural)
RECRV	Remoção e reconstrução total do revestimento asfáltico

Um aspecto fundamental a ser analisado na fase que antecede a tomada de decisão relativa à adoção de medidas de manutenção que envolva uma disponibilidade significativa de capital é o estabelecimento do momento ideal para se promover intervenções (Figura 2). Para tanto, conforme Gonçalves (1999), é preciso considerar as restrições orçamentárias existentes e identificar as conseqüências decorrentes da implementação de diferentes alternativas de manutenção (custos, desempenho).



Fonte: Gonçalves (1999), p.46

Figura 2 – Efeitos da escolha do momento de se restaurar um pavimento

2.2 Reciclagem de Pavimentos

A reciclagem de pavimentos alifáticos, a exemplo da reciclagem de qualquer outro material, tem se mostrado uma exigência do mundo contemporâneo, sobretudo em termos de uma consciência ambiental mais desenvolvida, além de trazer repercussões econômicas e sociais.

A reciclagem de pavimentos compreende a reutilização total ou parcial dos materiais existentes no revestimento, na base e/ou na sub-base, em que os materiais são misturados novamente no estado em que se encontram após a desagregação ou tratados por energia térmica e/ou aditivados por ligantes novos ou rejuvenescedores, com ou sem recomposição granulométrica, (MOMM E DOMINGUES, 1995).

A reciclagem de pavimentos *in situ*, é uma técnica revolucionária que vem apresentando bom resultado em todo o mundo. Esta técnica utiliza a camada do pavimento antigo para a realização da recuperação da via e tem se mostrado uma solução viável, técnica e ambientalmente, para os revestimentos asfálticos, pois há um aproveitamento total do material *in situ*, eliminando a necessidade de se explorar pedreiras ou executar aterros de bota fora, resolvendo, assim, um grande problema, que é a disposição final dos materiais em locais inadequados, principalmente ao longo do corpo estradal, (DNER, 1996).

Conforme Fonseca (2002), a reciclagem permitindo a reutilização de pavimentos existentes se apresenta como um processo moderno, que permite aumentar de forma notável a capacidade estrutural e a homogeneidade dos mesmos, com uma utilização mínima de novos materiais. Este procedimento é mais indicado para a reabilitação de pavimentos flexíveis em estado de degradação total com bases granulares e pavimentos betuminosos num estado último de utilização.

É importante salientar que a tecnologia a ser usada deve ser capaz de produzir um material reciclado que assegure que as propriedades apresentadas por ele garantam que problemas ocorridos anteriormente não mais se apresentem nesta rodovia. Por isso, é viável que o Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) seja processado corretamente para assegurar que as propriedades de engenharia sejam equivalentes às dos materiais virgens. Portanto, um gerenciamento minucioso do RAP resultará em um material relativamente homogêneo, (*Federation of Canadian Municipalities – FCM, 2005*).

Segundo Bonola (2005), a reciclagem surgiu devido à necessidade de proteção ao meio ambiente. Decorrentes disto, pontos positivos notáveis se apresentam, tais como: (a) a redução do consumo de recursos naturais; (b) economias no custo da produção devido à redução no consumo de energia associado à preparação de matérias-primas a ser incorporado nos produtos finais; (c) economia no custo da produção devido à redução na exploração de pedreiras, porque reutiliza material da estrutura existente.

O processo de reciclagem de pavimentos é realizado da seguinte maneira:

- Removem-se as camadas compactadas;
- Adicionam-se agregados para corrigir a granulometria do material que é o resultado da operação anterior;
- Regenera-se a ligação entre os componentes do esqueleto na mistura final com a adição de polímero ou betume e aditivo, isto é, o agente rejuvenescedor.

Na reciclagem *in situ* a própria rodovia é usada como fonte de materiais a serem incorporados no produto final, de tal modo, o consumo de recursos naturais é drasticamente reduzido como também o custo de transporte de materiais virgens e acabados.

A reciclagem pode ser efetuada a frio ou a quente através de adições ao material fresado, de emulsões asfálticas rejuvenescedoras ou Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP's) com ou sem agentes recicladores (AR's).

Trabalhos recentes mostram que as misturas com materiais reciclados têm apresentado um desempenho similar e em alguns casos superiores as misturas asfálticas convencionais, quando se comparam as suas propriedades mecânicas e ainda permitem uma significativa diminuição no tempo de execução das obras de restauração de vias (LIMA, 2003).

Jensen (2004), em seu artigo, relata que o Instituto Rodoviário Dinamarquês publicou quatro novos preceitos e tendências de materiais que podem ser reciclados para construção de rodovias, de acordo com os novos padrões europeus. Estes materiais novos (concreto britado, tijolo britado e material asfáltico fresado) podem ser aplicados ilimitadamente para as camadas de base. O autor diz que o asfalto fresado corresponde a um bom material, que pode ser comparado com um material de base usado em todas as rodovias de tráfego pesado até rodovias de menor porte.

No guia da FHWA (1997), são destacadas as seguintes vantagens da reciclagem:

- Redução nos custos de construção;
- Conservação de agregados e ligantes;
- Preservação da geometria do pavimento existente;
- Preservação do meio ambiente;
- Conservação de energia;
- Rápida liberação da pista.

Também, podem ser mencionadas as vantagens econômicas da reciclagem. Estes materiais tendem a ser mais barato quando se compara o custo que a disposição destes resíduos acarretam. O reuso e a reciclagem, também, reduzem o volume de material reutilizável que é lançado em aterros municipais, liberando espaço para os resíduos domésticos e aumentando a vida útil dos aterros, além de diminuir a necessidade por aterros novos. No Canadá, gestores municipais, engenheiros, administradores de rodovias e indústrias da construção têm tido muitos progressos no que tange a aplicação das tecnologias de reuso e reciclagem de pavimentos. Balizados por estes sucessos, alguns aterros municipais deixaram de aceitar qualquer material potencialmente reciclável para construção e manutenção de rodovias, (FCM, 2005).

O reuso de camadas do pavimento existente possibilita a produção de um novo material, o qual oferece consideráveis economias em termos de agregados e energia. Este processo,

ainda destaca a vantagem de manutenção da geometria (largura e espessura) do pavimento original durante o processo construtivo, (CASTRO, 2003).

A associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (The Asphalt Recycling and Reclaiming – ARRA), define cinco categorias principais (ver Figura 3) para os diferentes métodos de reciclagem:

- Reciclagem a frio (Cold recycling);
- Reciclagem a quente (Hot recycling);
- Reciclagem a quente in situ (Hot in-place recycling);
- Reciclagem a frio in-situ (Cold in-place recycling)
- Reciclagem profunda (Full depth reclamation).

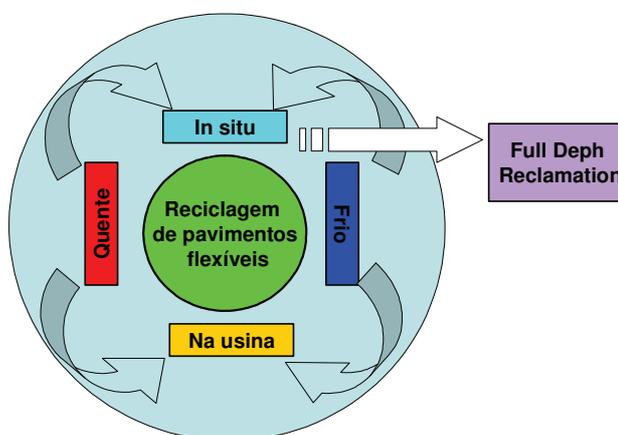


Figura 3 – Tipos de reciclagem de pavimentos flexíveis

2.3 Histórico da reciclagem de pavimentos

A idéia de se reciclar pavimentos surgiu em 1915 e foi pouco difundida até meados dos anos 70. No Brasil, iniciou na década de 80, contemplando somente o concreto betuminoso usinado à quente reciclado, (DNER, 1996). Hoje em dia, as pesquisas em torno do assunto, tem vários trabalhos publicados (Previato et al., 1987; Ferreira et al., 1994; Bonfim e Domingues, 1995; Ramos et al., 1995), citados por Araújo (2003).

Em 1984, o Departamento de Estradas e Transportes do Estado do Novo México (NMSHTD), iniciou o uso de um processo de restauração de pavimentos flexíveis usando a reciclagem a frio *in situ*. Este projeto apresentou avaliações de custo e desempenho de pavimentos que foram executados utilizando essa técnica, (McKEEN, HANSON & STOKES,

1998). O estudo deixa claro que a reciclagem a frio *in situ* não é bem sucedida em lugares que contenham materiais com quantidades excessivas de água. Quando uma camada estiver próxima da saturação, o material reciclado pode não curar corretamente e não desenvolver resistências satisfatórias. Os autores, ainda, concluíram que as trilhas de roda nos pavimentos diminuíram significativamente quando este tipo de técnica foi usado, sendo evidenciadas em apenas 3 de 45 projetos e que o desempenho dos pavimentos após 10 anos de vida apresentaram um desempenho excelente.

A reciclagem com espuma de asfalto vem sendo utilizada em quase todas as regiões do País, mas em se tratando da reciclagem de base *in situ* com a incorporação do material fresado, ainda são poucos os autores que estudaram e pesquisaram sobre o assunto (OLIVEIRA et al., 1997; MIRANDA Jr e SILVA, 2000), contudo, ainda são muitas as dúvidas a serem esclarecidas.

A técnica mais utilizada é a adição subsequente de camadas de recapeamento. Com isso, surgem problemas com relação à altura útil em túneis, sob viadutos, altura de meio-fios e defensas, bem como problemas de drenagem e formação de degrau nos acostamentos. O uso da técnica de fresagem minimiza esses problemas, devido a seu processo, em que parte da espessura do pavimento é retirada da pista e uma nova camada é colocada em substituição à antiga, evitando com isso a sobreposição de camadas.

As obras rodoviárias geram grandes quantidades de material fresado quando da restauração dos pavimentos. Quando o material fresado é reutilizado para revestimento, o ligante asfáltico é recuperado através da incorporação de agentes rejuvenescedores (AR's) e a granulometria dos agregados pode ser corrigida pela adição de novos materiais. Já no reaproveitamento do fresado, para base e/ou sub-base rodoviária, a intenção é de se utilizar o material nas características em que se encontra no momento, incorporando-se ao cascalho ou outro material de base, com ou sem a adição de cimento, cal, betume, etc. (ARAÚJO et al, 2004).

A técnica de reciclagem *in situ* viabiliza a reutilização desse material evitando, assim, uma maior agressão ao meio ambiente e tende, muitas vezes, a colocar as misturas dentro de uma faixa especificada. Em campo pode-se tentar aumentar o diâmetro dos grumos do fresado aplicando-se uma velocidade maior de corte, conforme Bonfin (2001). Esta se apresenta como uma forma de se tentar corrigir a granulometria das misturas.

Araújo e Farias (2004), analisaram amostras de material fresado, retiradas de alguns trechos de vias do Distrito Federal (DF). No estudo realizado verificou-se que a incorporação do fresado ao cascalho de base fez com que a mistura se enquadrasse na faixa granulométrica especificada devido ao material fresado apresentar uma parcela muito pequena de finos. O estudo mostrou também que o fresado pode ser caracterizado como um material não plástico, neste caso, e que este material tende a aumentar a massa específica das misturas e diminuir a umidade ótima de compactação. Além disso, os autores observaram que com a incorporação do material fresado, ocorreu uma queda considerável no valor de ISC (Índice de Suporte Califórnia) devido ao fato de que a presença do betume tende a diminuir o ângulo de atrito entre as partículas do material fresado e conseqüentemente, o valor de ISC. Salientam os autores que isto ocorre nas misturas, principalmente, para maiores teores de fresado. E que todos estes fatos indicam a existência de uma percentagem ótima de fresado a ser incorporada, pois nas misturas com porcentagens entre 20% e 25%, apresentaram um ganho de resistência e porcentagens, acima destas citadas, houve uma pequena redução da resistência.

Estudos realizados em alguns estados americanos, durante os anos de 1980 a 1986 apontam que a reciclagem pode reduzir o custo das obras em até 50%. Uma revisão bibliográfica realizada pela *Federal Highway Administration - FHWA* (1997), mostra que economias acima de 40, 50, 55 e 67% podem ser alcançadas usando reciclagem de misturas a quente, a quente *in situ*, a frio *in situ*, e reciclagem profunda (espessura total), respectivamente.

Casos como o do aeroporto de Pouso Alegre/MG, que estudou a viabilidade econômica de se utilizar reciclagem a frio *in situ* para a sua restauração, comprova que essas técnicas trazem vantagens ambientais devido ao reuso de materiais existentes, prevenindo assim, as detonações, diminuindo a distância de transporte e neste caso específico apresentando uma redução de 27% no valor da obra em relação ao projeto inicial que utilizaria as técnicas convencionais de restauração de pavimentos (FILHO, 2005).

2.4 Tipos de reciclagem de materiais de pavimentação

2.4.1 A quente na usina

A reciclagem a quente é um método onde se combina o Pavimento Asfáltico Recuperado – RAP (em inglês *Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP), com agregado novo e cimento asfáltico ou agente reciclador para produzir mistura asfáltica à quente.

Neste método a remoção do pavimento asfáltico se dá com o auxílio de uma fresadora ou outro equipamento capaz de arrancar a camada de revestimento, total ou parcialmente, a uma profundidade previamente estabelecida que, logo após, é transportada para o local de estocagem para que seja reciclada em usina. Dois tipos de usina de asfalto podem ser utilizados para a produzir a mistura reciclada do asfalto removido. Sendo elas do tipo gravimétricas ou Drum Mixer, (FHWA, 1997).

A recomendação da FHWA (1997), salienta que o tipo e o grau de deterioração do revestimento existente no pavimento a ser trabalhado definirá se a técnica de remoção da camada de revestimento será parcial ou total. O desmonte e remoção da totalidade de uma camada do pavimento poderão ser realizados empregando os equipamentos tradicionais de obras de pavimentação tais como, tratores, escavadeiras, carregadeiras e estações de britagem móveis ou fixas, ou ainda máquinas fresadoras.

A reciclagem de pavimentos constituídos com revestimentos asfálticos a quente resulta numa considerável conservação de energia por reduzir custos de transporte e produção de novos materiais. Em relação ao consumo de energia de um método de reciclagem incluem-se as seguintes operações: fabricação de material, transporte de material, produção da mistura, transporte da mistura, esparrame e compactação da mistura.

2.4.2 A quente *in situ*

A reciclagem a quente *in situ* de misturas asfálticas é um processo simples que consiste na remoção mecânica do revestimento asfáltico através de aquecimento e conseqüente amolecimento (fresagem a quente). Este revestimento é, então, misturado com o ligante asfáltico, agregados virgens e agentes rejuvenescedores. E em seguida, a mistura é recolocada sobre o pavimento remanescente.

A reciclagem *in situ* apresenta um baixo custo nas estratégias de manutenção. Estes processos demonstram que o material asfáltico está disponível em grande quantidade e que pode ser efetivamente e economicamente recuperado.

O processo de reciclagem pode ser realizado com a operação de passagem única do equipamento reciclador, que combina o pavimento restaurado com materiais virgens, ou com dupla passagem onde o material reciclado é recompactado, seguido da aplicação de uma nova mistura asfáltica, (ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION – ARRA, 2005).

Os processos básicos para a realização da reciclagem a quente *in situ* são: (a) Escarificação com aquecimento, no qual o pavimento é aquecido, escarificado, rejuvenescido, nivelado, reperfilado e compactado; (b) Repavimentação, onde se utiliza o mesmo procedimento da escarificação, com adição de uma nova camada de mistura asfáltica de pouca espessura sobre a superfície reciclada; (c) Remixing, processo similar aos anteriores, porém com um aquecimento mais efetivo permitindo a colocação de revestimento mais espesso e uma melhoria no revestimento velho com correções na granulometria do agregado ou ajustes nas propriedades do ligante.

Kandhal & Mallick (1997) sugerem a coleta de amostras na pista de onde será obtido o Revestimento Asfáltico Recuperado – RAR para determinação prévia de suas características. As recomendações bibliográficas propõem que o RAR produzido numa obra não seja misturado com o RAR proveniente de outra.

No Brasil, as especificações ES 318/97 e ES 319/97 (DNER, 1997), ao tratar da reciclagem a quente em usina e *in situ*, estabelece que o concreto betuminoso reciclado pode ser empregado como revestimento, base, regularização e reforço na restauração de pavimentos.

2.4.3 A frio na usina

A técnica de reciclagem a frio de revestimentos asfálticos em usina é uma alternativa de recuperação de pavimentos aplicada há mais de 25 anos, com incremento frente a crescente preocupação com o destino dado aos resíduos sólidos produzidos pelas aglomerações urbanas, assim como o possível esgotamento das reservas naturais não renováveis, (DAU, 2001).

Este é um método que permite a reconstrução de pavimentos flexíveis que apresentam falhas ou estejam em estado de degradação. Estas falhas podem ser: trincas transversais,

buracos, trilhas de roda, irregularidades na superfície ou a combinação de todos esses defeitos. O processo também possibilita que a camada seja removida a uma profundidade desejada, utilizando para isso a técnica da fresagem, permitindo que a restauração do pavimento seja feita através de uma nova camada de revestimento, e também que se faça correções no greide da pista, inclinações, ondulações e deformações na camada de revestimento.

A reciclagem a frio utiliza máquinas autopropelidas para fresar as camadas do pavimento, dotadas de um cortador giratório que corta o pavimento a uma espessura pré-determinada, como salienta o ASPHALT INSTITUTE (2005).

De acordo com o manual da Wirtgen (2004), o método de reciclagem a frio compreende dois processos: na usina ou *in situ*. Na usina, o material recuperado da rodovia existente é transportado até um depósito central, onde o mesmo é alimentado através de uma unidade de processamento ou *in situ* utilizando uma máquina de reciclagem.

O processamento na planta geralmente é a opção mais cara em termos de custo por metro cúbico (m³) do material processado, principalmente devido aos custos de transporte que não existem na reciclagem *in situ*. Porém, ambos os métodos de reciclagem, tem seu espaço no mercado da construção e a decisão sobre qual deve ser utilizado é dada pelo:

1. Tipo de construção. O processamento na planta geralmente é considerado quando o material reciclado é utilizado na construção de uma nova camada de pavimento, como para aumentar a capacidade estrutural do pavimento existente.
2. Material local de um pavimento que deve ser reciclado. Quando se recicla a camada superior do pavimento, deve-se fazer uma seleção ou pré-tratamento do material, devido à variedade e a condição do material reciclado.

A reciclagem na usina é indicada quando o processo inclui uma mistura de materiais reciclados e virgens, os quais necessitam de algum tipo de tratamento.

2.4.4 A frio *in situ*

O primeiro projeto de reciclagem foi desenvolvido na Malásia em 1985. Em dezembro de 1988, o segundo trabalho com reciclagem a frio *in situ* foi dirigido pela Federal Trunk Road entre Pagar Sasak e Merapoh, no estado de Pahang, envolvendo 55 Km de extensão. O

projeto levou quase dois anos para ser terminado, mas passados 12 anos de sua conclusão o pavimento ainda apresentava um excelente desempenho (SUFIAN et. al, 2005).

A reciclagem a frio *in situ* permite a recuperação do revestimento existente utilizando, normalmente, emulsão asfáltica à temperatura ambiente, para produzir uma nova camada asfáltica que integra características semelhantes a uma nova mistura de pré-misturado a frio (PMF). Para isso é realizada, primeiramente, a fresagem do revestimento asfáltico com profundidade previamente determinada. Em seguida, é adicionada a emulsão asfáltica, espalhando-a e compactando-a com equipamentos adequados (trens de reciclagem).

Wirtgen (2004), destaca que esta técnica elimina a necessidade de aquecimento da mistura e diminui significativamente o custo com o transporte de material, uma vez que somente o agente reciclador será transportado. Geralmente, emulsão asfáltica é adicionada como um agente reciclador. A emulsão é proporcional ao peso de RAR. Cinzas, cimento ou cal virgem também podem ser adicionados. Estes aditivos são eficazes para revestimentos asfálticos e misturas de baixa estabilidade.

O processo inclui pulverizar o pavimento existente, classificar o RAR conforme a sua granulometria, aplicar o agente rejuvenescedor, esparramar a mistura e compactar. O uso dos trens de reciclagem inclui um pulverizador, peneira, triturador e unidades de mistura. A profundidade do tratamento varia, tipicamente, de 75 a 100 mm, (FHWA, 1997).

Nunn (2005), considera que a publicação de Milton e Earland deu origem a um relatório consistente de orientações e especificações para a reciclagem *in situ*, usando também espuma de asfalto ou cimento. O autor destaca a importância de se usar um “Guia de Projeto Inteligente”, o qual apresenta os vários estágios da reciclagem: avaliação do local, avaliação da adequação da reciclagem a frio, avaliação da capacidade de suporte do pavimento para reciclagem profunda, avaliação da adequação para materiais do pavimento existente, avaliação de riscos, riscos com o projeto do pavimento, riscos no projeto da mistura e riscos de construção.

As vantagens da reciclagem a frio *in situ* se apresentam na significativa melhora estrutural da maioria dos defeitos apresentados pelos pavimentos, melhorias no conforto ao rolamento, minimização dos problemas com transporte e possibilita aumentar a largura do pavimento.

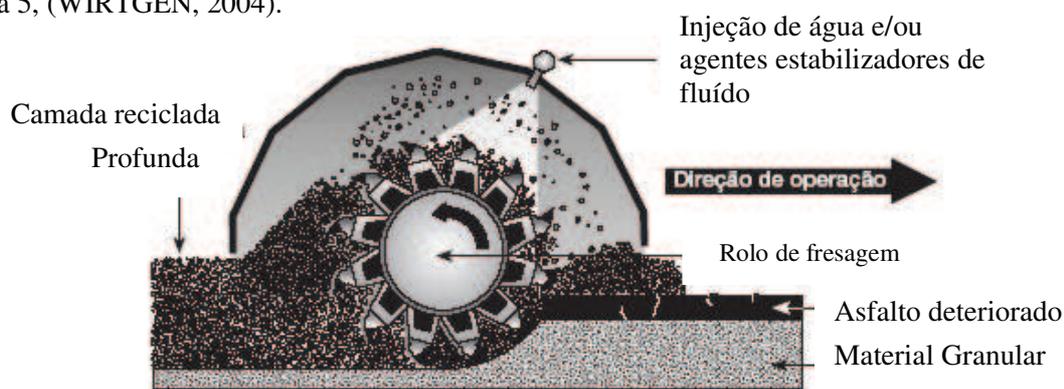
A reciclagem é realizada através de máquinas recicladoras (Figura 4), grandes e potentes, que permitem reciclar espessas camadas de pavimento em uma única passagem. Estas máquinas podem ser montadas tanto na pista quanto sobre pneumáticos de alta flutuação.



Fonte: FHWA, cap 01 1997

Figura 4 – Reciclagem a frio in situ

A peça principal de uma máquina de reciclagem é o rotor fresador e misturador, equipado com uma grande quantidade de ferramentas de corte. O tambor normalmente gira para cima, pulverizando o material no pavimento da rodovia existente, conforme ilustrado na Figura 5, (WIRTGEN, 2004).



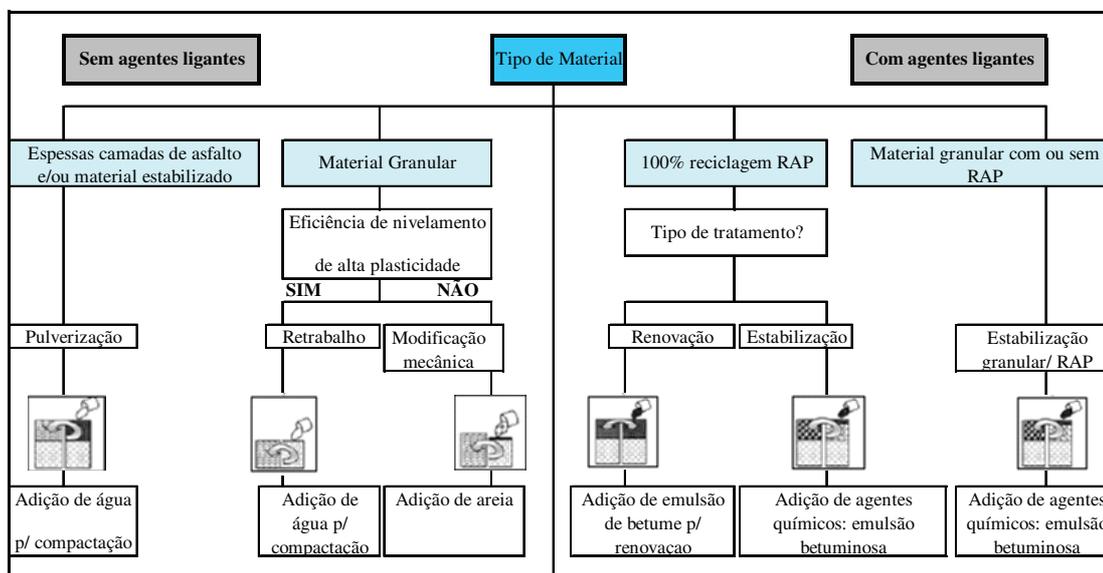
Fonte: Wirtgen, 2004

Figura 5 – Processo de reciclagem

Conforme a máquina se movimentava para frente com o rolo girando, a água de um tanque acoplado a recicladora é distribuída através de uma mangueira flexível e pulverizada na câmara misturadora da recicladora. O índice de distribuição é medido com precisão por um sistema de bombeamento controlado por microprocessador e o rolo giratório mistura a água com o material reciclado para alcançar o teor de umidade necessário para conseguir altos níveis de compactação.

A reciclagem a frio é um processo multifacetado que pode satisfazer as várias necessidades de manutenção e recuperação da infra-estrutura de rodovias. Para a Wirtgen (2004), duas categorias de reciclagem a frio podem ser identificadas quanto ao tratamento ou não com um agente ligante. Além disso, como um meio secundário, podem ser classificadas

pele tipo de tratamento que o material reciclado recebe. Este sistema de classificação primária e secundária é ilustrado na Figura 6.



Fonte: Wirtgen (2004), p.32

Figura 6 – Tipos de reciclagem

O que condiciona a escolha do tipo de reciclagem a ser usada são os tipos de defeitos, a extensão e a severidade dos mesmos.

A reciclagem de material 100 % RAP com asfalto misturado a frio, exige a introdução de betume adicional na forma de uma emulsão. Este é essencialmente um processo de renovação. Contudo, adicionar ligante a uma mistura de asfalto existente sem comprometer as propriedades volumétricas do material reciclado exige uma abordagem cautelosa do projeto. A compressão da camada reciclada será diferente daquela do asfalto original e, além disso, os finos normalmente estão ligados dentro do material reciclado. Isto significa que é necessário acrescentar finos adicionais durante a reciclagem.

Normalmente, é necessário um revestimento eficiente na parte superior da camada reciclada para se obter propriedades funcionais, tais como resistência à derrapagem e conforto ao rolamento. Para rodovias com tráfego leve, isto pode tomar a forma de uma vedação com lamas asfálticas ou de um micro-revestimento (< 40 mm) de mistura asfáltica a quente. Onde o pavimento estiver sendo remodelado para suportar tráfego pesado, normalmente, é necessária uma camada de base asfáltica, além do revestimento asfáltico.

A *estabilização granular* é comumente executada como um meio de tratar estruturas de pavimentos deteriorados com bases granulares e revestimentos relativamente pouco espessos, que normalmente são compostos de asfalto. O desgaste de tais pavimentos geralmente se manifesta na forma de camadas asfálticas seriamente trincadas, camadas granulares deformadas e buracos na pista. O objetivo de adicionar agentes estabilizadores enquanto se recicla é restaurar a integridade estrutural, melhorando as propriedades mecânicas dos materiais recuperados e, simultaneamente, alcançar o conforto ao rolamento necessário.

A estabilização granular/RAP pode ser executada pela reciclagem em várias profundidades, normalmente entre 150 mm e 250 mm. Onde, necessita-se o aumento da capacidade estrutural para atender a demanda de tráfego adicional, pode ser aumentada a profundidade da reciclagem alcançando-se assim um aumento na espessura da nova camada estabilizada. Contudo, para se utilizar esta opção, é necessário ter profundidade suficiente de material natural de boa qualidade. Pavimentos deteriorados que incluem camadas previamente estabilizadas (por exemplo, com cal hidratada ou cimento), também podem ser reciclados.

Quando da existência de camadas espessas de asfalto não se faz necessária adição de agentes estabilizadores. Pavimentos que incorporam camadas degradadas, com base estabilizada com cimento, também podem ser eficazmente tratados utilizando-se a pulverização. Camadas ligadas que sofreram desgaste normalmente exibem trincas em blocos, que iniciam com um espaçamento amplo e se tornam cada vez mais espaçadas com o tempo. Pulverizar estes materiais elimina o potencial para reflexão de trincas (WIRTGEN, 2004).

A reciclagem a frio *in situ* apresenta muitos benefícios que podem ser obtidos quando da recuperação de pavimentos através deste método. Para Pereira et al. (2005), a reciclagem é uma alternativa interessante a partir do momento que utiliza parte ou a totalidade das camadas betuminosas existentes para produzir um novo material. O guia da Wirtgen (2004), inclui entre eles, os seguintes benefícios:

1. Fatores ambientais. O material do pavimento existente é totalmente utilizado. O volume de material novo que necessita ser transportado de pedreiras é reduzido;
2. Qualidade da camada reciclada;
3. Integridade estrutural. O processo de reciclagem a frio produz camadas espessas ligadas, que são homogêneas e não contêm interfaces fracas entre camadas de pavimento mais finas;
4. A interferência na fundação é minimizada, quando comparada à recuperação de pavimentos com equipamentos de construção convencionais;

5. Menor tempo de construção. As recicladoras possuem altos índices de produtividade, o que reduz significativamente o tempo de construção quando comparado a métodos de recuperação alternativos. Um menor tempo de construção reduz os custos do projeto e o tempo em que o tráfego é interrompido;
6. Segurança. O trem de reciclagem (completo) pode ser acomodado dentro da largura de uma pista de tráfego;
7. Custo-benefício. Todos os benefícios acima fazem da reciclagem a frio um processo mais atraente para a recuperação de pavimentos em termos de custo-benefício.

Quando a recuperação de pavimentos rodoviários degradados é avaliada, os métodos de reparo mais econômicos tendem a serem específicos do projeto. Cada projeto é exclusivo em termos da estrutura do pavimento existente, e da qualidade dos materiais que compõem as camadas do pavimento. Portanto, é importante utilizar a solução mais apropriada e prática para cada projeto, considerando os seguintes fatores importantes:

- Localidade. Se o projeto é uma via urbana com elevado tráfego onde somente o trabalho noturno será permitido, ou uma rodovia rural não revestida, com baixo volume de tráfego, que necessita de melhorias.
- Ambiente físico. Deve-se considerar a topografia e a geologia ao se determinar o método mais apropriado de recuperação. O clima desempenha um papel vital na escolha, e serão necessárias soluções para regiões desérticas com pouca precipitação que sejam diferentes daquelas que são apropriadas para áreas com muita chuva. O efeito de temperaturas extremas, como trincamento térmico induzido por ciclos de gelo-degelo, também tende a influenciar a alternativa adotada.
- Disponibilidade de materiais. Estes devem estar disponíveis em quantidades suficientes e devem ser de qualidade consistente, aceitável.

Existe sempre mais de uma solução para a recuperação de uma rodovia degradada. A reciclagem profunda é um conceito relativamente novo na engenharia de pavimentação e, devido à economia de custos inerente que é oferecida, sempre deveria ser considerada como uma opção.

2.4.5 Full depth reclamation - FDR

O Guia da FHWA (1997) define a FDR (reaproveitamento em toda a espessura) como um método de reciclagem, onde toda a seção do pavimento asfáltico e uma quantidade pré-determinada de material das camadas subjacentes podem ser tratadas para produzir uma base estabilizada.

Nesta mistura, diferentes tipos de aditivos podem ser incorporados para haver uma melhora estrutural da base, tais como: emulsões asfálticas e agentes químicos como a cal hidratada, cimento portland e cinza volante.

O sistema incorpora as camadas do pavimento com a camada asfáltica do revestimento, com ou sem a adição de novos materiais, produzindo uma nova camada de base estabilizada para pavimentos em estado de deterioração. Este método tem como vantagem a possibilidade de se corrigir defeitos estruturais no pavimento, especialmente nas camadas abaixo do revestimento.

Os cinco passos principais do processo são: pulverização, introdução do aditivo, produção da mistura, compactação e aplicação de um revestimento. Se o material *in situ* não for o suficiente para se estabilizar a espessura de base desejada, novos materiais podem ser adicionados no processo. Este método de reciclagem é geralmente executado com espessuras que variam de 100 a 300 mm.

Existem diferentes tipos de FDR estudados pela *Federation of Canadian Municipalities* - FCM (2005), os quais incluem mistura pulverizada (“pulvi-mixing”) ou reprocessamento *in situ* (sem estabilização); FDR com estabilização betuminosa (usando emulsão asfáltica ou espuma de asfalto); FDR com estabilização química (cimento Portland, cinza volante, cal ou aditivos como cloreto de cálcio ou cloreto de magnésio); e FDR com estabilização mecânica (correção da granulometria).

Desde alguns anos é utilizada no país a técnica de reciclagem envolvendo a adição de espuma de asfalto ao material fresado de pavimentos. A formação da espuma ocorre quando pequenas quantidades de água são adicionadas ao asfalto quente, com conseqüente aumento de área superficial e redução de viscosidade. Nesta forma, o asfalto tem facilitado sua mistura com agregado frio úmido. Dama et al. (2001), descrevem a utilização de reciclagem com espuma de asfalto em um trecho da BR-290, no trecho Porto Alegre-Eldorado do Sul. Foi realizada retroanálise da condição do pavimento existente e a elaboração do projeto de restauração por reciclagem com espuma de asfalto, que compreendeu a reciclagem de 16,0 cm de camada asfáltica existente e execução de 5,0 cm de concreto asfáltico. O trecho

considerado era constituído por quatro faixas de tráfego, sendo duas na pista denominada norte (sentido Porto Alegre – Eldorado do Sul) e duas na pista denominada sul (sentido Eldorado do Sul – Porto Alegre). A solução adotada para a restauração da pista sul foi a reciclagem com espuma de asfalto e foi executada nos meses de fevereiro e março do ano de 2001. Desde então, o trecho vem sendo avaliado periodicamente através da realização de ensaios deflectométricos e de investigações da presença de defeitos de superfície. O propósito de tais avaliações é a obtenção de uma melhor compreensão do comportamento estrutural da camada reciclada com espuma de asfalto.

A primeira vantagem de estabilizar com espuma de asfalto é que a base compactada pode receber o revestimento em menos de 48 horas quando comparado com as 2 a 6 semanas requeridas pela reciclagem a frio *in situ*. Isto se apresenta como um grande benefício, para os projetos que precisam ser finalizados em pouco tempo, pois a camada de base não precisa ficar um longo período sem a camada de revestimento, além de garantir que não ocorra o efeito de reflexão de trincas (FCM, 2005).

Uma pesquisa, realizada no Canadá pela Universidade Laval, restaurou uma seção de pavimento na cidade de Québec, onde utilizou a pulverização e a mistura do concreto asfáltico existente com o material de base e sub-base, atingindo uma espessura de 500 mm, (TIGHE et al., 2001, citado por FCM, 2005). O cimento Portland foi adicionado para pulverizar a mistura *in situ* (foram utilizados 9%, 12% e 15% de cimento em relação à massa seca do material), e então se fez a compactação de forma convencional. Esta tentativa resultou em uma base de concreto compactada.

Pavimentos que apresentem trincas em blocos, nos bordos, longitudinais ou transversais e por escorregamento, baixa capacidade estrutural e deformações permanentes (corrugação, trilha de roda, escorregamento de massa) apresentam características ideais para serem restaurados através da reciclagem profunda.

Um estudo realizado por Du e Cross (1998), no estado do Kansas, mostrou que a cinza volante tem desempenhado bons resultados e está sendo utilizada como aditivo em misturas recicladas a frio *in situ*. Os usos de emulsão asfáltica com pasta de cal quente, também foram estudados em laboratório como uma alternativa para o aumento da resistência à tração apresentando resultados positivos.

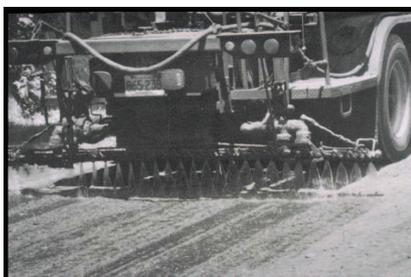
A caracterização dos materiais, um qualificado projeto da mistura e ensaios de laboratório fazem parte do controle de qualidade e devem ser verificados durante os trabalhos de restauração do pavimento. Estes são componentes fundamentais para o sucesso de um projeto de restauração profunda (FDR), conforme descrito por FCM (2005).

Uma revisão de estudos de caso publicados de FDR, feita pela FHWA (1997), mostra que quando executado corretamente a FDR, pode reconstruir pavimentos de forma eficaz, eliminando vários defeitos. Este método provê uma alternativa muito econômica em relação aos métodos convencionais. O estudo revisou alguns casos como o da recuperação da estrada Mt. Wachusett Road, Princeton, MA em 1991, o qual correspondia a um pavimento com seção de 9,7 m de largura, com uma espessura de mistura asfáltica a quente de 75 mm sobreposta a uma camada de 150 mm macadame. Embora não houvesse nenhuma indicação de ruptura da base, a superfície apresentava panelas (buracos) expressivas. Isto condicionou ao uso da FDR com a aplicação de cloreto de cálcio líquido para aumentar a resistência do material ao congelamento. O processo iniciou com o corte da camada de revestimento juntamente com parte da camada de base num total de 150 mm de profundidade, conforme pode ser visto na Figura 7. Logo após, foi aplicado uma porcentagem de 35% da solução de cloreto de cálcio para pulverizar o material (Figura 8), isto equivaleu a uma taxa de 3,6 l/m². A base foi restaurada para ser capaz de aceitar o tráfego antes da colocação da camada de revestimento asfáltico. Ao longo do processo de restauração o tráfego no pavimento era permitido e não houve necessidade alguma de se criar desvios ou aplicar qualquer tipo de camada selante na base restaurada.



Fonte: FHWA, cap 17, p.2

Figura 7 - Recuperação da rodovia usando FDR



Fonte: FHWA, cap 17, p.2

Figura 8 – Aplicação do cloreto de cálcio

Outro caso revisado pela FHWA (1997), foi o de restauração de uma rodovia feita pelo Texas DOT, em 1995, usando o processo FDR. O projeto consistia no processamento de 180 mm da camada de revestimento (HMA) e 76 mm da base de material granular existente. O material existente foi fresado, pulverizado, peneirado e tratado com cimento e água (Figura 9), para produzir uma base tratada com cimento (CTB) de baixa resistência. A base tratada foi executada usando-se dois trens de reciclagem (Figura 10). O processo era finalizado colocando-se a camada de mistura asfáltica a quente sobre a base tratada.



Fonte: FHWA, cap. 17, p.4

Figura 9 - Trem de reciclagem usado na FDR



Fonte: FHWA, cap. 17, p.5

Figura 10 – Aplicação do cimento

As maiores vantagens da FDR são as seguintes:

- A estrutura do pavimento pode ser melhorada significativamente sem mudar a geometria do pavimento e reconstrução do acostamento;
- Pode restabelecer o pavimento antigo para o perfil desejado, eliminando a existência de trilhas de roda, restabelece aclive e declive, elimina buracos, irregularidades, e áreas ásperas. Também, podem ser executadas operações para o alargamento do pavimento, além de possibilitar a uniformidade da estrutura do pavimento;

- Elimina trincas do tipo couro-de-crocodilo, trincas longitudinais e transversais, e a reflexão de trincas;
- Suscetibilidade ao congelamento pode ser melhorada;
- O custo de produção é baixo, e somente uma camada fina de revestimento é necessária na maioria dos projetos;
- Custos de engenharia são baixos;
- Há conservação de materiais e energia, assim como a qualidade do ar que é resultado do pó, gás e fumaça que são eliminados. Este processo é ambientalmente correto e evita os problemas com a disposição de materiais.

O reaproveitamento em toda a espessura pode ser recomendado quando da existência de profundas trilhas de roda, trincamento por fadiga, trincamento térmico, reflexão de trincas, pavimentos com manutenções do tipo remendo, e outros. Este método é, principalmente, utilizado quando existem problemas na base ou sub-base do pavimento.

Tratamentos em profundidade dependem de habilidade na compactação do material estabilizado e pode ser realizada até a 500 mm de espessura.

A recuperação da espessura total tem como primeiro passo remover, escarificar ou fresar o pavimento existente a uma profundidade especificada. O segundo processo envolve uma planta central, considerando que os outros três são processos *in situ*. O material resultante pode ser processado, mais adiante, para redução do tamanho e para ser misturado a agentes recicladores e materiais novos, se necessário, *in situ* ou na planta central. A escolha entre executar *in situ* ou em planta central depende da disponibilidade de equipamento, condição da estrada e dos custos envolvidos.

O método *in situ* é, geralmente, mais econômico que o método em planta. A FHWA (1997) destaca quatro tipos de operações *in situ* que estão sendo usados no momento, as quais incluem: seqüência de múltiplas passagens, seqüência de duas passagens, máquina única e passagem única com trem de reciclagem.

A seqüência de múltiplas passagens é o processo no qual o pavimento é quebrado, pulverizado e misturado a um agente reciclador. A disponibilidade de equipamentos para a fresa inicial ou escarificação inclui motoniveladora ou trator esteira montado com dentes. Este método mostra ser eficiente para camadas finas de mistura asfáltica a quente (HMA), mas pode produzir pedaços grandes de material que precisarão ser cortados.

A seqüência de duas passadas é um processo que prevê o arrancamento, pulverização ou uma combinação com a classificação pelo tamanho do agregado, juntamente com a fresagem

a frio ou com a máquina de pulverizar, como pode ser visto na Figura 11. O segundo passo envolve a adição de um agente reciclador e equipamento para a estabilização da mistura de solo e para o transporte da mistura. A principal característica da recicladora a frio (Figura 12) é um tambor giratório substituível, com dentes cortantes inclinados, os quais são utilizados para arrancar o pavimento existente. Estas máquinas garantem um controle preciso da profundidade do perfil, como também, em uma única passagem pulverizam e classificam, segundo o tamanho, resultando em uma menor interferência no tráfego.



Fonte: FHWA (1997)

Figura 11 – Moedor móvel



Fonte: FHWA (1997)

Figura 12 – Recicladora a frio

A qualidade do material e a profundidade de corte são os fatores principais que influenciam na resistência do pavimento à penetração dos dentes cortantes, os quais controlam a produtividade da máquina recicladora.

Os principais fatores relacionados com a qualidade do material são os seguintes:

1. Condição estrutural do pavimento. Uma camada de pavimento com trincas do tipo couro-de-crocodilo ou trincamento por fadiga é mais facilmente cortado que um pavimento estruturalmente em boas condições;

2. Resistência ou dureza e distribuição granulométrica do agregado;
3. Características do ligante.

A máquina de passagem única é capaz de quebrar, pulverizar e adicionar agentes recicladores em uma única passagem. As figuras 13 e 14 mostram a máquina de passagem única. Esta máquina consiste basicamente de um misturador de pavimento. A Figura 14 apresenta uma máquina única com moinho, injeções de emulsão, misturadores e vibroacabadoras. A figura 15 apresenta de modo esquemático um equipamento que utiliza agregado virgem para modificar o material existente.

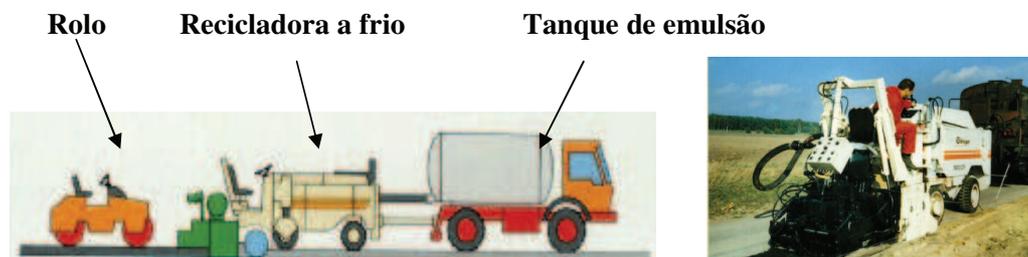
As vantagens da máquina de passagem única são a alta capacidade de produção e simplicidade de operação. Isto também é satisfatório nas áreas urbanas devido a sua pequena extensão. Porém, a limitação da profundidade e RAR de agregados grandes são as principais desvantagens deste método (FHWA, 1997).

Fresador/misturador Pavimentadora



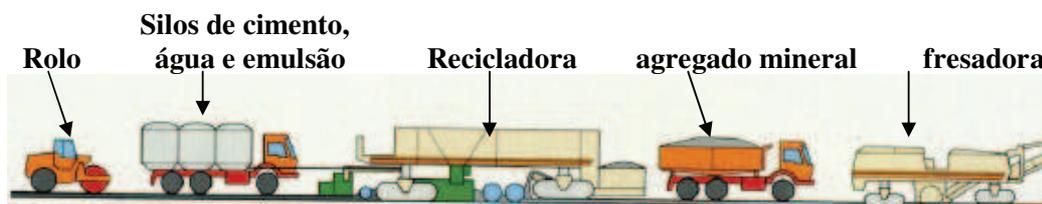
Fonte: FHWA, cap 16 (1997)

Figura 13 – Máquina de passada única



Fonte: FHWA, cap 16 (1997)

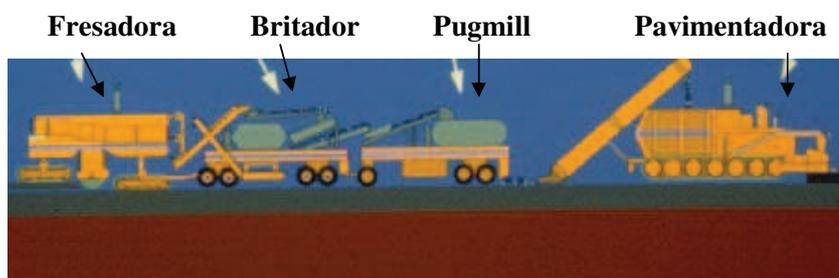
Figura 14 – Máquina de passagem única



Fonte: FHWA, cap 16 (2004)

Figura 15 – Máquina de passagem única

O *trem de reciclagem*, consiste de um conjunto de equipamentos, cada um com uma operação particular. Os equipamentos comumente usados são a recicladora a frio, britador portátil e misturador móvel, como ilustrados na Figura 16.



Fonte: FHWA, cap 16 (1997)

Figura 16 – Esquemática do trem de reciclagem

Outro item importante no processo da reciclagem do tipo FDR são os agentes recicladores. Eles servem para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais de pavimentação. Emulsões asfálticas (de ruptura lenta ou média), resíduos de petróleo, alcatrão, e versões emulsificadas de agentes recicladores comerciais podem ser usados. Água também pode ser adicionada para ajudar na dispersão do asfalto modificado durante a operação de mistura. Uma pequena porcentagem de cimento Portland pode ser adicionada na emulsão asfáltica para ajudar a estabilizar a mistura reciclada e reduzir o tempo de cura.

A escolha pelo agente reciclador envolve vários fatores, incluindo, a composição da estrutura existente, o tipo de solo do subleito e o objetivo da reciclagem. Se a reciclagem inclui o material da base misturado ao solo do subleito sem ser tratado, então isto requer aditivos para a estabilização do solo, (FHWA, 1997). A Figura 17 apresenta o tipo de equipamento utilizado neste processo e as Figuras 18 e 19 mostram as etapas do processo.



Fonte: FHWA 1997

Figura 17 – Máquina única



Fonte: FHWA, cap 01 (1997)

Figura 18 – Nivelamento



Fonte: FHWA, cap 01 (1997)

Figura 19 – Finalização da base

Alguns dos agentes recicladores mais comumente usados são:

1. Emulsões asfálticas;
2. Cimento Portland;
3. Cal;
4. Cinza volante;
5. Cloreto de cálcio; e
6. Espuma de asfalto.

Emulsão asfáltica: ajuda no aumento da coesão e na capacidade de suporte da mistura. Também ajuda no rejuvenescimento e amolecimento do ligante existente no material asfáltico. As emulsões são misturas de cimento asfáltico, água e agente emulsificante. A vantagem do uso de emulsão é a sua baixa viscosidade e fácil aplicação, a qual tem sido satisfatória em equipamentos de reciclagem com sistemas de aditivos líquidos. O resultado é um cimento asfáltico de alta viscosidade e, além disso, o aumento na coesão do material de base.

Cimento Portland: Este aditivo é usado para aumentar, nas bases, a resistência à compressão. Quando o cimento é combinado com solo e água, imediatamente ocorre a cimentação entre as partículas de solo, e a mistura continua ganhando resistência à compressão durante um longo período de tempo. A adição de cimento é bastante eficiente em bases ou subleitos granulares e de alta plasticidade.

Cal: é usada como um aditivo para atenuar o efeito de reação da argila com os materiais da base. A cal reduz a plasticidade em poucos dias e elimina o potencial de expansão do solo. Isto ajuda na resistência à água e aumenta a resistência à compressão das misturas recicladas.

Cinza volante: a maior razão de se usar cinza volante como aditivo é a forma de cimentação do solo (em presença de água) e os aumentos na impermeabilidade e resistência das misturas recicladas.

Cloreto de cálcio: é usado para baixar o ponto de congelamento do material de base e assim ajuda a evitar problemas como gelo/degelo.

Espuma de asfalto: A espuma facilita a dispersão do asfalto nos materiais a serem reciclados. Uma pequena quantidade de água é pulverizada no asfalto quente.

Na FDR é necessário que se dê atenção a algumas considerações construtivas, citadas pela FHWA (1997), como diretrizes básicas para este tipo de reciclagem.

- A restrição ao curso da base é que esta deve estar distante a 100 mm de remendos, grandes pedregulhos, rochas e tocos de árvores;
- Deve haver limitações quanto à classificação da máquina de restauração. Tamanho máximo permitido das partículas é 100% passando na peneira 50 mm.

A porcentagem de material passando na peneira 200, às vezes, é menor que 3%. Se a profundidade de corte é 100 mm, geralmente, adicionam-se finos. Pode ser extremamente difícil passar 100% através da peneira 25 mm, a qual é uma especificação para materiais em projetos que usam cloreto de cálcio como aditivo.

Outros elementos importantes, segundo a Wirtgen (2004), que podem ser monitorados na reciclagem profunda são os seguintes:

1. Método de corte: a estrutura do pavimento existente pode ser cortada em qualquer um desses dois modos: (a) a máquina é alinhada ao longo de uma área de trabalho. (b) a máquina pode ser posicionada lateralmente ao longo da área de trabalho com o rotor em cima de uma superfície não pavimentada. O rotor é baixado até a profundidade de corte através do material macio, e então a máquina é dirigida pela largura da área.
2. Profundidade de corte: a profundidade mínima de corte é de 25 mm abaixo da profundidade total da camada do pavimento para prover alívio às ferramentas do rotor.
3. Largura do corte: pode ser limitada à largura do pavimento. Porém, o pavimento existente pode ser alargado reformando os acostamentos em cada lateral das pistas.
4. Granulometria: a posição da porta de descarga da câmara de mistura na máquina de reciclagem deve ser ajustada para evitar a geração de quantidades excessivas de finos.
5. Velocidade do rotor: a velocidade do rotor usada para pulverizar o asfalto e materiais de base deve ser controlada para produzir o material RAP com o próprio tamanho do agregado. Quanto mais alta é a velocidade do rotor, mais fina é a mistura.
6. Velocidade da máquina: geralmente, quanto mais lenta é a velocidade da máquina, mais fina é a graduação. Conseqüentemente, a velocidade deve ser controlada para produzir tamanho de agregado exigido no material RAP.
7. Temperatura ambiente: as propriedades das camadas de misturas asfálticas a quente são bastante afetadas pelas temperaturas do ambiente. Uma alta temperatura (> 32°C, 90°F) faz com que aumentem as chances de se ter quebra de grandes pedaços (desplacamentos) na frente da fresadora.

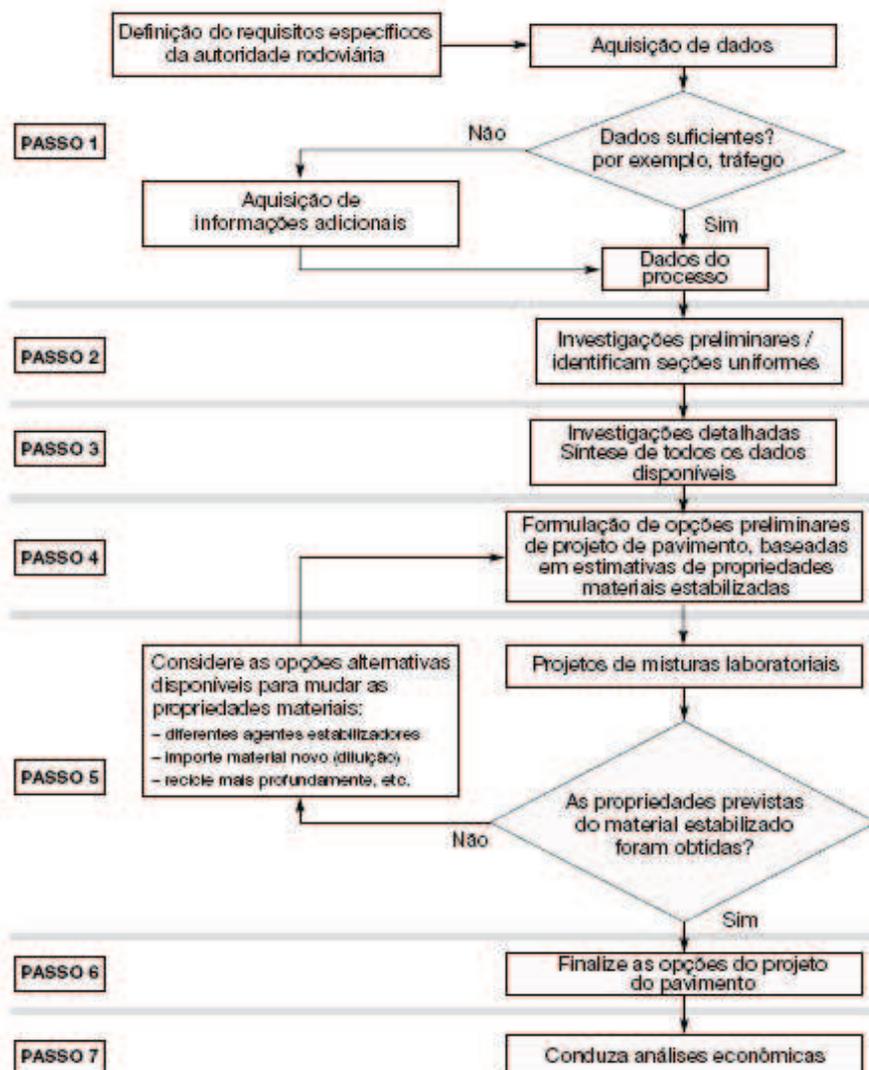
2.5 Abordagem do projeto do pavimento

Todos os processos de recuperação do pavimento são específicos do projeto, cada projeto é único. A profundidade da reciclagem e o tipo de estabilização são ditados pelo tráfego previsto ao longo do período do projeto, pelos materiais de pavimentação existentes e pela resistência da fundação *in situ*.

Ao longo dos últimos 50 anos, muitos métodos de projeto de pavimentos foram desenvolvidos, variando de simples métodos empíricos até as abordagens mais desenvolvidas, complexas, de modelagem (por exemplo, análise de elementos finitos) que exigem softwares sofisticados. Muitos destes métodos foram desenvolvidos, antes da idéia de reciclar material a partir de um pavimento existente ser concebida. Entretanto, vários destes métodos podem ser adaptados a pavimentos onde a reciclagem a frio é possível.

De acordo com Gonçalves (1999), o dimensionamento estrutural de um pavimento flexível tem sido feito aplicando-se método de origem empírica, como o Método do DNER (1981) e o Guia da *American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO* (1986), que definem a espessura total necessária para que as camadas de subleito e de reforço do subleito sejam adequadamente protegidas contra a geração excessiva de deformações plásticas, ao mesmo tempo, que estipulam, com base no tráfego de projeto, as espessuras mínimas das demais camadas, desde que os materiais empregados atendam a determinadas especificações. Esses métodos apresentam as vantagens da simplicidade de aplicação e de refletirem desempenhos reais observados em pavimentos em serviço. Tem sido notório, contudo, que a extrapolação desses métodos para condições fora das que lhes deram origem leva a subdimensionamentos ou super-dimensionamentos. Este fato deu origem a um grande número de pesquisas no sentido de se obter modelos de previsão de desempenho de natureza mecanístico-empírica. Somente através de modelos deste tipo podem-se efetuar projetos considerando o uso de materiais para os quais não se tem experiência de campo suficiente para a elaboração de um modelo empírico adequado.

Um projeto correto seguindo o processo passo a passo, conforme ilustrado na Figura 20, deveria ser sempre empreendido para todo e cada pavimento que exija recuperação.



Fonte: Wirtgen (2004)

Figura 20 – Fluxograma: Investigação do pavimento e projeto

No Brasil, a espessura total requerida para um pavimento em concreto asfáltico, em termos de materiais granulares, vem sendo determinada a partir do Método do DNER/1981 para dimensionamento de pavimentos flexíveis (o qual tem sua origem no Método CBR do USACE de 1962).

Os vários métodos de projeto de pavimento podem ser resumidos em dois títulos principais, conforme manual de reciclagem da Wirtgen (2004):

– *Métodos empíricos*. Estes incluem:

- O método de projeto de revestimento baseado na resistência da fundação subjacente (CBR);

- O catálogo de soluções, baseado em estruturas características de pavimento para aplicações específicas;
- O método de projeto DCP que utiliza dados de pesquisa do DCP para servir de exemplo em pavimentos existentes; e
- O método do Número Estrutural que atribui coeficientes aos vários tipos de material.

– *Métodos analíticos*. Todos estes incluem um processo analítico que é seguido pela interpretação (elemento empírico) para traduzir os resultados de tais análises da capacidade estrutural (conhecidas como funções de transferência):

- Métodos de projeto baseados na deflexão utilizando medidas de deflexão (análises das bacias de deflexão); e
- Análises mecanicistas. Estes métodos baseiam-se na análise da elasticidade linear de múltiplas camadas, plástica elástica ou em elemento finitos.

Como uma regra geral, pavimentos com tráfego pesado (>5 milhões ESAL's - equivalent single axle loads) sempre deveriam ser projetados utilizando uma abordagem analítica. Para Wirtgen (2004), um método empírico pode bastar para pavimentos de tráfego mais leves, mas, onde houver qualquer dúvida de que um projeto pode não ser apropriado para a carga de tráfego prevista (isto é, projetada abaixo ou acima), o mesmo deve ser verificado utilizando-se um método analítico.

2.5.1 Catálogos de soluções

Catálogos de soluções são determinados pelos tipos e pela qualidade dos materiais necessários para uma estrutura de pavimento. O catálogo fornece uma lista dos tipos de pavimento para as condições de suporte fornecidas, e para as capacidades de tráfego. Apesar, desta abordagem de projeto ser, normalmente, desenvolvida utilizando procedimentos analíticos, ela é ao mesmo tempo restritiva (pois não pode incluir todas as opções) e não é facilmente transferível (pois normalmente é desenvolvida para materiais e para condições climáticas locais). As condições de suporte utilizadas em projetos de catálogo devem ser analisadas com base naquilo para o que as opções de projeto foram desenvolvidas.

2.5.2 Método do número estrutural (SN)

A partir da experiência foram desenvolvidos coeficientes para certos materiais de pavimentos a serem utilizados em projetos estruturais. A abordagem do número estrutural soma o produto destes coeficientes estruturais e a espessura de suas camadas. Se o total exceder uma certa quantidade mínima do projeto do tráfego e as condições de sustentação da fundação, a estrutura do pavimento será considerada como adequada.

O método da AASHTO para dimensionamento de pavimentos flexíveis é baseado nos resultados obtidos na pista experimental da AASHTO Road Test. Seu objetivo principal é estabelecer o número estrutural (SN) adequado para proteção do subleito contra deformações plásticas excessivas para um determinado tráfego.

Conforme o Guia da Wirtgen (2004), a abordagem do SN é simples, pois utiliza materiais conhecidos, com um histórico do desempenho em dadas condições climáticas. Deve-se tomar cuidado ao utilizar este método onde as condições climáticas forem severas, ou onde os materiais locais forem significativamente diferentes. Além disso, esta abordagem do projeto não é recomendada para pavimentos com uma necessidade de capacidade estrutural de mais de 5 milhões de ESALs, pois não existe nenhum mecanismo de controle inerente para manter equilíbrio do pavimento em termos de resistência das camadas sobrepostas.

2.5.3 Métodos baseados na deflexão

Os métodos de projeto de restauração baseados nas deflexões são utilizados para analisar a resposta de um pavimento existente à uma carga aplicada. As medidas das bacias de deflexão são utilizadas para analisar o módulo resiliente da camada, necessárias para criar tal perfil de resposta. Estes módulos são então empregados para selecionar a estrutura do projeto de recuperação apropriado, utilizando análises mecanicistas com espessuras variadas de camadas (abordagem repetitiva utilizando tentativa e erro).

Os métodos de medição da deflexão freqüentemente são integrados a métodos mecanicistas de projetos. Esta é a aplicação mais apropriada para projetos de reciclagem. Em tais casos, os parâmetros dos dados da espessura das camadas e a classificação do material podem ser obtidos a partir de análises de DCP.

2.5.4 Métodos mecanísticos de projeto

A utilização de métodos mecanísticos de projetos de pavimentos para trabalhos de recuperação é a abordagem mais segura. Estes métodos baseiam-se em princípios de engenharia, utilizando dados de desempenho desenvolvidos através da pesquisa sobre diferentes materiais. Estruturas de pavimentos, incluindo opções de recuperação (por exemplo, reciclagem a frio) são modeladas para obter tensões e pressões nas várias camadas, as quais estão, por sua vez, relacionadas às funções de transferência de propriedades materiais, de maneira a prever a sua capacidade estrutural. Geralmente, um nível mais alto de confiança é obtido quando comparado empiricamente aos métodos de projeto.

O projeto mecanicista utiliza um software de computador para determinar a resposta do pavimento à carga. Tal resposta é determinada como deflexões, tensões e pressões em cada uma das camadas do pavimento. Este método de projeto requer os dados da espessura da camada e as propriedades do material (em termos de módulo elástico e Índice de Poisson) das várias camadas do pavimento.

2.6 Seleção de pavimentos e estratégias de reciclagem

Todo pavimento se deteriora depois de um certo tempo devido ao tráfego atuante na pista e aos fatores ambientais. Para contornar ou solucionar estes defeitos existe um número enorme de alternativas para sua manutenção ou restauração. Sendo que a escolha pelo método mais apropriado leva em consideração muitos fatores, tais como, local da obra, tipo de material existente no pavimento, disponibilidade de equipamentos, custos, defeitos do pavimento e informações sobre o projeto.

Os diferentes métodos de restauração e manutenção, apresentados pela FHWA (1997), para pavimentos de concreto asfáltico que apresentam os mais diversos tipos de defeitos estão apresentados na Tabela 1.

A escolha pela técnica de restauração deve ser baseada, primeiramente, no desempenho histórico do pavimento existente.

Os fatores mais comuns a serem considerados também são (1) a condição atual do pavimento, considerando os defeitos; (2) tráfego em termos do eixo padrão de 8,2 toneladas estimado para o período de projeto; e (3) capacidade estrutural do pavimento existente.

Antes de se decidir definitivamente qual a alternativa a se utilizar, o projetista deve avaliar as condições ambientais, de drenagem e as limitações práticas impostas por estruturas adjacentes. Visto que diferentes técnicas de restauração podem produzir diferentes ciclos de vida, o projetista deve considerar uma expectativa de vida para o pavimento, bem como, avaliar as restrições orçamentárias, se houverem, e se esta é conveniente para o usuário da via.

Tabela 1 – Alternativas de manutenção e restauração de pavimentos, FHWA (1997)

Problema	Possível causa				Manutenção				Restauração					
	Rompimento da estrutura	Composição da mistura	Mudanças de temp. ou umid.	cons-trutiva	CR	CS	TS	lama	RR	MR	Rev. Gran. aberta	Rev.	RE	REC
Trincas Couro de crocodilo	X				X		X	X				X	X	X
Trincas nas juntas	X		X	X	X									
Reflexão de trincas					X		X	X			X	X	X	
Trincas (escorreg.)		X	X				X	X	X		X	X	X	
Trincas (retração)				X	X									
Trilha de roda	X	X		X					X	X		X	X	X
Ondulações	X	X		X					X	X		X	X	X
Depressões	X			X	X								X	X
Def. Plástica Localizada			X		X								X	X
Buracos	X		X	X	X						X			
Arrancamento		X		X		X	X	X	X					
Exudação		X		X			X		X		X			
Polimento do agregado		X	X				X		X	X	X			
Oxidação		X					X							

Onde: CR: Conserva Rotineira; CS: Capa Selante; TS: Tratamento Superficial; RR: Reciclagem do Revestimento; MR: Micro-Revestimento; Rev: Revestimento; RE: Reciclagem da Estrutura; REC: Reconstrução.

2.7 Considerações sobre a construção e equipamentos

Projetos de reciclagem caracterizam-se por grandes máquinas, atividade intensa, e altas taxas de produção. O trabalho de reciclagem concentra-se em uma localização específica, ao contrário dos projetos de construção de novas rodovias que contemplam diversas operações

funcionando simultaneamente por toda a obra. O trabalho avança de forma linear, deixando para trás o produto acabado que normalmente exige apenas um revestimento de superfície.

As recicladoras possuem um grande potencial de produtividade. Apesar de um número conservador de produção diária de 5.000 m², normalmente, ser utilizado para fins de planejamento, não é incomum reciclar a largura total de um quilômetro de uma rodovia com pista dupla por dia (até 10.000 m²) com uma única recicladora.

A reciclagem é um método de construção relativamente simples, mas como acontece com todas as operações de pista rápida, o trabalho deve ser administrado corretamente para que a produção seja alta.

O objetivo geral do trabalho de reciclagem é construir uma nova camada de pavimentação que atenda às exigências do projeto. Essas exigências normalmente são expressas em uma especificação do projeto que define as duas exigências mais importantes para a reciclagem, ou seja:

- A qualidade do material na camada reciclada; e
- A espessura da camada reciclada.

Claramente, o desempenho do pavimento recuperado depende do alcance dessas duas exigências básicas. Elas representam as hipóteses principais feitas para prever a vida útil da rodovia recuperada e qualquer deficiência de uma delas pode conduzir a uma falha prematura. Para obter o máximo benefício, Wirtgen (2004), conclui que as operações de reciclagem devem ser bem planejadas para alcançar o potencial de produção e assegurar que a mesma atenda estritamente às exigências especificadas para o produto, exigindo que:

- Todos os aspectos do trabalho sejam analisados com detalhes e planejados meticulosamente;
- Obstáculos ao trabalho de reciclagem sejam identificados e resolvidos na hora;
- As necessidades de entrada de material (como agentes estabilizadores) sejam constantemente avaliadas, e que o material seja adquirido e disponibilizado no local quando necessário;
- As máquinas sejam protegidas por programas apropriados de manutenção preventiva;
- Operadores e supervisores sejam treinados adequadamente e entendam claramente todos os aspectos da operação de reciclagem; e
- As questões de segurança recebam a atenção que merecem, particularmente quando se trabalha com betume quente.

Estes requisitos são importantes para criar um ambiente de trabalho produtivo e assegurar que o produto final exigido seja alcançado.

2.7.1 Planejamento da reciclagem

Devido às operações de alta produção, o bom resultado de um projeto de reciclagem depende do planejamento da qualidade. Antes de iniciar o trabalho, é importante identificar cuidadosamente os vários passos e operações que devem ser executados e, diariamente ou a cada turno, colocar esses itens na forma de um plano de produção. Em particular, segundo a Wirtgen (2004), os seguintes aspectos principais devem ser considerados:

1. Seleção do equipamento: a reciclagem exige uma recicladora, compactadores, niveladoras e tanques de água essenciais, assim como os transportadores necessários para trazer os agentes estabilizadores até a recicladora.

Abaixo cada um é descrito em separado:

- A recicladora: decisão sobre qual máquina deverá ser utilizada (e quantas) é, antes de tudo, influenciada pelo tamanho e pelo tipo de projeto.
- Equipamento de compactação: normalmente, três rolos, são necessários para a compactação do material que vem atrás da recicladora, conforme ilustrados na Figura 21. Um rolo principal (tambor liso ou pé-de-carneiro) é posicionado, primeiramente, aplicando esforço de compactação de alta amplitude para penetrar até o fundo da camada reciclada. Quando houver uniformidade de compactação nos dois terços inferiores da camada reciclada, um nivelador é utilizado para colocar a pista nos níveis finais exigidos. A partir de então, um rolo liso vibratório é aplicado com baixa amplitude para compactar a porção superior da camada nova. Quando uma máquina montada na via for utilizada, o material é normalmente colocado através da mesa pavimentadora, permitindo que um rolo vibratório (com tambor único ou duplo) complete todo o processo de compactação. No final do processo de compactação, um rolo pneumático é utilizado para finalizar e obter uma textura de superfície com boa coesão. A espessura da camada reciclada e as características do nivelamento do material reciclado são critérios de seleção primordiais.



Fonte: Wirtgen (2004)

Figura 21 – Tipos de rolos

- Tanques de grande escala: Os tanques são acoplados a recicladora para o fornecimento de água e/ou agentes estabilizadores líquidos (como emulsão betuminosa). A capacidade desses tanques deve ser compatível com a área de trabalho e a geometria da estrada.
- Aplicação de cimento: o cimento é o agente estabilizador mais utilizado em todo o mundo, tanto como um agente único como em conjunto com outros agentes, geralmente com agentes estabilizadores betuminosos. As taxas de aplicação especificadas variam de 1 % até 6% ou mais, especialmente quando materiais arenosos são estabilizados.
- Meta de produção: Normalmente, um dia de trabalho é marcado para completar uma seção da estrada, na largura total ou em metade da largura.
- Material do pavimento existente: O tipo de material do pavimento existente, a consistência e o teor de umidade *in situ* são todos de extrema relevância. Mudanças na espessura dos diferentes materiais que constituem o pavimento existente (especialmente em camadas de asfalto) podem influenciar significativamente a velocidade de avanço da recicladora. Além disso, a maneira como o material se comporta quando reciclado influenciará como ele deverá ser posicionado, compactado e finalizado.
- Geometria da rodovia existente: a largura da estrada é de crucial importância já que ela indica o número de passagens (cortes) de reciclagem necessário para cobrir toda a largura. Seções estreitas, como as do início e do fim das pistas de subida, precisam ser cuidadosamente avaliadas. Além disso, a forma da superfície (inclinação ou declive) influencia o posicionamento de ligações longitudinais entre cortes adjacentes.
- Acomodação do tráfego: A reciclagem a frio tem um impacto relativamente pequeno sobre a passagem segura do tráfego na estrada. A natureza da passagem única do processo e altas taxas de produção possibilitam que, apenas uma porção limitada da estrada seja fechada a qualquer momento, normalmente a largura de uma faixa.

- Logística: as necessidades diárias de materiais importados precisam ser calculadas antecipadamente, os pedidos e as entregas, programados para assegurar que o processo de reciclagem seja contínuo.
- Exigências do produto final: além da espessura da camada, as exigências precisas em termos de produto final devem ser claras. Elas incluem detalhes do nível final e tolerâncias quanto à forma, processos de compactação, textura da superfície e ação com qualquer material excedente.
- Exigências de pré-reciclagem:
 - Remoção de obstáculos;
 - Instalação de novos canais ou qualquer outra instalação adicional para drenagem;
 - Pré-fresagem ou pré-trituração para obter qualquer formato e/ou nível de superfície; e
 - Importar/espalhar material novo sobre a superfície existente da estrada.
- Exigências específicas antes da abertura do tráfego: alguns projetos exigem que a superfície da camada completa receba tratamento especial, tal como uma leve pulverização de emulsão de betume diluída.
- Plano de produção diária: todos os aspectos descritos acima deverão ser incluídos em um plano de produção diário simples e de fácil leitura.

2.8 Processo de reciclagem

De acordo com o manual de reciclagem da Wirtgen (2004), nesta fase está incluído o ajuste do trem de reciclagem, procedimentos que precisam ser seguidos antes de iniciar a reciclagem e uma vez que a operação estiver a caminho, condições adicionais que precisam ser vistas durante o processo, mais o manuseio do material reciclado. A compactação e acabamento seguem a operação de reciclagem. É importante observar os detalhes, especialmente:

- A profundidade de corte em ambos os lados da recicladora.
- Se a recicladora está obedecendo à linha correta com a largura de sobreposição exigida;
- Velocidade de avanço. A melhor velocidade de mistura é entre 6 m/min e 12 m/min, dependendo da profundidade de corte, do material sendo reciclado e dos aditivos;

- O teor de umidade do material tratado é suficiente para assegurar compactação adequada; e
- O produto reciclado está adequado ao que se é esperado.

A taxa de produção da operação de reciclagem é amplamente ditada pelo tipo e número de recicladoras a serem utilizadas.

Após a reciclagem, o material tratado deve ser colocado em sua posição final e compactado para atender às exigências de densidade especificadas.

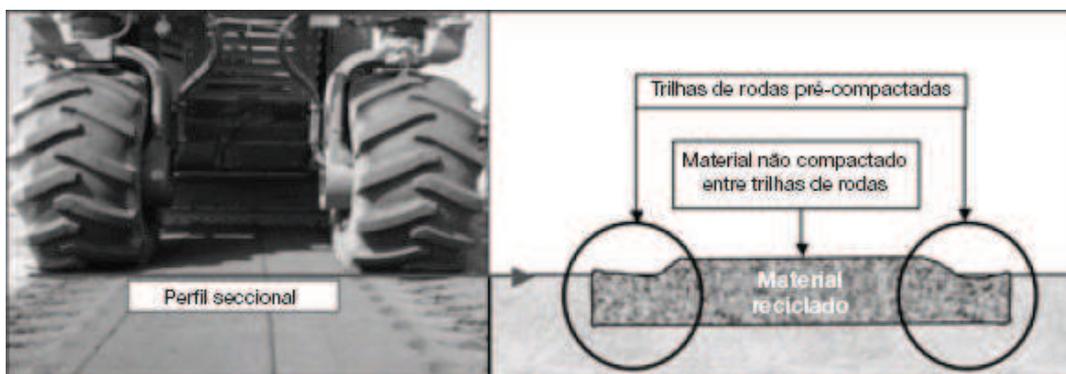
Compactar material reciclado para obter a densidade especificada é um dos aspectos determinantes e mais importantes do desempenho futuro do pavimento recuperado. Material mal compactado tende a ficar denso sob o tráfego, causando o aparecimento de sulcos. Quando o material estabilizado não for compactado de forma apropriada, as metas de resistência não são alcançadas, há o aumento de permeabilidade promovendo danos causados pela umidade, pelo envelhecimento dos agentes estabilizadores de betume. Assim, é necessário que a compactação seja tratada como um dos aspectos mais importantes da reciclagem.

Medir a densidade de um material reciclado após a compactação (densidade de campo) não é tão óbvio como é para a construção com novos materiais (material de brita graduada). Uma das características do material reciclado é a variabilidade, particularmente onde o pavimento existente tiver sido extensivamente remendado. Esta variabilidade pode ocasionar problemas quando métodos convencionais são utilizados para verificar se o valor da densidade foi atingido. Além disso, atingir uma densidade específica pode não ser tão simples quanto aplicar esforço de compactação adicional, (WIRTGEN, 2004).

Uma meta de densidade geralmente é especificada como um percentual da densidade máxima seca - Proctor. Tipicamente, a meta de densidade para uma camada específica em um pavimento é determinada como um “mínimo de 98% de densidade Proctor máxima”, significando que todas as medições da densidade de campo após a compactação devem ser mais altas que 98/100 da densidade máxima seca obtida para aquele material específico no laboratório aplicando compactação padrão Proctor.

Deve-se chegar a um estado uniforme de compactação em toda a largura de corte da recicladora, antes de utilizar uma motoniveladora para atingir os níveis finais necessários. As rodas traseiras de recicladoras pneumáticas sempre rodam sobre a superfície do material reciclado, uma em cada lado de corte. A carga de cada pneu compacta parcialmente o material

reciclado, mas o material entre as trilhas das rodas é só semi-compactado pela pressão aplicada sobre a porta traseira, conforme ilustrado na Figura 22.



Fonte: Wirtgen, cap 06 (2004)

Figura 22 – Pré-compactação do material atrás da recicladora pneumática

Ao se executar o acabamento de uma camada reciclada, é necessário deter-se em algumas exigências que são impostas pela natureza do material e do agente estabilizador utilizado. Materiais com altas quantidades de asfalto tendem a ser mais grossos e apresentar baixa aderência, por isso se tornam mais difíceis de acabar. Quando estas características são identificadas no início dos trabalhos, é possível fazer a adição de material fino durante o processo de reciclagem para que haja modificação do produto final evitando problemas de acabamento.

A superfície reciclada deverá ser protegida para evitar desmoronamentos, formação de panelas e outras formas de degradação, quando projetada para longos períodos. O volume de tráfego, bem como o material e o tipo de agente estabilizador determinam os tipos de medidas preventivas necessárias para o bom desempenho da camada reciclada.

Um aspecto final muito importante neste processo é a drenagem. Muito freqüentemente, esta etapa não é enfatizada, gerando problemas devido ao acúmulo de água na pista. Esta água invariavelmente entra na estrutura do pavimento, causando saturação do material do pavimento, o que leva a formação de panelas quando o mesmo é trafegado.

2.9 Controle de qualidade

Este item é de suma importância em obras que contemplam a reciclagem como processo construtivo. Dentre os vários pontos a controlar neste tipo de processo, a qualidade do produto final é a mais importante, pois depende da operação correta da recicladora, da incorporação de aditivos com níveis de dosagem corretos e, finalmente, da adequada colocação, compactação e acabamento do material tratado.

A realização de uma série de testes se faz necessário para garantir a aceitação do material reciclado. Este material deve atender as expectativas de desempenho esperadas, implicando na capacidade estrutural do pavimento recuperado.

As exigências de qualidade estão normalmente incluídas em um conjunto de Especificações de Projeto, que ditam os critérios de aceitação, tais como:

- Verificações e testes de controle do processo;
 - Verificações visuais
 - Profundidade da reciclagem
 - Aplicação de água e agentes estabilizadores
 - Qualidade da mistura
 - Juntas laterais
- Verificações e testes de controle de aceitação;
- Resistência do material reciclado;
- Densidade seca do material compactado;
- Espessura da camada final.

Considerando que a FDR é um tipo de reciclagem a frio de pavimentos asfálticos, as especificações e controle de qualidade são similares à reciclagem a frio. Segundo FHWA (1997), as especificações para este método indicam o equipamento a ser usado e todo o processo de construção. O resultado final da especificação fixa limites para alguns testes prioritários a serem realizados no pavimento acabado. A granulometria dos materiais existentes na rodovia deve ser levada em conta ao se elaborar a especificação de granulometria do agregado. Devido a inerente variabilidade do material na FDR, pode não ser muito prático especificar o tamanho de peneira. Porém, os equipamentos usados na FDR devem ser capazes de cortar o pavimento na profundidade desejada. Na especificação pode

constar, por exemplo, que o método de construção será pulverização do revestimento asfáltico existente, e que tenha 97% do material passando na peneira 50 mm.

O próximo ponto que a FHWA (1997) considera importante na FDR é que exista uma especificação para os agentes recicladores, a qual deve se encaixar nas propriedades estabelecidas por órgãos como *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), *American Society for Testing and Materials* (ASTM) ou outras especificações referentes aos diferentes tipos de ligantes asfálticos, como as emulsões asfálticas. O equipamento usado para adicionar o agente reciclador deve ser capaz de aplicar as taxas com muita precisão, tal que, as tolerâncias ficam em torno de $\pm 5\%$. A especificação, também deve considerar a aplicação de água na pré-mistura quando necessário. A responsabilidade pela estabilização da mistura, os procedimentos exigidos para coleta de amostras, métodos de ensaio e critérios de projeto para a mistura devem ser claramente esboçados na especificação.

Ajustes na granulometria ou a quantidade de asfalto na mistura reciclada podem ser feitos baseados nos resultados de testes de extração de amostras administrados na mistura reciclada.

Outra consideração importante a ser feita no controle de obras de reciclagem, segundo a FHWA (1997), é a densidade de compactação. O uso da densidade máxima teórica é o mais recomendado em relação ao uso da densidade de laboratório, pelo fato de haver diferenças significativas nas temperaturas, quantidades de fluídos e outras condições, entre as quais, a compactação no campo e no laboratório. Geralmente, as especificações para reciclagens de misturas a frio exigem que a quantidade de vazios de ar fique em torno de 12 a 15%.

2.10 Controle tecnológico

O controle tecnológico envolve os ensaios realizados em campo e em laboratório, os quais garantem a qualidade das obras rodoviárias dentro de especificações impostas pelos órgãos estaduais e federais responsáveis pelas rodovias. Em geral, estes ensaios são usados e reconhecidos mundialmente na área de pavimentação rodoviária, tais como: CBR, densidade *in situ*, granulometria, equivalente de areia e Cone de Penetração Dinâmica (DCP).

2.10.1 Cone de penetração dinâmica (DCP)

O uso do Cone de penetração dinâmica (*Dynamic Cone Penetration – DCP*) foi iniciado em 1956 por Scala na Austrália. Em 1969, Van Vuuen, no Zimbábue, modificou o Scala penetrômetro e obteve uma correlação notável entre o DCP e o CBR *in situ*.

Na África do Sul, o DCP tem sido extensivamente usado desde 1973 para verificação rápida da resistência *in situ* das camadas de pavimentos.

Posteriormente, no Reino Unido o *Transport and Road Research Laboratory - TRRL*, iniciou o uso do DCP, e desde 1975, Kleyn, na África do Sul, e Harison em 1987 na Indonésia se dedicaram a estudá-lo.

Outros pesquisadores como Angelone (1991), na Argentina e Heyn (1986), Rohm e Nogueira (1990), Oliveira e Vertematti (1997), no Brasil, estudaram o uso deste aparelho.

Foi introduzido no Minnesota Department of Transportation (Mn/DOT) pelo Minnesota Road Research Project (Mn/ROAD). Desde 1993, o DCP tem sido usado pelo Mn/DOT, conforme MnROAD (1993).

Nogami e Villibor (1995), citados por Trichês (1999), afirmam que a faixa de trabalho deste aparelho é bastante ampla: desde solos moles ou pouco consistentes, até camadas de bases, correspondentes a bases de brita graduada ou pedregulho. No que se refere à camada de base, nem todos pesquisadores comungam com esta colocação.

Trichês (1999), realizou uma pesquisa nas obras de duplicação da BR-101/SC, próximo ao município de Florianópolis. O estudo envolvia o controle tecnológico de execução de aterros rodoviários do trecho em estudo, utilizando o DCP. Trichês observou que a correlação direta entre o índice de penetração e o CBR, encontrado na BR-101 – Brasil/SC, encontra-se compreendida entre as obtidas por Harison, na Indonésia, e por Oliveira e Vertematti, em São Paulo.

Desde a sua criação, o equipamento DCP vem sendo estudado, modificado e utilizado por pesquisadores de vários países do mundo como a África do Sul, Argentina, Chile, Estados Unidos, Inglaterra, Israel, Malásia. Tal interesse é por se tratar de um ensaio rápido e de baixo custo, que não requer a abertura de trincheiras e possibilita caracterizar a capacidade de suporte do solo “*in situ*” em seu estado natural ou em camadas compactadas, diferentemente do CBR “*in situ*”, (LIMA, 2000).

Dentro de suas particularidades, muitas instituições em todo o mundo, desenvolveram o Penetrômetro Dinâmico de Cone. A partir disso muitas correlações foram estabelecidas entre medidas de DCP e outras características de resistência dos materiais que compõem as

estruturas de pavimentos rodoviários, como por exemplo, as correlações entre o DCP e o CBR.

O pesquisador Harison (1986 e 1987), apresenta uma dedução matemática simplista para o modelo de correlação exponencial baseado nas leis de impacto e momento.

$$R = \frac{W_1 \times h}{D} \times \frac{W_1 + e^2 \times W_2}{W_1 + W_2} \quad (1)$$

Onde:

R = Resistência de ponta

W_1 = Peso do martelo

W_2 = Peso total do equipamento excluído o peso do martelo

h = Altura de queda do martelo

D = Índice de penetração

e = Coeficiente de restituição

O mesmo autor admite que R (resistência de ponta) é uma função inversa da razão de penetração D (índice de penetração, mm/golpe), ou seja:

$$R = A_1 \cdot (D)^{-1} \quad (2)$$

Onde:

$$A_1 = \frac{W_1 \times h [W_1 + (e^2 \times W_2)]}{W_1 + W_2} \quad (3)$$

O uso principal do ensaio é, contudo, a estimativa do CBR *in situ* dos materiais, o que é feito aplicando correlações entre o CBR e o parâmetro DCP. O autor admitindo que o CBR é função de R, adotou de maneira simplista a seguinte equação:

$$CBR = A \times DN^{-1} \quad (4)$$

De acordo com Alves (2002), esta equação assume o sistema com 100% de eficiência e considera que não há energia perdida. Com certeza, há energia perdida atribuída à compressão da barra de penetração, à compressão elástica do solo e a outros fatores. Para que esses fatores sejam levados em conta, a relação teórica foi modificada como é mostrado a seguir:

$$\text{Primeiramente, } CBR = A \times (DN)^{-B} \quad (5)$$

$$\text{ou} \quad \log CBR = \log A - B \times \log DN \quad (6)$$

$$\text{e ainda,} \quad CBR = A \times (DN)^{-1} + B \quad (7)$$

Onde:

DN = índice de penetração (medido pelo DCP em mm/golpes)

CBR = dado em %

$B \neq 1$

Amini (2003), destaca os autores que realizaram extensas pesquisas para desenvolver relações entre DCP e CBR (Kleyn, 1975; Harison, 1987; Livneh, 1987; Livneh e Ishai, 1988; Chua, 1988; Harison, 1983; Van Vuuren, 1969; Livneh, et. al., 1992; Livneh e Livneh, 1994; Ese et. al., 1994; e Coonse, 1999). Baseado no resultado de estudos anteriores, muitas das correlações entre DCP e CBR tem a seguinte forma:

$$\log(CBR) = a + b \times \log(DCP) \quad (8)$$

onde:

DCP = resistência à penetração (mm/golpe)

a = constante com valores entre 2,44 e 2,60

b = constante com valores entre -1,07 e -1,16

Harison (1987), formulou correlações para solos argilosos, areia e pedrisco graduados. Obteve, também, uma correlação com os dados combinados com um desvio de $\pm 10\%$ das demais, atendendo a todos os materiais ensaiados. As correlações obtidas foram as seguintes:

$$\text{Log}CBR = 2,56 - 1,16 \times \text{Log}(DN) \quad R^2 = 0,97 \quad \text{para solos argilosos} \quad (9)$$

$$\text{Log}CBR = 3,03 - 1,51 \times \text{Log}(DN) \quad R^2 = 0,92 \quad \text{para solos arenosos} \quad (10)$$

$$\text{Log}CBR = 2,55 - 0,96 \times \text{Log}(DN) \quad R^2 = 0,96 \quad \text{para solos pedregulhosos} \quad (11)$$

$$\text{Log}CBR = 2,81 - 1,32 \times \text{Log}(DN) \quad R^2 = 0,98 \quad \text{para todos tipos de solos} \quad (12)$$

Onde, DN é o Índice de Penetração em mm/golpe.

Um resumo destas correlações, juntamente com os materiais ensaiados está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Correlações CBR x DCP (Amini, 2003)

Equação de Correlação	Material Ensaiado	Referência
$\text{Log CBR} = 2,56 - 1,16 \times \log(\text{DCP})$	Granular e coesivo	Livneh (1987)
$\text{Log CBR} = 2,55 - 1,14 \times \log(\text{DCP})$	Granular e coesivo	Harison (1987)
$\text{Log CBR} = 2,45 - 1,12 \times \log(\text{DCP})$	Granular e coesivo	Livneh et al. (1992)
$\text{Log CBR} = 2,46 - 1,12 \times \log(\text{DCP})$	Vários tipos de solo	Webster et al. (1992)
$\text{Log CBR} = 2,62 - 1,27 \times \log(\text{DCP})$	Desconhecido	Kleyn (1975)
$\text{Log CBR} = 2,44 - 1,07 \times \log(\text{DCP})$	Agregado de base	Ese et al. (1995)
$\text{Log CBR} = 2,60 - 1,07 \times \log(\text{DCP})$	Agregado de base e coesivo	NCDOT (Pavement, 1998)
$\text{Log CBR} = 2,53 - 1,14 \times \log(\text{DCP})$	Solo residual piemonte	Coonse (1999)

A Tabela 4 e a Figura 23 apresentam valores de CBR obtidos através da aplicação do DCP, em mm/golpe. Estes valores foram correlacionados por diversos autores, os quais referenciados por Lima (2000). Na Tabela 3 estão mostrados os autores, País do estudo e correlações DCP x CBR obtidas.

Tabela 3 – Correlações CBR x DCP (Lima, 2000)

Autor	País	Equação (Log CBR =)	R²
Kelyn	África do Sul	$2,631 - 1,280 \times \log \text{DCP}$	Não informado
Harison	Austrália	$2,810 - 1,320 \times \log \text{DCP}$	0,98
TRRL	Inglaterra	$2,480 - 1,060 \times \log \text{DCP}$	Não informado
Heyn	Brasil	$2,647 - 1,300 \times \log \text{DCP}$	Não informado
Hasin	Malasia	$2,430 - 0,990 \times \log \text{DCP}$	0,90
Angelone	Argentina	$2,563 - 1,050 \times \log \text{DCP}$	Não informado
Ponce	Chile	$2,890 - 1,460 \times \log \text{DCP}$	0,95
Oliveira	Brasil	$2,490 - 1,057 \times \log \text{DCP}$	0,96
Triches	Brasil	$2,710 - 1,250 \times \log \text{DCP}$	0,90

Tabela 4 – Valores de CBR estimados com base em correlações CBRxDCP existentes (Lima 2000).

DCP (mm/golpe)	CBR (%)								
	Kleyn	Harison	TRRL	Heyn	Hasim	Angelone	Ponce	Oliveira	Trichês
2,0	176	259	145	180	136	177	282	149	216
2,5	132	193	114	135	109	140	204	117	163
3,0	105	151	94	106	91	115	156	97	130
3,5	85	124	80	87	78	98	125	82	107
4,0	73	104	69	73	68	85	103	71	91
4,5	62	89	61	63	61	75	86	63	78
5,0	54	77	55	55	55	67	74	56	69
6,0	43	61	45	43	46	56	57	47	55
7,0	35	49	38	35	39	47	45	40	45
8,0	30	41	33	30	34	41	37	34	38
9,0	26	36	29	25	31	36	31	30	33
10,0	22	31	26	22	28	33	27	27	29
11,0	20	27	24	20	25	29	23	25	26
13,0	16	22	20	16	21	25	18	21	21
15,0	13	18	17	13	18	21	15	18	17
18,0	11	14	14	10	15	18	11	15	14
21,0	9	12	12	8	13	15	9	12	11
24,0	7	10	10	7	12	13	7	11	10
27,0	6	8	9	6	10	11	6	9	8
30,0	5	7	8	5	9	10	5	8	7
35,0	5	6	7	4	8	9	4	7	6
45,0	3	4	5	3	6	7	3	6	4
50,0	3	4	5	3	6	6	3	5	4
60,0	2	3	4	2	5	5	2	4	3
70,0	2	2	3	2	4	4	2	3	3
80,0	2	2	3	1	4	4	1	3	2
90,0	1	2	3	1	3	3	1	3	2
100,0	1	1	2	1	3	3	1	2	2

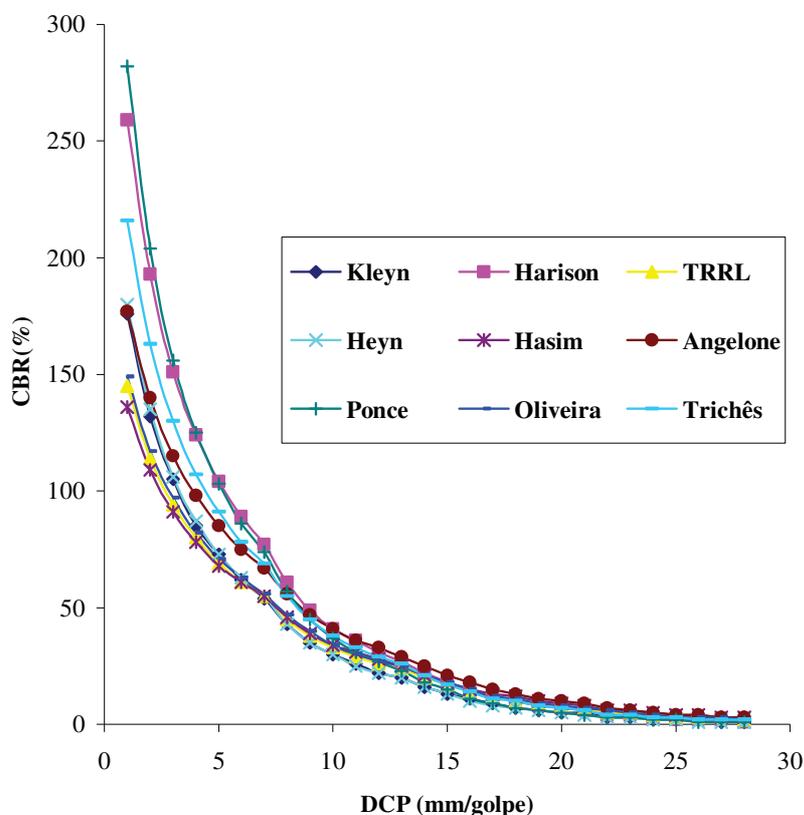


Figura 23 – Valores de CBR estimados com base em correlações CBRxDCP

O DCP consiste de uma haste metálica, com ponta em forma de cone em ângulo padronizado (60°), que é forçada a penetrar no solo ou na camada granular por meio de golpes aplicados com um peso que cai de uma certa altura sobre um batente soldado na haste. Uma régua graduada é posicionada ao lado da haste, ficando apoiada em uma base metálica no topo da camada de onde os ensaios são iniciados, conforme pode ser visto na Figura 24.

Segundo Klein (1979) do TRB (*Transvaal Road Department*), citado por Lima (2000), a justificativa para a utilização do ângulo de abertura de 60° , baseia-se no fato de que este apresenta uma maior vida de trabalho e apresenta uma curva DCP bem mais definida.

O mesmo autor relata que o TRB iniciou o uso do DCP no ano de 1973 durante uma extensa investigação de pavimentos rodoviários. O tempo limitado para a execução da investigação, aliado à necessidade de avaliação da resistência de cada camada constituinte das estruturas dos pavimentos, condicionou fortemente a decisão de utilizar o DCP.

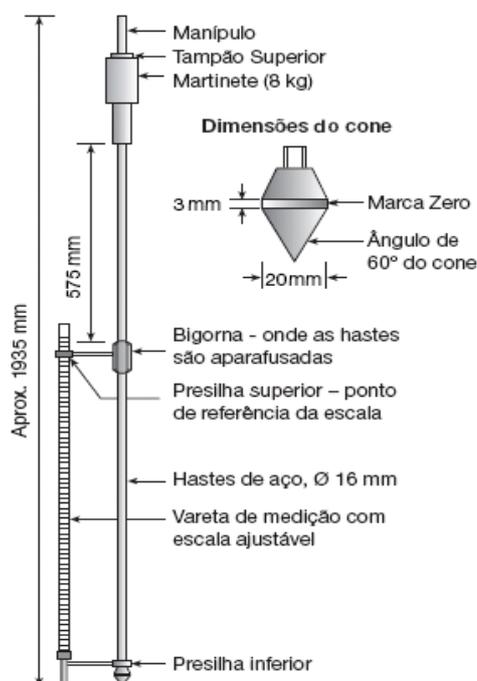
O ensaio consiste em se aplicar golpes sucessivos e anotar a posição de uma marca de referência na haste através da régua, anotando ao lado da posição o número do golpe aplicado. Em solos mais resistentes podem ser registradas leituras depois de vários golpes do peso.

Cada teste leva em média de 5 a 10 minutos. O ensaio DCP normalmente necessita de um grupo de três pessoas para realizá-lo (Figura 25). O primeiro realiza as leituras de penetração e as anota em planilha padronizada, como pode se visto na Figura 26, o segundo realiza a aplicação dos golpes com o martelo enquanto o terceiro segura o equipamento na vertical. Investigadores do Mn/ROAD usam o teste DCP espaçado de 30 em 30 metros e 3 metros do centro até as bordas direita e esquerda do pavimento.



Fonte: TRL (2004)

Figura 24 – Ensaio DCP



Fonte: Wirtgen (2004), cap.3, p.53

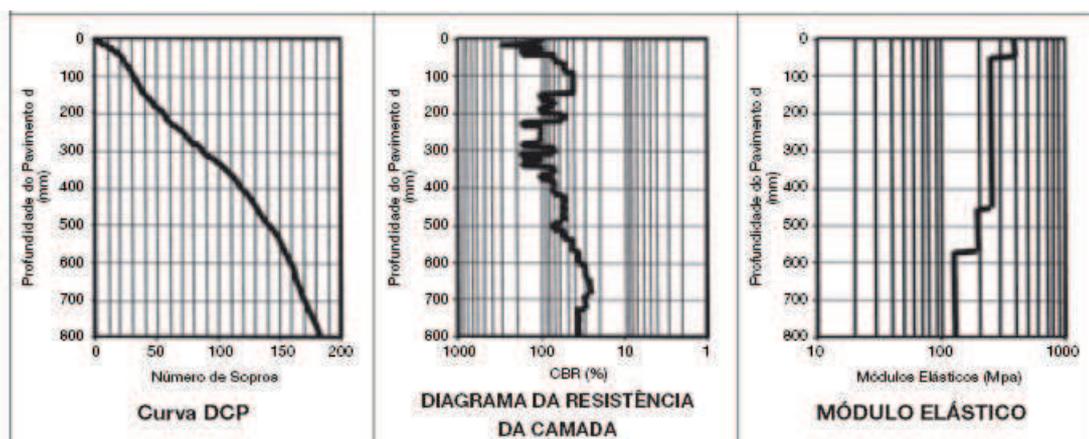
Figura 25 – Desenho esquemático do equipamento DCP

PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE								
Planilha de Dados								
Local:					Camada:			
Estaca:					Operador:			
Posição:					Data:			
Nº de Golpes	Leitura (mm)	Penetração (mm)	Nº de Golpes	Leitura (mm)	Penetração (mm)	Nº de Golpes	Leitura (mm)	Penetração (mm)
0	125	0	110	400	275	166	691	566
10	150	25	120	428	303	169	766	641
20	173	48	125	450	325	171	818	693
30	201	76	130	474	349	172	844	719
40	225	100	135	494	369	173	870	745
50	253	128	140	519	394	174	896	771
60	274	149	145	538	413	175	922	797
70	300	175	150	560	435			
80	321	196	155	585	460			
90	347	222	160	604	479			
100	375	250	163	637	512			

Fonte: Lima (2000), p.

Figura 26 – Exemplo de planilha de ensaio DCP

Os resultados de uma investigação com DCP são úteis para indicar a espessura das camadas com resistência uniforme dentro da estrutura do pavimento. Programas de computador estão disponíveis para analisar os dados de penetração e indicar CBR, UCS (resistência à compressão não-confinada), espessura da camada e módulos elásticos *in-situ*, conforme mostra a Figura 27.



Fonte: Wirtgen (2004), cap.3, p.53

Figura 27 – Análise típica do DCP

De acordo com o Saskatchewan Highways and Transportation – SHT (1992), se a taxa de penetração for abaixo de 20mm/golpe, a frequência das leituras pode ser diminuída para:

- uma para cada dois golpes com leituras entre 10-20 mm;
- uma para cada cinco golpes com leituras entre 5-9 mm;
- uma para cada dez golpes com leituras entre 2-4 mm;
- Penetração com profundidades menores que 1 mm e excedidos 20 golpes é considerada como recusada.

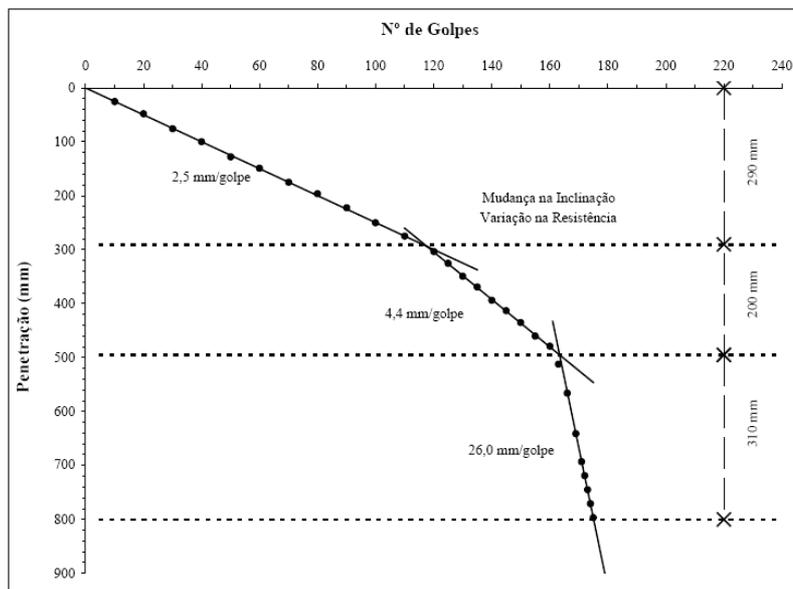
Segundo estudo realizado pelo TRL (2004), para camadas de bases granulares de boa qualidade, leituras a cada 5 ou 10 golpes são normalmente satisfatórias, porém, para camadas de sub-base ou subleito construídas por material de baixa resistência, leituras a cada 1 ou 2 golpes demandam melhores resultados.

Lima (2000), destaca a dificuldade de penetração que pode ser encontrada em pontos localizados, tais como, em materiais granulares constituídos por agregados de grandes dimensões, camadas fortemente estabilizadas ou camadas de solo muito ressecadas.

Contudo na pesquisa feita pelo TRL (2004), pondera-se que o DCP desenvolvido por este órgão foi projetado para penetrar inclusive materiais muito resistentes e que valores de penetração de 0,5 mm/golpe são aceitáveis, mas se após 20 golpes consecutivos não for verificado a penetração da haste, poderá assumir-se que o equipamento é inadequado para o material em questão.

O autor destaca ainda que o DCP pode atravessar TSS ou TSD, porém recomenda-se que as camadas betuminosas sejam removidas anteriormente ao ensaio.

Concluído o ensaio, após a haste ter penetrado até a profundidade que se pretendia ensaiar, o equipamento é removido do pavimento através de golpeamento do martelo em sentido contrário, ou seja, de baixo para cima, batendo no punho. Finalmente, traça-se um gráfico que apresenta “Posição da Haste *versus* Número de Golpes” que permite obter o índice de penetração da haste (Figura 28). A curva DCP representa o número de golpes acumulado para a penetração do equipamento com a profundidade.



Fonte: Lima (2000), p 33.

Figura 28 – Exemplo de curva DCP

Como indicado na figura acima, os pontos gerados no ensaio são utilizados para a definição de resistências à penetração com a profundidade, expressa pelo parâmetro DCP (penetração média em mm/golpe).

Quanto maior a inclinação, em mm/golpe, menor será a resistência da camada avaliada. Mudanças significativas dessas derivadas indicam a transição de uma camada para outra, de modo que o ensaio se presta também à identificação das espessuras das camadas de uma estratigrafia. (LIMA, 2000).

Segundo o mesmo autor, a mudança na inclinação desses segmentos indica alteração da resistência do material, o qual pode ocorrer em função de fatores como variação no teor de umidade, mudança no estado de compactação da camada, mudança de camada e outros. A diferença de cota (profundidade) entre duas mudanças de inclinação representa a espessura efetiva da camada atravessada.

As leituras podem ser realizadas de três formas:

- Leitura após cada golpe do martelo;
- Leitura após um conjunto de golpes dados; e
- Leitura em incrementos de penetração.

Leituras de incremento foram realizadas pelo TRRL (1989-a) e pelo Department of Main Roads (1976), com ensaios executados a 10 e 25mm respectivamente. Na prática, no entanto, é usualmente mais fácil tomarem-se leituras após cada golpe do martelo ou após um conjunto de golpes dados.

Segundo Kleyn (1975), o equipamento DCP pode ser usado em materiais cimentados e brita (diâmetro máximo de 75 mm) e que leituras entre 0,3 e 1,0 mm/golpe são ainda aceitáveis.

Lima (2000), destaca ainda que a determinação simples e pura das resistências relativas, em milímetros de penetração por golpe, entre as camadas de uma estrutura de pavimento é necessária, mas não suficiente para o processo de caracterização da capacidade de suporte, em termos de CBR. Está claro, portanto, que a utilização do DCP estará fortemente condicionada ao estabelecimento de correlações confiáveis entre os índices de penetração advindos do ensaio DCP e parâmetros de resistência ou de deformabilidade aplicáveis no projeto e avaliação de obras viárias.

O Departamento de Transportes de Minnessota (Mn/DOT), em 2006, conduziu um estudo que visava a melhoria de especificações para a controle da qualidade de bases granulares. Dentre alguns aspectos, o Mn/DOT destaca que há muitos anos o controle de qualidade, de construção de bases, tem sido feito comparando as densidades dos solos através de ensaios de compactação e cone de areia. De acordo com o estudo, os engenheiros deveriam estar melhor equipados para adaptar projetos de pavimentos para diferentes locais, métodos construtivos e outras inovações. Pensando nestas possibilidades, construtoras em todo o mundo, tem desenvolvido testes para medir os valores de resistência e rigidez, particularmente, módulo de Young, de materiais compactados. Estes artifícios usam diversos métodos para calcular os valores dos módulos. Alguns, como o *Light Weight Deflectometer* (LWD) e o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), usam cargas para obter uma resposta do solo ao carregamento. Além de outros equipamentos, como o *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) e o *Rapid Compaction Control Device* (RCCD), que penetram um cone no solo para produzir uma força cisalhante.

O Mn/DOT tem usado o DCP para avaliar a resistência de bases, desde a criação de uma especificação em 1997. Particularmente, a especificação não inseriu os efeitos da umidade e da granulometria do material. Um artigo de Matthew Oman, concluiu que mais de 19% das bases granulares conhecidas e baseadas nas exigências da especificação de 1997, eram inadequadas devido a grande parte desses efeitos.

Para tanto, o Mn/DOT's Office Materials, conduziu uma série de testes de DCP controlados em laboratório, como parte do LRRB Investigation 829, para avaliar a

especificação de Oman 2004, modificada para materiais granulares e também, para estabelecer uma especificação semelhante para o equipamento LWD. De acordo com Mn/DOT (2006), estudo envolveu a preparação de amostras de materiais granulares, variando a umidade e a densidade. Os instrumentos, usados no estudo, para medir as propriedades mecânicas do solo foram o DCP e o LWD. O DCP usa a força de impacto de um peso de ponta cônica em solo compactado. O LWD, conforme pode ser visto na Figura 29, é um dispositivo que permite obter a resposta de um solo à queda de um peso sobre uma placa que fica apoiada na camada a ser testada. Uma célula de carga, dentro do equipamento, mede o histórico de tempo do pulso de carga e um geofone, preso na placa, mede o deslocamento do solo. Estes históricos são automaticamente exportados para um sistema de aquisição de dados onde, a carga de pico e os valores de deslocamentos são usados para calcular os módulos.

Uma vez que a transmissão no sistema de aquisição de dados esta pronta, o peso é levado em posição. A haste da guia deve ser segurada firme, o peso é, então, liberado apertando-se a alavanca e o botão de segurança na manivela do LWD. O procedimento do teste pede três quedas do peso para cada altura de queda (25 cm, 50 cm e 75 cm) para produzir os dados do teste.

Segundo Mn/DOT (2006), muitos grupos de pesquisa têm proposto várias correlações entre DPI e o Módulo de Young. Infelizmente, nenhuma das relações propostas tem sido aceitas como padrão nos Estados Unidos. CSIR Transportek, uma organização de pesquisa da África do Sul, que contribui no desenvolvimento da tecnologia do DCP, obteve uma das equações, mais rigorosamente testadas. No início de 1990, engenheiros do CSIR usaram uma variedade de estratégias para fazer medidas estáticas e dinâmicas de uma seção de pavimento altamente instrumentada. Estes valores de módulos foram correlacionados com valores de DPI e a seguinte correlação foi derivada:

$$E = 10^{3,04758 - [1,061661 \log(DPI)]} \quad (13)$$

Onde:

E = Módulo de Young (MPa)

DPI = Índice de penetração (mm/golpe)

A equação 13 possibilita estimar os módulos de algumas camadas de solo, conhecendo somente o valor médio de DPI.



Fonte: Mn/DOT (2006), p 12.

Figura 29 – Ensaio LWD e equipamento LWD

2.10.2 Ensaio CBR

Segundo o DNER (2006), até a década de 70, os métodos de dimensionamento usualmente empregados no Brasil caracterizavam-se por focar, basicamente, a capacidade de suporte dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, retratada através do valor de CBR.

De acordo com Rodrigues (2003), o método CBR foi adotado em diversos países, tendo sido adaptado na Inglaterra com base no desempenho observado em rodovias em serviço e é utilizado até hoje para a definição das espessuras das camadas que compõem a fundação do pavimento. A determinação do CBR, que é calculado por:

$$CBR = 100 \times \frac{P_1}{P_0} \quad (14)$$

onde P_1 é a pressão correspondente à penetração de 0,1” (2,54 mm) e a pressão de referência (associada a uma Brita Graduada padronizada) é $P_0 = 70 \text{ kgf/cm}^2$.

No entanto, segundo DNER (2006), observa-se que boa parte da malha rodoviária vinha apresentando uma deterioração prematura que era atribuída à fadiga dos materiais gerada pela contínua ação dinâmica do tráfego atuante. Esta realidade acabou por dar ensejo à introdução, no país, de estudos de resiliência dos materiais empregáveis em pavimentos.

Tal metodologia resultou na possibilidade de analisar e prever estados de tensão - deformação de estruturas de pavimentos através de programas computacionais, partindo-se de

propriedades dinâmicas expressáveis em termos de valores de módulo resiliente. O módulo resiliente é determinado pela seguinte equação:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (14)$$

Onde:

M_R = Módulo de deformação resiliente

σ_d = tensão-desvio aplicada repetidamente

ε_r = deformação específica axial resiliente correspondente a um número particular de repetição da tensão-desvio.

As deformações resilientes são deformações elásticas, no sentido que são recuperáveis. Entretanto, não variam necessariamente de modo linear com as tensões aplicadas e dependem de vários fatores que não são considerados no conceito convencional de elasticidade.

O manual de pavimentação do DNER (2006), destaca alguns fatores que afetam o módulo resiliente dos solos granulares:

- Número de repetição da tensão-desvio;
- Histórico de tensões;
- Duração e frequência do carregamento;
- Nível de tensão aplicada;

Rodrigues (2003), destaca que diversas tentativas foram feitas no sentido de se estimar o módulo de resiliência a partir do CBR, podendo-se citar:

- Shell (para $CBR < 15$): $M_R = 10CBR$ (MPa) (15)

- Powell et al. (1984): $M_R = 17,6CBR^{0,64}$ (MPa) (16)

Deve-se observar, segundo o autor, que o módulo de resiliência não é uma função simples do CBR, mas depende do tipo de solo e da tensão-desvio aplicada. O fator 10, da fórmula da Shell, é apenas um valor médio havendo uma dispersão entre 4 e 25. Também, para os materiais granulares não existe uma correlação entre M_R e CBR. Correlações desta natureza devem ser aplicadas apenas em ante-projetos ou no projeto de obras de pequeno porte.

Ainda, conforme Rodrigues (2003), a avaliação estrutural de um pavimento pode ser efetuada através da seguinte seqüência:

- Determinação dos módulos de elasticidade da camada granular (base e sub-base) e do sistema reforço/subleito (E2 e E3, respectivamente), através da deflexão máxima (D_0) e do raio de curvatura (RC) medidos com a viga Benkelman;
- Estimativa do CBR *in situ* da camada granular e dos solos de reforço/subleito, por meio da relação:

$$CBR = \frac{E_i}{K_i} \quad (17)$$

onde os valores de K_i são calculados com base nos valores de CBR e de módulo de resiliência medidos em laboratório. Valores entre 60 e 200 têm sido encontrados para K_i (unidades em kgf/cm²) pela aplicação deste procedimento, para o caso de solos de subleito.

Valores típicos para os parâmetros de resiliência de solos e materiais granulares são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros típicos para solos e materiais granulares (Rodrigues, 2003)

$$M_R = K_1 \theta^{K_2}$$

Material	K_1 (psi)	K_2	M_R médio (kgf/cm ²)	CBR típico
BG (camada única)	6000	0,50	1700	80
BG ($h_2 > 24$ cm)	7060	0,50	2000	100
BG (sobre sub-base de CBR > 50)	8825	0,50	2500	125
Macadame Seco (Rachão)	-	-	-	-
$h_3 = 15$ cm			700	
$h_3 = 19$ cm			1200	
$h_3 = 32$ cm			2600	
GW	4500	0,55	1600	70
GP	2000	0,60	850	45
GU	1000	0,75	670	37
GM	2000	0,60	850	60
GC	3200	0,50	1000	30
SW	4000	0,40	930	30
SP	2100	0,50	660	20
SU	700	0,80	540	15
SM	2000	0,60	850	30
SC	6350	0,35	1280	15
ML	6685	0,00	470	10

3 MÉTODOS E MATERIAIS

3.1 Métodos e técnicas utilizados

Neste capítulo apresenta-se a metodologia adotada para a realização deste trabalho. Na figura 30 apresentam-se elementos e caminhos adotados na execução do estudo.

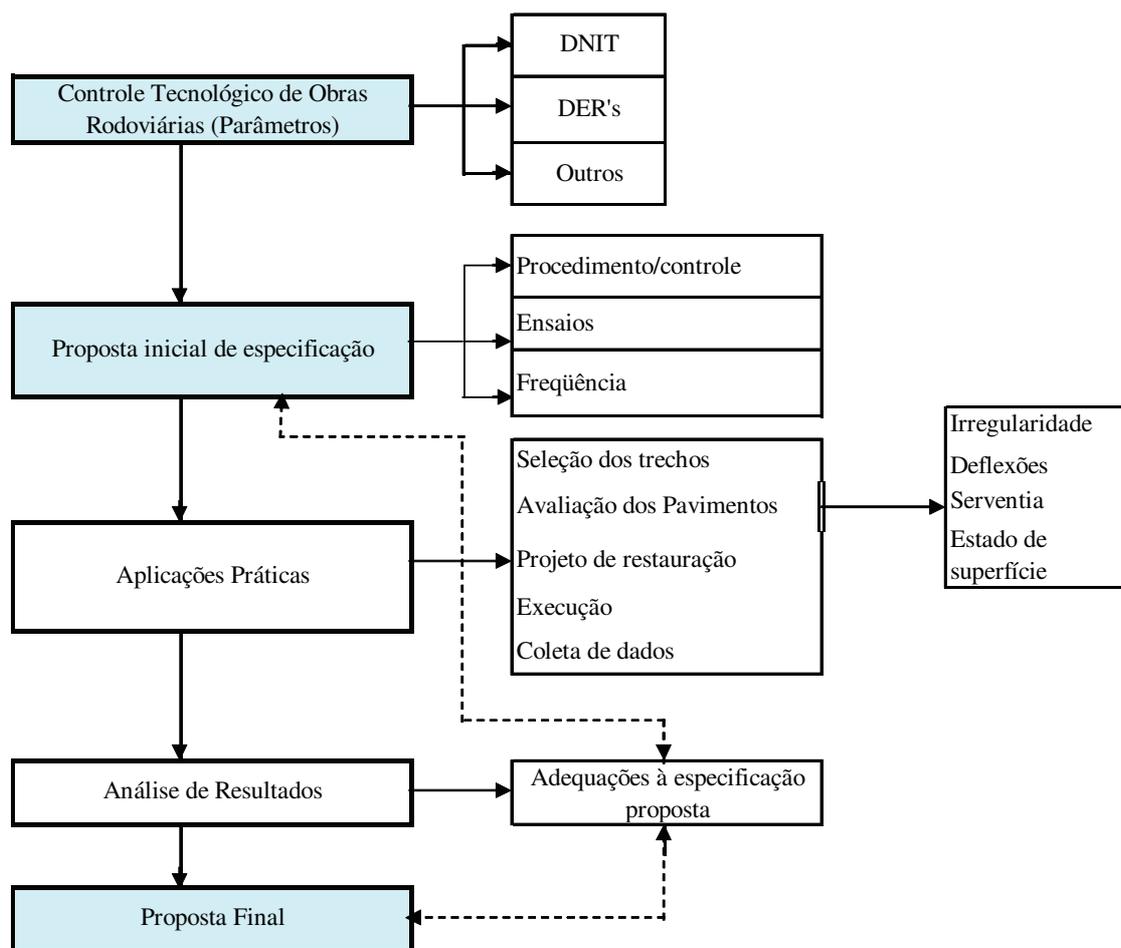


Figura 30 – Etapas para execução do trabalho

A necessidade de se buscar a garantia de qualidade para as obras de reciclagem de pavimentos requer o estabelecimento de critérios para aceitação da mesma.

Nesse sentido, num primeiro momento foram identificados os parâmetros que asseguram o desempenho de pavimentos cuja base granular tenha sido reciclada. Sabe-se que no Brasil as Especificações Técnicas (ET) ou Especificações de Serviço (ES) se preocupam, no caso de pavimentos novos, com os elementos principais citados no item 2.10.

Os DER's (Departamento de Estradas de Rodagem) estaduais estão inseridos de forma notável na área de pesquisas, para o desenvolvimento de novas tecnologias aplicáveis à pavimentação rodoviária. Desta forma, foi feita uma investigação nos principais DER's brasileiros (Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) para verificar se existem estudos sendo desenvolvidos envolvendo a reciclagem de pavimentos, bem como, as técnicas e procedimentos adotados por estes órgãos na recuperação e manutenção de suas rodovias. Dentre os DER's pesquisados apenas o Estado Paraná possui Especificação de Serviço para reciclagem de base granular – DER/PR-ES-P 34/05 (Pavimentação: Reciclagem de Pavimento “in situ” com Estabilização Granulométrica).

Antes de partir para a elaboração da proposta de especificação fez-se a coleta de todos os dados relevantes e pertinentes, referentes aos pavimentos que seriam restaurados. Tais como, valores de irregularidades (QI), Deflexões (através do FWD – Failing Weight Deflectometer), PSR (Present Serviceability Ratio) e PSI (Present Serviceability Index), os quais foram obtidos pelo DAER/RS (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul). Além disso, foram coletados dados como tráfego atuante, condições do pavimento, idade e estrutura do pavimento entre outros, referentes aos trechos determinados para o estudo.

De posse dos dados de avaliação dos pavimentos, passou-se à escolha dos trechos que fariam parte do estudo. Estes representam uma malha de 381,65 quilômetros dividida em 32 trechos, sendo que destes, 60% serão restaurados utilizando a técnica da reciclagem *in situ* da base granular. Tais rodovias integram o Lote 1 do Programa de Restauração em andamento no norte do RS – CREMA. Os trechos rodoviários a serem restaurados estão apresentados na Tabela 7.

O Programa CREMA é a ação do DAER/RS para promover a restauração da rede pavimentada do Estado do Rio Grande do Sul e sua manutenção, através de contratos de gestão com empresas privadas, de modo a atender as metas físicas do Programa de Gerenciamento de Rodovias do RS. Este Programa coloca em prática o atual modelo administrativo e gerencial no que se refere à aplicação de investimentos e resultados positivos

para a conservação do patrimônio público em 5 anos, conforme informações do DAER/RS (2006).

O CREMA I constitui-se de sete lotes, os quais estão descritos na Tabela 6 juntamente com os nove lotes pertencentes ao CREMA II. O mapa localizando os lotes pode ser visto na Figura 31.

Tabela 6 – Lotes pertencentes ao CREMA I E II, (DAER, 2005)

CREMA	LOTE	Região	Extensão (Km)
I	1	Erechim	381,65
I	2	Passo Fundo	283,99
I	3	Palmeira das Missões	452,20
I	4	Santa Rosa	308,99
I	5	Santiago	262,55
I	6	Cruz alta	328,34
I	7	Bento Gonçalves	468,30
II	8	Sta Cruz do Sul, Passo Fundo	344,05
II	9	Sta Maria, Bagé e Cachoeira do Sul	374,22
II	10	Sta cruz do Sul, Cachoeira do Sul	410,70
II	11	Osório	344,46
II	12	Esteio, São Francisco de Paula	360,54
II	13	Lajeado	388,53
II	14	Sta Cruz do Sul, Pelotas	266,17
II	15	Sta Maria, Alegrete	304,15



Fonte: DAER (2005)

Figura 31 – Mapa de localização dos Lotes

Tabela 7 – Trechos rodoviários a serem restaurados, (DAER, 2005)

Trecho	Rodovia	Trechos	Ext.(km)
TR01	RS/126	Entr. BR/285(B) (Lagoa Vermelha) – Entr. RS/467 (Três Porteiras)	27,90
TR02	RS/126	Entr. RS/467 (Três Porteiras) – Entr. RS/343 (Sananduva)	9.84
TR03	RS/126	Entr. RS/343 (Sananduva) – Entr.RS/475 (p/Getúlio Vargas)	2.90
TR04	RS/126	Entr.RS/475 (p/Getúlio Vargas) - São João da Urtiga	14.69
TR05	RS/126	São João da Urtiga – Entr. RS/477 (P/ Paim Filho)	14.87
TR06	RS/126	Entr. RS/477 (P/ Paim Filho) – Entr. RS/208 (Maximiliano de Almeida)	9.69
TR07	RS/126	Marcelino Ramos (Águas Termais) – Entr. RS/331/491	5.39
TR08	RS/211	Campinas do Sul – Jacutinga	8.36
TR09	RS/211	Jacutinga – Entr. BR/153/480(A)(Erechim)	28.87
TR11	RS/331	Entr. BR/153 (p/Erechim) – Gaurama	15.38
TR12	RS/331	Gaurama – Viadutos	9.45
TR13	RS/331	Viadutos – Pinhalzinho	8.60
TR14	RS/331	Pinhalzinho - Entr. RS/126/491 (Marcelino Ramos)	15.65
TR15	RS/343	Entr. BR/470/RS/208(Barracão) – Entr. RS/442/477(A) (São José do Ouro)	19.57
TR16	RS/343	Entr. RS/442/477(A) (São José do Ouro) – Entr. RS/477(B) (Cacique Double)	7.59
TR17	RS/343	Entr. RS/477(B) (Cacique Double) – Entr. RS/126 (Sananduva)	32.01
TR18	RS/420	Entr. RS/331(Erechim) – Aratiba	34.00
TR19	RS/426	Severiano de Almeida – Entr. BR/153(p/Erechim)	5.32
TR20	RS/467	Entr. RS/430 (Tapejara) – Entr. RS/463 (Tapejara) (Contorno)	1.23
TR21	RS/467	Entr. RS/463 (Tapejara) (Contorno) - Ibiaçá (Acesso Oeste)	14.87
TR22	RS/467	Ibiaçá(Acesso Leste)(Contorno) – Entr. RS/126 (Três Porteiras)	8.82
TR23	RS/469	Entr. BR/153/RS/475 (p/Erechim) – Ipiranga do Sul	4.77
TR24	RS/475	Estação – Entr. VRS/328 (p/Erebango)	3.18
TR25	RS/475	Entr. VRS/328 (p/Erebango) – Entr. BR/153/RS/469 (p/Erechim)	11.68
TR26	RS/477	Entr. RS/126(p/Maximiliano de Almeida) – Paim Filho	2.73
TR27	RST/470	Div. RS/SC(Rio Pelotas) – Entr. RS/208/343(Barracão)	9.74
TR28	RST/480	Entr. RS/406(Goio En) – Erval Grande;	20.08
TR29	RST/480	Ervál Grande – Entr. RS/487(p/Faxinalzinho)	16.25
TR30	RST/480	Entr. RS/487(p/Faxinalzinho) – São Valentim	6.17
TR31	VRS/328	Entr. RS/475(Estação) – Erebangó	3.11
TR32	VRS/802	Entr. RS/135 – Áurea	6.35

Dentre estes trechos e de acordo com o cronograma de execução das obras foram selecionados alguns segmentos para aplicação dos critérios propostos, os quais incluem o processo de reciclagem.

Os trechos a serem incluídos no estudo são os abaixo citados, suas características encontram-se apresentadas na Tabela 8 e sua localização pode ser vista na Figura 36.

1. *Trecho 01*: ERS 126 (0020) - Entrada BR/285 (B) (Lagoa Vermelha) – Entrada RS/467 (Três Porteiras). Este trecho apresenta pavimento construído em 1987 com revestimento em Pré-misturado a frio (PMF) e se encontra sob um nível de tráfego médio. Os defeitos de superfície presentes no pavimento podem ser vistos na Figura 32.



Figura 32 – Trecho TR01

2. *Trecho 02*: ERS 126 (0030): Entrada RS/467 (Três Porteiras) – Entrada RS/343 (Sananduva). O histórico e a estrutura do pavimento do TR02 são os mesmos do trecho TR01, mas o nível de tráfego é mais intenso e um pouco mais pesado. A condição geral do pavimento é, contudo, um pouco melhor conforme pode ser visto na Figura 33. O estado de superfície revela um pavimento em deterioração moderada, com predominância de trincas, desgaste e remendos.



Figura 33 – Trecho TR02

3. *Trecho 21*: ERS 467 (0020): Entrada RS/463 (Tapejara) – (Ibiaçá - Acesso Oeste). No trecho TR21 o pavimento está submetido a tráfego médio, tem revestimento de PMF + Lama Asfáltica e foi implantado em 1993. O estado de superfície revela também um

pavimento bastante deteriorado, com trincas, panelas, remendos, desgaste e afundamentos em trilha de roda (ver Figura 34).



Figura 34 – Trecho TR21

4. *Trecho 22*: ERS 467 (0030): Ibiacá (Acesso Leste) – Três Porteiras (Entrada RS/126). As características do trecho anterior se repetem aqui no trecho TR22, com a diferença de o pavimento estar mais deteriorado. Isso pode ser observado na Figura 35.



Figura 35 – Trecho TR22

Tabela 8 – Características dos trechos a serem analisados

Trecho/ Rodovia	Extensão (km)	VDM	Faixas de tráfego	Idade Pavimento (anos)	Estrutura (cm)	Atividade/ espessura (m)
01	27,96	1920	2	19	5,0 PMF 37,0 BG	Reciclagem base/0,20
02	9,84	2627	2	19	5,0 PMF 17,0 BG 20,0 Rachão	Reciclagem base/0,20
21	14,87	1798	2	13	5,0 PMF+LA 33,0 BG	Reciclagem base/0,20
22	8,82	1701	2	15	5,0 PMF+LA 33,0 BG	Reciclagem base/0,20

Onde: VDM: Volume Médio Diário; PMF: Pré Misturado a Frio; BG: Brita Graduada; LA: Lama asfáltica



Figura 36 – Mapa de situação

Em seguida, foi elaborada uma metodologia aplicável ao controle tecnológico de obras de restauração de pavimentos através da reciclagem *in situ* da base granular. Os seguintes elementos de controle foram incluídos:

- Ensaio DCP;
- Ensaio CBR;
- Granulometria;
- Equivalente de areia;
- Densidade *in situ*.

Os procedimentos para coleta dos dados no campo (intervalo/frequência) estão apresentados no capítulo V desta dissertação.

A etapa posterior está baseada na investigação da aplicabilidade dos critérios propostos inicialmente. Os procedimentos propostos foram aplicados em situações de obras de restauração de algumas rodovias do Rio Grande do Sul, conforme os trechos indicados na Tabela 7 citada anteriormente.

4 AVALIAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DAS SOLUÇÕES PARA RECICLAGEM

4.1 Avaliação dos pavimentos

Na fase de investigação, acerca da necessidade atual de manutenção de pavimentos, há que se fazer algumas análises do pavimento existente, verificar equipamentos disponíveis, coletar dados importantes como o tráfego atuante, estrutura existente, deflexões, irregularidades, tipos de defeitos e principalmente uma análise de todos os custos envolvidos na obra.

No caso do Lote 1, do Programa CREMA de Restauração de Rodovias do Rio Grande do Sul - foi realizada, pelo DAER, uma análise contemplando o uso de métodos convencionais de restauração de pavimentos flexíveis e também o possível uso da reciclagem de pavimentos incorporando o material do revestimento à base granular.

As análises que antecederam as obras de restauração dos pavimentos foram feitas pelo DAER e estão descritas em Alternativa Proposta para a Manutenção dos Pavimentos do Lote 01 do DAER/RS (2005). Estas análises envolveram a verificação de deflexões, irregularidade longitudinal e levantamento visual contínuo (LVC). A avaliação estrutural dos pavimentos foi feita com o FWD. As bacias de deflexões foram retro-analisadas através do programa Laymod4, descrito em Rodrigues (2003), para a obtenção dos módulos de elasticidade das camadas do revestimento (E1), base (E2) e subleito (E3), bem como para o cálculo do Número Estrutural (SN) da estrutura.

A importância de se incluir as avaliações realizadas nos pavimentos existentes, está no fato destas permitirem um melhor entendimento acerca do desempenho futuro dos pavimentos restaurados. A síntese dos resultados obtidos para os trechos em estudo está apresentada nas Figuras 37 a 44, que mostram que as deflexões e a irregularidade longitudinal e nas Tabelas

10 a 16 que apresentam os resultados obtidos com LVC (Levantamento Visual Contínuo), o qual inclui os defeitos presentes no pavimento dotado de sua extensão e severidade.

Primeiramente, os encarregados pela obra realizaram a análise do PSR do Guia da AASHTO (1986), seguido da análise da irregularidade, através do Bump Integrator que é um medidor de irregularidade do tipo resposta, totalmente informatizado e com grande precisão e repetibilidade, e das deflexões utilizando o Failing Weight Deflectometer (FWD). Além disso, ainda foram identificados os tipos de estrutura dos pavimentos e o tráfego atuante em cada um dos trechos.

O PSR, conforme definido no AASHTO Guide (1993), é um valor atribuído por um engenheiro avaliador, baseado na importância que os diversos tipos de defeitos e seus níveis de severidade tem para a condição estrutural e funcional do pavimento.

O PSI está relacionado, único e exclusivamente, ao conforto ao rolamento percebido pelo usuário trafegando na velocidade média da via.

Estas análises possibilitaram a elaboração de um diagnóstico, por parte da empresa responsável, acerca das condições funcionais e estruturais dos pavimentos, através da metodologia descrita abaixo.

A aplicação do modelo de previsão de desempenho foi feita, em primeiro lugar, calculando-se o PSI (serventia) atual do pavimento, ou seja, no ano-base, pelas fórmulas:

$$PSI = \frac{PSR + PSI_{IDS} + PSI_{QI}}{3} \quad (18)$$

Onde:

PSR = nota dada no campo pelo avaliador quando da realização do LVC (valor subjetivo)

PSI_{QI} = correlação entre o QI (Quarter Index) e o PSI (HDM-III)

PSI_{IDS} = correlação entre defeitos e serventia.

ou seja, ponderando-se três avaliações distintas: o registro visual subjetivo (PSR), o levantamento dos defeitos de superfície (PSI_{IDS}) e a avaliação objetiva através da leitura da irregularidade longitudinal (PSI_{QI}). Esta definição visa fazer com que o parâmetro básico que será o indicador da condição geral do pavimento seja reflexo, ao mesmo tempo, da percepção

do avaliador quanto ao estado global do pavimento, da extensão e severidade dos defeitos existentes e do conforto ao rolamento.

O parâmetro PSR_{IDS} é avaliado de acordo com a correlação (Pereira, 1979):

$$PSI_{IDS} = \frac{309,22 - 0,616 \times IDS}{61,844 + IDS} \quad (19)$$

onde o Índice de Defeitos de Superfície (IDS) é calculado da mesma forma e utilizando os mesmos fatores de ponderação do IGG (Índice de Gravidade Global, da norma DNIT PRO 006/2003).

Paterson (1987), concluiu que a evolução da irregularidade longitudinal com o tempo só poderia ser prevista como uma função da evolução dos demais defeitos.

$$PSI_{QI} = 5 \exp\left(\frac{-QI}{71,5}\right) \quad (20)$$

Em seguida, o modelo de previsão de desempenho foi aplicado a cada ano do período de análise na sua forma diferencial, conforme descrito em Rodrigues (2007). A fórmula abaixo é um modelo que pode ser aplicado para efeito de descrever a evolução do parâmetro PSI como tráfego acumulado N.

$$PSI(N) = 5 \left(\frac{PSI_o}{5} \right)^{e^{\alpha N}} \quad (21)$$

Nesta fórmula, o parâmetro α representa a velocidade com que ocorre a perda de serventia devido ao acúmulo de repetições das cargas de tráfego do eixo de 80 kN. O parâmetro α seria, ainda, o responsável pela inclusão no modelo das características estruturais do pavimento. O modelo do guia da AASHTO (1986) inclui os efeitos da capacidade estrutural do pavimento através do parâmetro SN, no caso dos pavimentos flexíveis.

A evolução da irregularidade foi determinada pela fórmula descrita abaixo, ao menos para as seções onde os dados abrangeram $\Delta IRI > 1\text{m/km}$:

$$IRI(N) = IRI_o e^{\alpha N} \quad (22)$$

Onde:

IRI_o = irregularidade do pavimento novo (m/km);

N = número acumulado de repetições do eixo padrão de 80 kN (milhões);

α = constante, função da estrutura do pavimento e das condições ambientais.

O modelo da AASHTO (1986), segundo Gonçalves (2004), não é muito adequado para descrever a curva PSI \times tempo, pode-se cogitar de utilizar a equação acima como modelo de previsão de desempenho. Quaisquer ajustes adicionais poderiam ser feitos através de um fator de calibração F_c da seguinte forma:

$$A = F_c \times \alpha_A \quad (23)$$

onde α_A é o valor de α requerido pela fórmula geral do modelo quando aplicada ao modelo da AASHTO. Neste caso:

$$\alpha_A = -\frac{1}{W_{18}} \ln \left(\frac{\ln \left(\frac{PSI_o}{5} \right)}{\ln \left(\frac{2,5}{5} \right)} \right) \quad (24)$$

onde, W_{18} é o tráfego acumulado requerido pelo modelo da AASHTO para $PSI = PSI_0 - PSI_t$, com $PSI_t = 2,5$. O valor de W_{18} é dado, de acordo com o Guia da AASHTO e no caso de pavimentos asfálticos, pelas fórmulas:

$$W_{18} = 10^{-6} \left[\frac{(SN + 1)}{1,05} \right]^{9,36} \left[\frac{PSI_0 - 2,5}{2,7} \right]^{\frac{1}{\beta}} \left[\frac{M_R}{3000 \text{ psi}} \right]^{2,32} \quad (25)$$

$$\beta = 0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}} \quad (26)$$

O procedimento adotado para se registrar os defeitos de superfície está descrito em Gonçalves et al. (2004), foi desenvolvido como uma síntese dos procedimentos utilizados por: PMS da CALTRANS, VIZIR do LCPC, DNER-PRO 08/94 e PCI do USACE. Em adição ao registro dos defeitos existentes, o avaliador atribuirá um conceito à condição geral do pavimento, utilizando a escala do PSR. A escala, quanto ao grau de deterioração do pavimento, a ser dada pelo avaliador está apresentada na Tabela 9.

Cada tipo de defeito registrado é categorizado em três níveis de severidade (1-aceitável, 2-tolerável, 3-intolerável), definidos em termos do grau de comprometimento da condição estrutural ou funcional. O nível 1 corresponde ao defeito em sua condição inicial de aparecimento. O nível 2 indica aumento da severidade e da extensão do defeito em velocidades significativas. O nível 3 está associado a um grau de severidade onde uma intervenção imediata se faz necessária a fim de evitar danos à estrutura do pavimento e ou ao usuário.

A cada registro de presença de um determinado tipo de defeito, na severidade que for predominante, dentro da área avaliada, deverá ser anotada a extensão com que este se manifesta, utilizando-se os seguintes níveis: A – alta, M – média e B – baixa.

Tabela 9 – Avaliação de serventia atual (Gonçalves, 2004)

PSR	Conceito	Condição Geral
4 - 5	Excelente	Pavimento, praticamente, isento de defeitos e com irregularidade perceptível na velocidade máxima do trecho em nível perfeitamente aceitável.
3 - 4	Bom	Presença de poucos defeitos, cuja extensão e severidade não afeta a condição funcional ou a condição estrutural do pavimento. A irregularidade longitudinal percebida pelo usuário trafegando na velocidade máxima do trecho pode ser qualificada como tolerável.
2 - 3	Regular	Pavimento pode requerer restauração, por estarem os defeitos existentes com níveis de extensão ou severidade capazes de afetar a condição estrutural e ou funcional do pavimento. O conforto ao rolamento percebido pelo usuário pode estar em níveis inaceitáveis.
1 - 2	Mau	Pavimento requer intervenção imediata.
0 - 1	Péssimo	Tráfego é prejudicado, tendo que reduzir velocidade devido à deterioração do pavimento. Riscos de segurança aos usuários.

Os defeitos considerados estão divididos em três categorias:

CATEGORIA 1: Trincamento

- Trincamento couro-de-crocodilo (CR)
- Trincamento em bloco (BL)
- Trincas transversais (TT)
- Trincas longitudinais (TL)
- Trincas de escorregamento (TE)
- Trincas de bordo (TB)

CATEGORIA 2: Desintegração

- Painelas (P)
- Desgaste (D)
 - Desagregação superficial (DS)
 - Erosão de bordo (ER)
- Bombeamento de finos (BF)
- Desplacamento de capa selante (DC)
- Remendos (R)

CATEGORIA 3: Deformações

- Afundamentos em trilha de roda (ATR)
- Corrugações (COR)
- Escorregamento de massa (EM)
- Depressões (DP)
- Expansão localizada (EL)

Todo o processo está consolidado em um programa de computador, denominado SGM (Sistema de Gerência da Manutenção), o qual permite gerar um grande número de estratégias alternativas para a alocação de recursos (Pinto et. Al, 2004). As estratégias geradas deveriam atender a expectativa de desempenho num período de cinco anos, conforme reivindicações associadas ao Lote 01.

No trecho TR01 as avaliações mostraram que as deflexões e a irregularidade longitudinal são moderadas. Os resultados podem ser verificados nas Figuras 37 e 38 e nas Tabelas 10 e 11.

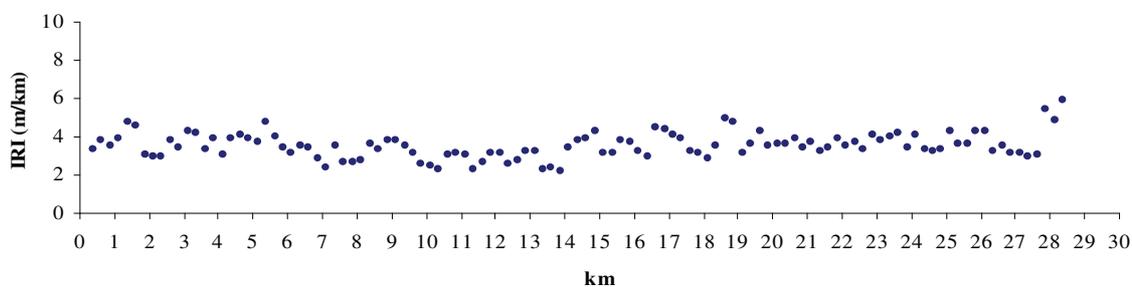


Figura 37 – Irregularidade no trecho TR01

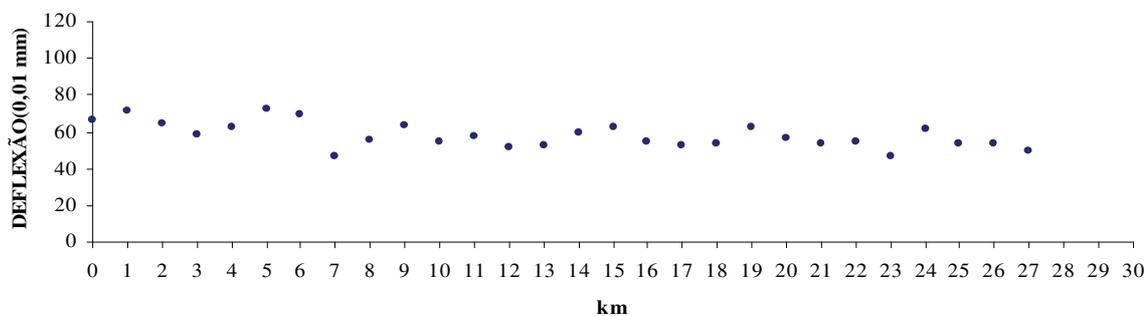


Figura 38 – Deflexões no trecho TR01

Tabela 10 – Estado de superfície na faixa de tráfego 1, (Projeto Executivo de Restauração dos pavimentos do LOTE I do DAER/RS, 2005)

STH	INICIO	FIM	PSR	CR	BL	TT	TL	TE	TB	P	D	DS	ER	BF	DC	R	ATR	COR	EM	DP	EL	PSR_ACOST	DEGRAU_CM	
1	0	1	2.3	M1							M2						M1						2	2
2	1	2	2.3	B2							M2					B2	M1	B1					2	2
3	2	3	2	B2							M2	M		M		M2							2	2
4	3	4	2.3	B1							M1	M											2	2
5	4	5	2	B2							M1						M1						1	2
6	5	6	2	M2							M1												2	2
7	6	7	2.7	B2							M1												2	2
8	7	8	2.5	B1							M1					B2							2	2
9	8	9	2.5	B2							M1												2	2
10	9	10	3								M1										B1		2	2
11	10	11	3	B1							M1												2	2
12	11	12	3	B1							M1												2.5	2
13	12	13	2.5	B1							M1												2	2
14	13	14	2	B2							M2												2	2
15	14	15	2.3	B2							B1	M2											2	2
16	15	16	2	B2							B1	M2	M				M1						2	2
17	16	17	2.3	M2							B1	M2	M				B1	B1					2	0
18	17	18	2	B2							B1	M1					M2	M2					2	2
19	18	19	2	B2							B1	M2				M2	M1						2	0
20	19	20	2	B1							M2						M1	M1					2	0
21	20	21	2.3	B2							M2	B				B2	M1						2	0
22	21	22	2	B2							M2					B2	M1	M2					2	0
23	22	23	2.3	M1							B2	M2				M2	M1				B2		2	0
24	23	24	2.3	B2							B1	M1				B2	M1						2	0
25	24	25	2	M2							B2	M2				B2		M1					2	0
26	25	26	2.3	B1							M2					B2							2	0
27	26	27	2.5	B1							M1												2	0
28	27	27.96	2	B2							M2					M2					B2		2	0

Tabela 11 – Estado de superfície na faixa de tráfego 2, (Projeto Executivo de Restauração dos pavimentos do LOTE I do DAER/RS, 2005)

STH	INICIO	FIM	PSR	CR	BL	TT	TL	TE	TB	P	D	DS	ER	BF	DC	R	ATR	COR	EM	DP	EL	PSR_ACOST	DEGRAU_CM	
1	0	1	2.3	M1							M2						B2	M1					2	2
2	1	2	2.5	B1							M1						B2						2	2
3	2	3	2.3	M1							M2							B1					2	2
4	3	4	2.5	B1							M1												2	2
5	4	5	2.3	B2							M1						B2						2	2
6	5	6	2	M2							B1	M1					M2						2	2
7	6	7	2.5	B1							M1						B2						2	2
8	7	8	2.5	B1							M1												2	2
9	8	9	2.3	B2							B1	M1					B2						2	2
10	9	10	3																				2	2
11	10	11	3	B1							M1								B2				2.5	2
12	11	12	2.7	B1							M1												2.5	2
13	12	13	2.5	B2							M2						B2	M1					2	2
14	13	14	2	B2							B1	M2	M				M2		B2				2	2
15	14	15	2.3	B2							B1	M2	M					M1					2	2
16	15	16	2.3	B2							B1	M2	M					M1	B2				2	0
17	16	17	2.2	B2							M2	M							M2				2	2
18	17	18	2	B2							B2	M2						M1	M2				2	2
19	18	19	2	B1							B1	M2	B					M1	M1				2	0
20	19	20	2	B2							M2	B					B2	M2					2	0
21	20	21	2.3	B2							M2	M						M1					2	0
22	21	22	2.3	B2							B1	M2	M				B2	M1					2	0
23	22	23	2.3	B1							B1	M1	M				M2	M1	M1				2	0
24	23	24	2.3	B2							M2	M					B2	M1					2	0
25	24	25	2.3	M2							B1	M2					M2						2	0
26	25	26	2.3	B1							M2						M2	M1					2	0
27	26	27	2.3	B1							M2										B2		2	0
28	27	27.96	2	B2							B1	M2					M2				B2		2	0

Tabela 13 – Estado de superfície na faixa de tráfego 2, (Projeto Executivo de Restauração dos pavimentos do LOTE I do DAER/RS, 2005)

STH	INICIO	FIM	PSR	CR	BL	TT	TL	TE	TB	P	D	DS	ER	BF	DC	R	ATR	COR	EM	DP	EL	PSR_ACOST	DEGRAU_CM	
100	0	1	2.5	B1							M1												2	2
101	1	2	3	B1																			2	2
102	2	3	2	B2							M1					M2							2	2
103	3	4	2	M2							B1	M2					A2						2	2
104	4	5	3	M1																			2	2
105	5	6	2	M2							M2							M1					2	2
106	6	7	2.5	M2							B1	M2					B1	M1					2	2
107	7	8	2.7	M1							M1												3	0
108	8	9	2.7	M1							M1												3	0
109	9	9.84	2	M2							M2												3	0

No trecho TR21, a irregularidade longitudinal, conforme exposto nas Figuras 41 e 42 varia de moderada a elevada demais para o tráfego atuante, as deflexões do pavimento são baixas. A camada de base granular apresenta também uma boa condição estrutural. Nas Tabelas 14 e 15 estão apresentados os dados do LVC.

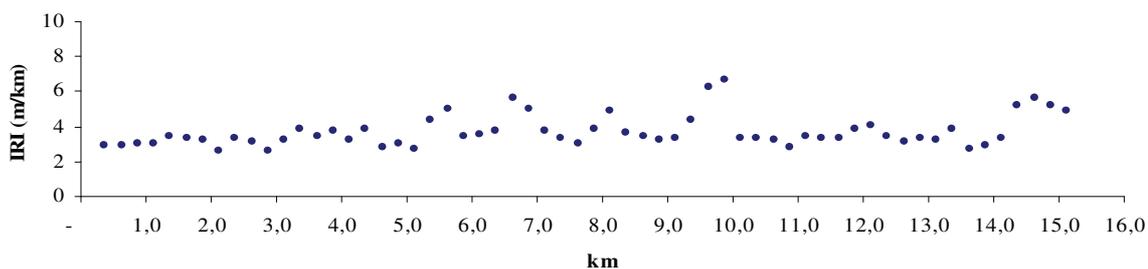


Figura 41 – Irregularidade no trecho TR21

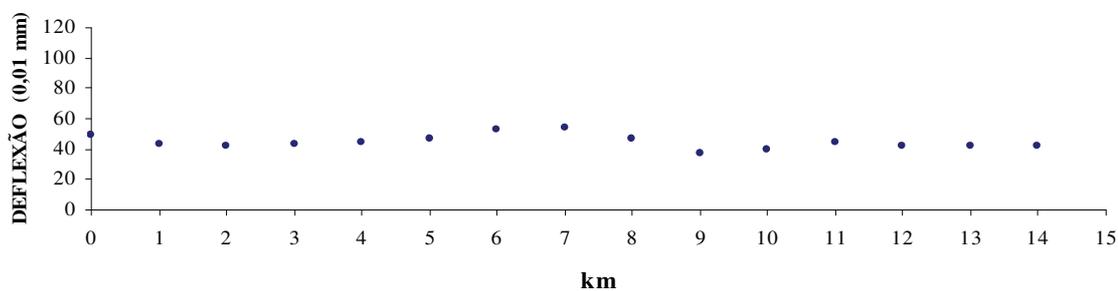


Figura 42 – Deflexões no trecho TR21

Tabela 14 – Estado de superfície na faixa de tráfego 1, (Projeto Executivo de Restauração dos pavimentos do LOTE I do DAER/RS, 2005)

STH	INICIO	FIM	PSR	CR	BL	TT	TL	TE	TB	P	D	DS	ER	BF	DC	R	ATR	COR	EM	DP	EL	PSR_ACOST	DEGRAU_CM
2000	0	1	2.5	M1							M1					B1	B1						
2001	1	2	2.3	M1							M2												
2002	2	3	2.3	M1							M2	B											
2003	3	4	2	B1							M2	B				B1	B1						
2004	4	5	2	B2						B2	M2	M				B2							
2005	5	6	2	M2						M1	M2					M1							
2006	6	7	2	M2							M2					B2							
2007	7	8	2	M1						B1	M2	B				B2	B1						
2008	8	9	2	M2							M2	B											
2009	9	10	1.5	M2						M1	M2	M				B2							
2010	10	11	2	M2						B1	M2					B2							
2011	11	12	2	M2						B1	M2					B2	B1						
2012	12	13	2	M2							M2												
2013	13	14	1.5	M2						M1	M2	B				M2							
2014	14	14.87	1.5	A2							M2					M2	B2						

Tabela 15 – Estado de superfície na faixa de tráfego 2, (Projeto Executivo de Restauração dos pavimentos do LOTE I do DAER/RS, 2005)

STH	INICIO	FIM	PSR	CR	BL	TT	TL	TE	TB	P	D	DS	ER	BF	DC	R	ATR	COR	EM	DP	EL	PSR_ACOST	DEGRAU_CM
2000	0	1	2.5	B1							M1						B1						
2001	1	2	2.3	M1						B1	M2					B1							
2002	2	3	2	M1						B1	M2	B				B1							
2003	3	4	2	B1							M2	M				B2							
2004	4	5	2	B1						B1	M2	B				B1							
2005	5	6	2	M2						M1	M2						M1						
2006	6	7	2	M2							M2					B2							
2007	7	8	2	M1						B1	M2					B2	M1						
2008	8	9	2	M2							M2						M1						
2009	9	10	1.5	M2						M1	M2	M				B2	M1						
2010	10	11	2.3	M1						B1	M2					B2							
2011	11	12	2	M2							M2					B1							
2012	12	13	2	M2						B1	M2					M2							
2013	13	14	1.5	M2							M2	B				B1							
2014	14	14.87	1.5	A2						B1	M2	B				M2	B2						

O trecho TR22 seguindo os mesmos critérios de avaliação teve sua extensão também avaliada e os respectivos resultados estão apresentados nas Figuras 43 e 44 e nas Tabelas 16 e 17. O estado de superfície revela também um pavimento bastante deteriorado, com trincas, panelas, remendos, desagregação superficial e afundamentos em trilha de roda.

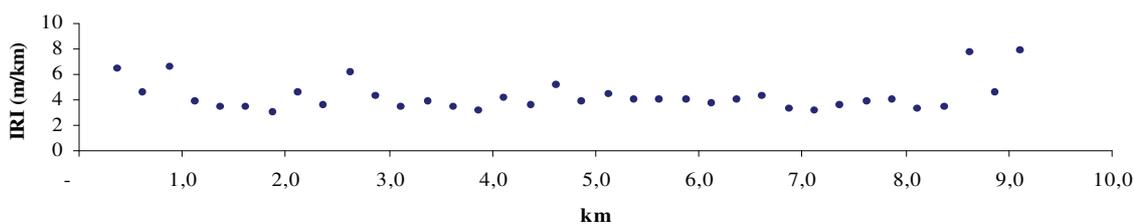


Figura 43 – Irregularidade no trecho TR22

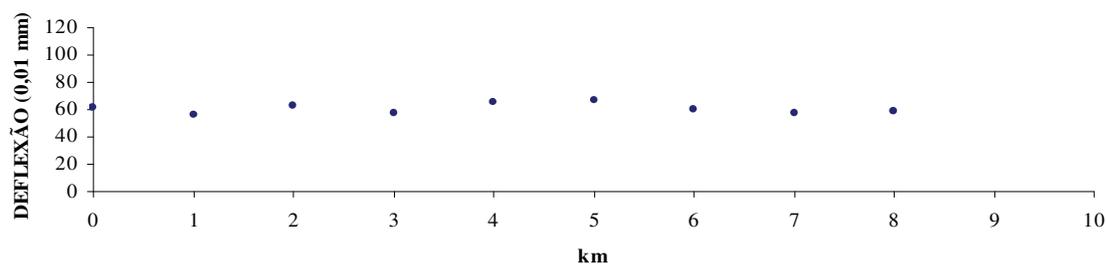


Figura 44 – Deflexões no trecho TR22

Tabela 16 – Estado de superfície na faixa de tráfego 1, (Projeto Executivo de Restauração dos pavimentos do LOTE I do DAER/RS, 2005)

STH	INICIO	FIM	PSR	CR	BL	TT	TL	TE	TB	P	D	DS	ER	BF	DC	R	ATR	COR	EM	DP	EL	PSR_ACOST	DEGRAU_CM
2100	0	1	1	M3						B1	M2	A				M2	M1						
2101	1	2	1	M2						B1	M2	A				B2	M1						
2102	2	3	1	M3						M1	M2	A				B2	M1						
2103	3	4	1	M3						B1	M2	A				B2	M1						
2104	4	5	1	M3						M1	M2	A				B2	M1						
2105	5	6	1.5	M2						B2	M2	A				B2	M1						
2106	6	7	1	M2						B1	M2	A				B2	M1						
2107	7	8	0.5	A3						A2	M2	A				M2	B3				B3		
2108	8	8.82	1	M3							M2	A				B2	B3				B3		

Tabela 17 – Estado de superfície na faixa de tráfego 2, (Projeto Executivo de Restauração dos pavimentos do LOTE I do DAER/RS, 2005)

STH	INICIO	FIM	PSR	CR	BL	TT	TL	TE	TB	P	D	DS	ER	BF	DC	R	ATR	COR	EM	DP	EL	PSR_ACOST	DEGRAU_CM
2100	0	1	1.5	M2						B1	M2	A				B2	M1						
2101	1	2	1.5	M2							M2	A				B2	M1						
2102	2	3	1	M3						M1	M2	A				B2	M1						
2103	3	4	1	M3						M1	M2	A				B2	M1						
2104	4	5	1	M3						B2	M2	A				B2	M1						
2105	5	6	1.5	M2							M2	A				M2	M1						
2106	6	7	1	M3						B1	M2	A				B2	M1						
2107	7	8	1	M3							M2	A				M2	M1				B3		
2108	8	8.82	1.5	M2							M2	A				B2	M1						

4.1.1 Alternativas para restauração dos trechos

Com base nos resultados obtidos através da avaliação dos trechos, a empresa competente elaborou estratégias de intervenções para a restauração dos trechos degradados.

A geração das estratégias para manutenção (conserva + restauração) dos pavimentos foi realizada com base na análise de desempenho das soluções e das restrições orçamentárias existentes. Sendo para tanto utilizado o Sistema de Gerência de Manutenção (SGM) descrito por Pinto et al. (2004). O SGM foi extraído de um sistema maior, o PAVESYS, desenvolvido

para dar apoio ao gerenciamento estratégico das rodovias integrante dos programas de concessões. O SGM foi utilizado para avaliação de viabilidade de implantação do II Programa CREMA/RS, (PINTO et al., 2005).

Dentre as características principais do SGM, destacam-se:

- Banco de dados (cadastro das rodovias);
- Ferramentas de análise (modelo de desempenho);
- Parâmetros de configurações;
- Análise de conseqüências (custos, quantitativos e desempenho).

A figura 45 ilustra uma das primeiras telas do SGM, na qual são estabelecidos parâmetros iniciais de configuração e encaminhamento de alternativas, tais como ano-base, período de análise, taxa crescimento do tráfego, vida restante mínima ao final do período de análise em termos de serventia, serventia mínima para restauração, espessura mínima e máxima para recapes, irregularidade máxima admissível após a restauração, degrau admissível entre pista e acostamento. O Quadro no canto inferior esquerdo refere-se aos Índices de Prioridade de intervenção. Chama-se a atenção para as opções “Reciclagem a frio *in situ*” e “TSD”, como forma de opção por essas estratégias, as quais poderiam igualmente estar “desmarcada” ou “marcada”, (PINTO, 2004).

Parâmetros que Configuram a Geração de Estratégias de Manutenção

Custos Unitários

Dados Gerais

Ano-base: 2005

Período de análise (anos): 8

Taxa anual de crescimento do tráfego (% a.a.): 1,5

Vida restante mínima ao final do período de análise (anos): 2

PSI mínimo admissível durante o período de análise: 2,5

IGG crítico para indicar necessidade de reconstrução do pavimento: 200

Espessura mínima admissível em CBUQ (cm): 4

Espessura máxima admissível em CBUQ (cm): 6

Irregularidade máxima admissível após restauração (cont./km): 32

Degrau máximo pista-acostamento (cm): 5

Instalação do Programa

Local onde o programa está instalado: E:\Pavesys\SGM2\

Local onde estão os arquivos de dados dos trechos: E:\Pavesys\SGM2\Dados\DAER-RS\

Intervenções a serem consideradas

Reciclagem a frio *in situ*

Tipo de material da base reciclada: Granular

TSD

ANO	IPMIN	IPMAX
1	30	100
2	25	30
3	20	25
4	15	20
5	10	15
6	5	10
7	0	5

<== Critério para Priorização das Restaurações

Save Cancel

Fonte: Pinto (2004), p.08

Figura 45 – Tela de configuração de estratégias do SGM

Um aspecto relevante do SGM é o fato dele absorver inúmeros conceitos trazidos pelo HDM e em termos de previsão ser tão confiável quanto o modelo desenvolvido sob financiamento do Banco Mundial (PATERSON, 1987 e THE WORLD BANK, 1987).

As informações obtidas pelo Levantamento Visual Contínuo do estado de superfície dos pavimentos são inseridas no programa. Os registros foram feitos por subtrecho, em que cada trecho foi segmentado.

Desta forma, os Diagramas elaborados pelo Sistema de Gerência da Manutenção, apresentam a condição atual do trecho rodoviário em termos de informações objetivas da via (na forma de gráficos representando a irregularidades longitudinal e transversal, a deflexão e o degrau entre a pista e o acostamento), ou obtidas em termos de serventia (tais como PSR e PSI). Finalmente, apresenta-se a condição final esperada para o segmento, em termos de serventia atual e irregularidade longitudinal.

Os projetos envolveram aplicação de métodos convencionais de restauração e uma proposta nova, em termos de restauração no Brasil, a qual contempla a reciclagem *in situ* da base granular de pavimentos flexíveis. Ambas as alternativas foram avaliadas e elaboradas pelo DAER conforme o que segue nas Tabela 18 a 21, as quais apresentam à esquerda alternativas de restauração utilizando métodos convencionais utilizados no Brasil e à direita das tabelas encontram-se as alternativas que foram projetadas visando a utilização da técnica de reciclagem da base granular.

Ainda, nas Figuras 46 a 49 estão apresentadas as estruturas dos pavimentos existentes e do pavimento após restauração.

Foram utilizados os seguintes códigos para descrever as intervenções (DAER, 2005):

RS = recapeamento simples em CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), na espessura **HR**;

RRP = remoção e reconstrução parcial do pavimento, envolvendo retirada de uma espessura **HC** (revestimento e parte da base), com novo revestimento asfáltico na espessura **HR**;

RRT = remoção e reconstrução total do pavimento (até o nível do subleito compactado), envolvendo retirada de uma espessura **HC**, com novo revestimento asfáltico na espessura **HR**;

ESC+TSS = escarificação e recompactação de uma espessura **HC_{ac}** do acostamento, seguida por aplicação de TSS (1,5 cm);

RECIC = execução de camada de base granular através de reciclagem a frio *in situ*, cortando-se uma espessura **HC** do pavimento existente, seguida de construção de revestimento em TSD (2,5 a 3,0 cm);

Tabela 18 – Estratégias para restauração do TR01 (DAER, 2005)

Trecho	ESTRATÉGIA - BASE							ESTRATÉGIA PROPOSTA					
	STH	Pista	HR (cm)	HC (cm)	Acostam.	HRac (cm)	HCac (cm)	Pista	HR (cm)	HC (cm)	Acostam.	HRac (cm)	HCac (cm)
TR01	1	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	2	RS	6.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	3	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	4	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	5	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	6	RRP	4.0	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	7	RS	6.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	8	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	9	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	10	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	11	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	12	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	13	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	14	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	15	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	16	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	17	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	18	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	19	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	20	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	21	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	22	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	23	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	24	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	25	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	26	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	27	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR01	28	RRP	4.0	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0

Tabela 19 – Estratégias para restauração do TR02,(DAER, 2005)

Trecho	ESTRATÉGIA - BASE							ESTRATÉGIA PROPOSTA					
	STH	Pista	HR (cm)	HC (cm)	Acostam.	HRac (cm)	HCac (cm)	Pista	HR (cm)	HC (cm)	Acostam.	HRac (cm)	HCac (cm)
TR02	100	RS	6.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR02	101	RS	6.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR02	102	RS	6.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR02	103	RS	6.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR02	104	RS	6.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR02	105	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR02	106	RRP	4.0	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR02	107	RS	6.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR02	108	RS	5.0	0.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0
TR02	109	RRT	4.0	42.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0

Tabela 20 – Estratégias para restauração do TR21, (DAER, 2005)

Trecho	ESTRATÉGIA – BASE							ESTRATÉGIA PROPOSTA					
	STH	Pista	HR (cm)	HC (cm)	Acostam.	HRac (cm)	HCac (cm)	Pista	HR (cm)	HC (cm)	Acostam.	HRac (cm)	HCac (cm)
TR21	2000	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2001	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2002	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2003	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2004	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2005	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2006	RS	5.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2007	RS	5.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2008	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2009	RRP	4.0	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2010	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2011	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2012	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2013	RS	4.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR21	2014	RS	5.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0

Tabela 21 – Estratégias para restauração do TR22, (DAER, 2005)

Trecho	ESTRATÉGIA – BASE							ESTRATÉGIA PROPOSTA					
	STH	Pista	HR (cm)	HC (cm)	Acostam	HRac (cm)	HCac (cm)	Pista	HR (cm)	HC (cm)	Acostam	HRac (cm)	HCac (cm)
TR22	2100	RRP	4.0	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR22	2101	RRP	4.0	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR22	2102	RS	5.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR22	2103	RS	5.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR22	2104	RS	5.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR22	2105	RS	5.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR22	2106	RS	5.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR22	2107	RS	5.0	0.0	TSS	1.5	0.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0
TR22	2108	RRP	4.0	20.0	ESC+TSS	1.5	15.0	RECIC	2.5	20.0	TSS	1.5	0.0

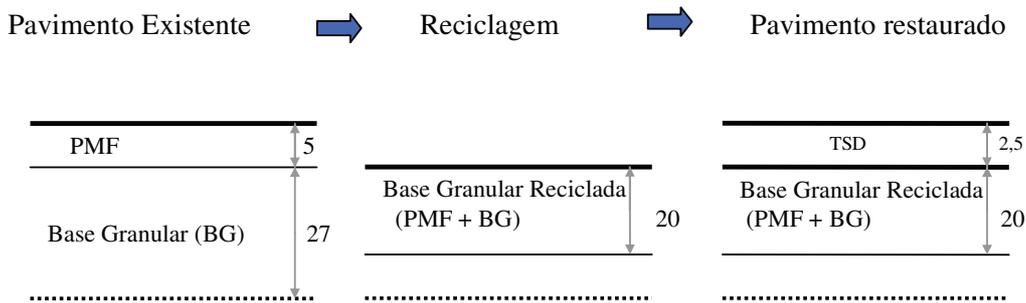


Figura 46 – Estrutura do trecho TR01 antes e após a restauração



Figura 47 – Estrutura do trecho TR02 antes e após a restauração

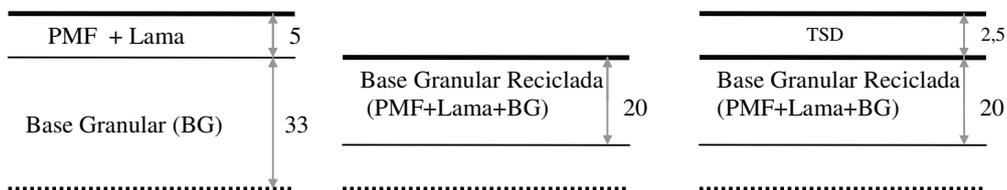


Figura 48 – Estrutura do trecho TR21 antes e após a restauração

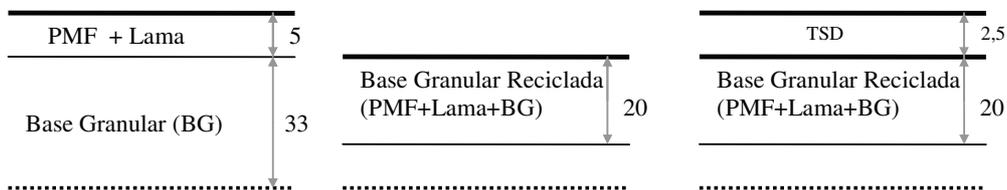


Figura 49 – Estrutura do trecho TR22 antes e após a restauração

4.2 Soluções adotadas

A estratégia de restauração das rodovias, apresentada pela empresa responsável pela restauração das rodovias, incluiu a substituição de intervenções do tipo recapeamento em CBUQ por reconstrução parcial por meio de reciclagem a frio *in situ* com produção de nova base granular seguida por revestimento em TSD.

O processo executivo adotado na reciclagem da base granular constituiu-se das seguintes etapas:

- Remoção e incorporação da camada do revestimento existente à base granular do pavimento antigo através da recicladora TEREX CMI – 3258 (Figura 51); a espessura mínima de base granular a ser reciclada é de 12 cm;
- Regularização do material reciclado (Figura 52);
- Compactação da base granular reciclada com rolo liso, conforme ilustra a Figura 53; A base reciclada deve apresentar um grau de compactação (Proctor Modificado) de limite inferior igual a 100, a espessura da base reciclada de 20 cm, seguida de uma camada de imprimação com uma taxa de CM-30 de 1,00 kg/m².
- Imprimação da base reciclada, como pode ser visto na Figura 54;
- Aplicação da camada de TSD.



Figura 51 – Reciclagem do pavimento com a recicladora TEREX CMI – 3258



Figura 52 – Regularização do material reciclado



Figura 53 – Compactação da base reciclada



Figura 54 – Pista reciclada e imprimada

5 CONTROLE TECNOLÓGICO DAS OBRAS DE RECICLAGEM

5.1 Especificações Técnicas Brasileiras

A proposta inicial contendo os procedimentos para a realização do controle tecnológico das obras de reciclagem foi elaborada baseada no atendimento às exigências impostas pelas Especificações de Serviço (ES) brasileiras para execução de base granular. Isto se deve ao fato de que estas são as únicas considerações fixadas pelos órgãos rodoviários para base granular e as quais permitem o bom atendimento do pavimento às cargas impostas pelo tráfego.

As especificações granulométricas usuais constituem em atalhos para facilitar a obtenção, a custo reduzido, em termos de ensaios de laboratório, de materiais capazes de apresentar no campo estabilidade adequada sob a ação repetida das cargas dinâmicas do tráfego. A relação entre a granulometria, as propriedades do material fino e a resistência da camada compactada são, contudo, extremamente complexas, de modo que existe sempre o risco, ao se confiar exclusivamente em faixas granulométricas especificadas, de se rejeitar materiais que teriam um desempenho adequado no campo.

Mais importante do que o atendimento a especificações gerais, cujo objetivo é apenas o de facilitar o processo de dosagem de uma mistura de agregados e solos na estabilização granulométrica, é verificar se o material avaliado atende aos parâmetros fundamentais que vão de fato controlar seu desempenho como camada de base no pavimento.

Nos casos em que se está lidando com a produção de uma camada de base, obtida por reciclagem de materiais granulares existente na pista, esta questão adquire relevância central, na medida em que condicionar a aceitação do material resultante ao seu enquadramento em uma ou várias faixas granulométricas deixará de levar em conta a realidade do processo construtivo, onde a flexibilidade para alterar a granulometria do produto final é forçosamente

limitada, a menos que se queira incorrer em custos elevados, capazes de cancelar todas as vantagens associadas ao uso da reciclagem *in situ* (como a menor interrupção do tráfego pela maior velocidade de produção e a proteção do meio ambiente pela maximização do reuso de materiais que já se encontram na pista).

Dessa forma, foram aqui avaliadas as especificações técnicas existentes no Brasil, referentes ao controle tecnológico de bases granulares novas e de processos de reciclagem usados no país.

Os parâmetros fundamentais citados pelas Especificações de Serviço do DNIT (Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transporte, antigo DNER), especificam que para que uma camada de base granular apresente um bom desempenho em um pavimento rodoviário, necessita alcançar algumas exigências fundamentais. Abaixo estão citadas algumas especificações e suas recomendações para os diversos serviços. De forma geral, as especificações dizem que:

1. Capacidade de suporte adequada às cargas do tráfego, a qual é garantida por um CBR ≥ 60 (80 com a saturação de 4 dias) sob tráfego leve e CBR ≥ 80 (100 com a saturação de 4 dias) sob tráfego pesado;
2. Manutenção da capacidade de suporte ao longo do tempo, em face:
 - Dos efeitos do aumento do teor de umidade (obtida limitando-se o teor de finos argilosos e siltosos e a sua plasticidade). As especificações mais exigentes impõem um limite em torno de 8% de material passando na peneira #200 e aquelas que permitem teores mais elevados de até 25%, por exemplo, requerem que o material passante na peneira nº 40 tenha LL $\leq 25\%$ e IP $\leq 6\%$;
 - De alterações de granulometria e densidade, produzidas por quebra de agregados graúdos sob as cargas do tráfego (controlada com a exigência de Abrasão Los Angeles $\geq 50\%$), intrusão de finos do solo de subleito na parte inferior da camada de base (evitada com o expoente n da Curva de Talbot sendo inferior a 1,2) ou por bombeamento de finos da camada de base através de trincas do revestimento (evitada com a fração fina apresentando IP $< 6\%$).
3. Trabalhabilidade adequada, de modo a permitir compactação suficiente para atingir a resistência necessária e sem risco de segregação. Uma curva granulométrica bem

graduada (medida pela aplicabilidade da Curva de Talbot) atua neste sentido com elevada eficácia;

4. Acabamento de superfície adequado à aplicação do revestimento asfáltico (controlado limitando-se o diâmetro máximo de agregados em valores da ordem de 2”).

A especificação de serviço do DNER - DNER-ES 303/97 – Pavimentação: Base estabilizada granulometricamente, define que as bases devem apresentar:

Os materiais destinados a confecção da base devem apresentar as seguintes características:

- Deverão possuir composição granulométrica satisfazendo a uma das faixas especificadas pelo DNER;
- A fração que passa na peneira nº 40 deverá apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 25% e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%. Quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deverá ser maior que 30%.
- A porcentagem do material que passa na peneira nº 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira nº 40;
- O Índice de Suporte Califórnia, deverá ser superior a 60% e a expansão máxima será de 0,5%, com energia de compactação do Método B. Para tráfego com valor de N acima de $N = 5 \times 10^6$, o Índice de Suporte Califórnia deverá ser superior a 80%, neste caso, a energia de compactação será a do Método C;
- No ensaio Los Angeles (DNER-ME 035), não deverão apresentar desgaste superior a 55%.

No Rio Grande do Sul, a especificação do DAER (DAER-ES-P 08/91) : Base Granular, define base granular:

“As bases granulares são camadas constituídas de mistura de solos e materiais britados, ou produtos totais de britagem”.

As bases constituídas de mistura de solos e materiais britados, são comumente designadas de solo-brita e as constituídas exclusivamente de produtos de britagem, são designadas de bases de brita graduada.

Os materiais (agregados) no momento em que são depositados no leito da estrada devem apresentar os requisitos seguintes:

- Abrasão Los Angeles com valor máximo igual a 40%;
- Ensaio de Sanidade (Soundness Test) com valor Máximo igual a 10%.

No caso de misturas com solos, os mesmos deverão apresentar as seguintes características:

- $IP < 6\%$;
- $LL \leq 25\%$;
- $Expansão \leq 0,5\%$

A especificação divide em três as faixas granulométricas para base granular, as quais sejam A, B e C.

O material para a base da Classe A deve apresentar os requisitos seguintes:

- Índice de Suporte Califórnia com valor mínimo de 100%;
- Equivalente de areia com valor mínimo de 50%.

O material para base da Classe B deve apresentar os requisitos seguintes:

- Índice de Suporte Califórnia com valor mínimo igual a 90%;
- Equivalente de areia com valor mínimo de 40%

O material para base de Classe C deve apresentar os requisitos seguintes:

- Índice de Suporte Califórnia com valor mínimo de 80%;
- Equivalente de areia com valor mínimo de 30%.

O controle tecnológico envolve:

1. Um ensaio de compactação e ISC, com energia de compactação AASHTO Modificado, em intervalos de 500 a 1000m, conforme a uniformidade do material e dos serviços executados.
2. Uma determinação do teor de umidade a cada 100m, imediatamente antes da compactação.
3. Ensaio de caracterização (LL, LP, EA, Granulometria) nos pontos de determinação da densidade “in situ”.

4. Determinação da densidade “in situ”, com espaçamento máximo de 100m, na seqüência LE, E, LD, com o objetivo de determinar o GC, e a 0,60m do bordo.

A especificação de serviço DNER – ES 405/2000 – Pavimentação - reciclagem de pavimento a frio “in situ” com espuma de asfalto define base reciclada “in situ”:

“Mistura realizada no local com o emprego de equipamentos próprios para esta finalidade, utilizando –se agregados removidos do pavimento existente, agregados adicionais, cimento asfáltico de petróleo, cimento Portland e água em proporções previamente determinadas por processo próprio de dosagem em laboratório, misturada, espalhada e compactada, de forma a compor a camada de base do pavimento”.

Esta norma especifica que os agregados adicionais devem apresentar as seguintes características:

- Desgaste Los Angeles igual ou inferior a 55% (DNER-ME 035/98);
- Índice de forma superior a 0,5 (DNER-ME 086/94);
- Durabilidade, perda inferior a 12% (DNER-ME 089/94).

Para a mistura reciclada, a norma exige as seguintes verificações:

1. Deve ser feito um poço de sondagem a cada 500 metros de extensão de pista, para verificação de:
 - Espessuras das camadas existentes, revestimento e base;
 - Granulometria e teor de umidade do conjunto revestimento + base;
 - Teor de betume do revestimento.
2. A composição da mistura reciclada deve satisfazer os requisitos do projeto com as respectivas tolerâncias:
 - Possuir a composição granulométrica que satisfaça a faixa definida no projeto;
 - Apresentar o valor mínimo de 0,25 MPa, para a resistência à tração indireta seca, e de 0,15 MPa para a resistência indireta saturada, a 25 °C.

A reciclagem da mistura asfáltica deve ser realizada no local, com equipamento apropriado para esta finalidade, do tipo “Recicladora”.

Os controles de confecção da mistura devem ser realizados a cada 250 metros de extensão de faixa de tráfego, como a seguir:

- Verificação da quantidade de cimento incorporado por massa ou volume;
- Ensaio de compactação para determinação da massa específica aparente seca máxima, com a energia do ensaio Proctor Normal;
- Determinação do teor de umidade depois da adição da água e homogeneização da mistura;
- Ensaio de granulometria e teor de betume para verificação das características do material reciclado;
- Moldagem de dois corpos-de-prova Marshall (75golpes/face) para determinação da resistência à tração indireta por compressão diametral seca e saturada (DNER-ME 138/94), após 72 horas de cura em estufa a 60 °C, com material recolhido na pista;
- Moldagem de dois corpos-de-prova Marshall (75golpes/face) para determinação da massa específica aparente, após 72 horas de cura em estufa a 60 °C, com material coletado na pista;
- Determinação da densidade “in situ” após compactação na pista.

Os ensaios de densidade “in situ” para verificação do grau de compactação pelo método DNER-ME 092/94 (determinação da massa específica aparente “in situ”, com emprego do frasco de areia) devem ser realizadas a cada 250 metros de extensão de faixa de tráfego, ou por jornada de 8 horas de trabalho.

A norma do DNIT 033/2005 (Pavimentos Flexíveis – concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação de Serviço), uma revisão da norma DNER-ES 318/97, define concreto asfáltico reciclado na usina:

“É a mistura realizada em usina com características específicas utilizando-se como agregado o material do revestimento asfáltico removido a frio do pavimento existente, cimento asfáltico e agregados adicionais e, se necessário, material de enchimento (filer) e agente de reciclagem misturados, espalhados e comprimidos à quente”.

O concreto asfáltico reciclado em usina pode ser empregado como revestimento, base, regularização ou reforço do pavimento.

No caso de agregado graúdo adicional algumas considerações:

- Desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50 % (DNER-ME 035); admitindo-se agregados com valores maiores, no caso de terem apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior.

O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR), na sua especificação de serviço DER/PR ES-P 34/05 Pavimentação: reciclagem de pavimento “in situ” com estabilização granulométrica define base reciclada “in situ” como:

“Base reciclada “in situ” com estabilização granulométrica: é uma mistura reciclada no local com o emprego de equipamentos próprios para esta finalidade, utilizando-se material do pavimento existente, agregados adicionais (eventuais) e água, em proporções previamente determinadas em laboratório, misturada, espalhada e compactada, de forma a compor uma nova camada de base do pavimento”.

Esta determina que:

- O ensaio de durabilidade (DNER-ME 89/94) deve apresentar valores inferiores aos seguintes limites:
 - Agregados graúdos: 12%
 - Agregados miúdos: 15%
- Percentagem de desgaste no ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME 35/98) não deve ser superior a 50%;
- Agregado miúdo deve apresentar equivalente de areia (DNER-ME 054/97) igual ou superior a 40%;
- A composição granulométrica da camada reciclada estabilizada granulometricamente deve estar enquadrada em uma das seguintes faixas:
 - Para qualquer condição de tráfego:

Peneira de malha quadrada		Percentagem passando, em peso						
ABNT	Abertura, mm	I	II	III	IV	V	VI	VII
2"	50,8	100	100	-	-	100	-	-
1/2"	38,1	-	-	-	-	90-100	100	100
1"	25,4	-	75-90	100	100	-	-	77-100
3/4"	19,1	-	-	-	-	50-85	60-95	66-88
3/8"	9,5	30-65	40-75	50-85	60-100	35-65	40-75	46-71
nº 4	4,8	25-55	30-60	35-65	50-85	25-45	25-60	30-56
nº 10	2	15-40	20-45	25-50	40-70	18-35	15-45	20-44
nº 40	0,42	8-20	15-30	15-30	25-45	8-22	8-25	8-25
Nº 200	0,074	2-8	5-15	5-20	5-20	3-9	2-10	5-10

- Para tráfego leve ou médio ($N < 5 \times 10^6$):

Peneira malha quadrada		Porcentagem passando, em peso	
ABNT	Abertura, mm	VIII	IX
1"	25,4	100	100
n° 4	4,8	55-100	70-100
n° 10	2	40-100	55-100
n° 40	0,42	20-50	30-70
n° 200	0,074	6-20	8-25

- O limite de liquidez (DNER-ME 122/94) deve ser igual ou inferior a 25%, e o índice de plasticidade igual ou inferior a 6%;
- O índice de suporte Califórnia (DNER-ME 49/94) e a expansão para energia modificada devem apresentar os seguintes valores mínimos:
 - Para $N \leq 5 \times 10^6$: ISC $\geq 60\%$;
 - Para $N > 5 \times 10^6$: ISC $\geq 80\%$;
 - Expansão $\leq 3\%$.

5.2 Proposta inicial da especificação técnica

No sentido de investigar a aplicabilidade prática do controle de obras de reciclagem, foi aqui investigada e proposta a especificação técnica que foi aplicada ao controle das obras de reciclagem do LOTE 1, para ser aplicada às operações de produção de camada de base granular reciclada para estruturas de pavimentos flexíveis com revestimentos asfálticos.

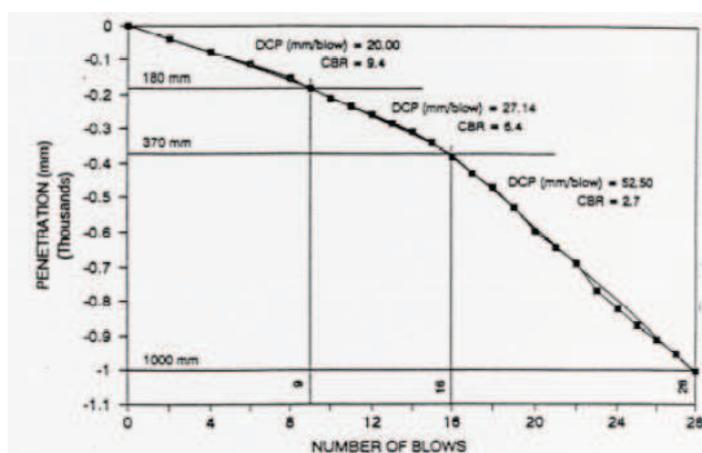
As normas brasileiras existentes estipulam os ensaios e as frequências dos mesmos, para o controle tecnológico, conforme o que está apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 – Frequência dos ensaios apresentados nas normas brasileiras

FREQUÊNCIA DE ENSAIO				
Norma	CBR	Equivalente de areia	Densidade	Granulometria
DNER-ES 303/97	300 a 1000 m	300 a 1000 m	100 m	300 m
DNER-ES 405/2000	-	-	250 m	500 m
DAER-ES-P 08/91	500 a 1000 m	100 m	100 m	100 m
DER/PR-ES-P 34/05	03/3000 m ³	01/1200 m ³	01/200 m ³	01/600 m ³

Para tanto, optou-se, num primeiro momento, por elaborar a proposta baseada nos parâmetros que condicionam as especificações brasileiras. Os ensaios foram realizados conforme o que segue:

1. Ensaio DCP: O ensaio consiste em se aplicar golpes de sucessivos e anotar a posição de uma marca de referência na haste através da régua, anotando ao lado da posição o número de golpes. Por fim, traça-se o gráfico, *Posição da haste x número de golpes*, conforme a Figura 55. Este ensaio deve ser realizado na base reciclada, em intervalos de 100 em 100 metros.



Fonte: Saskatchewan Higways and Transportation, p. 8 (1992)
Figura 55 – Ensaio DCP

Depois de plotados, os dados devem ser correlacionados com valores de CBR já estabelecidos por estudos anteriormente realizados, citados no item 2.10.1 desta dissertação.

O ensaio DCP segue conforme o proposto pelo TRL (2004), o qual define a frequência dos ensaios tendo em vista o objetivo a que se destina a investigação. A tabela 23 apresenta as distâncias máximas a serem respeitadas entre os pontos de ensaio DCP.

Tabela 23 – Espaçamentos mínimos para execução do DCP (TRL, 2004)

Objetivo	Espaçamento máximo
Manutenção de pavimentos	< 500 m
Restauração de pavimentos	< 100 m
Rodovias vicinais	< 500 m
Pistas novas	< 50 m

O DCP se justifica pelo fato de que a caracterização da capacidade de suporte, em termos do CBR das camadas constituintes da estrutura do pavimento, é realizada a partir de ensaios de laboratório. O mais correto seria empregar técnicas capazes de levar em conta as reais condições de campo.

Scala (1956), afirma que o ensaio CBR, realizado em corpos de prova submetidos à saturação por imersão, em muitos casos conduz a um superdimensionamento da estrutura de pavimentos rodoviários, pois dificilmente são verificadas condições tão severas de encharcamento na prática.

2. Ensaio CBR: segue a especificação DNER-ME 049/94. As amostras devem ser coletadas de 100 em 100 metros, e não a cada 300 metros como propõem a especificação do DNER, sendo representativas da base granular reciclada.
3. Granulometria (Curva de Talbot): a granulometria foi verificada, coletando-se amostras do material reciclado, espaçadas em no máximo 200 metros, peneirando-as (DNER-ME 083/98) para obtenção das porcentagens de material retido em cada peneira. Após o peneiramento, far-se-á a adequação da granulometria do material através da aplicação da Curva de Talbot. O grau de atendimento à Curva de Talbot:

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (28)$$

avaliado pelo coeficiente de determinação (r^2) do ajuste dos pontos experimentais a esta função. Valores de r^2 próximos de 1,0 indicam elevada adequação da curva granulométrica a esta função. O expoente n será utilizado para verificação do grau de homogeneidade ao longo da obra executada. As especificações granulométricas usuais procuram direcionar a produção dos materiais para valores de n não muito distantes de 0,5 a fim de maximizar a capacidade de densificação no campo.

A determinação em laboratório do LL e do IP será desnecessária no presente caso, por se estar lidando com a reciclagem de materiais puramente granulares, oriundos do revestimento antigo em PMF e da base granular existente, em Brita Graduada.

4. Equivalente de areia: este ensaio deve ser realizado conforme norma do DNER (DNER – ME054/94) e será executado a cada 500m.

5. Densidade “in situ”: será verificada com espaçamento máximo de 100 metros, na seqüência LE (lado esquerdo), E (eixo), LD (lado direito), com o objetivo de determinar o GC (Grau de Compactação), e a 0,60m do bordo.

A necessidade de se buscar a garantia de qualidade, para as obras a serem executadas nos pavimentos em estudo, requer o estabelecimento de um critério para aceitação da camada de base reciclada. Baseados nas especificações brasileiras, para bases novas, conforme descrito acima, foram propostos num primeiro momento os seguintes procedimentos para a *Proposta Inicial de Especificação Técnica*. A figura 56 mostra de forma esquemática a estrutura da proposta de controle tecnológico.

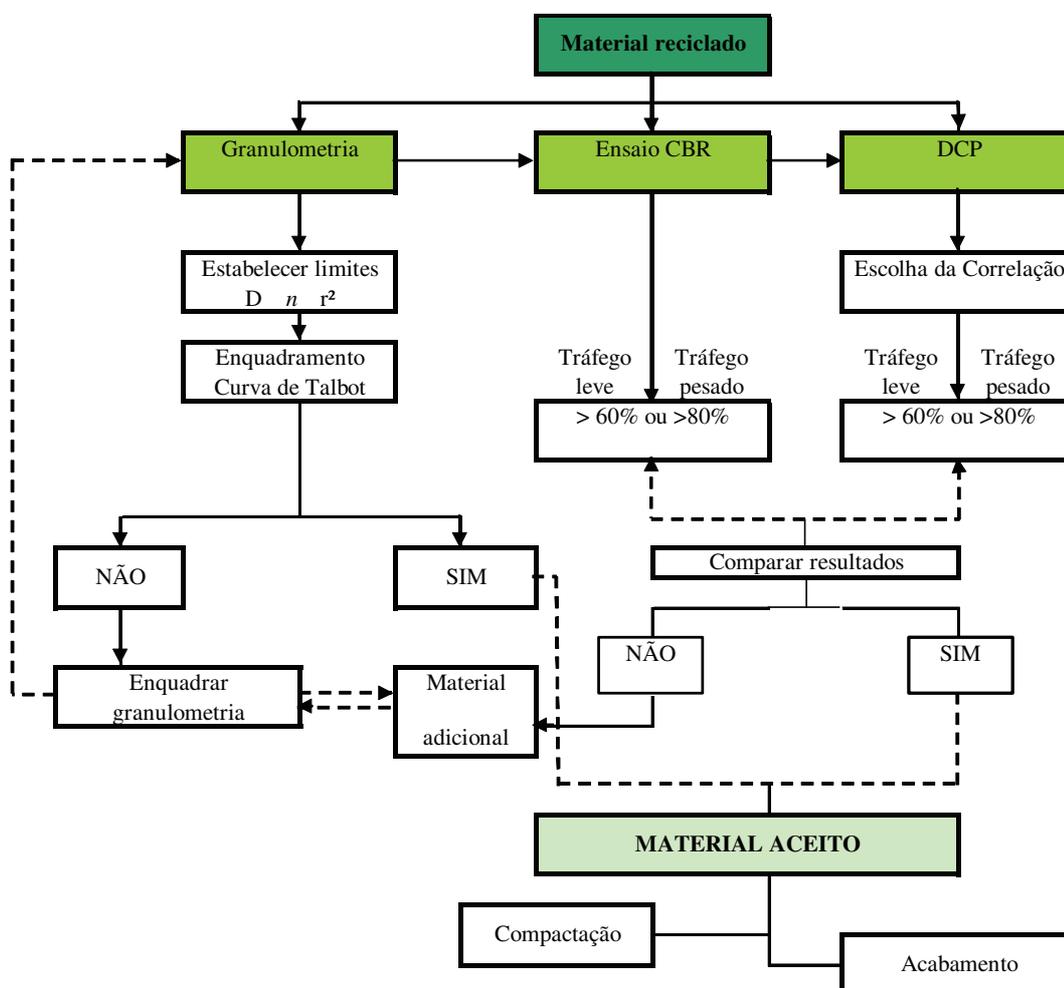


Figura 56 – Etapas da proposta de especificação

1. A determinação do CBR da camada de base reciclada será feita de 100 em 100 m, utilizando um dos seguintes procedimentos:
 - CBR *in situ*, determinado através do ensaio DCP (Dynamic Cone Penetrometer), com valor de projeto $CBR_P = 80$ para rodovias de tráfego leve ($N_{ano}^{AASHTO} < 1,0 \times 10^5$ repetições anuais do eixo-padrão de 8,2 tf) e $CBR_P = 100$ para rodovias de tráfego pesado; ou
 - CBR de laboratório, nas condições de projeto para compactação (umidade e densidade ótimas do Proctor Modificado) e após saturação de 4 dias, com valores de projeto: $CBR_P = 60$ em tráfego leve e $CBR_P = 80$ em tráfego pesado, ou CBR de laboratório nas condições de umidade e densidade próximas às de campo, sem saturação de 4 dias, com valores de projeto iguais aos do caso de execução do ensaio DCP.

Onde CBR_P é o valor de projeto, obtido pela equação (DNER-PRO 277/97):

$$CBR_P = CBR_{m\u00e9dio} - \frac{S \times t_{90}}{\sqrt{n-1}} \quad (29)$$

onde $CBR_{m\u00e9dio}$ é o valor m\u00e9dio, S \u00e9 o desvio-padr\u00e3o, t_{90} \u00e9 o valor da Distribui\u00e7\u00e3o t de Student para 90% de confian\u00e7a, e n \u00e9 o n\u00famero de pontos da amostra.

Os resultados ter\u00e3o por finalidade tanto a verifica\u00e7\u00e3o da qualidade obtida pelo processo como a verifica\u00e7\u00e3o do grau de homogeneidade da execu\u00e7\u00e3o.

Ainda, deve ser calculado em cada segmento o par\u00e2metro estat\u00edstico (DAER-ES-P 08/91):

$$CBR_{m\u00edn} = CBR_{m\u00e9dio} - \frac{1,29\sigma}{\sqrt{n}} \quad (30)$$

onde σ \u00e9 o desvio-padr\u00e3o e n \u00e9 o n\u00famero de pontos. Este m\u00ednimo estat\u00edstico dever\u00e1 atender ao crit\u00e9rio: $CBR_{m\u00edn} \geq CBR_P$, onde CBR_P \u00e9 o CBR de projeto.

2. A verifica\u00e7\u00e3o do enquadramento da granulometria ser\u00e1 feita pela aplica\u00e7\u00e3o dos seguintes crit\u00e9rios:
 - A Curva de Talbot dever\u00e1 ser aplic\u00e1vel, com $r^2 > 0,70$ em pelo menos 90% dos pontos, espa\u00e7ados em no m\u00e1ximo 200 m;

Os par\u00e2metros D e n da Curva de Talbot dever\u00e3o ter seus valores m\u00e9dios e correspondentes desvios-padr\u00e3o determinados em segmentos, com no m\u00ednimo 9 pontos, espa\u00e7ados em no

máximo 200 m, determinados a partir da equação proposta no controle tecnológico da especificação do DAER-ES-P 08/91 e deverão atender às seguintes faixas:

$$D_{\min} = D_{\text{méd}} - \frac{1,29\sigma_D}{\sqrt{N}}$$

$$D_{\max} = D_{\text{méd}} + \frac{1,29\sigma_D}{\sqrt{N}}$$

$$n_{\min} = n_{\text{méd}} - \frac{1,29\sigma_n}{\sqrt{N}}$$

$$n_{\max} = n_{\text{méd}} + \frac{1,29\sigma_n}{\sqrt{N}}$$

sendo N o número de pontos de ensaio, σ_D é o desvio-padrão do diâmetro máximo de agregados e σ_n é o desvio-padrão do expoente n da Curva de Talbot.

3. A verificação dos aspectos que são controlados por meio de restrições impostas aos parâmetros LL, IP e teor de finos (% que passa na #200) será feita aplicando-se o critério usual relativo ao Equivalente de Areia, cujo ensaio deverá ser executado a cada 500 m. Esta medida visa eliminar as dificuldades trazidas pela variabilidade inerente à própria realização dos ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, os quais deverão ser executados de km em km e apenas para fins comparativos com o Equivalente de Areia.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados durante a fase de execução das obras de reciclagem devem ser sintetizados (ver exemplo da Tabela 24). Na seqüência deverá ser verificado o atendimento dos critérios indicados pelas especificações de modo que se possa estabelecer o diagnóstico final.

Tabela 24 – Exemplo de granulometria da base reciclada

ESTACA	LADO	GRANULOMETRIA				Curva de Talbot		
		¾"	4"	#30	#200	D (")	N	r ²
28+320	DIR.	93.20	29.40	7.70	1.60	0.944	0.788	0.995
28+420	EIXO	95.00	31.50	6.50	2.00	0.973	0.765	0.992
28+520	ESQ.	98.00	33.80	5.60	2.90	1.037	0.716	0.961
.
.
29+920	EIXO	93.00	33.00	11.00	1.00	0.756	0.864	0.970
30+020	DIR.	94.30	33.00	8.00	2.00	0.924	0.756	0.997
n
					Média =			
					Desvio =			
					Cv (%) =			

Os resultados obtidos com a reciclagem *in situ* serão avaliados em termos das especificações do DAER/RS para a construção de bases granulares de estruturas de pavimentos novos. Para tanto, as Tabelas 25 a 27 mostram as seis faixas granulométricas que são utilizadas como referência para camada de base granular. Nestas tabelas serão determinados os parâmetros D e n da Curva de Talbot correspondentes às fronteiras superior ($P_{máx}$) e inferior ($P_{mín}$) que definem a faixa em cada subclasse. Como é ilustrado na Figura 57.

Tabela 25 – Faixa granulométrica para base Classe C do DAER/RS

C1	d (in)	P_{mín} (%)	P_{máx} (%)	C2	d (in)	P_{mín} (%)	P_{máx} (%)
	0.375	50	85		0.375	60	100
	0.250	35	65		0.250	50	85
	0.033	17	34		0.033	28	50
	0.005	5	15		0.005	5	20
	n =	0.5057	0.3866		n =	0.5478	0.3603
	D =	1.5711	0.6324		D =	0.7639	0.3478

Tabela 26 – Faixa granulométrica para base Classe B do DAER/RS

B1	d (in)	P_{mín} (%)	P_{máx} (%)	B2	d (in)	P_{mín} (%)	P_{máx} (%)
	0.750	50	85		0.750	90	100
	0.250	25	45		0.250	35	55
	0.033	10	25		0.033	10	30
	0.005	2	9		0.005	2	9
	n =	0.6220	0.4270		n =	0.7415	0.4588
	D =	2.0962	1.2103		D =	0.8970	0.7410

Tabela 27 – Faixa granulométrica para base Classe A do DAER/RS

A1	d (in)	P_{mín} (%)	P_{máx} (%)	A2	d (in)	P_{mín} (%)	P_{máx} (%)
	0.750	50	85		0.750	90	100
	0.250	30	45		0.250	35	55
	0.033	10	25		0.033	10	30
	0.005	2	9		0.005	2	9
	n =	0.6370	0.4270		n =	0.7415	0.4588
	D =	1.8046	1.2103		D =	0.8970	0.7410

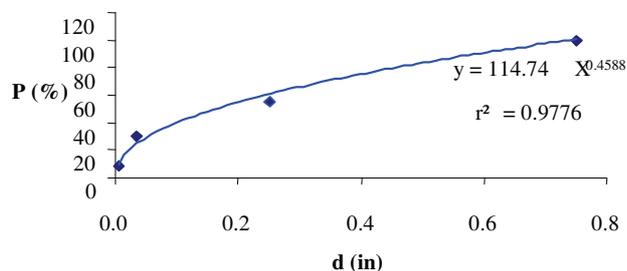


Figura 57 – Curva de Talbot da *fronteira* superior da subclasse A2 do DAER/RS (exemplo)

5.3 Aplicação prática da proposta

A proposta inicial para o controle tecnológico foi aplicada nos trechos determinados para o estudo e proporcionou a obtenção de resultados dos ensaios de campo. Os resultados foram coletados e processados, para uma melhor avaliação e posterior aprovação ou adequação da especificação proposta. A obra de reciclagem segue um critério de execução e de controle tecnológico, o qual está mostrado no Anexo 5.

5.3.1 Coleta de dados

Os dados foram coletados durante o acompanhamento da execução das obras e realização dos ensaios, conforme a especificação proposta. Os dados referentes a ensaio de DCP, granulometria (através da curva de Talbot do material reciclado e do TSD) foram processados para verificar a adequação ou não da metodologia proposta para base reciclada.

5.3.1.1 Ensaio DCP

Foram realizados ensaios DCP na base reciclada nos trechos TR01, TR02, TR21 e TR22, com espaçamento de 100 em 100 metros conforme proposta inicial de especificação, os

quais tem seus resultados apresentados nas tabelas do Anexo 1 e seus respectivos gráficos nas Figuras 58 a 61 com demarcações de 900 em 900 metros. O resultado dos subtrechos estão apresentados nas Tabelas 28 a 31. As planilhas utilizadas no campo para a anotação dos ensaios estão apresentadas nos Anexos 2 e 3 deste documento.

Para obtenção dos valores de CBR foi aplicada a correlação do USACE, válida para $CBR > 10$:

$$CBR = \frac{292}{DPI} \quad (31)$$

onde DPI (*Dynamic Penetrometer Index*) é a penetração média verificada na camada, em mm/golpe. Os resultados mostram que a penetração especificada, de 5 mm/golpe, está sendo atendida.

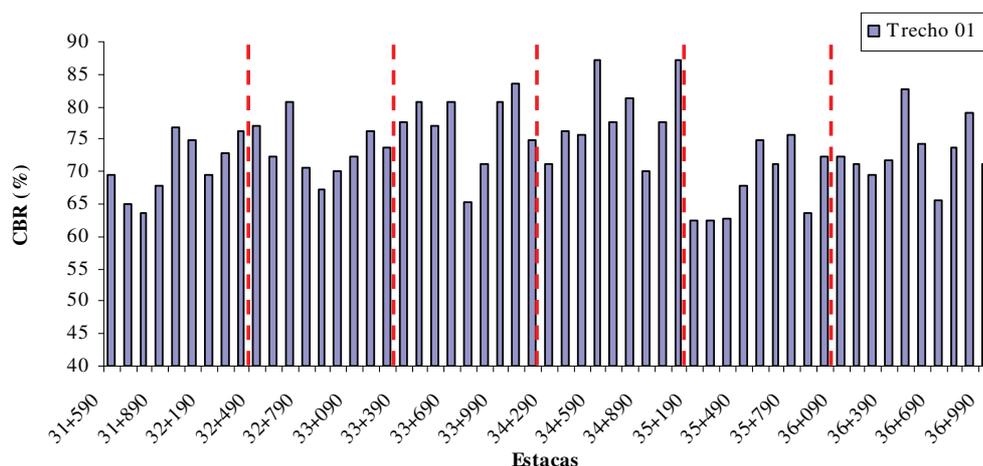


Figura 58 – Ensaio DCP no Trecho TR01

Tabela 28 – Resumo de resultados do ensaio DCP

Trecho/subtrecho	Média CBR %(DCP)	Desvio Padrão	CV(%)
1/1	71	4,98	6,99
1/2	73	4,17	5,68
1/3	76	5,93	7,80
1/4	77	7,85	10,16
1/5	69	5,20	7,51
1/6	73	5,10	6,92

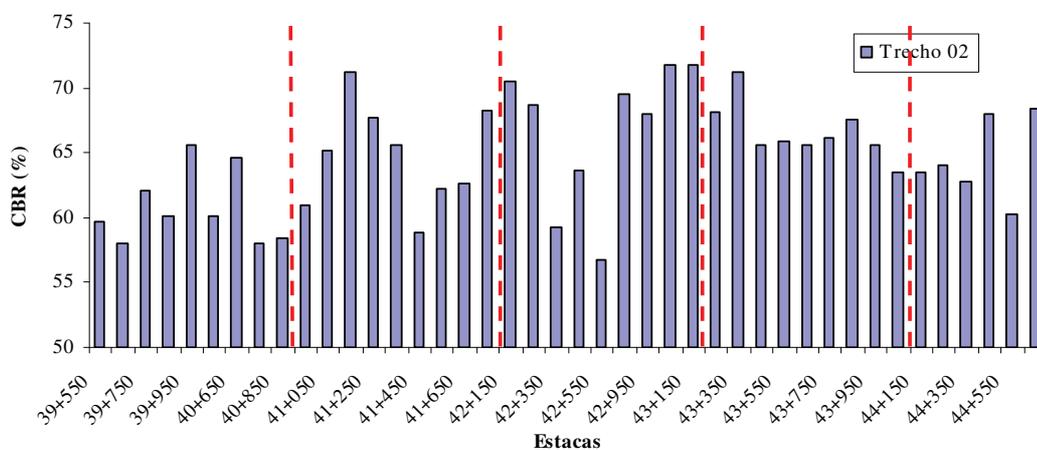


Figura 59 – Ensaio DCP no Trecho TR02

Tabela 29 – Resumo de resultados do ensaio DCP

Trecho/subtrecho	Média CBR %(DCP)	Desvio Padrão	CV(%)
2/1	61	4,34	4,34
2/2	66	4,13	6,27
2/3	66	5,20	7,84
2/4	66	2,27	3,44
2/5	65	2,62	4,05

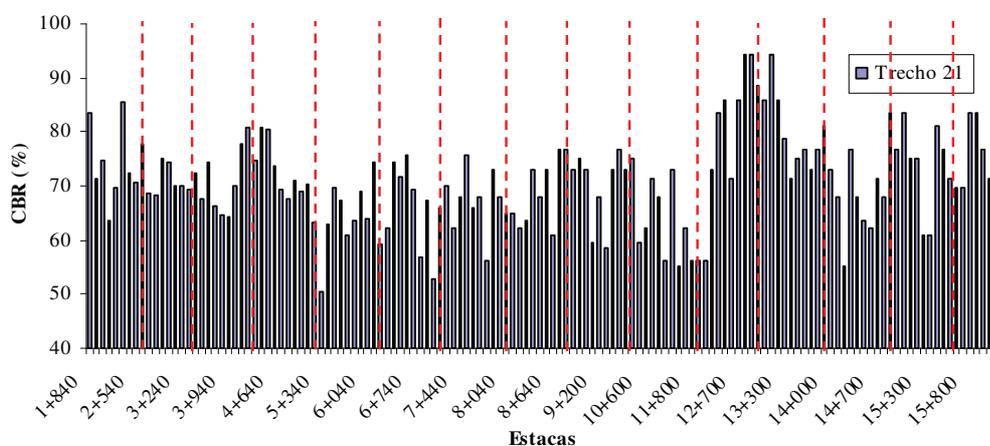


Figura 60 – Ensaio DCP no Trecho TR21

Tabela 30 – Resumo de resultados do ensaio DCP

Trecho/subtrecho	Média CBR %(DCP)	Desvio Padrão	CV(%)
21/1	74	6,80	9,22
21/2	71	2,74	3,84
21/3	73	6,69	9,12
21/4	66	7,87	11,84
21/5	66	4,60	7,01
21/6	67	7,39	11,23
21/7	67	5,43	8,13
21/8	69	6,05	8,80
21/9	70	6,63	9,48
21/10	65	7,39	11,43
21/11	74	14,36	19,52
21/11	83	8,57	10,28
21/12	71	7,74	10,97
21/13	72	8,25	11,33
21/14	75	8,33	11,15
21/15	71	5,64	7,93

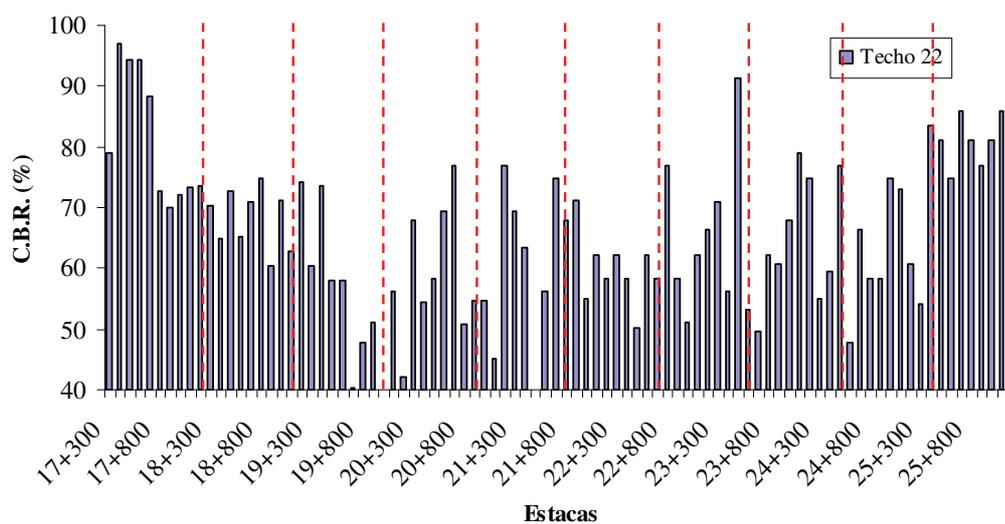


Figura 61 – Ensaio DCP no Trecho TR22

Tabela 31 – Resumo de resultados do ensaio DCP

Trecho/subtrecho	Média CBR %(DCP)	Desvio Padrão	CV(%)
22/1	81	10,82	13,28
22/2	68	4,98	7,31
22/3	56	12,46	22,38
22/4	59	12,14	20,54
22/5	61	12,95	21,38
22/6	60	5,99	10,02
22/7	66	12,34	18,93
22/8	65	10,34	15,89
22/9	64	11,35	17,69
22/10	81	9,23	11,43

A Tabela 32 apresenta, de modo simplificado os resultados do ensaio DCP nas rodovias restauradas.

Tabela 32 – Resumo de resultados do ensaio DCP

Trecho	Média	Desvio Padrão	Cv (%)
01	73,40	6,03	8,21
02	64,65	3,14	4,85
21	70,87	8,52	12,02
22	63,52	12,12	19,07

5.3.1.2 Ensaio de granulometria

Este ensaio foi realizado com espaçamentos de no máximo 200 m, conforme descrito na proposta de especificação e seus dados anotados em planilhas. Os resultados destes ensaios estão apresentados nas figuras 62 a 65, e nas Tabelas do Anexo 4. As planilhas usadas para o ensaio estão apresentadas no Anexo 5 desta dissertação.

Os valores de D e n foram calculados pelas fórmulas propostas na especificação e obedecendo aos limites impostos pela granulometria da faixa A2 do DAER especificada para o pavimento. Os cálculos para obtenção dos valores de D seguem a equação da curva de Talbot que leva em consideração o tamanho do agregado, porcentagem que passa em cada peneira e o n que é utilizado para verificação do grau de homogeneidade da mistura ao longo da obra. Os gráficos gerados, em função da composição granulométrica, estão apresentados nas Figuras 66 a 69, que mostram um ensaio em cada trecho. Os gráficos apresentam a curva

granulométrica, o limite inferior e limite superior da faixa a ser obedecida e ainda, fornecem valores de n e r^2 , através da expressão $Y = A \times d^n$, dada pela curva de tendência gerada no gráfico.

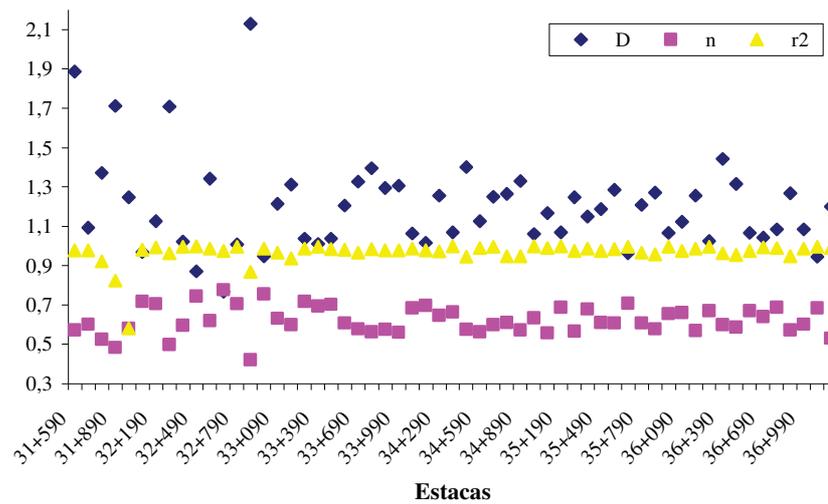


Figura 62 – Valores de D, n e r^2 no Trecho TR01

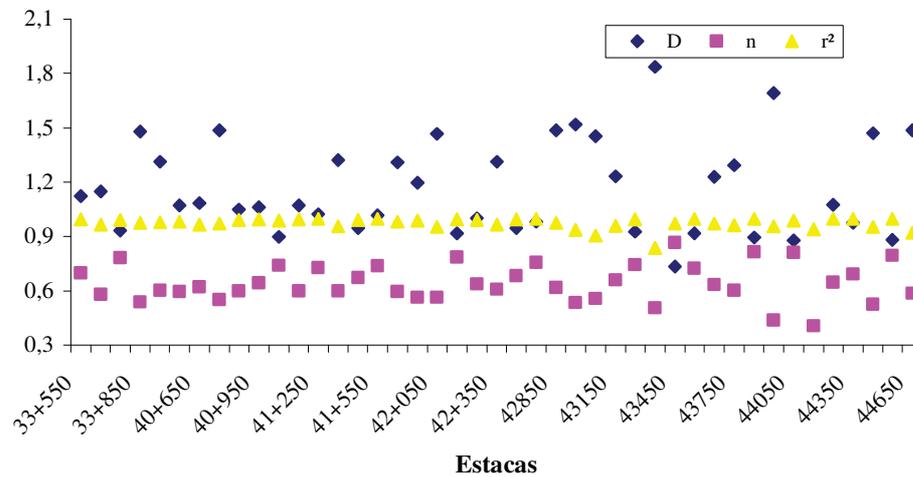


Figura 63 – Valores de D, n e r^2 no Trecho TR02

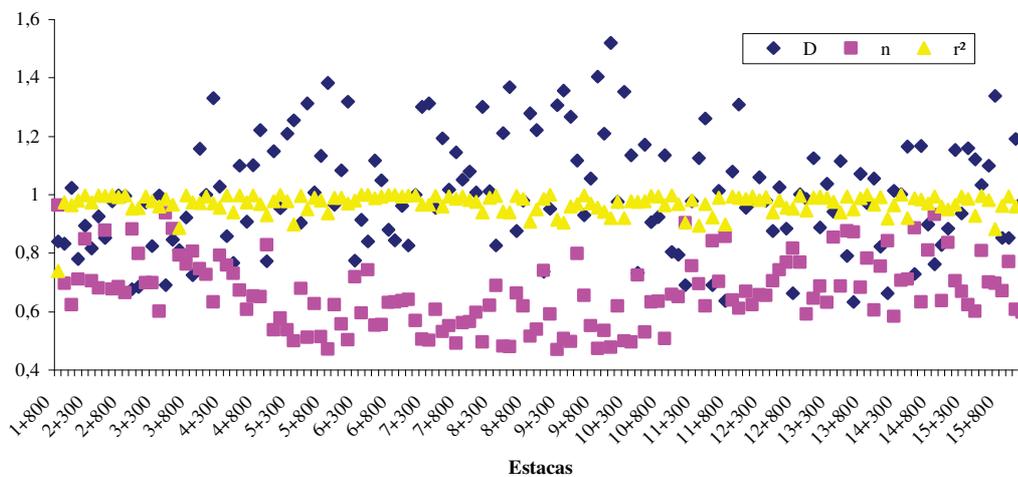


Figura 64 – Valores de D, n e r² no Trecho TR21

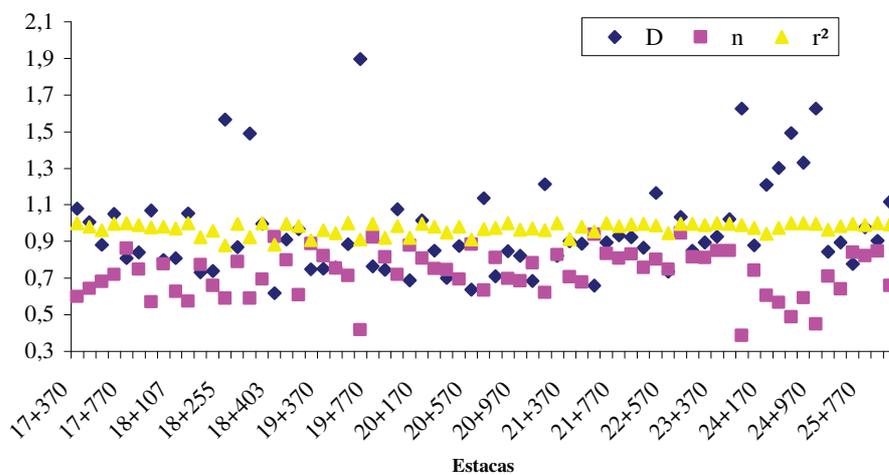


Figura 65 – Ensaio granulométrico no Trecho TR22

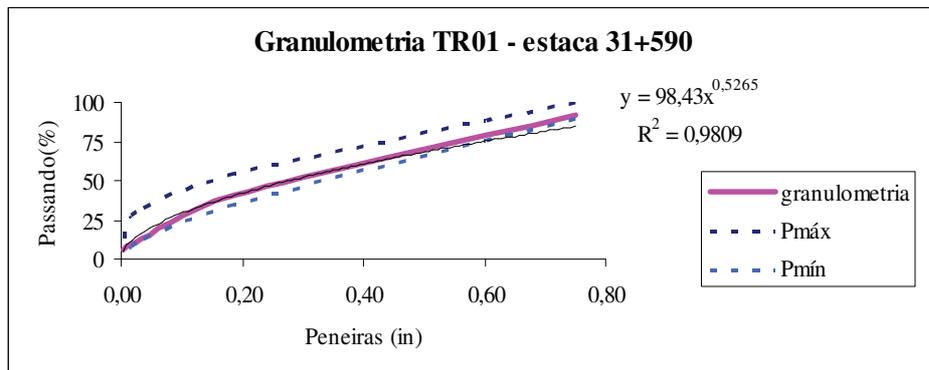


Figura 66 – Exemplo de curva de ensaio granulométrico no Trecho TR01

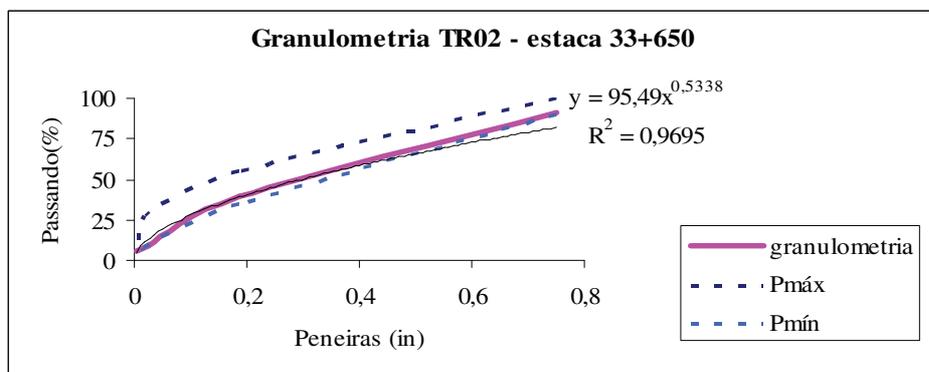


Figura 67 – Exemplo de curva de ensaio granulométrico no Trecho TR02

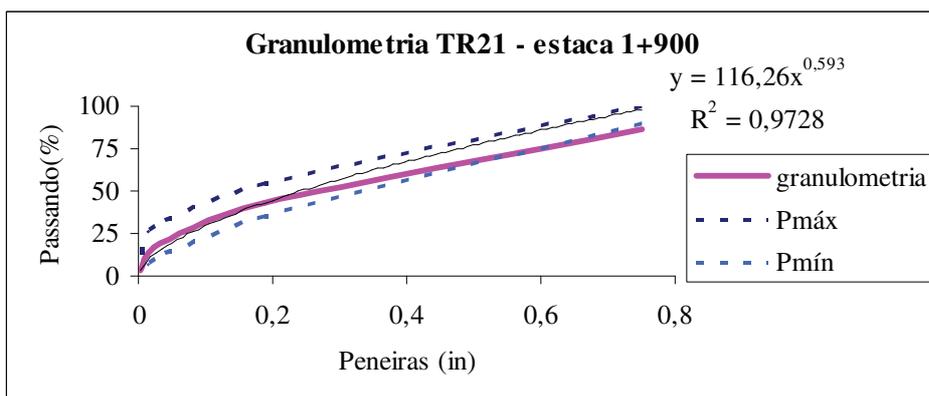


Figura 68 – Exemplo de curva de ensaio granulométrico no Trecho TR21

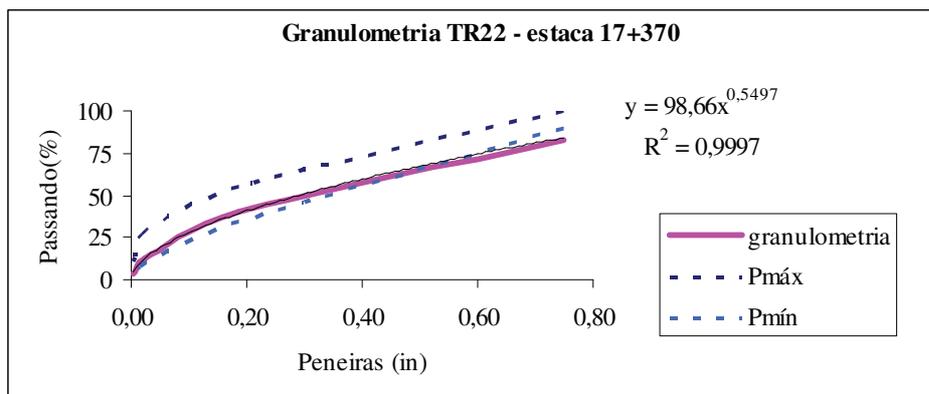


Figura 69 – Exemplo de curva de ensaio granulométrico no Trecho TR22

5.3.1.3 Densidade e equivalente de areia

É importante saber e controlar a densidade das camadas do pavimento durante a sua execução. Para tanto, foram utilizados os ensaios de Proctor Modificado e Cone de Areia para a verificação da densidade da base reciclada após sua compactação. O primeiro realizado em no campo e o segundo realizado em laboratório.

Os testes foram executados nos trechos em estudo com espaçamento de 500 metros entres os pontos de ensaio, sendo que os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Resultados dos ensaios de Proctor modificado e equivalente de areia

Trecho	Extensão (m)	Proctor Modificado			Equivalente de Areia	
		Grau de Compactação da brita graduada		Densidade	Desvio Padrão	Média
		Desvio Padrão	Média			
TR01	4900	1,36	101,52		4,90	43,05
TR02	5000	0,86	101,01	2,466	6,21	35,48
TR21	14000	0,84	101,31	2,460	7,42	55,95
TR22	8600	1,58	101,89	2,295	6,47	57,36

5.3.1.4 Tratamento Superficial Duplo (TSD)

A granulometria do TSD foi realizada com espaçamentos de 500 metros em ambos os lados da via. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 34 e 35.

Tabela 34 – Granulometria do TSD (lado esquerdo) nos trechos TR01, TR02, TR21 e TR22 (DAER/RS,2005)

Granulometria									
Trecho	Lado Esquerdo	1"	3/4	1/2	3/8	Nº 4	Nº 8	Nº 16	
TR01	1ª CAMADA	Média =	100,00	97,87	45,71	11,12	2,03		
		Desvio =	-	0,62	1,65	1,63	0,41		
		Cv (%) =	-	0,63	3,60	14,65	19,98		
	2ª CAMADA	Média =			100,00	95,92	12,59	1,88	1,03
		Desvio =			-	2,25	1,72	0,41	0,20
		Cv (%) =			-	2,34	13,65	21,60	19,35
TR02	1ª CAMADA	Média =	100,00	97,10	44,10	10,88	1,08		
		Desvio =	-	0,76	1,73	2,54	0,61		
		Cv (%) =	-	0,76	3,93	23,40	56,52		
	2ª CAMADA	Média =			100,00	97,30	13,75	2,18	1,35
		Desvio =			-	2,01	2,05	1,17	1,24
		Cv (%) =			-	2,06	14,91	53,93	92,22
TR21	1ª CAMADA	Média =	100,00	97,77	44,72	11,52	1,96		
		Desvio =	-	0,89	2,02	1,48	0,46		
		Cv (%) =	-	0,91	4,52	12,85	23,68		
	2ª CAMADA	Média =		100,00	100,00	95,12	12,84	1,78	0,78
		Desvio =		-	-	1,82	1,90	0,32	0,21
		Cv (%) =		-	-	1,91	14,80	18,19	26,83
Trecho	Lado esquerdo	1"	3/4	1/2	3/8	Nº 4	Nº 8	Nº 16	
TR22	1ª CAMADA	Média =	100,00	94,83	39,68	9,56	0,90		
		Desvio =	-	17,16	9,37	3,02	0,31		
		Cv (%) =	-	18,09	23,61	31,58	34,35		
	2ª CAMADA	Média =			100,00	97,00	12,72	1,24	0,65
		Desvio =			-	1,68	1,91	0,39	0,24
		Cv (%) =			-	1,73	15,02	31,18	37,40

Tabela 35 – Granulometria TSD (lado direito) nos Trechos TR01, TR02, TR21 e TR22
(DAER/RS,2005)

Granulometria									
Trecho	Lado Direito	1"	3/4	1/2	3/8	Nº 4	Nº 8	Nº 16	
TR01	1ª CAMADA	Média =	100,00	98,50	45,58	11,21	1,86		
		Desvio =	-	1,17	1,87	1,83	0,57		
		Cv (%) =	-	1,19	4,09	16,35	30,50		
	2ª CAMADA	Média =			100,00	97,03	12,84	1,75	0,86
		Desvio =			-	1,08	1,78	0,42	0,17
		Cv (%) =			-	1,12	13,85	24,05	19,54
TR02	1ª CAMADA	Média =	100,00	97,33	44,10	12,08	1,15		
		Desvio =	-	1,20	1,10	2,05	0,26		
		Cv (%) =	-	1,24	2,50	16,99	23,01		
	2ª CAMADA	Média =			100,00	94,85	12,73	2,05	1,15
		Desvio =			-	2,46	0,90	1,04	0,44
		Cv (%) =			-	2,59	7,07	50,62	37,90
TR21	1ª CAMADA	Média =	100,00	97,77	44,72	11,52	1,96		
		Desvio =	-	0,89	2,02	1,48	0,46		
		Cv (%) =	-	0,91	4,52	12,85	23,68		
	2ª CAMADA	Média =		100,00	100,00	95,12	12,84	1,78	0,78
		Desvio =		-	-	1,82	1,90	0,32	0,21
		Cv (%) =		-	-	1,91	14,80	18,19	26,83
TR22	1ª CAMADA	Média =	100,00	98,26	43,80	11,49	1,87		
		Desvio =	-	1,28	2,42	2,01	1,21		
		Cv (%) =	-	1,30	5,53	17,46	64,69		
	2ª CAMADA	Média =			100,00	95,92	12,79	1,21	0,66
		Desvio =			-	2,53	2,31	0,63	0,36
		Cv (%) =			-	2,63	18,08	52,35	54,89

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os resultados dos ensaios realizados durante o processo de execução da reciclagem da base granular apresentados no Capítulo 5 desta dissertação.

6.1 Adequação dos trechos executados aos critérios propostos

O ensaio de CBR “in situ” através do DCP apresentou resultados satisfatórios em relação às bases recicladas nos trechos de estudo. Para obtenção dos valores de CBR, numa primeira etapa, foi adotada a equação do USACE que correlaciona CBR e DCP:

$$CBR = \frac{292}{DCP} \quad (32)$$

No trecho TR01 os valores de CBR foram considerados aceitos, conforme análises realizadas em intervalos de 900 metros. Os valores de CBR para o respectivo trecho variaram de $CBR_{\text{mín}} = 62$ e $CBR_{\text{máx}} = 87$ garantindo a aceitação do trecho no que se refere a sua capacidade de suporte. O trecho TR02 apresentou valor médio de $CBR_{\text{médio}} = 64.65$, e valores máximos e mínimos iguais a 57 e 72, respectivamente, garantindo dessa forma, a sua aceitação à luz dos limites definidos a priori. No caso do trecho TR21 obteve-se um $CBR_{\text{médio}} = 71$, enquanto que no trecho TR22 o $CBR_{\text{médio}} = 64$, de modo que ambas as rodovias tiveram as bases recicladas aceitas em termos de capacidade de suporte. Estes trechos foram considerados aceitos, segundo os valores médios obtidos em cada subtrecho de 900 metros e baseado nas especificações que ditam os valores de laboratório, nas condições de projeto para compactação (umidade e densidade ótimas do Proctor Modificado) e após saturação de 4 dias, com valores de projeto: $CBR_p = 60$ em tráfego leve e $CBR_p = 80$ em tráfego pesado.

A Curva DCP consiste em uma representação do número acumulado de golpes, para a penetração da haste (DCP), com a profundidade que se deseja ensaiar ou que foi atingida. A figura 70 mostra um exemplo de curva DCP, onde o eixo das ordenadas indica a profundidade e o eixo das abscissas, o número acumulado de golpes para alcançar estas profundidades.

A inclinação das retas representa o índice de penetração (DN, em mm/golpe), o qual é obtido através da razão entre a profundidade e o número de golpes necessário para penetrar até a respectiva profundidade. Quando é constante, como no caso apresentado, significa uma uniformidade das propriedades do material, ou seja, considera-se que o material seja homogêneo. Sua variação implica numa mudança de propriedade do material (teor de umidade ou na sua massa específica aparente) ou uma mudança de camada. No gráfico pode-se observar a presença de apenas 1 camada bem definida de 165 mm de espessura com DN de 5,5 mm/golpe.

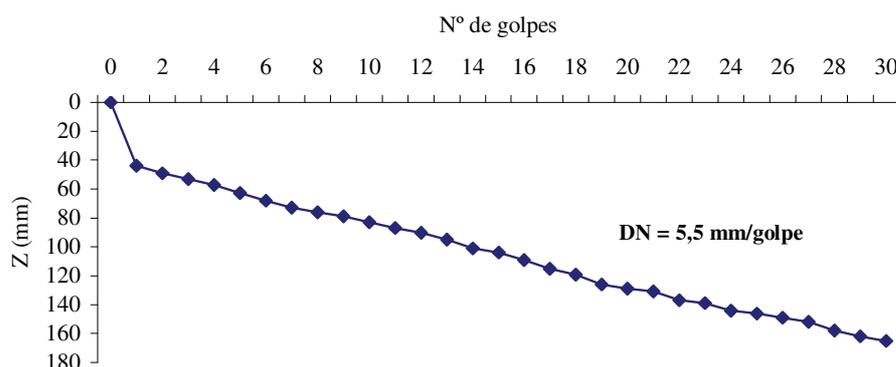


Figura 70 – Exemplo de curva de ensaio DCP

Conforme Alves (2002), a distribuição de resistência normalizada de uma estrutura de pavimento é definida como a variação na resistência das camadas com profundidade. De forma geral, a resistência da camada decresce com a profundidade e, em princípio, se este decréscimo é regular e sem qualquer descontinuidade a camada é considerada equilibrada.

Os dados de campo possibilitaram a investigação dos valores de CBR, através de outras correlações, para que fosse possível estabelecer a equação mais adequada a ser inserida na proposta inicial de controle tecnológico, idealizada neste estudo, já que não se tornou possível determinar uma correlação através dos resultados de CBR obtidos no campo.

Dentre todos os autores pesquisados e depois de uma extensa procura em trabalhos já realizados, foram selecionadas as seguintes correlações para compor o cálculo do valor de CBR nos trechos em estudo:

- ❖ Harison (1987) $\rightarrow \text{LogCBR} = 2,55 - 1,14\text{Log}(DPI)$
- ❖ Livneh et al (1992) $\rightarrow \text{LogCBR} = 2,45 - 1,12\text{Log}(DPI)$
- ❖ Kleyln (1975) $\rightarrow \text{LogCBR} = 2,438 - 1,065\text{Log}(DPI)$
- ❖ South Africa $\rightarrow \text{CBR} = 410 \times (DPI)^{-1,27}$ para $DPI > 2$
- ❖ Harison (1987) $\rightarrow \text{LogCBR} = 2,55 - 0,96\text{Log}(DPI)$
- ❖ Mn/Dot (1992) $\rightarrow \text{CBR} = \frac{292}{DPI^{1,12}}$
- ❖ USACE $\rightarrow \text{CBR} = \frac{292}{DCP}$

As correlações foram aplicadas para os valores de DCP coletados nos quatro trechos analisados. As diferentes correlações apresentam alguns valores bastante dispersos e outros muito próximos, como podem ser visto nas Figuras 71 a 76. As Figuras 71 e 72 mostram valores de CBR para uma estaca especifica dentro do trecho. As figuras 73 a 76 representam a média de DCP obtida para cada trecho como um todo.

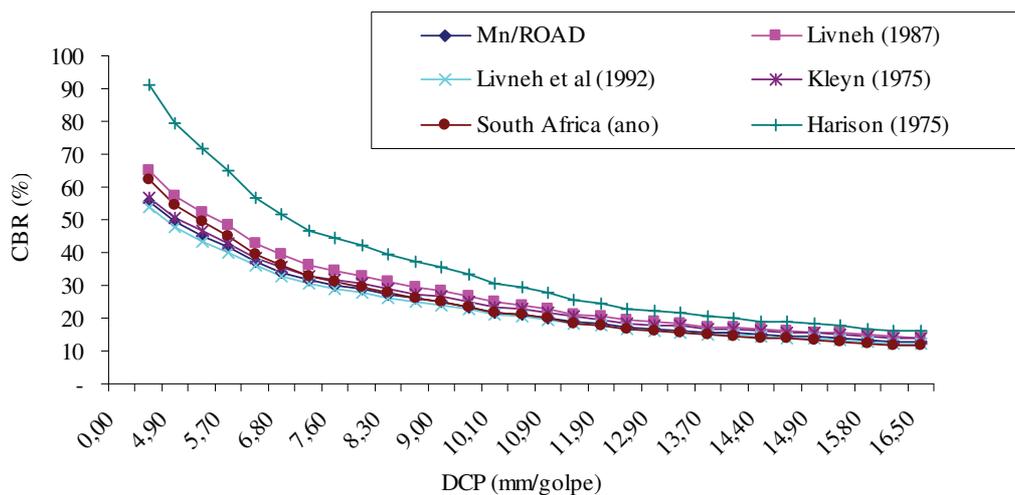


Figura 71 – Correlações CBRxDCP do ensaio realizado por estaca (exemplo)

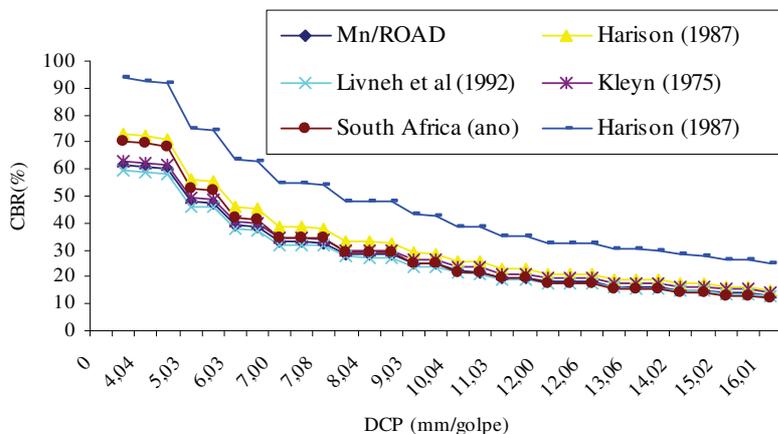


Figura 72 – Correlações CBRxDCP do ensaio realizado por estaca (exemplo)

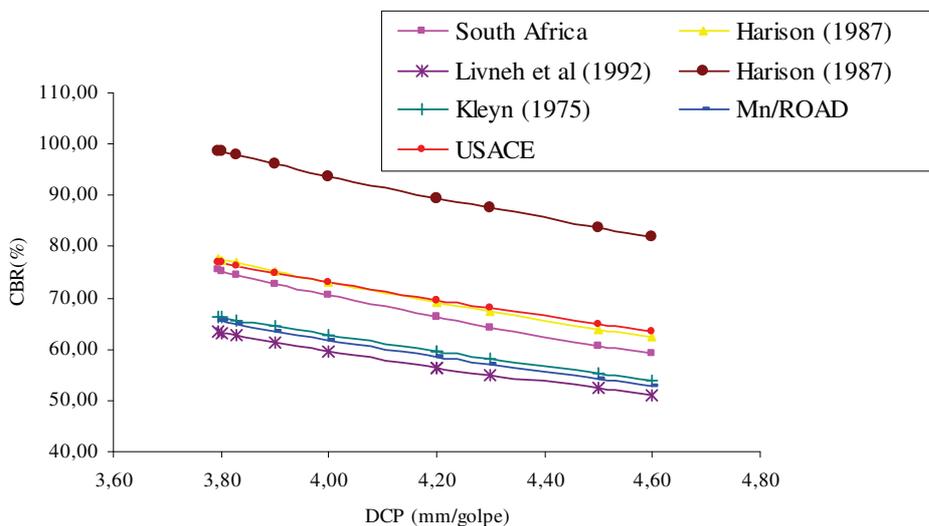


Figura 73 – Correlações CBRxDCP no Trecho TR01

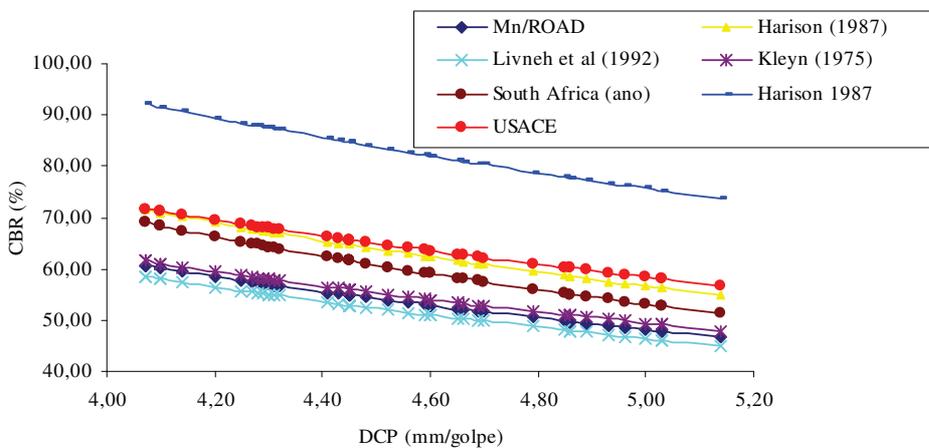


Figura 74 – Correlações CBRxDCP no TR02

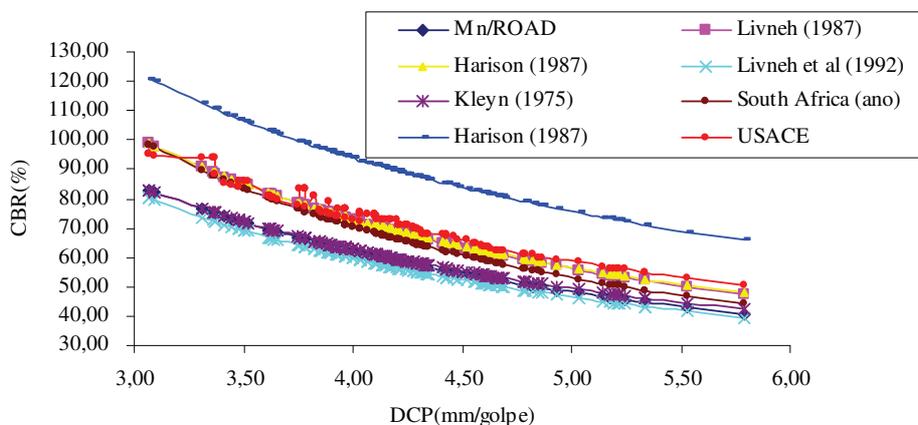


Figura 75 – Correlações CBRxDCP no TR21

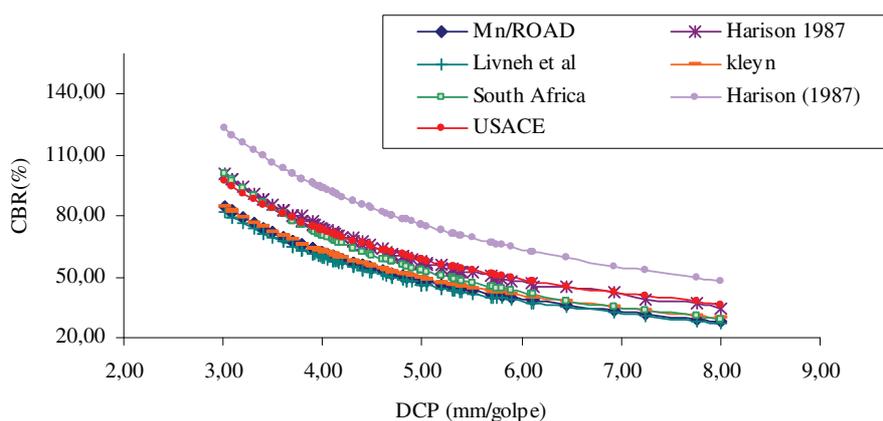


Figura 76 – Correlações CBRxDCP no TR22

Após as análises efetuadas, pode-se verificar que dentre as correlações aplicadas, as que mais se afastam do grupo todo, são as propostas por Harison (1987 e 1975), mostrando valores mais expressivos. As demais correlações tendem a apresentarem menores valores de CBR. Devido a essa dispersão nos resultados encontrados, torna-se difícil optar pela correlação que seria a “ideal” para a determinação do CBR *in situ*. Conforme pode ser visto na Tabela 36, os valores de CBR em cada trecho, para todas as correlações propostas, apresentam-se bastante variados. Para tanto, uma solução para tornar mais confiável a determinação dos valores de CBR no campo é a realização de estudos experimentais na fase inicial de execução da obra.

Tabela 36 – Correlações CBRxDCP nos trechos TR01, TR02, TR21 e TR22

Trecho	Correlação	Número de pontos	DPI	CBR _{médio} (%)	Desvio-padrão
01	Livneh (1987)	10	4,11	70	5,73
01	South Africa	10	4,11	68	6,06
01	Harison (1987)	10	4,11	71	5,66
01	Harison (1975)	10	4,11	101	9,24
01	Livneh et al (1992)	10	4,11	58	4,54
01	Harison (1987)	10	4,11	92	6,20
01	Kleyn (1975)	10	4,11	61	4,54
01	Mn/ROAD	10	4,11	60	4,71
01	USACE	10	4,11	73	4,98
02	Livneh (1987)	43	4,54	63	4,75
02	South Africa	43	4,54	60	4,98
02	Harison (1987)	43	4,54	63	4,71
02	Harison (1975)	43	4,54	88	7,55
02	Livneh et al (1992)	43	4,54	52	3,78
02	Harison (1987)	43	4,54	83	5,20
02	Kleyn (1975)	43	4,54	55	3,80
02	Mn/ROAD	43	4,54	54	3,92
02	USACE	43	4,54	65	4,20
21	Livneh (1987)	138	4,18	69	9,88
21	South Africa	138	4,18	67	10,48
21	Harison (1987)	138	4,18	69	9,76
21	Harison (1975)	138	4,18	98	15,99
21	Livneh et al (1992)	138	4,18	57	9,84
21	Harison (1987)	138	4,18	89	10,59
21	Kleyn (1975)	138	4,18	60	7,83
21	Mn/ROAD	138	4,18	59	8,12
21	USACE	138	4,18	71	9,33
22	Livneh (1987)	90	4,61	62	14,63
22	South Africa	90	4,61	59	15,37
22	Harison (1987)	90	4,61	62	14,15
22	Harison (1975)	90	4,61	86	23,36
22	Livneh et al (1992)	90	4,61	51	11,64
22	Harison (1987)	90	4,61	82	15,95
22	Kleyn (1975)	90	4,61	54	11,69
22	Mn/ROAD	90	4,61	53	12,06
22	USACE	90	4,61	64	12,88

Os trechos foram analisados quanto a sua capacidade de suporte utilizando, também, o ensaio CBR na energia modificada. Os resultados fornecidos pelo DAER/RS estão apresentados na Tabela 37 e mostram valores expressivos de CBR para todos os trechos.

Os altos valores de CBR levam ao questionamento da veracidade destes resultados. Podem ter ocorrido erros na execução ou análise dos dados. Este fato impede na prática, a possibilidade de se estudar uma correlação entre DCP e CBR, que se aplique aos casos de obra e tipos de materiais usados no Rio Grande do Sul em pavimentos rodoviários. A possível

criação de uma correlação utilizando estes resultados poderia levar a uma equação errônea e que não se mostrasse adequada ao estudo.

Tabela 37 – Ensaio CBR nos Trechos TR01, TR02, TR21 e TR22, (DAER, 2005)

Local	Km	Trecho	Densidade máxima (g/m ³)	Umidade ótima (%)	CBR _{Laboratório} (%)
RS/469		TR01	2390	10,7	101
BR/285	20+690	TR01	2310	8,6	167
BR/285	22+650	TR01	2335	8,8	166
RS/126	41+000	TR02	2460	8,2	128
RS/126	43+100	TR02	2380	8,2	106
RS/126	44+400	TR02	2420	7,8	120
RS/467	8+200	TR21	2430	8,2	139
RS/467	10+940	TR21	2460	8,0	119
RS/126	19+000	TR22	2470	9,0	166
RS/126	21+620	TR22	2390	9,0	153
RS/467	24+840	TR22	2470	8,6	175

A granulometria da base reciclada foi verificada utilizando a Curva de Talbot, sendo que num primeiro momento, foram definidos os valores de D , n e r^2 , os quais determinaram os limites para a granulometria específica das faixas do DAER (Base Granular Reciclada para o Lote 1 no Programa CREMA do DAER/RS, 2005):

$$D_{\text{mín}} \geq 0,63''$$

$$D_{\text{máx}} \leq 2,1''$$

$$n_{\text{mín}} \geq 0,36$$

$$n_{\text{máx}} \leq 0,74$$

$$r^2 > 0,70, \text{ em pelo menos } 90\% \text{ dos pontos}$$

Com base nestas considerações, é correto afirmar que o material reciclado (revestimento + base) encontrado nos quatro trechos estudados se enquadra na faixa granulométrica a ser atendida. É possível verificar que a média dos elementos D , n e r^2 , apresentadas nas tabelas do anexo 1, dessa dissertação, apontam valores aceitáveis e satisfatórios ao que se é exigido.

A Tabela 38 apresenta os valores de $D_{\text{máx}}$ e $D_{\text{mín}}$ de cada trecho, bem como, os valores de $n_{\text{máx}}$ e $n_{\text{mín}}$ encontrados para os trechos em questão. A figuras 77 a 79 mostram os valores de D , n e r^2 de todos os trechos, em um mesmo gráfico.

Tabela 38 – Valores máximos e mínimos de D e n

Trecho	$D_{\text{mín}}$	$D_{\text{máx}}$	$n_{\text{mín}}$	$n_{\text{máx}}$
TR01	1,159	1,400	0,588	0,642
TR02	1,134	1,242	0,623	0,663
TR21	0,984	1,025	0,652	0,677
TR22	0,923	1,005	0,710	0,749

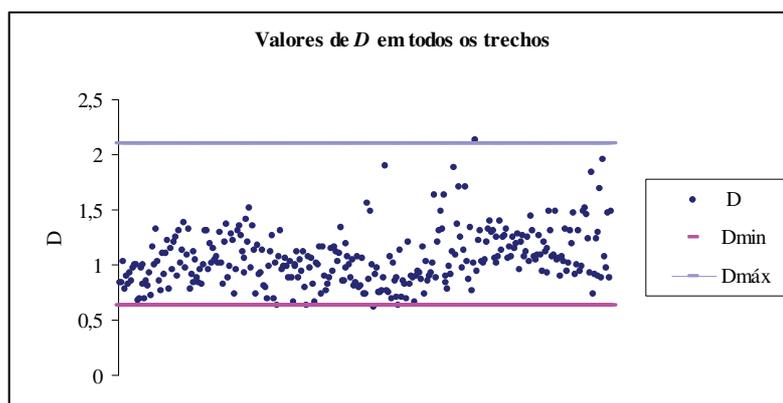


Figura 77 – Valores de D em todos os trechos

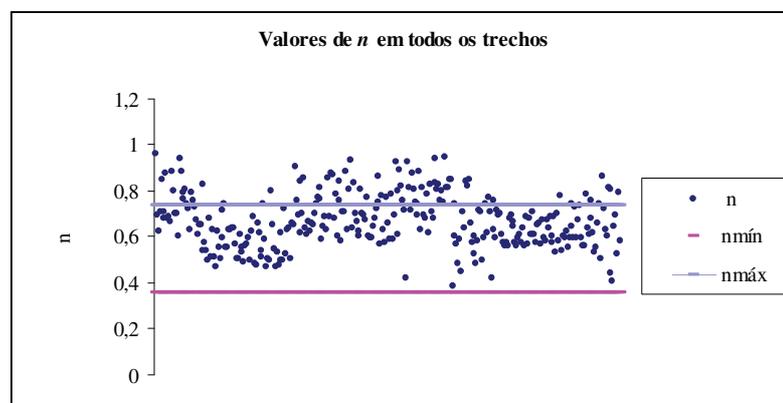


Figura 78 – Valores de n em todos os trechos

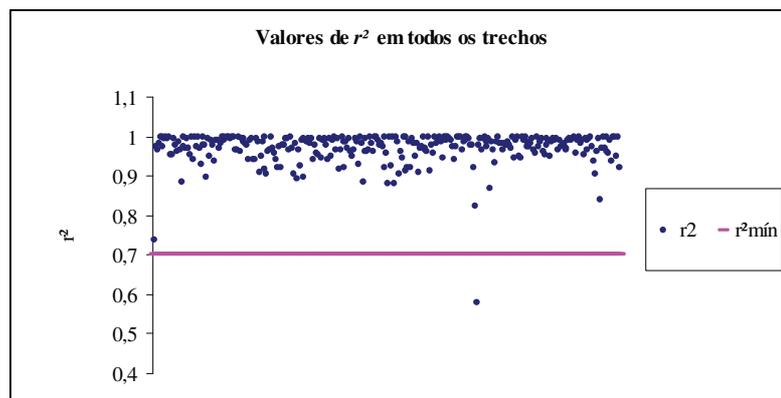


Figura 79 – Valores de r^2 em todos os trechos

Na Tabela 39 são identificados o número de pontos ensaiados e a porcentagem de pontos que se encontram dentro e fora dos limites estipulados para D e n .

Com base nos resultados, é possível afirmar que os valores de n para os trechos é questionável, na medida em que deveriam apresentar pelo menos 90% dos valores dentro dos limites especificados, mas como o resultado é avaliado pela média, os pontos se enquadram nos limites e acabam por serem aceitos.

Tabela 39 – Avaliação dos resultados de D e n nos trechos TR01, TR02, TR21 e TR22

		TR01	TR02	TR21	TR22
Nº de pontos fora dos limites	n	3	9	36	35
	D	1	0	0	0
Nº de pontos ensaiados	n	58	44	145	67
	D	58	44	145	67
% de pontos fora	n	5,17	20,45	24,83	52,23
	D	1,72	0	0	0
% Total de pontos fora	n	26,40			
	D	0,31			

Um último estudo realizado foi a verificação do módulo de elasticidade (Módulo de Young) da camada reciclada, através de correlações com o DPC (mm/golpe). Através do estudo realizado pelo Mn/DOT (2006), foi possível a obtenção de uma correlação entre o Módulo de Elasticidade e o ensaio DCP, para materiais granulares. A correlação foi aplicada

para os valores de DPI encontrados no campo. Os resultados estão apresentados nas Figuras 80 a 84. Os valores de CBR utilizados foram os obtidos pela equação da USACE, sendo que foram analisados de forma meramente ilustrativa, podendo os gráficos ser gerados, também, com os demais valores de CBR obtidos pelas outras equações utilizadas no estudo.

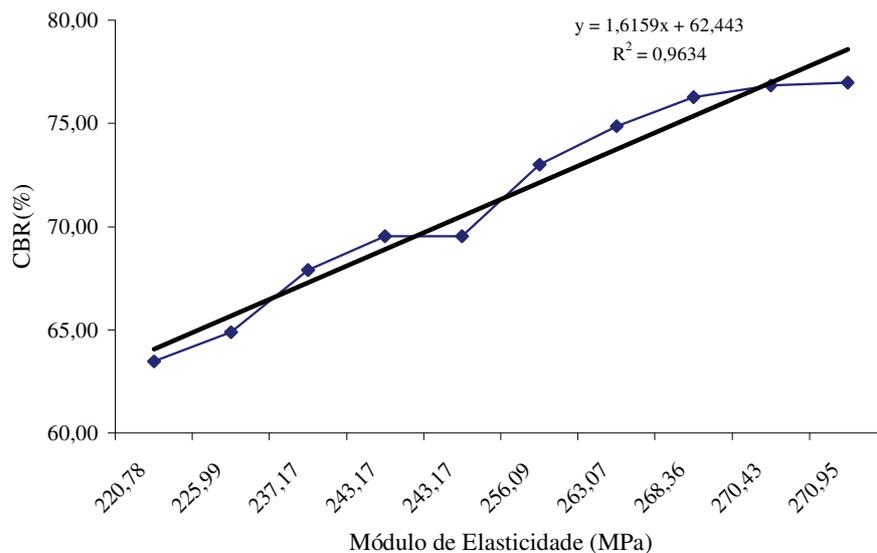


Figura 80 – Correlação DCPxE no trecho TR01

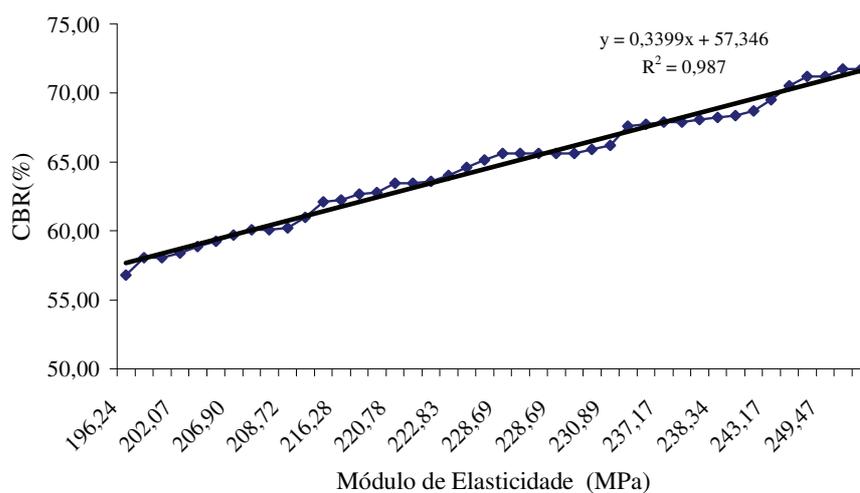


Figura 81 – Correlação DCPxE no trecho TR02

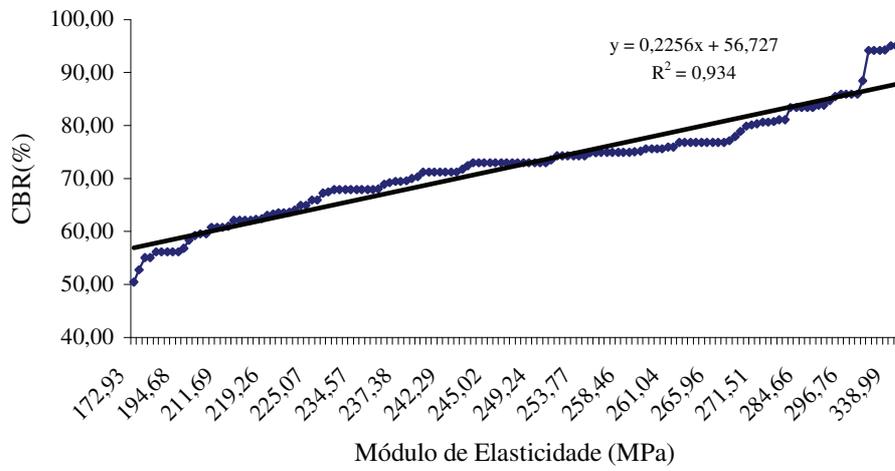


Figura 82 – Correlação DCPxE no trecho TR21

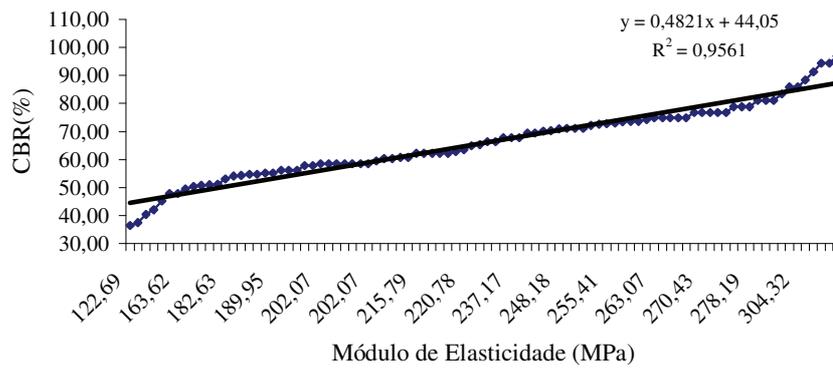


Figura 83 – Correlação DCPxE no trecho TR22

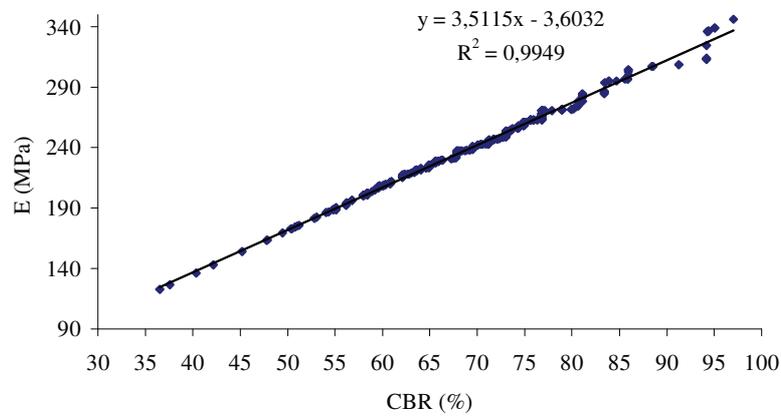


Figura 84 – Correlação CBRxE em todos trechos

Através dos resultados apresentados nas figuras 80 a 84, verificou-se que existe uma relação entre o CBR e o Módulo de Elasticidade (E), pois conforme aumenta o CBR, os valores de módulo também crescem. Pode-se verificar, portanto, que a correlação sugerida pelo Mn/DOT é aplicável a materiais granulares e que os valores obtidos para a camada de base reciclada, foram satisfatórios.

Ainda, realizou-se uma análise complementar através da verificação do módulo de elasticidade através da equação desenvolvida para materiais granulares:

$$E = 17 \times CBR \quad (33)$$

Os resultados obtidos com a equação acima, como exemplo, ilustram os valores de módulos do trecho TR02, conforme pode ser visto na Figura 85. O gráfico possibilita verificar que valores de CBR (%) e os valores de E tendem a manter uma correlação. Pode-se, também, observar que os valores obtidos com equação do Mn/DOT apresentaram valores de módulo expressivos quando comparados aos valores obtidos com a equação 32.

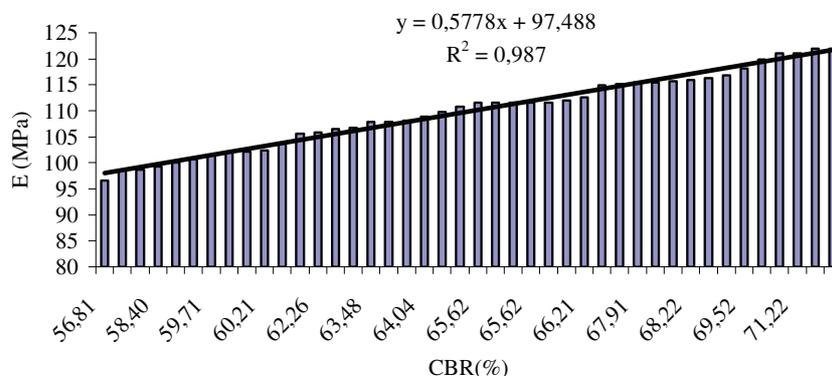


Figura 85 – Correlação E x CBR no trecho TR02

Para validação da aplicabilidade prática das correlações entre E x CBR, devem ser realizados ensaios de laboratório e investigações experimentais no campo, para que se possa obter uma equação que, de fato, reflita as condições do material encontrado na pista.

6.2 Identificação de necessidades de alterações/adaptações na especificação de serviço proposta

A necessidade de se buscar a garantia de qualidade para as obras a serem executadas nos pavimentos em estudo requer o estabelecimento de critérios para aceitação da camada de base reciclada. De modo geral, as premissas estabelecidas na proposta inicial de especificação técnica se mostraram adequada para as análises realizadas nos trechos em estudo. Verificou-se, no entanto, que algumas adaptações e modificações deveriam ser feitas para obtenção de melhores resultados, por exemplo, calcular o módulo de elasticidade da camada, através de correlações do DCP com o Light Weight Deflectometer (LWD), conforme pode ser verificado na Tabela 40.

Tabela 40 – Adequações e melhorias inseridas na proposta

Parâmetro	Proposta inicial	Adequação	Justificativa
DCP	Intervalos de 100 metros	Intervalos de 50 metros	Formar um maior banco de dados
Trechos experimentais	Inexistente	Ensaio de CBR a cada 100m e ensaios DCP a cada 30 m	Estabelecimento de correlações CBRxDCP
LWD	Inexistente	Intervalos de 100 m	Determinação do módulo de elasticidade

Portanto, baseado nas especificações brasileiras para bases novas e nos resultados obtidos através da aplicação prática da proposta inicial foram propostas algumas alterações e melhorias para a Proposta de Especificação Técnica:

PROPOSTA DE ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA O CONTROLE TECNOLÓGICO DE BASES GRANULARES RECICLADAS IN SITU (PROCEDIMENTOS)

SUMÁRIO

1. Objetivo
2. Referências
3. Definição
4. Condições específicas
5. Equipamentos
6. Execução
7. Inspeção

1. OBJETIVO

Estabelecer a sistemática a ser empregada no controle tecnológico da execução de bases granulares recicladas *in situ*.

2. REFERÊNCIAS

- DAER-ES-P 08/91 - Base Granular
- DER/PR-ES-P 34/05 - Pavimentação - reciclagem de pavimento “in situ” com estabilização granulométrica
- DNER-ME 035/98 - Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”
- DNER-ME 083/98 - Agregados – análise granulométrica
- DNER – ES 303/97 - Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente
- DNER-ME 049/94 - Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas
- DNER-ME 054/94 - Equivalente de areia
- DNER-ME 080/94 - Solos - análise granulométrica por peneiramento
- DNER-ME 089/94 - Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio
- DNER-ME 092/94 - Solos – determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D6951-03 - Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA, 1997 - Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments

MINNESOTA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (Mn/DOT) - Validation of DCP and LWD Moisture Specifications for Granular Materials, 2006.

MnROAD - User Guide to the Dynamic Cone Penetrometer, 1996.

TRL Project Report PR/INT/277/04 – Dynamic Cone Penetrometer tests and analysis. Technical Information Note

WIRTGEN, 2005 - Manual de reciclagem a frio

3. DEFINIÇÃO

Base granular reciclada *in situ* – camada granular de pavimentação composta pelo revestimento asfáltico existente na pista e toda ou parte da espessura de base e/ou sub-base granular antiga, executada sobre a sub-base ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado.

4. CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

4.1 Materiais: Os materiais constituintes são pedra britada ou produtos provenientes de britagem, material asfáltico proveniente das camadas de revestimento de pavimentos flexíveis.

4.1.1 Os materiais adicionais eventualmente destinados à confecção da base reciclada devem apresentar as seguintes características:

- a) Quando submetidos ao ensaio de durabilidade com solução de sulfato de sódio, em cinco ciclos, pelo método DNER 089/94, os agregados da mistura reciclada devem apresentar perdas inferiores aos seguintes limites (DER/PR ES-P 34/05):
 - Agregados graúdos: 12%;
 - Agregados miúdos: 15%.

- b) Para o agregado retido na peneira nº 10, a percentagem de desgaste no ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME 35/98) não deve ser superior a 50%.

- c) O agregado miúdo deve apresentar equivalente de areia (DNER-ME 054/97) igual ou superior a 50%.

A verificação dos aspectos que são controlados por meio de restrições impostas aos parâmetros LL, IP e teor de finos (% que passa na #200) será feita aplicando-se o critério usual relativo ao Equivalente de Areia.

4.1.2 Água

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

4.2 Características da mistura reciclada

4.2.1 Deverão possuir composição granulométrica satisfazendo a uma das faixas da tabela a seguir, que é utilizada como referência pelo DNIT para camada de base granular. Com base no limite superior ($P_{máx}$) e inferior ($P_{mín}$) apresentados nas faixas da Tabelas 1 do DNER serão determinados os parâmetros D e n da Curva de Talbot correspondentes às fronteiras que definem a faixa em cada subclasse.

Tabela 1 – Faixas granulométricas de acordo com nº N de tráfego do DNER (DNER, 1997)

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $< 5 \times 10^6$		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

4.2.1.1 A verificação do enquadramento da granulometria deverá ser feita pela aplicação dos seguintes critérios:

- a) A Curva de Talbot deverá ser aplicável, com $r^2 > 0,70$ em pelo menos 90% dos pontos, espaçados em no máximo 200 m;
- b) Os parâmetros D e n da Curva de Talbot deverão ter seus valores médios e correspondentes desvios-padrão determinados em segmentos, com no mínimo 9 pontos, espaçados em no máximo 200 m, e deverão atender às faixas, associadas às faixas granulométricas especificadas:

onde:

$$D_{\min} = D_{\text{méd}} - \frac{1,29\sigma_D}{\sqrt{N}}$$

$$D_{\max} = D_{\text{méd}} + \frac{1,29\sigma_D}{\sqrt{N}}$$

$$n_{\min} = n_{\text{méd}} - \frac{1,29\sigma_n}{\sqrt{N}}$$

$$n_{\max} = n_{\text{méd}} + \frac{1,29\sigma_n}{\sqrt{N}}$$

sendo N o número de pontos de ensaio, σ_D é o desvio-padrão do diâmetro máximo de agregados e σ_n é o desvio-padrão do expoente n da Curva de Talbot.

4.2.2 O Índice de Suporte Califórnia (CBR) de laboratório, nas condições de projeto para compactação (umidade e densidade ótimas do Proctor Modificado) e após saturação de 4 dias, com valores de projeto: $\text{CBR}_P = 60$ em tráfego leve ($N \leq 5 \times 10^6$) e $\text{CBR}_P = 80$ em tráfego pesado ($N \geq 5 \times 10^6$), ou CBR de laboratório nas condições de umidade e densidade próximas às de campo, sem saturação de 4 dias, com valores de projeto iguais aos do caso de execução do ensaio DCP.

4.2.3 CBR *in situ*, determinado através do ensaio DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*), com valor de projeto $\text{CBR}_P = 80$ para rodovias de tráfego leve ($N_{\text{ano}}^{\text{AASHTO}} < 1,0 \times 10^5$ repetições anuais do eixo-padrão de 8,2 tf) e $\text{CBR}_P = 100$ para rodovias de tráfego pesado, onde CBR_P é o valor de projeto, obtido pela equação 1:

$$\text{CBR}_P = \text{CBR}_{\text{médio}} - \frac{S \times t_{90}}{\sqrt{n-1}} \quad (1)$$

onde $\text{CBR}_{\text{médio}}$ é o valor médio, S é o desvio-padrão, t_{90} é o valor da Distribuição t de Student para 90% de confiança, e n é o número de pontos da amostra. Os resultados terão por finalidade tanto a verificação da qualidade obtida pelo processo como a verificação do grau de homogeneidade da execução.

Ainda, deve ser calculado em cada segmento o parâmetro estatístico através da equação 2:

$$\text{CBR}_{\min} = \text{CBR}_{\text{médio}} - \frac{1,29\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

onde σ é o desvio-padrão e n é o número de pontos. Este mínimo estatístico deverá atender ao critério: $\text{CBR}_{\min} \geq \text{CBR}_P$.

4.2.4 Para o cálculo do CBR há que se aplicar equações de correlação entre CBR e DCP (DPI) que sejam adequadas para o tipo de material em uso. Para tanto, é necessária a execução de um trecho experimental, na fase inicial da obra, para realização de ensaios de CBR e ensaios de DCP de modo a permitir o estabelecimento de uma correlação para a obra. Aplicando-se a seguinte seqüência de procedimentos:

- Um ensaio CBR a cada 100 metros;
- Um ensaio DCP a cada 30 metros;
- Elaboração da correlação através dos resultados obtidos de CBR e DCP. Os dados podem ser analisados através de modelos lineares, logarítmicos, exponenciais ou bi-logarítmicos (log x log). A correlação pode ter a seguinte forma:
 - $\log(CBR) = a + b \times \log(DCP)$

onde: DCP = resistência à penetração (mm/golpe)

a = constante com valores entre 2,44 e 2,60

b = constante com valores entre -1,07 e -1,16

e ainda, $CBR = a \times DCP^b$

onde: CBR = é dado em porcentagem (%)

DCP = resistência à penetração (mm/golpe)

a e b = são constantes obtidas através da análise de regressão

A tabela 2 apresentada pelo guia do Mn/ROAD Minnessota mostra valores típicos de taxas de CBR e DPI, as quais podem ser utilizadas para estabelecer a correlação mais adequada a ser usada. O CBR é apresentado em porcentagem e o DPI em mm/golpe.

Tabela 2 – Taxas de CBR e DPI (Mn/ROAD, 1993)

Tipo de solo	Valor de CBR (%)	Valor de DPI(mm/golpe)
Argila	2-17	127-15
Areia	17-45	15-6
Pedregulho	53-100	5-2,7

4.2.5 A determinação do módulo de elasticidade da camada reciclada poderá ser realizada através de ensaios de campo como os equipamentos do tipo Falling Weight Deflectometer (FWD) ou Light Weight Deflectometer (LWD). O ensaio deve ser realizado a cada 100 metros. A partir de investigações experimentais, também, pode-se determinar o valor da

rigidez da camada reciclada através de correlação com o DCP. Um exemplo de correlação proposta com esse propósito é a desenvolvida pe MnDOT (2006):

$$E = 10^{3,04758 - [1,06166 \log(DPI)]} \quad (3)$$

Onde:

E = Módulo de Young (MPa)

DPI = Índice de penetração (mm/golpe)

5. EQUIPAMENTOS

5.1 A seleção do equipamento: a reciclagem exige mais do que apenas uma recicladora. Compactadores, niveladoras e tanques de água também são essenciais, assim como os transportadores necessários para trazer os agentes estabilizadores até a recicladora quando necessário. São indicados os seguintes tipos de equipamentos para a execução da base granular reciclada, (WIRTGEN, 2004):

- a) A recicladora: sua escolha será influenciada pelo tamanho e pelo tipo de projeto.
- b) Equipamento de compactação: três rolos carro, em geral, são necessários para compactação do material que vem atrás da recicladora:
 - Rolo liso com esforço de compactação de alta amplitude para penetrar até o fundo da camada;
 - Rolo liso vibratório aplicado com baixa amplitude;
 - Rolo de pneumáticos de pressão variável.
- c) Tanques de grande escala: tanques são acoplados a recicladora para o fornecimento de água e/ou agentes estabilizadores líquidos. A capacidade desses tanques deve ser compatível com a área de trabalho e a geometria da estrada.
 - Tanques com capacidade entre 10.000 e 15.000 litros para projetos pequenos;
 - Grandes tanques semi-reboque com capacidade para mais de 20.000 litros, para projetos de larga escala para terrenos planos ou irregulares.
- d) motoniveladora;

6. EXECUÇÃO

6.1 A execução da base reciclada compreende as operações de remoção e incorporação da camada de revestimento existente à base granular do pavimento antigo através da recicladora, umedecimento ou secagem dos materiais realizados na pista, regularização do material reciclado, compactação e acabamento na pista devidamente preparada na largura desejada, nas quantidades que permitam, após a compactação, atingir a espessura projetada.

6.1.1 Reciclagem na seção e espessura de corte indicada em projeto, incorporando-se o revestimento asfáltico à base existentes na pista, com a concomitante adição de água, de acordo com o projeto de dosagem.

6.1.2 Compactação da camada reciclada:

- a) Imediatamente após o uso da recicladora, executa-se a compressão com o emprego de rolo vibratório auto-propelido, seqüenciado pelo emprego de rolos pneumáticos que assegurem a obtenção, em toda a espessura da camada, da massa específica aparente especificada.
- b) A compactação deve evoluir até que se obtenha o grau de compactação mínimo de 100%, em relação à massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio DNER-ME 129/94, executado com energia modificada.

6.1.3 O acabamento é executado com o emprego de motoniveladora atuando exclusivamente em operação de corte.

6.1.4 A proteção da camada de base reciclada deve ser realizada após a conclusão da compactação, tão logo se constate a evaporação do excesso de umidade superficial. Antes da aplicação da pintura betuminosa, a superfície deve ser limpa, mediante emprego de processos e equipamentos adequados.

6.2 A espessura mínima de qualquer camada de base reciclada deverá ser de 12 cm, após a compactação.

7. INSPEÇÃO

7.1 Controle do material

Deverão ser adotados os seguintes procedimentos:

7.1.1 Ensaio de caracterização e de equivalente de areia do material espalhado na pista pelos métodos DNER-ME 054/94 e DNER-ME 083/98, e locais determinados aleatoriamente. Deverá ser coletada uma amostra por camada para cada 500 m de pista, ou por uma jornada diária de 8 horas de trabalho para ensaio de equivalente de areia e amostras coletadas a cada 200 m para ensaio de granulometria.

A granulometria será verificada, coletando-se amostras do material reciclado, espaçadas em no máximo 200 metros, peneirando-as para obtenção das porcentagens de material retido em cada peneira. Após o peneiramento, far-se-á a adequação da granulometria do material através da aplicação da Curva de Talbot. A base reciclada deve apresentar granulometria compatível com as de uma base nova, de acordo com os seguintes limites de tolerância, definidos pela equação 3:

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (4)$$

Avaliado pelo coeficiente de determinação (r^2) do ajuste dos pontos experimentais a esta função. Valores de r^2 próximos de 1,0 indicam elevada adequação da curva granulométrica a esta função (ver Figura 1). O expoente n será utilizado para verificação do grau de homogeneidade ao longo da obra executada. As especificações granulométricas usuais procuram direcionar a produção dos materiais para valores de n não muito distantes de 0,5 a fim de maximizar a capacidade de densificação no campo.

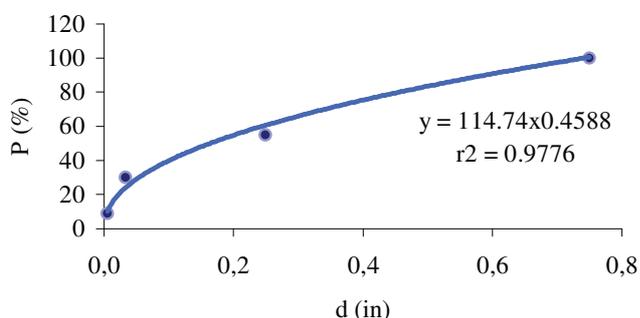


Figura 1 – Exemplo de curva granulométrica da fronteira inferior da faixa A do DAER

A determinação em laboratório do LL e do IP será desnecessária no presente caso, por se estar lidando com a reciclagem de materiais puramente granulares, oriundos do revestimento asfáltico antigo da base granular existente, em material britado.

7.1.2 Ensaio de Índice Suporte Califórnia – ISC e expansão pelo método DNER-ME 049/94, na energia de compactação indicada no projeto para o material coletado na pista, em locais determinados aleatoriamente. Deverão ser coletadas amostras a cada 500 m de pista, sendo representativas da base granular reciclada.

7.1.3 Ensaio DCP (*Cone de Penetração Dinâmica*) consiste em se aplicar golpes de sucessivos e anotar a posição de uma marca de referência na haste através da régua, anotando ao lado da posição o número de golpes. Por fim, traça-se o gráfico, *Posição da haste x número de golpes*, conforme Figura 2. Este ensaio deve ser realizado na base reciclada, em intervalos de 50 em 50 metros.

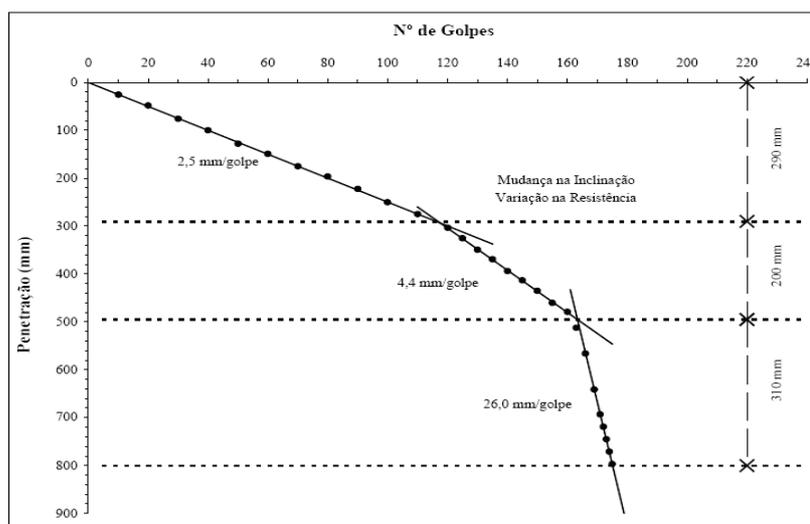


Figura 2 – Ensaio DCP (Lima, 2000)

Depois de plotados, os dados devem ser correlacionados com valores de CBR.

O espaçamento segue o proposto pelo TRL (2004), o qual define a frequência dos ensaios tendo em vista o objetivo a que se destina a investigação. A Tabela 3 apresenta as distâncias mínimas a serem respeitadas entre os pontos de ensaio DCP.

Tabela 3 – Espaços mínimos para execução do DCP (TRL, 2004)

Objetivo	Espaçamento mínimo
Manutenção de pavimentos	< 500 m
Restauração de pavimentos	< 100 m
Rodovias vicinais	< 500 m
Pistas novas	< 50 m

7.2 Controle da execução

7.2.1 Ensaio de umidade higroscópica do material reciclado a cada 100m, imediatamente após a passagem da recicladora e antes da compactação.

7.2.2 Ensaio de massa específica aparente seca “in situ” em locais escolhidos aleatoriamente, por camada, preconizados pelo método DNER-ME 092/94, espaçados em no máximo 100 metros, na seqüência LE (lado esquerdo), E (eixo), LD (lado direito), como o objetivo de determinar o GC (Grau de Compactação) e a 0,60 metros do bordo.

7.2.3 Ensaio de compactação com energia modificada, com amostras nas condições de pista, realizado a cada 500m, realizado logo após a passagem da recicladora e antes da compressão.

7.2.4 Ensaio de granulometria do material reciclado, deverá ser feito a cada 200m de pista, logo após a passagem da recicladora e antes da compressão.

7.2.5 Ensaio do ISC, realizado a cada 100m, com amostras da pista moldadas no controle de compactação, logo após a passagem da recicladora e antes da compressão.

7.2.6 Ensaio LWD, realizado a cada 100m no material reciclado, logo após a passagem da recicladora e antes da compressão.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este trabalho teve como objetivo a elaboração de uma proposta de especificação técnica para o controle tecnológico de bases granulares recicladas “in situ”, através do emprego de técnicas como o ensaio DCP e o enquadramento da granulometria pelo método da Curva de Talbot. Através dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Com base nas análises realizadas, nas alternativas de projetos propostas, para a restauração das rodovias dos trechos rodoviários, objeto desse estudo, verificou-se que a solução envolvendo a reciclagem da base *in situ* apresentou os custos de restauração reduzidos, em relação à medida de recapeamento em CBUQ. Além disso, observou-se que proposta de restauração através da reciclagem mostrou-se uma alternativa bastante atraente no que se refere à agilidade no processo e vida útil do pavimento.
- A inexistência de procedimentos adequados, em nosso meio, para a realização do controle tecnológico, de obras que envolvam a reciclagem de pavimentos, torna difícil a execução de obras desse tipo no Brasil. Atualmente, existem apenas alguns estudos, em fase inicial, voltados à idéia de desenvolver técnicas e/ou procedimentos que controlem os parâmetros que asseguram a adequação estrutural de bases granulares recicladas “in situ”.
- Durante o desenvolvimento dessa pesquisa pode-se verificar na prática a importância fundamental do processo construtivo para o desempenho das camadas recicladas. As obras de reciclagem requerem cuidados especiais no processo construtivo, por necessitar de um controle mais apurado tanto da umidade da mistura (base+revestimento) quanto na sua compactação. Limitação quanto ao tamanho máximo permitido dos agregados, profundidades e métodos de corte e a temperatura ambiente são fatores que influenciam no

processo construtivo. A escolha pela reciclagem compreende a disponibilidade de equipamentos adequados e procedimentos que levem a ter uma obra com a qualidade esperada.

- A proposta de especificação técnica mostrou-se suficiente e adequada no que se refere ao controle dos parâmetros que asseguram a adequação estrutural de bases granulares recicladas “in situ”. Com aplicação prática da proposta foi possível determinar os intervalos e frequências dos ensaios a serem realizados, para garantir a qualidade das obras de reciclagem. Para tanto, ficou definida para os ensaios a seguinte frequência: 01 ensaio CBR a cada 100 metros, 01 ensaio DCP a cada 50 metros, 01 ensaio LWD a cada 100 metros, granulometria a cada 200 metros, densidade a cada 100 metros e equivalente de areia a cada 500 metros.
- Os resultados de CBR foram considerados aceitos em todos os trechos em estudo. As análises foram realizadas por trecho, sendo que cada trecho foi dividido em subtrechos de 900 metros. Os resultados médios de CBR para cada subtrecho apresentaram-se satisfatórios, ficando acima do limite mínimo exigido para tráfego médio e leve, que é de 60%, especificado pelas normas do DNIT. Portanto, todos os trechos foram considerados aceitos em termos de capacidade de suporte da base reciclada;
- A variação do CBR calculado a partir das diferentes correlações dificulta a escolha por uma correlação que seria a “ideal” para ser inserida na proposta de especificação técnica. Os valores médios de CBR para todas as correlações, desvios-padrão e coeficientes de variação obtidos foram: TR01 com $CBR_{\text{médio}}$ igual a 72,53 para todas as correlações, desvio-padrão de 14,33 e um coeficiente de variação de 19,75%; o TR02 apresentou um $CBR_{\text{médio}}$ de 64,61, desvio-padrão de 12,64 e coeficiente de variação igual a 19,57%; o TR21 tem $CBR_{\text{médio}}$ de 71,01, desvio-padrão de 14,02 e coeficiente de variação de 19,74%; e no TR22 o $CBR_{\text{médio}}$ obtido foi de 63,48, desvio-padrão de 12,41 e coeficiente de variação de 19,54%.
- O uso das correlações mostrou-se inadequado, pelo fato de apresentar grandes variações nos resultados e por serem específicas de estudos realizados em várias partes do mundo, por diversos autores e em diferentes materiais com diferentes números de amostras.

- A insuficiência de dados de CBR impossibilitou a geração de uma correlação entre CBR e DCP para os trechos estudados.
- Com base no estudo realizado, sugere-se que a determinação do CBR “in situ” seja efetuada na fase inicial de execução das obras, através de um trecho experimental, no qual devem ser realizados ensaios de CBR e ensaios de DCP para possibilitar a determinação de uma equação de correlação, específica para cada obra. Este procedimento garantirá a adequação da correlação CBRxDPC e uma maior credibilidade aos resultados obtidos.
- A obtenção do CBR “in situ” através do uso do DCP mostrou ser um processo bastante atrativo, apesar do pouco uso no Brasil e as dificuldades que podem ser encontrados na interpretação de seus resultados. O DCP apresenta-se como um ensaio rápido, de fácil operação e de baixo custo.
- A metodologia proposta para o controle da granulometria envolvendo valores mínimos e máximos para o diâmetro dos agregados e valores mínimos para o expoente “n” da Curva de Talbot mostrou-se adequada, pois torna mais flexível o enquadramento dos materiais existentes na pista sem confiná-los a uma faixa específica. Os resultados obtidos mostraram que os valores encontrados para a média dos valores de “n” tornou todos os trechos aprovados quanto a granulometria do material e o seu limite mínimo. Para os valores de “D”, foram obtidos apenas 1,72% dos pontos fora dos limites, para todos os pontos ensaiados no Trecho TR01, nos demais trechos todos os valores ficaram dentro dos limites. Isto comprova a eficácia do processo adotado para o enquadramento da granulometria através da Curva de Talbot.
- Os resultados do estudo possibilitaram um maior conhecimento das técnicas de reciclagem de bases granulares, bem como os procedimentos a serem seguidos e os parâmetros a serem identificados no campo para garantir a adequação estrutural de bases para pavimentos flexíveis. Também foi possível identificar as lacunas existentes nas especificações técnicas, apresentadas pelos órgãos rodoviários brasileiros, para obras de reciclagem.

A partir deste estudo, surgem algumas recomendações para trabalhos futuros, as quais pretendem a continuidade dos estudos nessa área, para a inclusão da técnica de reciclagem de

base granular, nas especificações técnicas dos órgãos rodoviários. Destacam-se as seguintes sugestões:

- Estabelecimento de uma correlação aplicável a materiais granulares, empregados em bases de pavimentos rodoviários, mais utilizados no Rio Grande do Sul e a influência da dimensão dos agregados nos resultados finais;
- Criação de um banco de dados com valores de CBR e DCP e análise detalhada desses dados, já que o DCP mostrou diversas vantagens e possibilidades de uso;
- Geração de um programa computacional que auxilie na análise dos resultados de DCP;
- Monitoramento dos trechos recuperados e validação dos resultados de controle tecnológico obtidos durante a execução das obras.

REFERÊNCIAS

AASHTO. **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures** – American Association of State Highway and Transportation Officials - Washington-DC/USA, 1993;

AASHTO. **The AASHTO Guide for design of pavement structures**. American Association of State Highway Officials, Whashington, DC. 1986.

ALVES, A. B. C., **Avaliação da capacidade de suporte e controle tecnológico de execução da camada final de terraplenagem utilizando o penetrômetro dinâmico de cone**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 185 p. 2002.

AMINI, F. **Potential applications of dynamic and static cone penetrometers in mdt pavement design and Construction**. Department of Civil Engineering. Jackson State University. Mississipi. 36 p. 2003.

ARAÚJO, L. M. D., de FARIAS, M. M. **Estabilização química na reciclagem de material asfáltico fresado e cascalho de base**. 8º ENACOR. Gramado, RS. 11 p. 2004.

ARAÚJO, L. M. D., de FARIAS, M. M., de CRAVALHO, J. C. **Estudo da influência das características mecânicas do fresado de revestimento asfáltico em misturas com cascalho de base rodoviária**. 34º Reunião Anual de Pavimentação. Campinas, SP. 14 p. 2003.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Cold recycling. Asphalt Recycling & Reclaiming Association**. Disponível em <http://www.ara.org/hot_in_place_recycling.html>. Acesso em 21 jul. 2005.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Hot in place recycling. Asphalt Recycling & Reclaiming Association**. Disponível em <http://www.ara.org/hot_in_place_recycling.html>. Acesso em 21 jul 2005.

ASPHALT RECYCLING & RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Hot recycling. Asphalt Recycling & Reclaiming Association**. Disponível em <http://www.ara.org/hot_in_place_recycling.html>. Acesso em 21 jul 2005.

ASPHALT INSTITUTE. Disponível em <<http://asphaltinstitute.org>>. Acesso em 10 out 2005.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. São Paulo, ed. Fazenda Arte, 2001.

BONOLA, M. **Cold & hot in-place recycling & their combination for the maintenance of road flexible pavements**. 29º annual meeting of the asphalt recycling & reclaiming association. 2005. Disponível em <<http://www.ara.org>>. Acesso em 18 dez 2005.

CASTRO, L. N. **Reciclagem a frio “in situ” com espuma de asfalto**. Trabalho de conclusão do curso de mestrado em engenharia. Universidade do Rio de Janeiro – COPPE.. Rio de Janeiro – RJ, 2005.

DAMA, M. A. et al. **Aplicação de reciclagem a frio com espuma de asfalto na restauração da BR-1-290 no trecho entre Eldorado do Sul e Porto Alegre**. 33ª Reunião Anual de Pavimentação. Florianópolis. 2001.

DAU, F. N. **Uma avaliação técnico/econômica da reciclagem de revestimentos asfálticos em usina em área urbana**. Trabalho de conclusão do curso de mestrado em engenharia. Universidade Federal do rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS. 2001.

DEPARTMENT OF MAIN ROADS, N. S. W. **Dynamic cone penetrometer**. Test Method T161, 2p. 1976.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODOGAEM DO RIO GRANDE DO SUL (DAER/RS). **Crema**. :<<http://www.daer.rs.gov.br/crema/>>. Acesso em 03 mai. 2006.

_____. **Projeto executivo de restauração dos pavimentos do LOTE I do DAER/RS**. 2005.

_____. DAER/RS. **Alternativa Proposta para a Manutenção dos Pavimentos do Lote 01 do CREMA-RS**. 2005.

_____. DAER-ES-P 08/91: Base Granular. 1991. 8p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. DER/PR ES-P 34/05: Pavimentação: reciclagem de pavimento “in situ” com estabilização granulométrica. Curitiba/PR. 2005. 13p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de pavimentação**. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2006. 278p.

_____. DNER, ES 405/2000: reciclagem de pavimento a frio “in situ” com espuma de asfalto. Rio de Janeiro. 2000. 10p.

_____. DNER ME 083/98: Agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro. 1998. 05p.

_____. DNER ES 303/97: base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro. 1997. 07p.

_____. DNER ES 318/97: concreto betuminoso reciclado a quente na usina. Rio de Janeiro. 1997. 16p.

_____. DNER ES 319/97: concreto betuminoso reciclado a quente no local. Rio de Janeiro. 1997. 16p.

_____. DNER ES 311/97: macadame betuminoso por penetração. Rio de Janeiro. 1997. 12p.

_____. DNER ES 309/97: tratamento superficial duplo. Rio de Janeiro. 1997. 10p.

_____. Manual de pavimentação. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. 2ª ed. Rio de Janeiro-RJ, 1996.

_____. DNER ME 049/94: Solos – determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro. 1994. 14p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT: 033/2005 – **Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico reciclado a quente na usina** - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro. 2005.

DU, J. C., CROSS, S. A. **Evaluation of hot lime slurry in cold in-place recycling**. *Flexible pavement rehabilitation and maintenance*. Baltimore – USA. ASTM stock STP 1348. p. 68-80, 1998.

FEDERATION OF CANADIAN MUNICIPALITIES (FCM). **Roads and sidewalks - reuse and recycling of road construction and maintenance materials - National Guide to Sustainable Municipal Infrastructure (InfraGuide)**. Canadá. 50 p. 2005.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Cold in-place asphalt recycling** – application checklist. Publication No. FHWA-IF-06-012. 2005.

_____. **Pavement recycling for state & local governments**. 1997. FHWA. Publicação núm.: FHWA-SA-98-054

_____. **Federal Highway Administration**. 1993. Disponível em <<http://www.fhwa.org>>. Acesso em 10 out. 2005.

_____. **User guidelines for waste and by product materials in pavement construction**. <www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/begin.htm> Acesso em 08/08/2005

FILHO, J.D.P. **Reconstruction of the airport of the city of Poso Alegre/MG, for recycling the cold in situ – A economic measure and ecologic**. International Symposium Pavement Recycling. São Paulo/SP, 2005.

FONSECA, P. **Reciclagem de pavimentos rodoviários**. Escola Superior de tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança. 2002. Disponível em <<http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>>. Acesso em 7 nov 2005.

GONÇALVES, F. J. P., et al. **Um sistema para a geração de estratégias de manutenção dos pavimentos em redes rodoviárias**. 9º ENACOR, Natal/RN, 2004. 33p.

GONÇALVES, F. J. P. **O diagnóstico e a manutenção de pavimentos – notas de aula**. 77p. 1999. Disponível em <<http://lci.upf.tche.br/~pugliero>>.

GONÇALVES, F. J. P. **O desempenho dos pavimentos flexíveis – notas de aula**. 149p. 1999. Disponível em <<http://lci.upf.tche.br/~pugliero>>.

HARISON, J. A. **Correlation of CBR and dynamic cone penetrometer strength measurement of soils**. Australian Road Research, Technical Note n° 2, 1986, p. 130-136.

HARISON, J. A. **Correlation between California bearing ratio and dynamic cone penetrometer strength measurement of soils**. In: Proceedings of Instn. Civil Engineers, 1987, Australia, Part 2, p. 833-844.

JENSEN, M. O. **Recycling in road construction has been upgraded. Swedish National and Transport Research Institute – Nordic Road & Transport Research**. Number 03. 03 p. 2004.

KANDHAL, P. S. ; MALLICK, R.B. **Agregate tests for hot mix asphalt: state of the practice in North America**. Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, Vol XLII, novembro, 1997.

KLEYN, E. G. **The use of dynamic cone penetrometer**. Tranvaal Road Department, Africa do Sul, Report L2/74, 1975, 50p.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003, 117p.

LIMA, L.C. **Ensaio DCP aplicado no controle de qualidade de compactação de obras viárias executadas como solos lateríticos de textura fina**. 2000. Dissertação (mestrado) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos – SP, 2000.

McKEEN, G. R., HANSON, D. I., STOKES, J. H. **Construction and performance using cold in-situ recycling in New Mexico**. KANDHAL, P.S., GARDINER, M.S. **Flexible pavement rehabilitation and maintenance**. ASTM stock STP 1348. Baltimore – USA. 1998. p. 53-67, 1998.

MEDINA, J., MOTTA, M. G. **Mecânica dos pavimentos. Volume 2**. 2006. Rio de Janeiro

MIRANDA Jr, J. E DA SILVA, C. A. R. **Reciclagem de camada betuminosa como sub-base estabilizada com cimento na BR 381: uma experiência**. 2000. 32º Reunião Anual de Pavimentação. Brasília, DF, Volume II, p. 488-497.

Mn/DOT . **Validation of DCP and LWD Moisture Specifications for Granular Materials**. 2006. Department of Transportation Minnesota. Office of Materials. Research Services Section. Maplewood, MN.

Mn/ROAD – Office Minnesota Road Research. **User guide to the dynamic cone penetrometer**. 1993. Department of Transportation Minnesota. Ed. Affairs & Marketing Manager. Maplewood.

MOMM, LETO; DOMINGUES, F. A. A. **Reciclagem de Pavimentos à Frio "in situ" Superficial e Profunda**. Reunião Anual de Pavimentação, 29a, Cuiabá, 1995

NUNN, M., CARSWEL L. I., MERRIL, D. **Sustainable maintenance of roads using cold recycling techniques (smart project)**. International Symposium Pavement Recycling. São Paulo/SP, 2005.

OLIVEIRA, S. A. et al. **Caracterização mecânica de materiais recicláveis para base de pavimento**. 1º Simpósio Internacional de Pavimentos de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. Rio de Janeiro, RJ, Volume 2, p695-699. 1997.

- PATERSON, W.D.O. **Road deterioration and maintenance effects – models for planning and mangement.** The World Bank, Washington, DC. 1987.
- PEREIRA et al. **Structural analysis of a test section using cold in place recycling.** 2005. International Symposium Pavement Recycling. São Paulo/SP.
- PEREIRA, A.M. **"Considerações sobre o procedimento de avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos normalizado pelo DNER. Fundamentos metodológicos. Algumas modificações possíveis"**. Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projeto de Reforço, Anexos, Rio de Janeiro.ABPv. 1979.
- PINTO, R.R.P, et. al. **Estratégias de manutenção dos pavimentos em redes rodoviárias.** 37º Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)- 9º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Natal/RN. 2005.
- PINTO, R.R.P, et. al. **Aplicação de um sistema de gerência da manutenção de pavimentos para elaboração do projeto básico do lote 01 do programa CREMA/RS.** 8º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. Gramado/RS.2004. 29p.
- RAUBER, J. J. et al. **Apresentação de trabalhos científicos – normas e orientações práticas.** 3ª ed. Universidade de Passo Fundo – Passo Fundo, 2003.
- RODRIGUES, R.M. **Engenharia de pavimentos – Parte II – gerência de pavimentos.** Centro Técnico Espacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Divisão de engenharia de infra-estrutura aeronáutica. 2003. p.188.
- RODRIGUES, R. M. **Performance prediction models for pavement management with emphasis on compatibility of network and project level solutions.** TRB 07- 0505. 15p. 2007 (no prelo).
- SAKATCHEWAN HIGHWAYS AND TRANSPORTATION. **Standard Test Procedures Manual – dynamic cone penetrometer.** Ed. Revisada. 1992.
- SCALA, A. J. **Simple methods of flexible pavement design using cone penetrometers.** In: proceedings of Australian – New Zealand Conference on Soils Mechanics Foundation Engineering, 2, 1956, New Zealand p. 73-84.
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** Volume I. Ed Pini, São Paulo/SP. 1997.
- SUFIAN, Z., AZIZ, A. N., HUSSAIN, M. Z. **Cold in-place pavement recycling in Malaysia.** 2005. International Symposium Pavement Recycling. São Paulo/SP.
- THE WORLD BANK. **Description of the HDM-III Model.** Washington, DC. 1987
- TRANSPORT AND ROAD RESEARCH LABORATORY – TRRL. **Overseas unit. Information note. Operation instruction for de TRRL dynamic cone penetrometer.** 1986-a, 10p. Crowthorne, Berkshire, United Kingdon.
- TRANSPORT RESEARCH LABORATORY (TRL). **Dynamic cone penetrometer tests and analysis. Technical Information note.** Department for International Development (DFID). Project reference R8157. 2004. 8p.
- TRICHÊS, G., CARDOSO, A. B. **Avaliação da Capacidade de Aterros e Subleito de Rodovias Utilizando o Penetrômetro de cone e a Viga Benkelman.** Transporte em transformação IV. Trabalhos vencedores do prêmio CNT produção acadêmica 1999. Ed. Makron Books.. p. 35-49. São Paulo. 1999.
- WIRTGEN. **Manual de reciclagem a frio.** 2ª ed. 2004. Wirtgen GmbH. Alemanha.

ANEXO 1 – Ensaios de DCP realizados nos trechos TR01, TR02, TR21 e TR22
(DAER, 2005)

Rodovia 01		
Estaca	Média (mm/golpe)	DCP (CBR)(%)
31+590	4,2	69,52
31+690	4,5	64,89
31+790	4,6	63,48
31+890	4,3	67,91
31+990	3,8	76,84
32+090	3,9	74,87
32+190	4,2	69,52
32+290	4	73
32+390	3,83	76,29
32+490	3,79	76,98
32+590	4,03	72,38
32+690	3,62	80,65
32+790	4,14	70,48
32+890	4,34	67,21
32+990	4,17	70,08
33+090	4,03	72,38
33+190	3,83	76,29
33+290	3,97	73,63
33+390	3,76	77,69
33+490	3,62	80,65
33+590	3,79	76,98
33+690	3,62	80,65
33+790	4,46	65,41
33+890	4,1	71,16
33+990	3,62	80,65
34+090	3,5	83,43
34+190	3,9	74,94
34+290	4,11	71,1

Estaca	Média (mm/golpe)	DCP(CBR)(%)
34+390	3,83	76,17
34+490	3,86	75,61
34+590	3,34	87,3
34+690	3,76	77,69
34+790	3,59	81,42
34+890	4,17	69,98
34+990	3,76	77,69
35+090	3,34	87,3
35+190	4,67	62,53
35+290	4,67	62,57
35+390	4,66	62,66
35+490	4,3	67,91
35+590	3,9	74,87
35+690	4,1	71,16
35+790	3,86	75,61
35+890	4,59	63,67
35+990	4,03	72,38
36+090	4,03	72,4
36+190	4,1	71,16
36+290	4,21	69,41
36+390	4,07	71,8
36+490	3,53	82,64
36+590	3,93	74,28
36+690	4,45	65,64
36+790	3,97	73,63
36+890	3,69	79,14
36+990	4,11	71,1
	MÉDIA	73,4
	DESVIO	
	PADRÃO	6,03
	Cv (%)	8,21

Rodovia 02		
Estaca	Média (mm/golpes)	DCP (CBR)(%)
39+550	4,89	59,71
39+650	5,03	58,05
39+750	4,7	62,13
39+850	4,86	60,08
39+950	4,45	65,62
40+050	4,86	60,08
40+650	4,52	64,6
40+750	5,03	58,05
40+850	5	58,4
40+950	4,79	60,96
41+050	4,48	65,18
41+150	4,1	71,22
41+250	4,31	67,75
41+350	4,45	65,62
41+450	4,96	58,87
41+550	4,69	62,26
41+650	4,66	62,66
41+750	4,28	68,22
42+150	4,14	70,53
42+250	4,25	68,71
42+350	4,93	59,23
42+450	4,59	63,62
42+550	5,14	56,81
42+850	4,2	69,52
42+950	4,3	67,91
43+050	4,07	71,74
43+150	4,07	71,74
43+250	4,29	68,07
43+350	4,1	71,22
43+450	4,45	65,62
43+550	4,43	65,91
43+650	4,45	65,62
43+750	4,41	66,21
43+850	4,32	67,59
43+950	4,45	65,62
44+050	4,6	63,48
44+150	4,6	63,48
44+250	4,56	64,04
44+350	4,65	62,8
44+450	4,3	67,91
44+550	4,85	60,21
44+650	4,27	68,38
	MÉDIA	64,65
	DESVIO	3,14
	PADRÃO	4,85
	Cv (%)	4,85

Rodovia 21		
Estaca	Média (mm/golpe)	DCP (CBR)(%)
1+840	3,5	83,43
1+940	4,1	71,22
2+040	3,9	74,87
2+140	4,6	63,48
2+240	4,2	69,52
2+340	3,41	85,54
2+440	4,03	72,38
2+540	4,14	70,57
2+640	3,76	77,69
2+740	4,25	68,71
2+840	4,28	68,29
2+940	3,9	74,94
3+040	3,93	74,28
3+140	4,17	69,98
3+240	4,18	69,88
3+340	4,21	69,29
3+440	4,03	72,38
3+540	4,31	67,74
3+640	3,93	74,28
3+740	4,41	66,16
3+840	4,52	64,64
3+940	4,55	64,15
4+040	4,17	70,08
4+140	3,75	77,87
4+240	3,62	80,65
4+340	3,9	74,87
4+440	3,62	80,65
4+540	3,63	80,37
4+640	3,97	73,63
4+740	4,21	69,41
4+840	4,31	67,74
4+940	4,1	71,16
5+040	4,24	68,85
5+140	4,15	70,36
5+240	4,61	63,34
5+340	5,79	50,43
5+440	4,63	63,07
5+540	4,2	69,52
5+640	4,33	67,44
5+740	4,79	60,96
5+840	4,59	63,62
5+940	4,24	68,87
6+040	4,56	64,04
6+140	3,93	74,3
6+240	4,93	59,23

Estaca	Média (mm/golpe)	DCP(CBR)(%)
6+340	4,69	62,26
6+440	3,93	74,3
6+540	4,07	71,74
6+640	3,86	75,65
6+740	4,22	69,19
6+840	5,14	56,81
6+940	4,34	67,28
7+040	5,53	52,8
7+140	4,43	65,91
7+240	4,17	70,02
7+340	4,68	62,39
7+440	4,29	68,07
7+540	3,86	75,65
7+640	4,43	65,91
7+640	4,34	67,9
7+740	5,19	56,2
7+840	4	73
7+940	4,32	67,9
8+040	4,48	64,9
8+140	4,46	64,9
8+240	4,67	62,1
8+340	4,62	63,5
8+440	3,96	73
8+540	4,3	67,9
8+570	3,96	73
8+640	4,82	60,8
8+680	3,85	76,8
8+760	3,79	76,8
8+900	4,04	73
9+000	3,93	74,9
9+100	3,97	73
9+200	4,86	59,6
9+200	4,32	67,9
9+600	5,03	58,4
9+800	4,04	73
9+900	3,79	76,8
10+000	3,97	73
10+200	3,93	74,9
10+400	4,85	59,6
10+600	4,66	62,1
10+800	4,14	71,2
11+000	4,34	67,9
11+200	5,21	56,2
11+400	4	73
11+600	5,33	55,1
11+700	4,66	62,1
11+800	5,18	56,2

Estaca	Média (mm/golpe)	DCP(CBR)(%)
11+900	5,24	56,2
12+000	5,21	56,2
12+300	4	73
12+400	3,48	83,4
12+500	3,36	85,9
12+600	4,11	71,2
12+700	3,37	85,9
12+800	3,07	94,2
12+800	3,07	94,2
12+900	3,31	88,5
13+000	3,37	85,9
13+100	3,1	94,2
13+200	3,45	85,9
13+300	3,66	78,9
13+400	4,11	71,2
13+500	3,88	74,9
13+600	3,85	76,8
13+700	3,96	73
13+800	3,79	76,8
13+960	3,62	81,1
14+000	3,97	73
14+100	4,35	67,9
14+200	5,33	55,1
14+300	3,79	76,8

Estaca	Média (mm/golpe)	DCP(CBR)(%)
14+400	4,28	67,9
14+500	4,61	63,5
14+600	4,67	62,1
14+700	4,1	71,2
14+800	4,3	67,9
14+900	3,52	83,4
15+000	3,78	76,8
15+100	3,5	83,4
15+200	3,89	74,9
15+200	3,89	74,9
15+300	4,79	60,8
15+300	4,79	60,8
15+400	3,64	81,1
15+600	3,83	76,8
15+600	4,07	71,2
15+700	4,21	69,5
15+700	4,21	69,5
15+800	3,48	83,4
15+800	3,48	83,4
15+800	3,83	76,8
16+000	4,13	71,2
16+100	3,97	71,2
	MÉDIA	70,87
	DESVIO PADRÃO	8,52
	Cv (%)	12,02

Rodovia 22		
Estaca	Média (mm/golpes)	DCP (CBR)(%)
17+300	3,7	78,92
17+400	3,01	97,01
17+500	3,09	94,44
17+600	3,1	94,32
17+700	3,3	88,38
17+800	4,02	72,64
17+900	4,17	70,02
18+000	4,05	72,1
18+100	3,98	73,37
18+200	3,97	73,55
18+300	4,15	70,36
18+400	4,5	64,89
18+500	4,01	72,82
18+600	4,47	65,32
18+700	4,12	70,87
18+800	3,9	74,87
18+900	4,84	60,33
19+000	4,1	71,22
19+100	4,65	62,8
19+200	3,93	74,3
19+300	4,84	60,33
19+400	3,96	73,74
19+500	5,04	57,94
19+600	5,04	57,94
19+700	7,24	40,33
19+800	6,11	47,79
19+900	5,72	51,05
20+000	7,77	37,58
20+100	5,2	56,15
20+200	6,93	42,14
20+300	4,3	67,91
20+400	5,38	54,28
20+500	5	58,4
20+600	4,2	69,52
20+700	3,8	76,84
20+800	5,75	50,78
20+900	5,33	54,78
21+000	5,33	54,78
21+100	6,46	45,2
21+200	3,8	76,84
21+300	4,2	69,52
21+400	4,6	63,48
21+500	8	36,5
21+600	5,2	56,15
21+700	3,9	74,87

21+800	4,3	67,91
21+900	4,1	71,22
22+000	5,3	55,09
22+100	4,7	62,13
22+200	5	58,4
22+300	4,7	62,13
22+400	5	58,4
22+500	5,8	50,34
22+600	4,7	62,13
22+700	5	58,4
22+800	3,8	76,84
22+900	5	58,4
23+000	5,7	51,23
23+100	4,7	62,13
23+200	4,4	66,36
23+300	4,11	71,05
23+400	5,2	56,15
23+500	3,2	91,25
23+600	5,5	53,09
23+700	5,9	49,49
23+800	4,7	62,13
23+900	4,8	60,83
24+000	4,3	67,91
24+100	3,7	78,92
24+200	3,9	74,87
24+300	5,3	55,09
24+400	4,9	59,59
24+500	3,8	76,84
24+600	6,1	47,87
24+700	4,4	66,36
24+800	5	58,4
24+900	5	58,4
25+000	3,9	74,87
25+100	4	73
25+200	4,8	60,83
25+300	5,4	54,07
25+400	3,5	83,43
25+500	3,6	81,11
25+600	3,9	74,87
25+700	3,4	85,88
25+800	3,6	81,11
25+900	3,8	76,84
26+000	3,6	81,11
26+100	3,4	85,88
26+200	3,7	78,92
	MÉDIA	63,52
	DESVIO PADRÃO	12,12
	Cv (%)	19,07

ANEXO 2 – Exemplo de Planilha de campo – Cone de Penetração Dinâmica

ENSAIO CONE DE PENETRAÇÃO DINÂMICA

Local: _____

Estaca: _____

Obra: _____

Operador: _____

Data: _____

GOLPE	LEITURA(mm)
1	4,00
2	4,04
3	4,09
4	5,03
5	5,08
6	6,03
7	6,07
8	7,00
9	7,03
10	7,08
11	8,02
12	8,04
13	8,09
14	9,03
15	9,08
16	100,4
17	10,08
18	11,03
19	11,06
20	12,00
21	12,03
22	12,06
23	13,01
24	13,06
25	13,09
26	14,02
27	14,08
28	15,02
29	15,06
30	16,01
MÉDIA (mm/golpe)	5,33

GOLPE	LEITURA(mm)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	
MÉDIA (mm/golpe)	

ANEXO 4 – Ensaios de granulometria realizados nos trechos TR01, TR02, TR21 e TR22 (DAER, 2005)

TRECHO 01 - ENTR BR/285 - ENTR. RS/467(TRÊS PORTEIRAS)								
GRANULOMETRIA								
TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2
1	31+590	92,00	41,20	10,50	5,40	1,8860	0,5734	0,9774
1	31+690	89,50	40,30	9,30	4,60	1,0933	0,6033	0,9789
1	31+790	84,50	42,80	8,70	7,00	1,3704	0,5259	0,9215
1	31+890	87,00	39,50	7,40	9,10	1,7114	0,4846	0,8245
1	31+990	85,60	34,20	11,20	4,40	1,2483	0,5809	0,5809
1	32+090	84,20	43,70	6,40	2,70	0,9677	0,7187	0,9796
1	32+190	81,30	29,40	9,40	2,10	1,1270	0,7058	0,9934
1	32+290	83,10	30,60	12,30	6,20	1,7074	0,4991	0,9643
1	32+390	91,50	38,10	13,10	4,30	1,0222	0,5958	0,9951
1	32+490	82,20	44,30	8,70	2,10	0,8698	0,7453	0,9974
1	32+590	74,00	30,00	12,20	2,90	1,3406	0,6192	0,9877
1	32+690	87,60	40,20	13,00	1,60	0,7671	0,7752	0,9755
1	32+790	87,90	32,10	9,90	2,30	1,0076	0,7056	0,9947
1	32+890	80,00	39,10	10,50	10,70	2,1299	0,4218	0,8676
1	32+990	80,10	33,40	10,70	1,60	0,9483	0,7567	0,9852
1	33+090	82,60	38,30	7,00	3,90	1,2153	0,6325	0,9647
1	33+190	81,90	39,80	6,70	4,80	1,3125	0,5986	0,9351
1	33+290	80,20	40,40	6,50	2,50	1,0362	0,7179	0,9865
1	33+390	84,70	38,20	8,20	2,70	1,0115	0,6950	0,9965
1	33+490	85,00	39,00	6,70	2,80	1,0379	0,7016	0,9837
1	33+590	80,50	40,10	8,60	4,20	1,2055	0,6073	0,9805
1	33+690	80,30	39,20	8,40	4,90	1,3257	0,5781	0,9652
1	33+790	80,70	35,10	10,00	4,80	1,3939	0,5641	0,9827
1	33+890	79,60	39,70	9,20	4,80	1,2935	0,5766	0,9776
1	33+990	84,20	37,10	10,20	5,20	1,3070	0,5595	0,9785
1	34+090	85,50	38,00	7,20	3,00	1,0634	0,6838	0,9855
1	34+190	84,60	42,00	6,60	3,00	1,0176	0,6951	0,9772
1	34+290	80,70	35,90	6,80	3,50	1,2563	0,6450	0,9715
1	34+390	83,70	36,70	9,30	3,00	1,0693	0,6636	0,9980
1	34+490	79,40	39,00	7,50	5,10	1,4014	0,5748	0,9451
1	34+590	85,00	42,90	11,60	5,30	1,1263	0,5623	0,9901
1	34+690	79,60	35,80	10,60	3,90	1,2510	0,5984	0,9963
1	34+790	79,40	41,40	6,80	4,40	1,2644	0,6121	0,9479
1	34+890	82,90	39,50	7,90	5,30	1,3290	0,5727	0,9470
1	34+990	83,00	38,70	10,80	3,40	1,0609	0,6355	0,9994
1	35+090	82,70	42,80	11,50	5,30	1,1684	0,5583	0,9900
1	35+190	80,40	35,30	9,40	2,50	1,0700	0,6870	0,9996
1	35+290	80,40	42,50	9,50	5,20	1,2464	0,5673	0,9737
1	35+390	79,40	37,40	6,90	2,90	1,1498	0,6795	0,9852
1	35+490	79,70	41,80	8,20	4,20	1,1892	0,6118	0,9753
1	35+590	80,70	35,90	8,60	4,00	1,2843	0,6076	0,9834
1	35+690	85,10	40,40	8,00	2,60	0,9628	0,7086	0,9961
1	35+790	80,60	41,80	7,80	4,40	1,2074	0,6077	0,9657
1	35+890	80,20	42,50	8,20	5,10	1,2695	0,5785	0,9569

TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2
1	35+990	84,20	37,80	9,20	3,20	1,0672	0,6557	0,9965
1	36+090	82,00	40,20	6,90	3,40	1,1223	0,6613	0,9740
1	36+190	82,60	38,40	10,60	4,90	1,2547	0,5681	0,9874
1	36+290	79,40	42,70	8,70	3,00	1,0245	0,6714	0,9949
1	36+390	80,30	41,20	7,80	4,60	1,4434	0,5978	0,9617
1	36+490	83,40	38,10	7,80	4,90	1,3152	0,5857	0,9543
1	36+590	82,00	42,40	7,00	3,30	1,0668	0,6703	0,9762
1	36+690	83,20	42,00	9,40	3,60	1,0416	0,6397	0,9938
1	36+790	79,90	39,10	7,30	2,80	1,0852	0,6875	0,9900
1	36+890	85,50	40,10	8,20	5,40	1,2675	0,5733	0,9494
1	36+990	84,70	42,90	9,90	4,50	1,0857	0,6004	0,9870
1	37+090	80,30	40,30	11,90	2,50	0,9441	0,6847	0,9943
1	37+150	82,30	43,90	12,50	6,00	1,2007	0,5323	0,9897
Média =						1,2043	0,6232	0,9668
Desvio =						0,2353	0,0705	0,0602
Cv (%) =						19,5363	11,3091	6,2269

ENTR. RS/467 (TRÊS PORTEIRAS) - ENTR. RS/343 (SANANDUVA)								
TRECHO 02 GRANULOMETRIA								
TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2
2	33+550	85,78	29,71	8,59	2,36	1,1221	0,6985	0,9938
2	33+650	91,03	39,76	9,21	5,25	1,1473	0,5812	0,9656
2	33+750	83,34	32,05	9,56	1,47	0,9331	0,7812	0,9895
2	33+850	85,45	30,41	12,02	5,13	1,4800	0,5390	0,9744
2	33+950	86,79	31,28	9,18	4,04	1,3130	0,6023	0,9786
2	40+550	89,61	41,77	9,79	4,80	1,0704	0,5958	0,9808
2	40+650	89,51	41,56	7,82	4,43	1,0832	0,6223	0,9639
2	40+750	85,93	29,80	10,93	4,92	1,4847	0,5511	0,9711
2	40+850	90,16	40,48	10,83	4,56	1,0489	0,5981	0,9908
2	40+950	88,10	35,98	10,11	3,38	1,0608	0,6436	0,9958
2	41+050	83,64	36,40	11,27	1,85	0,8963	0,7410	0,9886
2	41+150	88,36	36,50	13,07	4,04	1,0727	0,5984	0,9946
2	41+250	86,28	33,63	7,66	2,21	1,0235	0,7279	0,9975
2	41+350	84,10	35,94	7,46	4,53	1,3234	0,5991	0,9563
2	41+450	90,90	41,64	8,70	3,33	0,9461	0,6714	0,9916
2	41+550	84,75	31,59	8,83	1,94	1,0175	0,7361	0,9967
2	41+650	85,51	31,94	9,67	4,09	1,3086	0,5966	0,9829
2	41+750	88,14	36,57	12,11	5,03	1,1957	0,5621	0,9889
2	42+050	85,42	32,69	8,48	5,13	1,4660	0,5640	0,9534
2	42+150	82,47	34,76	8,74	1,51	0,9159	0,7862	0,9956
2	42+250	88,73	35,23	13,57	3,21	0,9994	0,6363	0,9897
2	42+350	85,88	33,43	7,82	4,20	1,3129	0,6078	0,9664
2	42+450	87,80	38,51	12,25	2,63	0,9460	0,6841	0,9946
2	42+550	90,47	32,32	7,14	1,97	0,9814	0,7570	0,9964
2	42+850	73,60	33,30	7,10	3,60	1,4852	0,6169	0,9756
2	42+950	74,80	42,50	8,30	6,10	1,5178	0,5341	0,9362
2	43+050	77,60	42,90	6,80	5,90	1,4533	0,5576	0,9048

TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2
2	43+150	78,50	41,00	7,30	4,30	1,2337	0,6609	0,9602
2	43+250	74,90	42,80	9,20	1,90	0,9278	0,7432	0,9943
2	43+350	76,30	40,60	6,40	7,60	1,8377	0,5073	0,8381
2	43+450	79,80	43,90	10,50	1,00	0,7336	0,8658	0,9708
2	43+550	79,70	44,60	8,50	2,30	0,9180	0,7256	0,9963
2	43+650	76,00	41,20	7,10	3,70	1,2298	0,6343	0,9702
2	43+750	74,00	43,10	7,50	4,30	1,2939	0,6033	0,9620
2	43+850	77,30	40,30	7,20	1,40	0,8939	0,8127	0,9965
2	43+950	77,20	44,00	13,30	9,30	1,6914	0,4386	0,9565
2	44+050	74,20	40,60	8,80	1,30	0,8772	0,8095	0,9882
2	44+150	76,80	43,00	13,90	10,80	1,9613	0,4061	0,9392
2	44+250	79,90	40,60	9,50	3,30	1,0760	0,6460	0,9972
2	44+350	78,30	41,40	10,00	2,50	0,9765	0,6925	0,9986
2	44+450	73,90	44,70	9,40	6,30	1,4689	0,5236	0,9511
2	44+550	79,40	42,30	7,20	1,60	0,8810	0,7964	0,9966
2	44+650	73,90	40,80	6,20	4,90	1,4860	0,5850	0,9193
Média =						1,1880	0,6430	0,9730
Desvio =						0,2790	0,1020	0,0310
Cv (%) =						23,503	15,886	3,160

TRECHO 21 - RS/463(TAPEJARA)(CONTORNO) - IBIACÁ (ACESSO OESTE)								
GRANULOMETRIA								
TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2
21	1+800	91,20	33,20	14,40	1,80	0,8410	0,9640	0,7390
21	1+900	86,00	43,50	17,30	3,00	0,8320	0,6980	0,9750
21	2+000	92,30	30,90	16,20	3,20	1,0230	0,6230	0,9640
21	2+100	90,50	41,70	14,70	2,30	0,7810	0,7100	0,9800
21	2+200	87,30	35,00	5,60	1,30	0,8936	0,8476	0,9988
21	2+300	82,20	43,40	14,90	2,20	0,8176	0,7056	0,9745
21	2+400	93,30	41,10	9,80	3,10	0,9254	0,6810	0,9984
21	2+500	88,40	37,80	4,80	1,20	0,8522	0,8789	0,9952
21	2+600	82,30	40,60	10,10	2,80	0,9771	0,6774	0,9999
21	2+700	80,80	43,30	8,10	2,90	0,9977	0,6854	0,9922
21	2+800	80,40	39,60	11,50	2,80	0,9958	0,6646	0,9980
21	2+900	84,40	43,30	12,90	0,90	0,6764	0,8814	0,9515
21	3+000	88,00	44,20	15,50	1,40	0,6854	0,7985	0,9536
21	3+100	93,00	35,00	8,60	2,70	0,9746	0,6998	0,9950
21	3+200	85,50	41,30	14,80	2,30	0,8255	0,6999	0,9780
21	3+300	93,40	32,50	17,90	3,60	0,9988	0,6015	0,9600
21	3+400	86,80	44,60	7,60	0,80	0,6916	0,9389	0,9862
21	3+500	84,10	28,60	9,80	0,80	0,8463	0,8836	0,9658
21	3+600	89,40	27,10	19,70	1,10	0,8108	0,7921	0,8862
21	3+700	80,90	38,70	8,40	1,80	0,9217	0,7620	0,9989
21	3+800	88,30	42,10	12,70	1,40	0,7244	0,8060	0,9731
21	3+900	88,40	29,50	4,90	2,20	1,1568	0,7463	0,9713
21	4+000	93,10	30,40	8,60	2,20	1,0002	0,7260	0,9931
21	4+100	85,90	30,50	7,30	3,60	1,3300	0,6323	0,9694
21	4+200	84,70	38,30	3,80	2,00	1,0281	0,7924	0,9552
21	4+300	84,00	43,70	8,20	2,00	0,8578	0,7598	0,9979

TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2
21	4+400	88,70	37,70	18,30	1,80	0,7666	0,7315	0,9401
21	4+500	82,10	35,40	8,80	2,80	1,1000	0,6733	0,9979
21	4+600	88,90	39,30	18,30	3,60	0,9082	0,6081	0,9741
21	4+700	82,90	36,00	9,60	3,10	1,1024	0,6528	0,9980
21	4+800	92,90	29,50	7,40	3,40	1,2208	0,6516	0,9688
21	4+900	82,50	34,00	15,40	1,00	0,7732	0,8290	0,9293
21	5+000	88,12	43,49	11,68	6,28	1,1488	0,5375	0,9780
21	5+100	89,64	44,07	14,59	4,81	0,9541	0,5781	0,9994
21	5+200	89,27	39,67	11,69	6,12	1,2101	0,5369	0,9776
21	5+300	93,14	45,40	9,60	8,73	1,2559	0,5000	0,8974
21	5+400	91,74	42,67	9,20	3,21	0,9037	0,6784	0,9954
21	5+500	90,57	39,62	10,94	7,25	1,3124	0,5115	0,9500
21	5+600	91,18	40,40	9,76	4,03	1,0084	0,6282	0,9900
21	5+700	90,28	44,50	13,13	7,15	1,1342	0,5130	0,9791
21	5+800	89,49	42,33	12,00	8,90	1,3822	0,4722	0,9371
21	5+900	91,22	43,67	10,04	4,27	0,9667	0,6226	0,9895
21	6+000	90,17	41,53	12,53	5,54	1,0840	0,5566	0,9906
21	6+100	88,51	39,23	12,46	7,09	1,3198	0,5039	0,9701
21	6+200	89,61	42,38	14,37	2,21	0,7750	0,7187	0,9809
21	6+300	88,91	46,78	13,54	4,57	0,9152	0,5950	0,9998
21	6+400	93,21	40,00	9,12	2,24	0,8398	0,7421	0,9999
21	6+500	90,68	39,77	12,60	5,56	1,1176	0,5529	0,9888
21	6+600	92,10	40,26	14,08	5,41	1,0503	0,5553	0,9938
21	6+700	91,85	43,60	13,06	3,79	0,8806	0,6310	0,9996
21	6+800	92,59	45,44	13,47	3,79	0,8439	0,6336	0,9996
21	6+900	88,88	43,50	10,06	3,86	0,9613	0,6364	0,9941
21	7+000	91,44	46,44	13,78	3,61	0,8257	0,6410	0,9986
21	7+100	89,37	43,87	13,47	5,12	0,9993	0,5702	0,9978
21	7+200	89,45	39,55	12,18	7,15	1,3016	0,5059	0,9665
21	7+300	88,97	39,72	12,33	7,24	1,3121	0,5025	0,9671
21	7+400	90,04	44,35	11,60	4,42	0,9560	0,6075	0,9963
21	7+500	93,48	40,10	11,03	6,71	1,1942	0,5312	0,9599
21	7+600	93,93	40,72	14,76	5,54	1,0175	0,5523	0,9936
21	7+700	88,55	45,94	14,87	7,71	1,1446	0,4918	0,9867
21	7+800	91,95	40,59	13,35	5,35	1,0512	0,5606	0,9932
21	7+900	88,63	44,04	10,94	5,53	1,0791	0,5664	0,9816
21	8+000	90,65	39,78	12,68	4,34	1,0085	0,5978	0,9770
21	8+100	88,80	43,78	11,05	8,11	1,3005	0,4954	0,9395
21	8+200	91,56	40,54	9,97	4,17	1,0110	0,6215	0,9895
21	8+300	88,21	44,23	12,52	2,70	0,8262	0,6899	0,9958
21	8+400	91,99	46,34	12,19	8,94	1,2106	0,4822	0,9412
21	8+500	89,67	41,77	11,83	8,57	1,3689	0,4792	0,9403
21	8+600	92,91	39,64	12,86	3,10	0,8769	0,6624	0,9961
21	8+700	90,08	44,39	9,83	4,37	0,9795	0,6189	0,9869
21	8+800	92,67	42,75	9,20	7,88	1,2783	0,5154	0,9080
21	8+900	91,85	40,39	9,91	6,52	1,2209	0,5401	0,9500
21	9+000	90,39	45,53	13,35	2,08	0,7362	0,7410	0,9851
21	9+100	90,00	44,04	13,23	4,61	0,9531	0,5918	0,9991
21	9+200	88,12	45,90	10,04	8,44	1,3064	0,4691	0,9152
21	9+300	91,30	41,41	9,19	8,01	1,3570	0,5075	0,9040
21	9+400	93,21	39,65	12,67	7,69	1,2666	0,4970	0,9601

TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2
21	9+500	90,59	41,84	12,79	7,61	1,1180	0,7985	0,9677
21	9+600	88,82	42,77	10,39	3,43	0,9310	0,6547	0,9984
21	9+700	90,39	46,90	11,00	6,29	1,0556	0,5507	0,9708
21	9+800	88,40	40,41	12,97	8,41	1,4054	0,4728	0,9567
21	9+900	91,87	41,95	9,70	6,82	1,2100	0,5362	0,9418
21	10+000	88,15	39,31	10,63	8,53	1,5202	0,4783	0,9193
21	10+100	90,93	46,11	9,00	4,59	0,9751	0,6189	0,9751
21	10+200	92,44	40,16	10,20	8,06	1,3529	0,5000	0,9208
21	10+300	88,10	40,54	13,70	7,32	1,1358	0,4948	0,9788
21	10+400	88,62	45,98	14,98	2,16	0,7338	0,7252	0,9768
21	10+500	91,03	40,94	12,22	6,48	1,1711	0,5293	0,9771
21	10+600	92,01	40,07	13,69	3,55	0,9067	0,6337	0,9960
21	10+700	88,89	46,06	10,40	3,94	0,9234	0,6355	0,9945
21	10+800	93,84	44,17	12,56	7,71	1,1360	0,5070	0,9640
21	10+900	92,62	45,82	13,61	3,32	0,8049	0,6583	0,9976
21	11+000	92,30	41,40	18,50	3,00	0,7950	0,6510	0,9685
21	11+100	87,60	35,00	17,90	0,80	0,6920	0,9040	0,9035
21	11+200	84,10	40,20	5,60	2,20	0,9790	0,7570	0,9823
21	11+300	88,80	41,40	4,00	3,60	1,1250	0,6960	0,8941
21	11+400	81,70	27,40	13,90	2,90	1,2620	0,6200	0,9676
21	11+500	87,90	37,50	17,00	1,00	0,6910	0,8420	0,9230
21	11+600	82,70	40,60	7,20	2,70	1,0140	0,7030	0,9898
21	11+700	83,60	43,50	19,70	0,90	0,6370	0,8570	0,8981
21	11+800	88,90	33,60	11,00	3,30	1,0800	0,6390	0,9937
21	11+900	82,10	30,50	10,50	3,50	1,3090	0,6110	0,9903
21	12+000	84,30	36,50	13,50	2,60	0,9560	0,6700	0,9867
21	12+100	93,40	36,50	13,00	3,70	0,9780	0,6240	0,9933
21	12+200	85,10	41,00	7,70	3,50	1,0590	0,6570	0,9815
21	12+300	91,20	39,70	9,30	3,50	0,9800	0,6550	0,9930
21	12+400	81,20	35,40	17,80	1,90	0,8770	0,7040	0,9394
21	12+500	86,50	27,30	10,50	1,70	1,0250	0,7420	0,9796
21	12+600	83,70	31,20	13,60	1,40	0,8850	0,7690	0,9562
21	12+700	90,30	44,30	15,40	1,30	0,6630	0,8170	0,9524
21	12+800	88,20	29,50	7,80	1,70	1,0020	0,7680	0,9957
21	12+900	94,10	32,30	19,90	3,70	0,9870	0,5910	0,9463
21	13+000	86,20	35,40	8,80	3,40	1,1250	0,6450	0,9910
21	13+100	88,60	38,80	12,30	2,60	0,8890	0,6880	0,9944
21	13+200	93,60	36,10	10,10	3,80	1,0380	0,6320	0,9902
21	13+300	81,10	40,10	3,80	1,40	0,9420	0,8550	0,9761
21	13+400	92,50	33,90	5,10	3,30	1,1160	0,6880	0,9397
21	13+500	94,10	40,80	5,10	1,30	0,7910	0,8770	0,9945
21	13+600	93,80	42,80	14,40	1,00	0,6340	0,8720	0,9500
21	13+700	87,50	36,30	7,80	3,10	1,0720	0,6830	0,9884
21	13+800	84,20	32,60	7,40	1,60	0,9720	0,7830	0,9994
21	13+900	83,00	34,40	17,50	3,30	1,0560	0,6050	0,9661
21	14+000	80,70	45,80	10,20	1,90	0,8230	0,7550	0,9922
21	14+100	81,80	44,50	17,60	1,00	0,6630	0,8420	0,9174
21	14+200	80,10	39,40	19,50	3,70	1,0140	0,5840	0,9650
21	14+300	81,20	38,20	8,80	2,40	1,0020	0,7060	0,9998
21	14+400	88,50	36,30	4,10	3,10	1,1650	0,7100	0,9196
21	14+500	84,30	44,00	8,30	1,00	0,7290	0,8870	0,9872

TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2
21	14+600	90,80	29,50	10,70	3,30	1,1680	0,6330	0,9841
21	14+700	88,60	42,90	4,40	1,90	0,8980	0,8100	0,9697
21	14+800	90,50	34,60	6,60	0,80	0,7620	0,9320	0,9948
21	14+900	91,40	39,50	19,60	3,10	0,8280	0,6370	0,9599
21	15+000	88,40	45,70	3,50	1,80	0,8850	0,8370	0,9500
21	15+100	89,10	32,40	5,60	2,80	1,1530	0,7040	0,9665
21	15+200	87,20	44,20	9,00	3,30	0,9370	0,6700	0,9934
21	15+300	89,40	30,40	11,60	3,40	1,1600	0,6230	0,9856
21	15+400	87,00	28,20	19,30	3,10	1,1220	0,6020	0,9287
21	15+500	86,70	27,50	6,20	1,40	1,0330	0,8080	0,9963
21	15+600	90,80	31,90	6,80	2,70	1,0990	0,7010	0,9830
21	15+700	88,30	34,80	3,50	3,40	1,3390	0,6980	0,8824
21	15+800	86,40	38,50	17,40	2,50	0,8520	0,6720	0,9623
21	15+900	91,50	41,80	6,90	2,10	0,8530	0,7700	0,9948
21	16+000	92,00	27,00	14,30	3,40	1,1910	0,6070	0,9603
21	16+100	86,30	37,10	18,70	3,60	0,9760	0,5980	0,9673
Média =						1,0045	0,6648	0,9696
Desvio =						0,1896	0,1170	0,0341
Cv (%) =						18,8721	17,5950	3,5195

TRECHO 22 - IBIÇA (ACESSO LESTE) - ENTR. RS/126 (TRÊS PORTEIRAS)								
GRANULOMETRIA								
TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2
22	17+370	82,20	40,40	12,50	4,00	1,078	0,600	1,000
22	17+470	97,50	37,10	8,90	3,90	1,005	0,643	0,981
22	17+570	82,70	37,90	16,80	2,30	0,881	0,681	0,961
22	17+670	83,40	32,00	8,90	2,10	1,049	0,720	0,998
22	17+770	92,90	35,80	6,70	1,20	0,808	0,864	1,000
22	17+870	90,40	36,70	11,30	1,90	0,840	0,749	0,990
22	17+970	81,40	38,60	18,10	4,10	1,069	0,570	0,978
22	18+070	89,90	36,75	12,10	1,60	0,800	0,776	0,980
22	18+170	93,20	41,60	18,90	3,40	0,810	0,629	0,972
22	18+270	82,10	42,54	14,80	4,50	1,054	0,573	0,999
22	18+370	90,50	35,46	18,90	1,40	0,734	0,774	0,922
22	18+470	92,50	44,40	20,10	2,90	0,738	0,659	0,960
22	18+570	92,90	28,70	5,60	5,10	1,565	0,590	0,880
22	18+670	84,80	37,90	8,50	1,60	0,868	0,789	0,998
22	18+770	86,60	31,70	6,50	4,80	1,488	0,590	0,924
22	18+870	86,90	35,80	9,40	2,60	0,997	0,693	0,999
22	18+970	88,80	37,20	19,80	0,60	0,619	0,928	0,881
22	19+070	89,60	31,90	7,90	1,50	0,911	0,799	0,997
22	19+170	85,30	39,30	16,30	3,60	0,969	0,608	0,985
22	19+270	85,80	29,60	15,90	0,70	0,747	0,888	0,906
22	19+370	92,10	34,70	13,10	1,20	0,751	0,823	0,961
22	19+470	86,30	38,90	16,90	1,60	0,759	0,756	0,945
22	19+570	84,10	42,90	9,80	2,40	0,886	0,715	0,999
22	19+670	91,90	29,10	18,40	9,10	1,895	0,418	0,912
22	19+770	88,40	39,60	5,90	0,90	0,764	0,924	0,998
22	19+870	90,20	32,50	17,20	1,10	0,744	0,816	0,920

TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2
22	19+970	89,50	32,80	6,40	2,50	1,075	0,719	0,985
22	20+070	81,50	39,60	15,80	0,80	0,688	0,879	0,920
22	20+170	80,60	33,70	5,30	1,50	1,016	0,809	0,996
22	20+270	79,90	40,10	12,10	1,70	0,850	0,753	0,981
22	20+370	88,60	44,30	17,90	1,80	0,700	0,746	0,949
22	20+470	81,00	41,20	14,00	2,30	0,876	0,694	0,981
22	20+570	87,50	40,50	17,70	0,80	0,638	0,886	0,910
22	20+670	84,90	29,00	14,40	2,80	1,136	0,635	0,968
22	20+770	91,10	42,10	12,60	1,40	0,709	0,811	0,975
22	20+870	93,40	40,20	11,50	2,70	0,846	0,696	0,998
22	20+970	87,00	39,90	17,00	2,40	0,821	0,684	0,965
22	21+070	92,60	44,10	14,40	1,60	0,686	0,784	0,970
22	21+170	83,50	27,60	14,80	2,90	1,213	0,621	0,961
22	21+270	88,60	41,00	6,50	1,50	0,822	0,828	0,998
22	21+370	87,50	29,30	19,20	1,80	0,900	0,706	0,915
22	21+470	88,30	36,70	14,70	2,50	0,888	0,680	0,979
22	21+570	83,60	44,60	10,90	0,70	0,659	0,938	0,957
22	21+670	87,30	33,30	6,70	1,30	0,896	0,833	1,000
22	21+770	81,10	30,30	9,50	1,20	0,934	0,810	0,983
22	21+970	78,50	40,10	5,30	1,40	0,924	0,832	0,993
22	22+170	85,30	43,80	7,70	2,10	0,865	0,757	0,997
22	22+370	80,40	27,90	4,40	1,50	1,164	0,803	0,987
22	22+570	83,40	43,70	17,20	1,70	0,737	0,748	0,947
22	22+770	75,20	27,50	3,30	0,70	1,034	0,947	0,997
22	22+970	86,50	41,50	6,30	1,60	0,849	0,816	0,997
22	23+170	89,10	38,70	5,40	1,70	0,894	0,812	0,991
22	23+370	84,60	32,70	5,80	1,20	0,926	0,850	0,999
22	23+570	80,00	31,40	4,50	1,20	1,021	0,852	0,995
22	23+770	80,50	45,40	20,40	11,40	1,627	0,387	0,990
22	23+970	79,80	37,30	13,00	1,70	0,879	0,743	0,974
22	24+170	78,00	29,40	18,00	2,90	1,208	0,605	0,942
22	24+370	76,60	42,50	9,30	5,00	1,302	0,568	0,975
22	24+570	74,00	39,60	16,10	6,20	1,491	0,487	0,999
22	24+770	72,40	35,60	11,90	3,60	1,329	0,592	0,999
22	24+970	74,00	42,00	16,20	7,80	1,627	0,450	0,997
22	25+170	77,80	42,50	15,20	2,00	0,845	0,712	0,965
22	25+370	79,00	46,10	15,40	3,10	0,896	0,640	0,984
22	25+570	88,50	43,60	7,00	1,40	0,776	0,842	0,998
22	25+770	79,50	37,60	4,80	1,50	0,978	0,821	0,989
22	25+970	81,70	35,40	6,10	1,20	0,905	0,848	1,000
22	26+170	89,40	40,30	8,30	3,10	1,119	0,659	0,993
Média =						0,964	0,729	0,972
Desvio =						0,260	0,125	0,031
Cv (%) =						27,015	17,114	3,225

ANEXO 5 – Exemplo de Planilha de dados – Ensaio de Granulometria

ENSAIO DE GRANULOMETRIA									
Local: TRECHO 01 - ENTR BR/285 - ENTR. RS/467(TRES PORTEIRAS)									
Obra: CREMA					Operador:				
Data:					Camada:				
TRECHO	ESTACA	3/4	4"	30	200	D	n	r2	
1	31+590	92,00	41,20	10,50	5,40	1,8860	0,5734	0,9774	
1	31+690	89,50	40,30	9,30	4,60	1,0933	0,6033	0,9789	
1	31+790	84,50	42,80	8,70	7,00	1,3704	0,5259	0,9215	
1	31+890	87,00	39,50	7,40	9,10	1,7114	0,4846	0,8245	
1	31+990	85,60	34,20	11,20	4,40	1,2483	0,5809	0,5809	
1	32+090	84,20	43,70	6,40	2,70	0,9677	0,7187	0,9796	
1	32+190	81,30	29,40	9,40	2,10	1,1270	0,7058	0,9934	
1	32+290	83,10	30,60	12,30	6,20	1,7074	0,4991	0,9643	
1	32+390	91,50	38,10	13,10	4,30	1,0222	0,5958	0,9951	
1	32+490	82,20	44,30	8,70	2,10	0,8698	0,7453	0,9974	
1	32+590	74,00	30,00	12,20	2,90	1,3406	0,6192	0,9877	
1	32+690	87,60	40,20	13,00	1,60	0,7671	0,7752	0,9755	
1	32+790	87,90	32,10	9,90	2,30	1,0076	0,7056	0,9947	
1	32+890	80,00	39,10	10,50	10,70	2,1299	0,4218	0,8676	
1	32+990	80,10	33,40	10,70	1,60	0,9483	0,7567	0,9852	
Dmin:	1,1439					Média =	1,2798	0,6208	0,9349
Dmax:	1,2902					Desvio =	0,4061	0,1097	0,1103
Nmin:	0,6023066					Cv (%) =	31,7327	17,6759	11,7974
Nmax:	0,6370271								

ANEXO 6 – Exemplo de Planilha de Execução da Reciclagem

Controle de Qualidade da Execução de Reciclagem

Rodovia: **ERS 126 (0020)**

Trecho: **Entr. BR/285 (B)(Lagoa Vermelha) - Entr. RS/467 (Três Porteiras)**

Extensão: **27,96 km**

Faixa: **Pista**

Atividade: **Reciclagem da base - 20,00 cm**

Km	Posição	Reciclagem e compactação (Base)						Imprimação			Equivalente de areia			Densidade
		Grau de Compactação Brita Graduada (Proctor Modificado)			Espessura (cm)			Taxa de CM 30						Próctor
		Lim. Inferior	Ensaio (Empresa)	Ensaio (DAER)	Projeto (cm)	Ensaio (Empresa)	Ensaio (DAER)	Projeto (kg/m ²)	Ensaio (Empresa)	Ensaio (DAER)	Projeto mín.	Ensaio (Empresa)	Ensaio (DAER)	Modificado
31,590		100			20,0	17,00		1,00	0,80		50,0	38,10		
31,690		100	100,50		20,0	19,00		1,00	0,80		50,0			
31,790		100			20,0	18,50		1,00	0,80		50,0			
31,890		100			20,0	19,50		1,00	0,80		50,0			
31,990		100			20,0	20,00		1,00	0,80		50,0			
32,090		100			20,0	21,00		1,00	0,80		50,0	42,50		
32,190		100	102,00		20,0	20,00		1,00	0,80		50,0			
32,290		100			20,0	20,50		1,00	0,80		50,0			
32,390		100			20,0	19,00		1,00	0,80		50,0			
32,490		100			20,0	18,00		1,00	0,80		50,0			
32,590		100	101,70		20,0	17,50		1,00	0,76		50,0	51,00		
32,690		100			20,0	16,50		1,00	0,76		50,0			
32,790		100			20,0	16,00		1,00	0,76		50,0			
32,890		100			20,0	17,50		1,00	0,76		50,0			
32,990		100			20,0	18,00		1,00	0,76		50,0			
33,090		100	100,90		20,0	19,00		1,00	0,76		50,0	37,40		
33,190		100			20,0	19,00		1,00	0,76		50,0			
33,290		100			20,0	19,00		1,00	0,76		50,0			
33,390		100			20,0	20,00		1,00	0,76		50,0			
33,490		100	101,00		20,0	20,50		1,00	0,76		50,0	43,50		
33,590		100			20,0	21,00		1,00	0,76		50,0			
33,690		100			20,0	20,00		1,00	0,76		50,0			
33,790		100			20,0	20,00		1,00	0,90		50,0			
33,890		100	100,30		20,0	19,50		1,00	0,90		50,0	37,10		
33,990		100			20,0	19,00		1,00	0,90		50,0			
34,090		100			20,0	19,50		1,00	0,90		50,0			
34,190		100			20,0	19,00		1,00	0,90		50,0			
34,290		100			20,0	19,50		1,00	0,90		50,0			
34,390		100	103,50		20,0	18,50		1,00	0,60		50,0	39,60		
34,490		100			20,0	18,00		1,00	0,60		50,0			
34,590		100			20,0	19,00		1,00	0,60		50,0			
34,690		100			20,0	19,00		1,00	0,60		50,0			
	Dv Pd:	1,10			Dv Pd:	1,21		Dv Pd:	0,09		Dv. Pd.	4,94		
	Média:	101,41			Média:	18,98		Média:	0,78		Média:	41,31		