

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL

CLÁUDIA TEREZINHA SALDANHA
DAIANE DE SOUZA
GABRIEL SALDANHA GIACOMITTI

**ANÁLISE DO MÉTODO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO
ASFÁLTICO UTILIZADO PELA PREFEITURA MUNICIPAL DE
CURITIBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

CLÁUDIA TEREZINHA SALDANHA
DAIANE DE SOUZA
GABRIEL SALDANHA GIACOMITTI

**ANÁLISE DO MÉTODO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO
ASFÁLTICO UTILIZADO PELA PREFEITURA MUNICIPAL DE
CURITIBA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia de Produção Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Adauto José Miranda de Lima.

CURITIBA

2014

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO MÉTODO DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO ASFÁLTICO UTILIZADO PELA PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA

Por

CLÁUDIA TEREZINHA SALDANHA, DAIANE DE SOUZA e GABRIEL SALDANHA
GIACOMITTI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 28 de agosto de 2014, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Adauto José Miranda de Lima, Dr.
UTFPR

Prof. Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Prof. José Luiz Gonçalves Brandi, MSc.
UTFPR

AGRADECIMENTOS

Ao nosso orientador Professor Dr. Adauto José Miranda de Lima, pelos ensinamentos, a paciência, orientação e dedicação no decorrer deste trabalho.

Nossos sinceros agradecimentos à equipe do departamento de pavimentação da Secretária Municipal de Obras Públicas (SMOP) da Prefeitura Municipal de Curitiba. Agradecemos a possibilidade da realização do estudo e o apoio prestado na área técnica, principalmente na realização de ensaios que não seriam possíveis sem sua ajuda e suporte.

Ao Eng^o Vitor Reinaldo Bordignon, que nos acompanhou em vários ensaios realizados no Laboratório de Solos da UTFPR, agradecemos o apoio e o auxílio.

Aos nossos colegas de graduação que sempre estiveram presentes e deram seu apoio nos momentos de dificuldade. Seus incentivos foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Às nossas famílias, que sempre nos apoiaram em nossa jornada, tendo papel essencial em nossa formação pessoal e educação, resultado de muita dedicação e trabalho.

RESUMO

SALDANHA, Claudia T.; SOUZA, Daiane de; GIACOMITTI, Gabriel S. **Análise do método de reciclagem de pavimento asfáltico utilizado pela Prefeitura Municipal de Curitiba**. 2014. 71 fs. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Produção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

A reciclagem *in situ* a frio de pavimentos asfálticos com incorporação de cimento Portland se tornou uma opção viável para a reabilitação de vias, por ser um método mais barato que a execução convencional de uma pista, mais rápido e também com menor impacto ambiental. O processo de reciclagem profunda é utilizado pela Prefeitura Municipal de Curitiba (PMC) desde o ano de 2011, e estima-se que já foram reciclados mais de 145 km de pavimentos na cidade e região metropolitana. Este estudo analisa o método de reciclagem utilizado pela PMC, que é executado com o auxílio de máquinas recicladoras de asfalto, e consiste na transformação do tratamento superficial betuminoso (TBS) em uma base tratada com cimento para a execução de um novo pavimento asfáltico. A análise foi realizada em várias etapas: caracterização da mistura solo-asfalto obtida pela recicladora; comparação do processo com a Especificação de Serviço 167/2013, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), que estipula as diretrizes para este tipo de reciclagem; avaliação dos resultados de ensaios de resistência obtidos nos corpos de prova produzidos em laboratório; e avaliação das deflexões, obtidas com a viga Benkelman, em trechos de ruas antes e depois da reciclagem. Como resultado, através de sugestões, espera-se proporcionar melhorias no processo de reciclagem realizado pela Prefeitura.

Palavras-chave: Reciclagem de pavimento asfáltico. Reciclagem profunda. Cimento Portland.

ABSTRACT

In situ cold recycling of asphalt pavements incorporating Portland cement has become a viable option for rehabilitation of roads because it is a cheaper and faster method than the conventional implementation of a lane and with less environmental impact. The process of deep recycling is used by the Curitiba City Hall since the year 2011, and is estimated to have been recycled more than 145 km of pavements in the city and metropolitan area. This research analyzes the recycling method used by the city hall, which is performed with the use of recycling asphalt machines, and consists in transforming a bituminous surface treatment (BST) in a cement treated base for implementation of a new asphalt pavement base. The analysis was performed in several steps: characterization of soil-asphalt mixture obtained by the recycler; compared the process with the Service Specification 167/2013, DNIT, which stipulates the guidelines for this type of recycling; evaluation of the results of strength tests obtained in the specimens produced in the laboratory; and evaluation of the deflections obtained with Benkelman beam in stretches of streets before and after recycling. As a result, through suggestions, are expected to provide improvements to the recycling process performed by the municipal government.

Keywords: Asphalt pavement Recycling. Deep recycling. Portland cement.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARRA	<i>Asphalt Recycling And Reclaiming Association</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CP	<i>Cold planing</i>
CR	<i>Cold recycling</i>
DCP	<i>Dynamic Cone Penetrometer</i>
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DER/PR	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FDR	<i>Full Depth Reclamation</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
HR	<i>Hot recycling</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
NBR	Norma Brasileira
NDT	<i>Nondestructive Deflection Testing</i>
NP	Não-plástico
PMC	Prefeitura Municipal de Curitiba
TSB	Tratamento Superficial Betuminoso
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial Simples
TST	Tratamento Superficial Triplo
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SMOP	Secretaria Municipal de Obras Públicas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição dos esforços no pavimento Fonte: SENÇO (2007)	13
Figura 2 - Estrutura típica de pavimento flexível Fonte: DNIT (2006a).....	16
Figura 3 - Gráfico de plasticidade da classificação USCS	25
Figura 4 - Representação esquemática de trincas	32
Figura 5 - Representação esquemática de afundamentos Fonte: DNIT (2003)	33
Figura 6 - Representação esquemática de outros defeitos	35
Figura 7 - Trem de reciclagem profunda de pavimento <i>in situ</i> com adição de cimento Portland.....	38
Figura 8 – Mistura e homogeneização dos materiais na caixa de reciclagem da recicladora.....	39
Figura 9 - Esquema da viga Benkelman	42
Figura 10 - Rua Hermenegildo Luca	46
Figura 11 - Coleta de amostra na rua Hermenegildo Luca.....	47
Figura 12 – Ajuste do pé traseiro da Viga Benkelman	51
Figura 13 - Amostra retirada da rua reciclada com indicação da camada tratada pelo procedimento de reciclagem profunda com adição de cimento Portland	54
Figura 14 - Curva granulométrica da mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico)	55
Figura 15 - Curva granulométrica dos materiais utilizados na reciclagem	56
Figura 16 - Curva granulométrica da mistura reciclada e faixa granulométrica II da norma DNIT 167/2013 - ES	58
Figura 17 - Curva de compactação	59
Figura 18 - Curva de fluidez	60
Figura 19 – Deflexões no lado direito do pavimento antes e depois da reciclagem ..	65
Figura 20 – Deflexões no lado esquerdo do pavimento antes e depois da reciclagem	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
1.2	JUSTIFICATIVA	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1	PAVIMENTOS.....	13
2.1.1	Camadas constituintes do pavimento.....	14
2.1.2	Classificação dos pavimentos	15
2.1.3	Pavimentos flexíveis.....	15
2.2	TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	17
2.3	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	19
2.3.1	Granulometria	19
2.3.2	Consistência dos solos.....	20
2.3.2.1	Limite de plasticidade (LP)	20
2.3.2.2	Limite de liquidez (LL)	20
2.3.2.3	Índice de plasticidade (IP)	21
2.3.3	Classificação dos solos	22
2.3.4	Umidade ótima e massa específica aparente máxima	25
2.3.5	Ensaio de resistência	26
2.3.5.1	Ensaio de resistência à compressão.....	26
2.3.5.2	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	27
2.4	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	27
2.4.1	Estabilização de solos com cimento Portland	28
2.4.2	Solo-cimento	28
2.4.3	Solo melhorado com cimento.....	29
2.5	DEFEITOS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E SEMI-RÍGIDOS.....	30
2.5.1	Fendas	30
2.5.1.1	Fissura	31
2.5.1.2	Trinca	31
2.5.1.2.1	Trinca isolada	31
2.5.1.2.2	Trinca interligada.....	31
2.5.2	Afundamento.....	32
2.5.2.1	Afundamento plástico.....	32

2.5.2.2	Afundamento de consolidação	32
2.5.3	Ondulação ou Corrugação	33
2.5.4	Escorregamento	33
2.5.5	Exsudação	33
2.5.6	Desgaste	34
2.5.7	Panela ou Buraco.....	34
2.5.8	Remendo.....	34
2.5.8.1	Remendo superficial.....	34
2.5.8.2	Remendo profundo.....	34
2.6	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	35
2.6.1	Reciclagem profunda (<i>Full depth reclamation</i> – FDR).....	36
2.6.1.1	Equipamentos	37
2.6.1.2	Execução	39
2.7	AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	40
2.7.1	Avaliação Funcional	40
2.7.2	Avaliação Estrutural do Pavimento	41
2.7.2.1	Procedimento I – Viga Benkelman	42
2.7.2.2	Procedimento II – Defletômetros dinâmicos.....	43
2.8	MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO, REFORÇO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	43
2.8.1	Recuperação das características funcionais.....	44
2.8.2	Recuperação estrutural	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
5.1	CONCLUSÕES	66
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

O número cada vez maior de veículos trafegando pelos sistemas viários das grandes cidades gera sobrecarga nos pavimentos. Isto interfere diretamente na durabilidade e qualidade das vias e acarreta uma maior necessidade de manutenção e recuperação. Curitiba, segundo dados do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), está entre as cidades com maior relação de veículo por habitante do Brasil, o que torna a situação ainda mais agravante no município e também em sua região metropolitana.

Devido ao grande crescimento da população nas últimas décadas, a Prefeitura Municipal de Curitiba (PMC) adotou como medida paliativa um tipo de revestimento asfáltico de baixa qualidade, o tratamento superficial betuminoso, conhecido como “casca de ovo”. Este nome se popularizou pelas características do processo de pavimentação: espessura de revestimento asfáltico muito inferior à adequada e camadas anteriores sem a devida preparação. Por isso, a durabilidade deste pavimento é baixa se comparada ao processo normatizado, apresentando em curto intervalo de tempo inúmeras patologias.

Neste cenário outros problemas estão presentes, como a exploração intensiva das jazidas minerais e a decorrente escassez de material natural para produção de asfalto. Outro fator a ser considerado são as crescentes restrições impostas pelas legislações ambientais, principalmente no que diz respeito à deposição de resíduos.

Estes fatores levaram à escolha de alternativas viáveis para a recuperação e reparo das vias. As principais técnicas utilizadas são: o recape ou reforço, que consiste na execução de uma nova camada asfáltica sobre a estrutura já existente; e a reciclagem *in situ* a frio do pavimento, que é realizada através da reciclagem do pavimento antigo e incorporação de cimento Portland, permitindo reutilizar essa mistura como uma nova base estabilizada para a camada asfáltica.

Portanto, a reciclagem ganhou ênfase como opção para reabilitação de pavimentos asfálticos por todo o mundo, pois é a opção que concilia as exigências técnicas e sociais, e ainda possibilita a obtenção de uma fundação beneficiada.

Devido ao grande número de intervenções necessárias nos pavimentos, a PMC investiu cerca de dois milhões de reais em duas máquinas recicladoras de

pavimento com o intuito de recuperar as vias degradadas, além de aumentar significativamente a vida útil do pavimento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o método de reciclagem profunda de pavimentos asfálticos utilizado pela PMC para reabilitação das vias urbanas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do estudo são:

- Identificar as diferentes características entre o método de reciclagem de pavimentos asfálticos normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e o realizado pela PMC;
- Caracterizar a amostra de solo + revestimento asfáltico quanto à umidade ótima, massa específica seca máxima, Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP);
- Analisar se a granulometria da mistura do solo da camada de base com o revestimento asfáltico está dentro de pelo menos uma das faixas granulométricas estipuladas pelo DNIT para este tipo de mistura;
- Comparar os resultados obtidos nos ensaios de ruptura por compressão e tração dos corpos de prova produzidos em laboratório com a resistência mínima estipulada pela norma DNIT 163/2013-ES;
- Avaliar as deflexões, obtidas com a viga Benkelman, na rua analisada antes e depois da reciclagem.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em Curitiba, de acordo com o DENATRAN, a frota de veículos no município era de 1,4 milhão em dezembro de 2013 e, segundo o último Censo realizado em 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o número de

habitantes era de 1,75 milhão. Ou seja, 1,2 habitantes por veículo, sendo uma das taxas mais elevadas do Brasil.

Tendo em vista este aumento contínuo da frota e a necessidade de ampliação da infraestrutura de transportes, busca-se a utilização de novos materiais e métodos alternativos de pavimentação e recuperação de pavimentos.

Neste contexto, a PMC investiu na aquisição de duas máquinas recicladoras de asfalto. De acordo com a Secretaria Municipal de Obras Públicas (SMOP) da cidade, a reciclagem, que consiste no processo de transformação de antipó (tratamento superficial) em um pavimento asfáltico com uma base tratada com cimento, é 40% mais barata que a execução convencional de uma pista. Além disso, a previsão é que após a conclusão as vias recicladas terão vida útil de pelo menos mais dez anos.

A utilização desse método, de acordo com a SMOP de Curitiba, também implica em outras vantagens: a rapidez na execução (uma hora de trabalho para cada cem metros de via, duas a menos que o método convencional), menor impacto ambiental já que não descarta resíduos, redução do número de equipamentos na obra, diminuição no transporte de materiais e conseqüentemente maior produtividade.

A reciclagem de pavimentos por esse processo vem sendo utilizada em Curitiba e região metropolitana desde março de 2011, e estima-se que já foram revitalizados mais de 145 quilômetros de pavimentos.

O DNIT publicou em 2013 a Especificação de Serviço 167/2013 que define a sistemática empregada na execução de reciclagem a frio *in situ* do pavimento com adição de cimento Portland, estipulando assim suas diretrizes.

Esta pesquisa visa analisar o método aplicado pela PMC na reciclagem de pavimentos asfálticos. Através desta análise, qualitativa e quantitativa, serão, caso necessário, sugeridas melhorias para o método utilizado pela prefeitura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PAVIMENTOS

Definem-se por pavimento as estruturas compostas por camadas de materiais com diferentes espessuras e propriedades mecânicas, assentadas sobre uma fundação designada de subleito. Essas camadas estão sujeitas ao tráfego e às condições climáticas, e interagem entre si a fim de proporcionar um bom comportamento estrutural, resistindo às solicitações e transmitindo-as para camadas inferiores sem causar danos ao pavimento fora dos limites previstos (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

A NBR 7207 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982), cita ainda como funções gerais do pavimento oferecer mais comodidade e segurança ao rolamento e resistir ao desgaste (esforços horizontais) tornando a superfície mais durável.

De acordo com Senço (2007) as cargas decorrentes do tráfego são transmitidas ao pavimento majoritariamente de maneira vertical, e a distribuição dos esforços pode ser simplificada na forma de um tronco de cone (figura 1), assim, a pressão aplicada é reduzida com o aumento da profundidade.

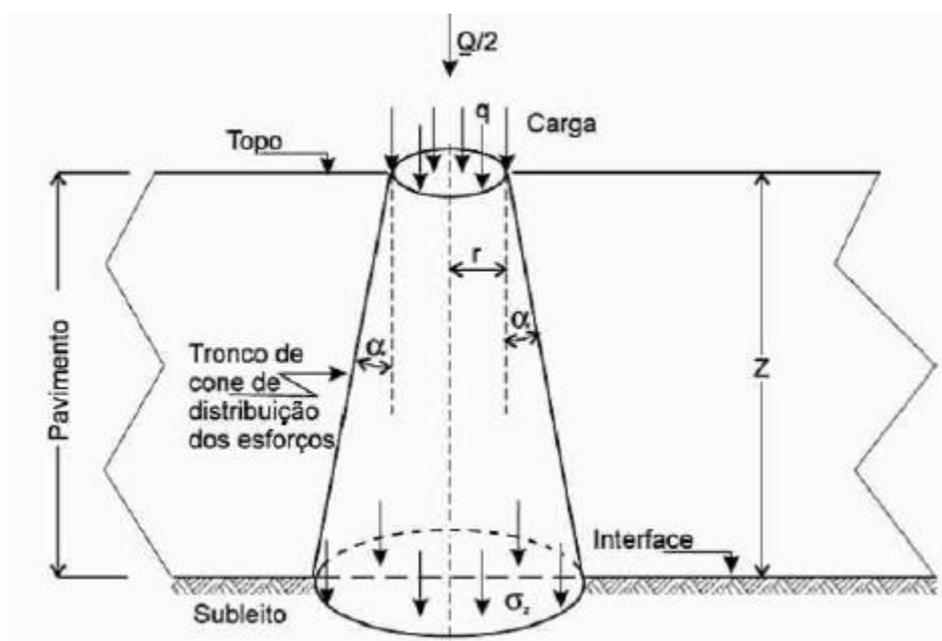


Figura 1 - Distribuição dos esforços no pavimento
Fonte: SENÇO (2007)

Dessa maneira, as camadas superiores estão sujeitas a maiores esforços e por isso exigem materiais de melhor qualidade e, com o objetivo de obter uma boa relação custo-benefício, nas camadas subsequentes adotam-se materiais cada vez menos nobres com o aumento da profundidade. Por este mesmo princípio, ao considerar uma mesma carga aplicada, a espessura do pavimento deverá ser maior quanto pior forem as condições da fundação ou subleito (SENÇO, 2007).

2.1.1 Camadas constituintes do pavimento

As camadas constituintes do pavimento têm diferentes funções e podem ser definidas segundo o Manual de Pavimentação, do DNIT (DNIT, 2006a):

- Subleito: é o terreno de fundação do pavimento. De acordo com Senço (2007), as amostras de material para essa camada são analisadas em sondagens de no máximo três metros de profundidade, sendo que a fundação em si é considerada geralmente apenas até um a um metro e meio de profundidade;
- Regularização do subleito: não é necessariamente uma camada do pavimento, pois é uma operação que pode ser de corte ou sobreposição de material ao do leito existente, por camada de espessura variável. Tem como objetivo a regularização longitudinal e transversal, de acordo com as especificações;
- Reforço do subleito: camada de espessura constante, constituída de material com características geotécnicas mais elevadas que as do subleito, porém inferiores as do material da camada superior;
- Sub-base: camada complementar à base, adotada quando é econômica ou tecnicamente desaconselhável construir a base diretamente sobre o subleito regularizado;
- Base: camada sobre a qual é executado o revestimento, com a função de resistir aos esforços atuantes e distribuí-los para as demais camadas;
- Revestimento: camada impermeável tanto quanto possível, diretamente sujeita ao efeito dos carregamentos (rolamento de veículos, passagem de pedestres, etc.), transmitindo-os de forma

atenuada as demais camadas, com o objetivo de tornar essa ação segura e confortável, além de resistir ao desgaste por ela provocado. Pode também ser chamado de capa ou capa de rolamento.

2.1.2 Classificação dos pavimentos

De acordo com Senço (2007), para a classificação dos pavimentos pode-se adotar a Terminologia Brasileira – TB7, da NBR 7207 (ABNT, 1982), que os divide em duas categorias:

- Rígidos: pavimentos pouco deformáveis, que têm como material principal o concreto de cimento Portland, cujo revestimento possui rigidez muito superior ao das demais camadas, e por isso é responsável por absorver a maior parte do carregamento. Quando sujeitos a deformações rompem por tração na flexão;
- Flexíveis: são os pavimentos que suportam deformações, até certo limite, sem romper. Geralmente possuem revestimento betuminoso, e são dimensionados para atuar na compressão e tração na flexão (decorrente da formação de bacias sob as rodas dos veículos), que podem levar a estrutura a deformações permanentes e ao rompimento por fadiga.

Ao adotar esse critério a principal dificuldade é a classificação quando se utilizam camadas rígidas e flexíveis em uma mesma estrutura. No Brasil, devido a recapeamentos de vias e a execução de bases em solo-cimento, muitas estruturas são classificadas como mistas (SENÇO, 2007). Por isso, o DNIT (2006a) adota ainda uma terceira categoria denominada pavimentos semirrígidos, cuja característica é a base possuir algum componente cimentício. Nessa situação esses materiais cimentados são responsáveis por resistir à parte da tração atuante no revestimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.1.3 Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis, de acordo com Bernucci *et al.* (2008), são formados basicamente por um revestimento de camada asfáltica, seguido respectivamente de base, sub-base e subleito, que podem ser compostos de materiais granulares, solos

ou misturas de solos, porém sem a presença de agente cimentante. A figura 2 mostra a estrutura-tipo de um pavimento asfáltico. Devido à espessura das camadas, seus materiais constituintes, bem como às condições a que o pavimento estiver exposto, uma ou mais camadas podem ser dispensadas.

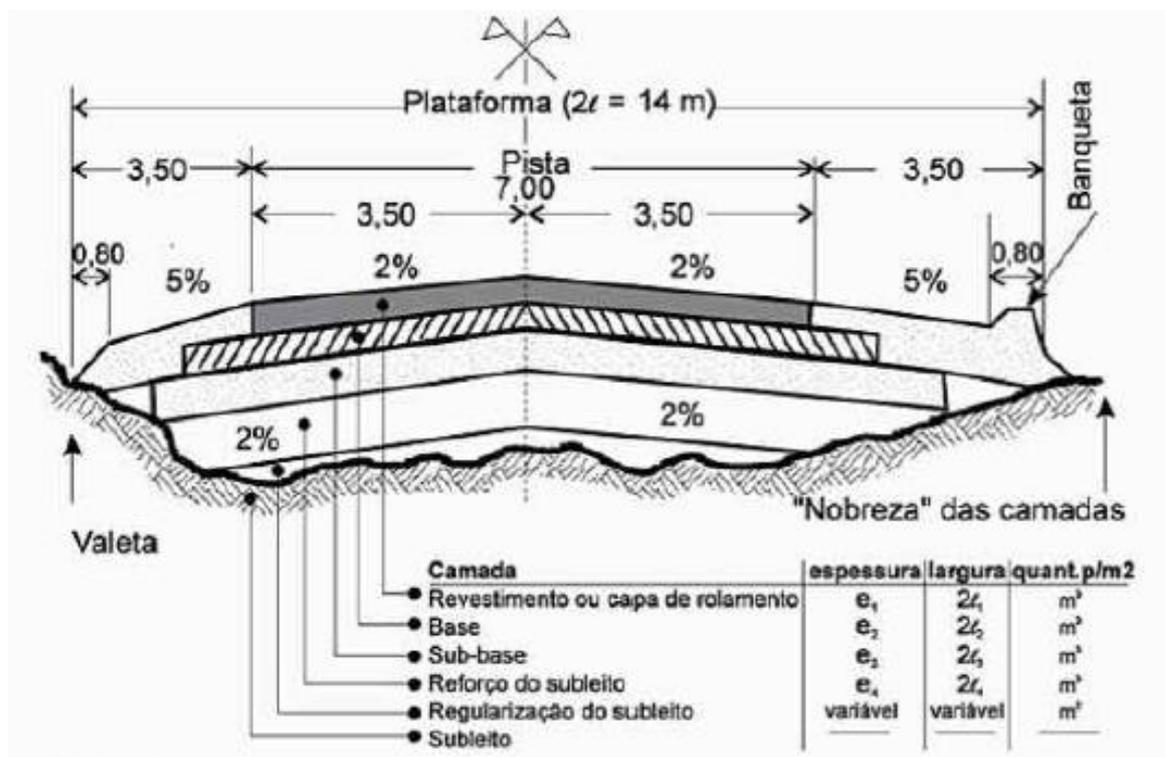


Figura 2 - Estrutura típica de pavimento flexível
Fonte: DNIT (2006a)

Segundo o DNIT (2006a), neste tipo de pavimento a carga atuante se distribui de maneira uniforme entre as camadas, pois todas sofrem deformação elástica. A NBR 7207 (ABNT, 1982) afirma que essas camadas não trabalham a tração, e que a capacidade de suporte é decorrente do sistema de superposição das camadas, no qual as mais resistentes se encontram na parte superior da estrutura.

Nos pavimentos asfálticos a relação entre a rigidez do material de revestimento e das camadas granulares não é tão alta quanto no caso dos pavimentos rígidos com revestimento de cimento Portland. Por isso, as tensões atuantes na estrutura são partilhadas por todas as camadas, proporcionalmente à rigidez (em função do material e da geometria). Assim, as cargas da superfície são distribuídas em uma área muito mais restrita que no caso dos pavimentos rígidos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.2 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

O Tratamento Superficial Simples (TSS) é definido pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná através da ES-P 18/05 (DER/PR, 2005b) como um revestimento asfáltico constituído de material betuminoso e agregado mineral, que pode ser utilizado para a construção, rejuvenescimento e conservação de pavimentos asfálticos. Em alguns estados do Brasil pode ser também chamado de Tratamento Superficial Betuminoso (TSB), nome traduzido de maneira literal da expressão no idioma inglês.

A sua execução consiste na aplicação de ligante asfáltico sobre a base de um pavimento através de carro-tanque provido de barra espargidora, seguido do espalhamento do agregado preferencialmente por caminhões basculantes com dispositivos distribuidores, e posterior compactação com rolo de pneus ou liso (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Esse revestimento pode ainda ser do tipo Tratamento Superficial Duplo (TSD) ou Triplo (TST), de acordo com o número de camadas de cada componente (DER/PR, 2005b). Senço (2007) ainda cita o Tratamento Superficial Quádruplo, composto por quatro camadas de agregado e quatro camadas de pintura betuminosa intercaladas, porém afirma que o tipo triplo (TST) é o mais utilizado para pavimentação.

Além disso, de acordo com a forma de penetração do ligante é possível classificar em três tipos: tratamento superficial de penetração direta, quando a pintura betuminosa é realizada sobre a camada de agregado; de penetração invertida, quando a pintura é espargida antes da camada de agregado; e de penetração mista, em que a pintura é realizada tanto antes da aplicação da camada de agregado quanto posteriormente (DER/PR, 2005b).

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), as principais funções do revestimento por tratamento superficial são:

- Obtenção de uma camada de rolamento de baixa espessura, mas de alta resistência ao desgaste;
- Impermeabilização do pavimento e proteção da infraestrutura;
- Proporcionar revestimento antiderrapante;
- Proporcionar alta flexibilidade ao revestimento, para que possa acompanhar as deformações da infraestrutura.

Tanto Bernucci *et al.* (2008) quanto Villibor e Nogami (2009) afirmam que devido a baixa espessura este tipo de revestimento não confere aumento de resistência estrutural ao pavimento e também não corrige as irregularidades (transversais ou longitudinais) decorrentes da aplicação sobre superfícies defeituosas.

O tratamento superficial é amplamente utilizado no Brasil. Villibor e Nogami (2009) relatam o uso deste tipo de revestimento no estado de São Paulo desde a década de 70, para a execução de pavimentos econômicos, e com bons resultados. Esses pavimentos são compostos por bases de materiais locais de baixo custo e revestimentos esbeltos de tratamento superficial (espessura máxima de três centímetros, frequentemente da ordem de um centímetro e meio).

Os autores citam ainda que alguns dos pavimentos econômicos estudados ultrapassaram 30 anos de bom desempenho, devido à combinação das características da base com as do revestimento. No mesmo estudo, a durabilidade somente da camada de revestimento betuminoso por tratamento superficial foi estimada em oito anos para tratamentos duplos e dez anos para tratamentos triplos, se bem executados (VILLIBOR; NOGAMI, 2009).

De acordo com o DER/PR (2005b) as seguintes especificações devem ser atendidas para a execução do TSS:

- Execução mediante o preparo prévio da superfície (limpeza e reparação preliminar), em dias não chuvosos e com temperatura ambiente superior a 10°C;
- Quanto ao ligante betuminoso são recomendados: Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) CAP-70 ou CAP-150/200, e emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida do tipo RR-2C;
- Caso não haja boa adesividade entre o ligante asfáltico e o agregado pode ser utilizado melhorador de adesividade, desde que este seja misturado no canteiro de obra;
- Os agregados podem ser constituídos por rocha sã ou seixos rolados, britados, de partículas limpas, duras, duráveis, isentas de cobertura e torrões de argila.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

2.3.1 Granulometria

Segundo DNIT (2006a), a análise granulométrica do solo consiste na determinação das porcentagens, em peso, das diferentes frações constituintes da fase sólida desse material.

O ensaio de granulometria é descrito pela norma DNER-ME 080/94. Neste ensaio, uma amostra de solo é passada por uma série de peneiras de malhas quadradas de dimensões padronizadas, em seguida, as quantidades retidas em cada peneira são pesadas e então se calcula as porcentagens passantes em cada peneira. Este ensaio é realizado para partículas de solo maiores do que 0,075 milímetros (peneira número 200). Para partículas menores que 0,075 milímetros utiliza-se o método de sedimentação contínua em meio líquido, que é baseado na lei de Stokes (DNIT, 2006a).

Com os resultados obtidos no ensaio de granulometria é traçada a curva granulométrica em um diagrama semi-logarítmico, neste diagrama as abscissas correspondem aos logaritmos das dimensões das partículas, e como ordenadas temos as porcentagens, em peso, do material passante em cada peneira (DNIT, 2006a).

Segundo Greco (2012), as partículas do solo podem ser classificadas de acordo com seu tamanho em:

- Pedregulho: partículas com diâmetro entre 2,0 e 76,0 mm;
- Areia: partículas com diâmetro entre 0,075 e 2,00 mm;
- Areia grossa: partículas com diâmetro entre 0,42 e 2,00 mm;
- Areia fina: partículas com diâmetro entre 0,075 e 0,42 mm;
- Silte: partículas com diâmetro entre 0,005 e 0,075 mm;
- Argila: partículas com diâmetro menor que 0,005 mm.

Através da curva granulométrica pode-se determinar se o material analisado enquadra-se dentro de determinada faixa granulométrica para um respectivo uso, ou se o mesmo necessita ser misturado com solos de outras faixas granulométricas para então se enquadrar nas condições da determinada função.

2.3.2 Consistência dos solos

Os limites de consistência do solo, também chamados de limites de Atterberg, têm como objetivo avaliar a plasticidade dos solos, que consiste na capacidade de serem moldados sem a variação de volume, em certos teores de umidade (DNIT, 2006a).

2.3.2.1 Limite de plasticidade (LP)

O limite de plasticidade (LP) corresponde ao teor de umidade, em porcentagem, que define o limite entre o estado plástico e o estado semi-sólido do solo (DNIT, 2006a).

O ensaio é descrito pela norma DNER-ME 082/94 e consiste na determinação da umidade quando a amostra de solo começa a fraturar ao ser moldada manualmente em forma cilíndrica com medidas padronizadas. Esse procedimento é repetido até que se obtenham três valores de umidade que não difiram entre si em mais de 5%.

De acordo com a norma DNER-ME 082/94, se o solo for extremamente arenoso o ensaio de LP deve ser realizado antes do ensaio de limite de liquidez (LL). E, caso o LP não puder ser determinado, deve-se anotar ambos como NP (não plástico).

2.3.2.2 Limite de liquidez (LL)

De acordo com o DNIT (2006a) o LL é expresso pelo teor de umidade, em porcentagem, que corresponde à transição do estado de consistência plástica para a líquida.

O ensaio é descrito pela norma DNER-ME 122/94 e consiste na obtenção do teor de umidade em que se unem, por um centímetro de comprimento, as bordas inferiores de um sulco feito na amostra de solo devidamente colocada na concha do aparelho de Casagrande e golpeada. Uma porção dessa amostra é retirada para determinação do teor de umidade, e a operação é repetida no mínimo três vezes com adição de água.

Esses resultados são plotados em um gráfico de coordenadas retangulares chamado curva de fluidez, cujo eixo das abscissas (escala aritmética) corresponde ao teor de umidade em porcentagem, e o eixo das ordenadas (em escala logarítmica) ao número de golpes. Com esses pontos obtêm-se uma reta, que na ordenada de 25 golpes representa em sua abscissa o teor de umidade que é o LL do solo (DNIT, 2006a).

Dessa maneira, o LL representa a quantidade de água que é absorvida pela parcela de solo passante na peneira número 40, e quanto maior seu valor mais compressível é o solo (DNIT, 2006a).

No caso da reciclagem de revestimentos asfálticos, Marín e Álvarez (2001) citam como parâmetro de controle que o material reciclado possua LL inferior a 35%.

2.3.2.3 Índice de plasticidade (IP)

O índice de plasticidade (IP) pode ser obtido pela diferença numérica entre o LL e LP:

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Este índice define a plasticidade do solo, sendo que o valor máximo corresponde às argilas e o mínimo para as areias. Assim, é também utilizado como critério para avaliar o teor de argila presente no solo. Em geral, o IP indica a quantidade de argila presente na amostra, enquanto que o LL e o LP indicam a quantidade e o tipo de argila (DNIT, 2006a).

Conforme cita a norma DNER-ME 082/94, quando o LP ou o LL não puderem ser determinados deve-se anotar o IP como NP. Da mesma maneira, caso o resultado de LP seja superior ao valor encontrado para o limite de liquidez, o IP também deve ser adotado como NP.

De acordo com Oliveira (2003) as misturas obtidas da reciclagem de pavimentos asfálticos dificilmente apresentam altos índices de plasticidade, pois a capa asfáltica triturada se transforma em um material grosso e áspero. Porém, é necessário conhecer essa característica, pois recomenda-se que o material da base não possua um IP maior que seis. Além disso, a estabilização com cimento têm melhores resultados quando a base é granular, com baixo IP.

Marín e Álvarez (2001) citam o IP inferior a 15% como valor de referência. E ainda, caso não seja atendida essa condição, juntamente com um LL inferior a 35%, os autores sugerem que pode ser realizado, mediante ensaios de laboratório, um tratamento prévio com cal. Este aglomerante possui a capacidade de reduzir o IP da base, principal benefício da estabilização com cal.

2.3.3 Classificação dos solos

Segundo Greco (2012), os solos podem ser classificados para fins rodoviários através da classificação do *Unified Soil Classification System* (USCS), os itens levados em consideração na classificação dos solos segundo esse sistema são a granulometria e os limites de Atterberg.

A tabela desta classificação divide os solos em três principais grupos: solos de granulometria fina, solos de granulometria grossa e solos altamente orgânicos, essas divisões são ainda subdivididas em 15 grupos básicos (GRECO, 2012).

A USCS classifica os solos quanto ao tamanho das partículas em pedregulho, areia, silte ou argila, podendo os pedregulhos e areias serem bem graduados, mal graduados, siltosos ou argilosos, os siltes serem de baixa plasticidade, orgânicos de baixa plasticidade, orgânicos de alta plasticidade ou elásticos e as argilas serem pouco plásticas, orgânicas e de alta plasticidade (GRECO, 2012).

Conforme Greco (2012), a classificação deve seguir os seguintes passos:

- Primeiro deve-se determinar se o solo é orgânico, de graduação grossa ou fina;
- Em seguida, com os dados de granulometria e com os limites de Atterberg, define-se a que grupo pertence, consultando-se a tabela 1;
- Para classificação da fração fina, utilizam-se os valores dos limites de Atterberg e o chamado gráfico de plasticidade.

Tabela 1 - Classificação dos solos segundo USCS

Classificação dos solos segundo a USCS					
Critérios para estabelecer símbolos de grupos e nomes de grupos usando ensaios de laboratório (A)				Classificação do solo	
				Grupo	Nome do grupo [B]
Solos de granulometria grossa, mais de 50% do solo retido na peneira nº 200	Pedregulhos, mais de 50% de fração grossa retidos na peneira nº 4	Pedregulhos limpos, menos de 5% de finos [C]	$Cu \geq 4$ e $1 \leq Cc \leq 3$ [E]	GW	Pedregulho bem graduado [F]
			$Cu < 4$ e/ou $1 > Cc > 3$ [E]	GP	Pedregulho mal graduado [F]
		Pedregulhos com finos, mais de 12% de finos [C]	Finos classificam-se como ML ou MH	GM	Pedregulho siltoso [F, G, H]
			Finos classificam-se como CL ou CH	GC	Pedregulho argiloso [F, G, H]
	Areias 50% ou mais da fração grossa passam pela peneira nº 4	Areias limpas, menos de 5% de finos [D]	$Cu \geq 6$ e $1 \leq Cc \leq 3$ [E]	SW	Areia bem graduada [I]
			$Cu < 6$ e/ou $1 > Cc > 3$ [E]	SP	Areia mal graduada [I]
		Areias com finos, mais de 12% de finos [D]	Finos classificam-se como ML ou MH	SM	Areia siltosa [G, H, I]
			Finos classificam-se como CL ou CH	SC	Areia argilosa [G, H, I]
Solos de granulometria fina, 50% do solo ou mais passando na peneira nº 200	Siltes e Argilas limite de liquidez menor que 50	Inorgânicos	IP > 7 e sobre ou acima da linha "A" [J]	CL	Argila pouco plástica [K, L, M]
			IP < 4 e abaixo da linha "A" [J]	ML	Silte
		Orgânicos	LL (seco em estufa) dividido por LL (não seco em estufa) menor que 0,75	OL	Argila orgânica [K, L, M, N] Silte orgânico [K, L, M, O]
	Siltes e Argilas limite de liquidez maior ou igual a 50	Inorgânicos	IP sobre ou acima da linha "A"	CH	Argila muito plástica [K, L, M]
			IP abaixo da linha "A"	MH	Silte elástico [K, L, M]
		Orgânicos	LL (seco em estufa) dividido por LL (não seco em estufa) menor que 0,75	OH	Argila orgânica [K, L, M, P] Silte orgânico [K, L, M, Q]
Solos altamente orgânicos	Principalmente matéria orgânica, escura na cor e com odor orgânico			PT	Turfa

Fonte: Adaptado de Greco (2012)

Considerando:

[A] - Baseado no material que passa pela peneira de 3 polegadas (75 mm).

[B] - Se amostra de campo contém rachões, adicionar “com rachões” ao nome do grupo.

[C] - Pedregulhos com 5 a 12% de finos requerem símbolos duplos:

- GW-GM pedregulho bem graduado com silte;
- GW-GC pedregulho bem graduado com argila;
- GP-GM pedregulho de graduação pobre com silte;
- GP-GC pedregulho de graduação pobre com argila.

[D] - Areias com 5 a 12% de finos requerem símbolos duplos:

- SW-SM areia bem graduada com silte;
- SW-SC areia bem graduada com argila;
- SP-SM areia de graduação pobre com silte;
- SP-SC areia de graduação pobre com argila.

[E] –

- Coeficiente de uniformidade (C_u)

$$C_u = D_{60}/D_{10} \quad (2)$$

- Coeficiente de curvatura (C_c)

$$C_c = (D_{30})^2/(D_{10} \cdot D_{60}) \quad (3)$$

- D_{10} = diâmetro correspondente a 10% do material que passa, tomado na curva granulométrica;
- D_{30} = diâmetro correspondente a 30% do material que passa, tomado na curva granulométrica;
- D_{60} = diâmetro correspondente a 60% do material que passa, tomado na curva granulométrica.

[F] - Se o solo contém 15% ou mais de areia, adicionar “com areia” ao nome do grupo.

[G] - Se os finos se classificam como CL ou ML, usar símbolos duplos GC-GM, ou SC-SM.

[H] - Se os finos são orgânicos, adicionar “com finos orgânicos” ao nome do grupo.

[I] - Se o solo contém 15% ou mais de pedregulho, adicionar “com pedregulho” ao nome do grupo.

[J] - Se os limites de Atterberg recaem sobre a área hachurada, o solo é uma argila siltosa, CL-ML.

[K] - Se os solos contêm de 15 a 29% de material retido na peneira 200, adicionar “com areia” ou “com pedregulho”, aquele que for predominante.

[L] - Se os solos contêm mais de 30% de material retido na peneira 200, predominantemente arenoso, adicionar “arenoso” ao nome do grupo.

[M] - Se os solos contêm mais de 30% de material retido na peneira 200, predominantemente pedregulhoso, adicionar “pedregulhoso” ao nome do grupo.

[N] - $IP \geq 4$ e recai sobre ou acima da linha “A”.

[O] - $IP < 4$ e recai abaixo da linha “A”.

[P] - IP recai sobre ou acima da linha “A”.

[Q] - IP recai abaixo da linha “A”.

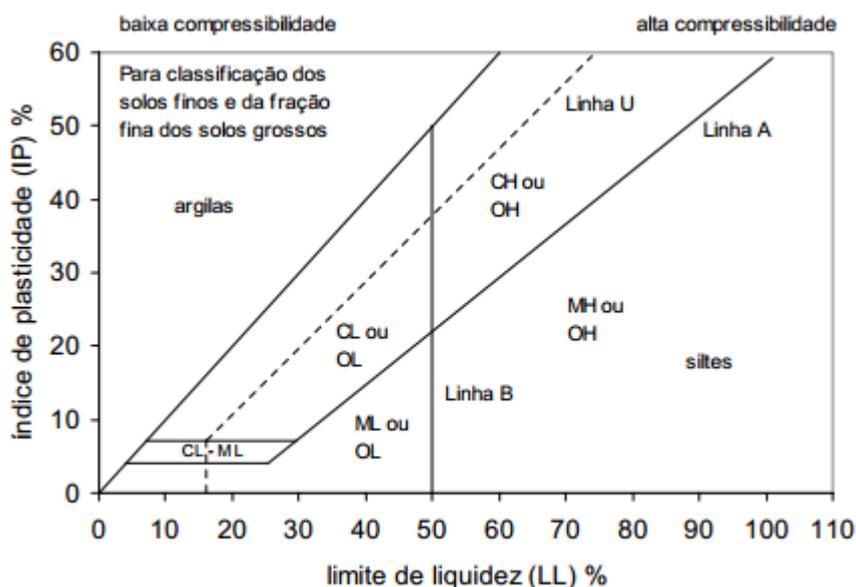


Figura 3 - Gráfico de plasticidade da classificação USCS
Fonte: Greco (2012)

2.3.4 Umidade ótima e massa específica aparente máxima

O teor de umidade ótima pode ser entendido como a relação entre a massa de água contida nos vazios de um solo e a massa de sólidos do mesmo, no qual o material apresenta a sua maior massa específica aparente possível. Assim, implica em possuir a maior quantidade de partículas sólidas por unidade de volume, resultando no aumento da resistência desse solo (SENÇO, 2007).

O procedimento de ensaio para se determinar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima pode ser encontrado na norma DNER-ME 216/94. Neste ensaio uma amostra de solo com um determinado teor de umidade é devidamente preparada e colocada em camadas dentro de um cilindro normatizado,

no qual cada camada da amostra será submetida a uma energia de compactação constante. Desta maneira se obtém para a umidade estipulada um valor correspondente de massa específica aparente do solo seco. Este procedimento é repetido com um determinado acréscimo de água a cada repetição, resultando em novos teores de umidade e correspondentes valores de massa específica aparente do solo seco.

O número de camadas (N_c) e a quantidade de golpes por camada (n) são variáveis de acordo com a energia de compactação (E) que se deseja (normal, intermediária ou modificada). A norma DNER-ME 181/94 apresenta a fórmula onde pode-se calcular a energia de compactação (E):

$$E.V = n.9,8.P.H.N_c \quad (4)$$

Onde V representa o volume do material compactado, P e H a massa e a altura do soquete, respectivamente.

Com os valores de cada umidade e massa específica aparente do solo seco encontrados é construída uma curva de compactação, marcando-se nas abscissas os teores de umidade e nas ordenadas as massas específicas aparentes secas correspondentes. A massa específica aparente seca máxima será o valor correspondente à ordenada máxima da curva de compactação, e o seu correspondente teor de umidade será o valor do teor de umidade ótima.

2.3.5 Ensaios de resistência

Segundo Oliveira (2003), os ensaios de resistência têm a função de confirmar se as propriedades mínimas de resistência estipuladas para uma determinada mistura foram atingidas.

2.3.5.1 Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão simples é obtida pela razão entre a carga de ruptura à compressão e a área da seção transversal do corpo de prova (DNER, 1994f). É um parâmetro fundamental devido aos esforços de compressão diretos transmitidos pelos veículos às camadas do pavimento.

O ensaio de resistência à compressão não confinada em amostras de solo-cimento é descrito pela norma DNER-ME 201/94. A resistência à compressão simples da mistura de material fresado com cimento Portland pode ser obtida por essa norma, tendo em vista que não há norma técnica brasileira específica para esse material.

2.3.5.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral consiste na obtenção de tensões de tração, de forma indireta, ao longo do diâmetro horizontal quando é aplicada perpendicularmente uma carga estática de compressão em duas geratrizes opostas (DNER, 1994e). O ensaio de resistência à tração em solos com adição de estabilizantes químicos é descrito pela norma DNER-ME 181/94.

Estas tensões de tração também servem como parâmetro para a resistência mecânica à fadiga, e, além disso, através de outros fatores, é possível determinar o comportamento de deformação sob pressão (WIRTGEN GMBH, 2002).

2.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de solos consiste na aplicação de processos tecnológicos e construtivos em bases e sub-bases com o intuito de melhorar ou fornecer características desejadas aos componentes destas camadas, dando condições para que o solo resista a deformações e rupturas quando solicitado (DNIT, 2006a; SENÇO, 2007).

De acordo com DNIT (2006a) existem dois tipos de estabilização de solos:

- Estabilização granulométrica: é obtida através da compactação de camadas de materiais ou misturas de materiais granulares. Essas camadas podem ser compostas, por exemplo, por solos, britas de rochas e de escória de alto forno. Os materiais devem atender critérios adequados, como granulometria e índices geotécnicos apropriados, de acordo com especificações. Senço (2007) afirma que essa adequada distribuição dos diâmetros dos grãos resulta em uma mistura densa, de massa específica aparente superior à dos componentes, mais impermeável e resistente;

- Estabilização com aditivos: é realizada através da mistura dos solos aditivados com materiais como cimento, cal e betume. Bernucci *et al.* (2008) cita que os principais objetivos desta mistura são proporcionar um aumento de rigidez ao material natural, e de resistência à compressão e à tração.

2.4.1 Estabilização de solos com cimento Portland

De acordo com Bernucci *et al.* (2008) existem dois tipos de estabilização de solos com cimento Portland, de acordo com a finalidade:

- Quando o objetivo é enrijecer o solo utilizam-se percentuais em massa em torno de 5%, e essa mistura é chamada de solo-cimento;
- Para melhorias parciais nas propriedades, como trabalhabilidade e aumento de capacidade de suporte, utilizam-se percentuais em massa em torno dos 3%, e a mistura é denominada então de solo melhorado com cimento.

Mas o DER/PR, através da norma ES-P 11/05 (DER/PR, 2005a) classifica as misturas de acordo com seu comportamento, através dos valores obtidos para resistência à compressão simples, obtida aos 7 dias de idade:

- Solo tratado com cimento: de 1,2 a 2,1 MPa;
- Solo-cimento: superior a 2,1 MPa.

2.4.2 Solo-cimento

De acordo com o DNIT (2006a), o solo-cimento é uma mistura compactada de solo, cimento Portland e água. A sua utilização tem por objetivo proporcionar um aumento de densidade, durabilidade e resistência à mistura, resultando em um material cimentado, duro e de rigidez à flexão mais elevada.

As misturas economicamente viáveis são obtidas com teores de cimento de aproximadamente 5% a 9% em relação à massa total. Inclusive, uma das características indicativas da viabilidade econômica é a presença de certa proporção de areia no solo, pois se este for muito argiloso pode demandar um alto teor de cimento, que além de tornar a mistura onerosa propicia a retração (BERNUCCI *et*

al., 2008). Conforme cita o DNIT (2006a), o teor de cimento usualmente adotado para a mistura é da ordem de 6% a 10%.

O solo-cimento deve ser preferencialmente preparado em usina, mas no caso de vias com baixo volume de tráfego pode também ser misturado na pista. Além disso, deve ser compactado imediatamente após o preparo e espalhamento na pista, devido à rápida reação de hidratação do cimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A norma DNIT 143/2010-ES sobre bases de solo-cimento indica que os solos utilizados na mistura devem apresentar as seguintes características:

Peneiras	Porcentagem	Tolerância
2½"	100%	-
Nº 4	50 a 100 %	± 5%
Nº 40	15 a 100 %	± 2%
Nº 200	5 a 35 %	± 2%
Limite de liquidez	máximo 40%	
Índice de plasticidade	máximo 18%	

Quadro 1 - Características do solo, para utilização em solo-cimento
Fonte: DNIT (2006a)

2.4.3 Solo melhorado com cimento

As bases e sub-bases estabilizadas com solo melhorado com cimento são consideradas flexíveis, pois não possuem elevada cimentação, devido ao baixo teor de cimento utilizado (DNIT, 2006a). Este teor deve ser superior a 1% em peso, e inferior aos teores mínimos que caracterizariam um solo-cimento, que varia de solo para solo, mas se encontra em torno dos 4% em peso (SENÇO, 2007).

De acordo com Senço (2007) a melhoria que o cimento proporciona, neste caso, visa apenas a correção de determinadas propriedades físico-químicas do solo, para que a mistura possa atender as especificações e destinar-se a um fim mais nobre.

A baixa adição de cimento em solos tem como finalidade reduzir a plasticidade, melhorar a trabalhabilidade e atender as especificações granulométricas. Além disso, pode proporcionar à mistura uma diminuição da deformabilidade e da expansão em presença de água (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Macedo e Motta (2006) *apud* Bernucci *et al.* (2008) citam ainda uma recomendação dita questionável: que diferentemente do solo-cimento, algumas especificações não indicam a compactação logo após a mistura. No caso do solo

melhorado com cimento, a mistura é deixada em pilhas por horas ou dias, para que ocorra a agregação e alteração granulométrica, antes de ser aplicada e compactada. As normas DNIT 140/2010-ES e DNIT 142/2010-ES, referentes à utilização de solos melhorados com cimento para bases e sub-bases de pavimentos, indicam um período de cura mínimo de 72 horas antes do espalhamento e compactação da mistura.

2.5 DEFEITOS DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E SEMI-RÍGIDOS

Os pavimentos são projetados para durarem um determinado período de tempo. Durante sua vida útil, ele passa de uma condição ótima no seu início de ciclo de vida até atingir uma condição ruim. A redução da qualidade do pavimento com o passar do tempo é conhecida como deterioração do pavimento (DNIT, 2006b).

Para os usuários das vias, o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois alterações nesta estrutura interferem diretamente no conforto dos usuários (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Bernucci, *et al.*, (2008) quando o conforto do usuário é prejudicado, significa que os defeitos apresentados pela via também causam consequências negativas no veículo. Essas consequências geram maiores custos operacionais, que englobam gastos com manutenção do automóvel, consumo de combustível, desgaste de pneus, tempo de viagem dentre outros.

No Brasil, o documento que define os termos técnicos associados às patologias encontradas em pavimentos flexíveis e semi-rígidos, e serve para padronizar a nomenclatura adotada em outros documentos relativos a esses pavimentos é a norma TER 005 (DNIT, 2003).

Segundo a norma TER 005 (DNIT, 2003), as definições para os defeitos encontrados nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos são as seguintes:

2.5.1 Fendas

Pode ser entendida como qualquer descontinuidade presente na superfície do pavimento que provoque aberturas de menor ou maior porte, podem ser encontradas na forma de fissuras e trincas.

2.5.1.1 Fissura

A fissura é a fenda de largura capilar existente no pavimento, de vista desarmada é perceptível somente a uma distância inferior a 1,50 metro, ela pode ser encontrada transversal, longitudinal ou obliquamente ao eixo da via. As fissuras não são patologias muito graves, pois não acarretam problemas funcionais ao revestimento asfáltico.

2.5.1.2 Trinca

É a fenda com abertura superior a da fissura, podendo ser observada facilmente a vista desarmada, pode ser encontrada na forma de trinca isolada ou trinca interligada.

2.5.1.2.1 Trinca isolada

a) Trinca transversal: é a trinca isolada que ocorre predominantemente ortogonal ao eixo da via, pode ser curta quando possuir extensão inferior a 100 centímetros e longa quando superar este valor.

b) Trinca longitudinal: é a trinca isolada que geralmente ocorre paralelamente ao eixo da via, pode ser curta quando possuir extensão inferior a 100 centímetros e longa quando superar este valor.

c) Trinca de retração: é a trinca que se origina devido ao fenômeno da retração térmica, seja ela decorrente do material da camada de revestimento ou do material da base rígida ou semi-rígida subjacentes ao revestimento trincado.

2.5.1.2.2 Trinca interligada

a) Trinca tipo “Couro de Jacaré”: é um conjunto de trincas que se forma sem uma direção preferencial, possuindo o aspecto do couro de jacaré. Esse tipo de trinca pode apresentar, ou não, erosão acentuada nas bordas.

b) Trinca tipo “Bloco”: é um conjunto de trincas interligadas formadas por lados bem definidos, assemelhando-se a configuração de blocos, pode apresentar, ou não, erosão acentuada nas bordas.

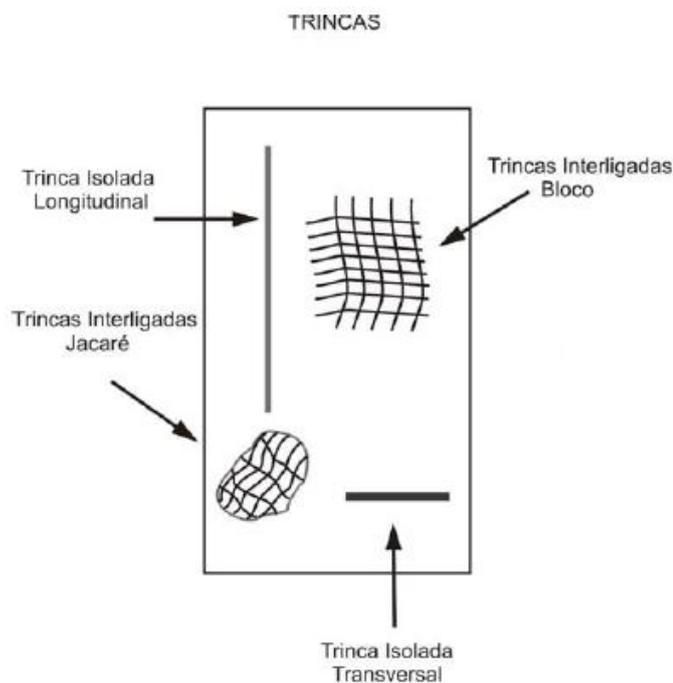


Figura 4 - Representação esquemática de trincas
Fonte: DNIT (2003)

2.5.2 Afundamento

É a deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, pode ser acompanhada, ou não, pelo levantamento. Pode ser encontrada na forma de afundamento plástico ou de consolidação.

2.5.2.1 Afundamento plástico

Afundamento causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito, é acompanhado de levantamento. Quando possuir extensão de até 6 metros é chamado afundamento plástico local, quando a extensão for superior a este valor e estiver localizado ao longo da trilha de roda é denominado afundamento plástico da trilha de roda.

2.5.2.2 Afundamento de consolidação

Afundamento de consolidação é causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento ou subleito, não estando acompanhado do

fenômeno do sollevamento. Quando possuir extensão de até 6 metros é denominado afundamento de consolidação local, quando a extensão for superior a este valor e estiver localizado ao longo da trilha de roda é denominado afundamento de consolidação da trilha de roda.

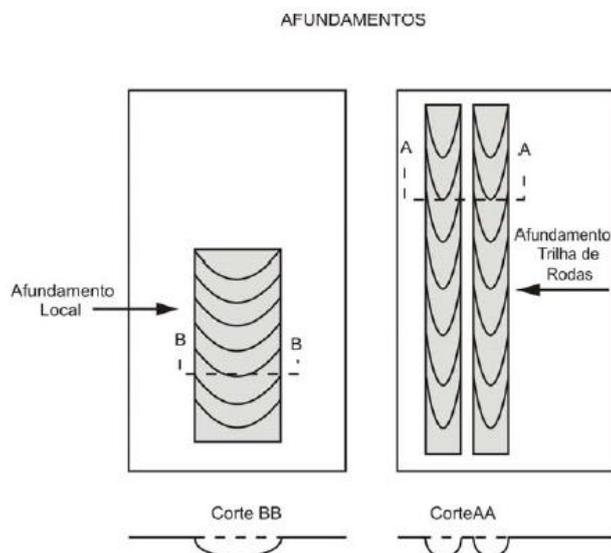


Figura 5 - Representação esquemática de afundamentos
Fonte: DNIT (2003)

2.5.3 Ondulação ou Corrugação

São deformações caracterizadas por ondulações e corrugações transversais na superfície do pavimento.

2.5.4 Escorregamento

É o deslocamento do revestimento asfáltico em relação à camada subjacente do pavimento, com surgimento de fendas em forma de meia lua.

2.5.5 Exsudação

Excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento, provocando manchas escuras, esse fenômeno é causado pela migração do ligante através do revestimento.

2.5.6 Desgaste

É o efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento provocado por esforços tangenciais gerados pelo tráfego, é caracterizado pela aspereza superficial do pavimento.

2.5.7 Panela ou Buraco

São cavidades que se formam no pavimento devido a diversas causas, podendo atingir as camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação dessas camadas.

2.5.8 Remendo

É a panela preenchida com uma ou mais camadas de pavimento na operação denominada de “tapa buraco”.

2.5.8.1 Remendo superficial

É a correção, em área localizada, da superfície do revestimento, através da aplicação de uma camada betuminosa.

2.5.8.2 Remendo profundo

É o remendo onde é necessária a substituição do revestimento e, eventualmente, de uma ou mais camadas inferiores do pavimento, geralmente apresenta forma retangular.

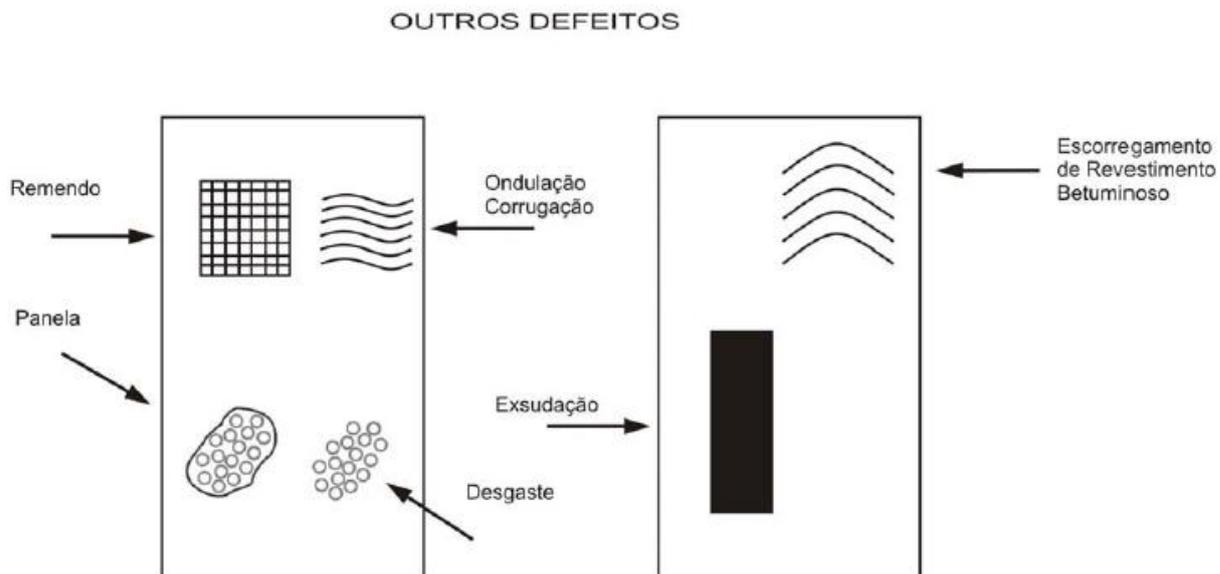


Figura 6 - Representação esquemática de outros defeitos
Fonte: DNIT (2003)

2.6 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Segundo Gewehr (2014) a reciclagem de pavimentos consiste na reutilização de todo o material existente na via danificada para reestruturação do pavimento, podendo ser adicionados materiais como agentes estabilizantes para reforçar a estrutura final.

De acordo com DNIT (2006b) a utilização de técnicas de reciclagem de pavimentos apresenta-se como uma solução para muitos problemas encontrados nos pavimentos, sendo, portanto, uma importante ferramenta para restauração de pavimentos degradados.

A reutilização dos materiais existentes no pavimento para compor uma nova estrutura resulta em considerável economia de energia, material e dinheiro, além de resolver problemas como o do descarte do material deteriorado (*Federal Highway Administration - FHWA, 1997*).

Conforme DNIT (2006b), a reciclagem dos pavimentos oferece benefícios, dentre os quais vale destacar:

- Conservação de agregados e de ligantes;
- Preservação do meio ambiente; e
- Restauração das condições geométricas existentes.

Segundo a *Asphalt Recycling And Reclaiming Association - ARRA (2001)*, a reciclagem de pavimentos asfálticos data do início do século XX, porém, as técnicas

e equipamentos de reciclagem tiveram pouco avanço até a década de 70. Com a crise do petróleo e a introdução de novos equipamentos de reciclagem durante a década de 70, o interesse no processo de reciclagem de pavimentos reacendeu, difundindo a técnica por todo o mundo, fazendo-a crescer de forma exponencial nos últimos 25 anos.

No Brasil, a reciclagem de pavimentos começou a ser empregada na década de 80, envolvendo somente o processo de reciclagem do Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) (DNER, 2006 *apud* GONÇALVES e SACHET, 2008, p.1). Nos anos subsequentes chegaram ao país as primeiras recicladoras a frio, que tinham a capacidade de reciclar não só a camada de revestimento, mas também a camada de base do pavimento. Essas máquinas propiciaram o início do emprego da técnica de reciclagem de pavimentos a frio no Brasil (BARRETA e FORTES, 2011).

Segundo ARRA (2001), existem cinco métodos de reciclagem de pavimento principais:

- Reciclagem a frio (*Cold recycling* - CR);
- Reciclagem a quente (*Hot recycling* - HR);
- Reciclagem a quente *in situ* (*Hot in-place recycling* - HIR);
- Aplainamento a frio (*Cold planing* - CP);
- Reciclagem profunda *in situ* (*Full depth reclamation* - FDR).

Como no decorrer do estudo o enfoque será no método de reciclagem FDR, ele será descrito com mais detalhes a seguir.

2.6.1 Reciclagem profunda (*Full depth reclamation* – FDR)

De acordo com Oliveira (2003), a reciclagem profunda *in situ* (FDR) é um processo automatizado, no qual a camada de revestimento asfáltico e parte do material das camadas subjacentes são simultaneamente triturados e homogeneizados, com o objetivo de serem reutilizados no pavimento como uma nova camada estabilizada e homogênea, capaz de conceder ao mesmo novo ciclo de vida útil.

Segundo DNIT (2006b) durante o processo de reciclagem podem ser adicionados agentes estabilizantes na mistura de materiais, como por exemplo, materiais betuminosos (emulsão asfáltica), agregados, agentes rejuvenescedores e

estabilizantes químicos. Dentre esses estabilizantes, o mais utilizado no Brasil é o cimento Portland, isso devido à sua disponibilidade, podendo ser encontrado em todas as regiões do país (OLIVEIRA, 2003).

Como o processo de reciclagem tido como foco do estudo utiliza cimento Portland como estabilizante químico, os equipamentos e a execução do método serão descritos com base no processo de reciclagem profunda *in situ* com adição de cimento Portland.

2.6.1.1 Equipamentos

Segundo DNIT (2013), os equipamentos mínimos requeridos para o processo de reciclagem profunda *in situ* com adição de cimento Portland são:

- Recicladora de pavimentos: equipamento responsável por fresar o revestimento asfáltico e camadas subsequentes, e realizar a mistura dos materiais, deixando a mistura homogênea.
- Caminhão-tanque: responsável por realizar o abastecimento da recicladora de pavimentos, de umidificar a superfície durante as operações de compactação e, também, para controlar a emissão de poeira e manter a umidade na superfície da camada reciclada após o acabamento. São necessários no mínimo dois caminhões de 10 mil litros de capacidade.
- Caminhão basculante equipado com caçamba inclinável: realizará o transporte de sobra de materiais oriundos das operações de acabamento da superfície.
- Pá carregadeira articulada: para remoção do material excedente da reciclagem.
- Vassoura mecânica e compressor de ar comprimido: usados para limpar a superfície da camada reciclada antes da aplicação da pintura de proteção e, também, para eliminar material solto antes da abertura ao tráfego.
- Motoniveladora: tem a função de cortar, espalhar e nivelar o material reciclado.

- Equipamento para espalhamento do cimento Portland: o equipamento deverá espalhar o estabilizante uniformemente nas direções longitudinal e transversal, ele deverá possuir controle eletrônico capaz de permitir a máxima precisão na taxa de aplicação.
- Equipamentos para compactação: serão utilizados rolos metálicos vibratórios do tipo liso e/ou pé de carneiro, e rolo pneumático autopropulsor, os equipamentos serão responsáveis pela compactação do material reciclado. A composição do trem de compactadores deve ser estabelecida experimentalmente, para definir a combinação ideal dos tipos de equipamentos que irão otimizar o número de passadas e alcançar o grau de compactação desejado.

O comboio formado pelos equipamentos que atuam simultaneamente e em sequência na pista de reciclagem é chamado de “trem de reciclagem”, a sua configuração é dada pela união da recicladora aos outros equipamentos (OLIVEIRA, 2003).

Como podemos observar na figura 6, o trem de reciclagem profunda *in situ* com adição de cimento Portland é formado, na sequência, por: espargidor de cimento, caminhão-tanque, recicladora de pavimento, rolo metálico vibratório (compactação inicial), motoniveladora e rolos metálico vibratório e pneumático (compactação final e acabamento). Na figura 7 não está representado o caminhão-tanque que atua no final do comboio, e é responsável por controlar a emissão de poeira e manter a umidade na superfície da camada reciclada após o acabamento.



Figura 7 - Trem de reciclagem profunda de pavimento *in situ* com adição de cimento Portland
Fonte: Adaptado de Gewehr (2014)

2.6.1.2 Execução

A execução da reciclagem profunda de pavimento *in situ* com adição de cimento Portland é normatizada no Brasil pela norma DNIT 167/2013-ES, nela estão descritas e detalhadas todas as etapas do processo de reciclagem.

O processo construtivo compreende a operação simultânea de desagregação do pavimento e incorporação de materiais novos (espalhados previamente sobre a pista), mistura e homogeneização *in situ*, compactação e acabamento, segundo alinhamento e cotas definidos no projeto geométrico, resultando numa camada nova de pavimento (DNIT, 2013).

A reciclagem *in situ* do pavimento deve ser executada de acordo com as condições e sequência a seguir descritas (DNIT, 2013):

- 1) Espalhamento do agregado adicional (caso necessário) na espessura determinada.
- 2) Espalhamento de cimento Portland sobre a superfície, na taxa indicada no projeto de mistura.
- 3) Não exceder 30 minutos entre a aplicação do cimento e o início da mistura dos materiais.
- 4) Reciclagem na seção e espessura de corte indicadas em projeto. Nesta operação o cimento Portland, agregados adicionais (caso necessário) e a água para compactação são simultaneamente incorporados e homogeneizados com os materiais do pavimento existente.

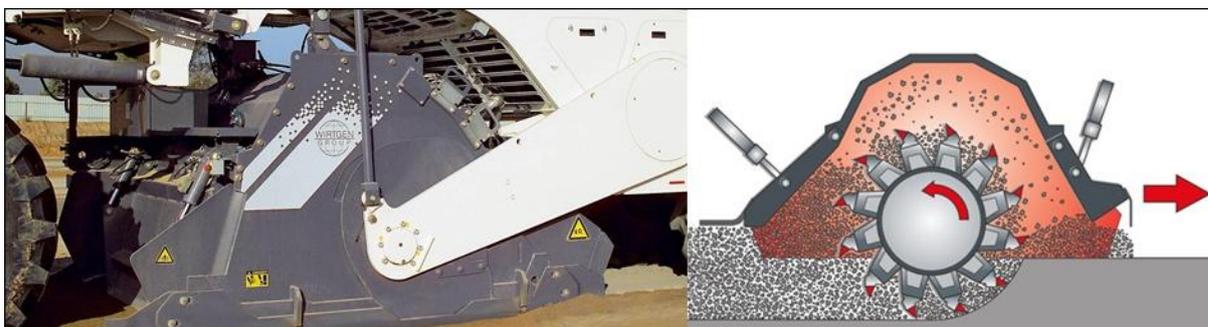


Figura 8 – Mistura e homogeneização dos materiais na caixa de reciclagem da recicladora
Fonte: Gewehr (2012)

- 5) Pré-compactação, para confinar a mistura reciclada e evitar perdas de umidade à medida que a recicladora avança. O equipamento de compactação vem imediatamente atrás da recicladora, para dar consistência à mistura antes que qualquer conformação geométrica seja feita pela motoniveladora.

6) Após a pré-compactação deve ser realizada a conformação inicial dos perfis transversais e longitudinais da camada com emprego de motoniveladora.

7) Finalizada a pré-compactação, inicia-se efetivamente a compactação final. À medida que se processa a compactação, a motoniveladora vai modelando a superfície, conforme estabelecido no projeto geométrico.

8) Após a conclusão da compactação deve ser feito o acerto final da superfície, de acordo com o projeto geométrico. Nesta etapa, as saliências devem ser eliminadas com o emprego de motoniveladora, e a superfície da base deve ser comprimida até que se apresente lisa e isenta de partes soltas ou sulcadas.

9) Concluídas as operações de compactação e acabamento, a camada reciclada deve ser protegida contra evaporação da água, por meio da aplicação de produto asfáltico isento de solventes.

10) Aplicação do revestimento final na camada reciclada devidamente protegida (pintura de proteção + capa selante).

2.7 AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), devem ser levantados em campo dados que forneçam as informações necessárias para projetar o melhor tipo de tratamento para recuperação do pavimento. Além disso, os pavimentos devem ser avaliados quanto à funcionalidade, ou seja, pelas condições de superfície e defeitos existentes, e à estrutura, pela capacidade de suportar cargas.

2.7.1 Avaliação Funcional

Segundo Bernucci *et al.* (2008), a pavimentação deve garantir conforto ao rolamento e segurança para seus usuários. As características funcionais do pavimento relacionam-se às deteriorações existentes na superfície. De acordo com Fontes (2009), deve-se avaliar a superfície quanto às características geométricas e físicas e, ainda, para Bernucci *et al.* (2008), quanto à aderência pneu-pavimento, principalmente em pistas molhadas.

De acordo com Oliveira (2003), deve-se inspecionar, quando possível, a extensão inteira do pavimento, para constatar o estado em que se encontra a superfície de rolamento em relação à existência de patologias e à frequência de

ocorrência das mesmas. Para detalhar as condições da superfície do pavimento, registram-se desgastes e defeitos na superfície, como: buracos, depressões, exsudações, deformações e desagregações; existência de desnível entre pistas maiores que cinco centímetros; obstáculos sobre as pistas; áreas do acostamento que foram cobertas por vegetação ou com erosões ou depressões elevadas;

2.7.2 Avaliação Estrutural do Pavimento

Através do estudo da capacidade estrutural do pavimento podem-se saber as solicitações suportadas até o presente e prever as futuras (DNIT, 2006b). A análise estrutural de pavimentos asfálticos pode ser feita através da combinação de elementos como: a capacidade que as camadas de solo têm de suportar as cargas, as deformações provocadas pelo tráfego e a integridade da superfície asfáltica (DNIT, 2006a).

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), a cada vez que a roda de um veículo passa pelo pavimento gera um deslocamento total que pode causar dois tipos de efeitos:

- Deformação elástica, onde o revestimento sofre uma flexão alternada comumente chamada de deflexão. Este é o principal parâmetro de avaliação estrutural do pavimento.
- Deformação permanente que é quando o veículo provoca um afundamento de trilha de roda e, a partir de determinada medida, pode provocar desconforto e prejudicar a segurança no tráfego, sendo um critério de avaliação estrutural e funcional do pavimento.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), para medir a deflexão dos pavimentos, existem duas gerações de defletômetros utilizados no Brasil. O primeiro foi a viga Benkelman, desenvolvida pelo engenheiro A. C. Benkelman do Departamento de Transportes da Califórnia e introduzida no país em 1962. O segundo é da classe dos equipamentos de impacto (*Falling Weight Deflectometer – FWD*), introduzida em 1994 no país (DNER, 1998 *apud* BERNUCCI *et al.*, 2008, p.446).

Os procedimentos recomendados pelo DNIT (2006a) para avaliar a estrutura dos pavimentos são:

2.7.2.1 Procedimento I – Viga Benkelman

O pavimento é submetido a uma avaliação contínua e, através de dados defletométricos retirados da viga Benkelman, mede-se o raio de curvatura e a deflexão máxima (DNIT, 2006a). A viga Benkelman necessita de um caminhão com carregamento de 8,2 toneladas e com roda dupla no eixo traseiro simples, conforme figura 08 (BERNUCCI *et al.*, 2008).

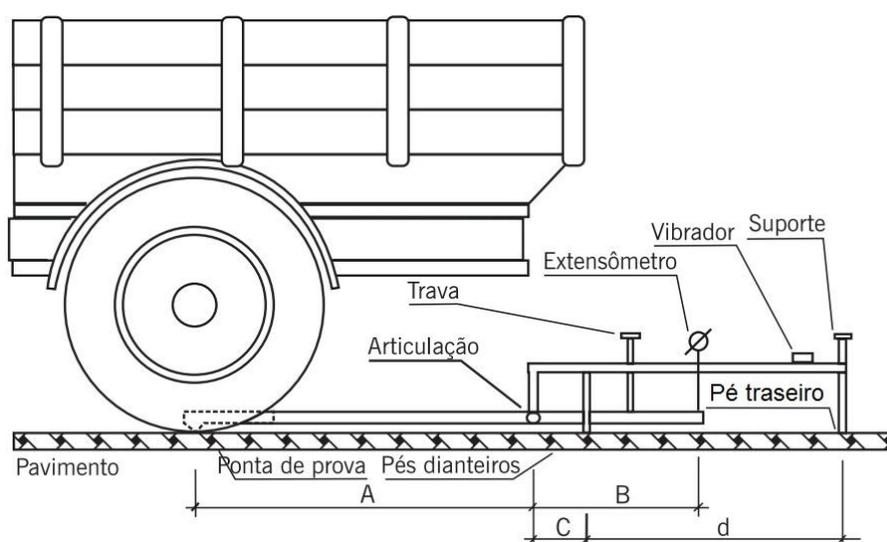


Figura 9 - Esquema da viga Benkelman
Fonte: Adaptado de DNER ME 24 (1994) apud Bernucci *et al.* (2008)

No ensaio, deve-se colocar a ponta de prova entre os pneus da roda dupla do caminhão, exatamente no eixo. Faz-se a leitura inicial no extensômetro da viga (L_i). O caminhão afasta-se lentamente por dez metros e faz-se a leitura no extensômetro (L_f), que está relacionada à deflexão do pavimento (d_0). O cálculo da deflexão pode ser feito a partir da expressão (5), onde K é uma constante da viga, da relação entre o braço maior “A” e o menor “B” (figura 9):

$$d_0 = (L_i - L_f) \cdot K \quad (5)$$

Para o cálculo do raio de curvatura, deve-se medir mais um ponto além da deflexão máxima (d_0), geralmente a 25 centímetros da leitura inicial (d_{25}), fazer um gráfico em função da distância e traçar um arco parabólico que passe pelos dois pontos.

Como os parâmetros obtidos pela viga Benkelman não são suficientes para obter os módulos de elasticidade das camadas do pavimento, são coletadas

amostras dos trechos para posterior determinação destes módulos em laboratório. A partir disso e outros parâmetros pode-se analisar o pavimento quanto à fadiga.

2.7.2.2 Procedimento II – Defletômetros dinâmicos

Em cada camada mede-se, através dos defletômetros dinâmicos, o módulo de elasticidade efetivo (E_{ef}). Apenas para confirmar os resultados obtidos para E_{ef} , retiram-se amostras de apenas alguns locais para o cálculo em laboratório do módulo de resiliência do subleito (M_r), com o intuito de evitar graves erros no processo de retroanálise das medidas de deflexões.

Os procedimentos citados acima são destrutivos, ou seja, são coletadas amostras, geralmente através de poços de sondagem, passando por cada camada do pavimento até o subleito, permitindo assim a realização de ensaios para determinação da capacidade de suporte de cargas *in situ* do pavimento, além da espessura de cada camada (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Além dos métodos destrutivos para determinação da capacidade estrutural do pavimento, existem os semidestrutivos e não destrutivos. Os métodos semidestrutivos são aqueles com pequenas aberturas no pavimento através da utilização de um equipamento portátil, como o cone dinâmico de penetração (*Dynamic Cone Penetrometer* - DCP). Este ensaio costuma gerar somente correlações com o Índice de Suporte Califórnia (ISC), porém vêm sendo utilizados instrumentos portáteis para avaliação expedita de módulo de elasticidade do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os equipamentos utilizados para métodos de avaliação estrutural não-destrutiva (*nondestructive deflection testing* - NDT) podem ser divididos em três categorias de acordo com o carregamento: quase-estático, dinâmico e por impacto (DNIT, 2006a; BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.8 MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO, REFORÇO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Segundo DNIT (2006b), o termo “Recuperação do Pavimento” deve ser interpretado como recuperação das características funcionais e estruturais, sendo concretizada pelas ações de intervenções físicas, ou seja, restauração ou

reabilitação do pavimento. Restauração é a recuperação quando o pavimento está deteriorado, porém não está com sua habilitação comprometida. Reabilitação é a recuperação quando a habilitação está comprometida, devido às elevadas deteriorações. Reforço é o reestabelecimento da capacidade estrutural de suporte do pavimento ou o aumento da capacidade para uma nova demanda de tráfego.

De acordo com Fontes (2009), os pavimentos asfálticos são dimensionados para uma determinada vida útil e ao longo dos anos ocorre perda gradual de qualidade do pavimento, que é denominada deterioração. Através do estudo das causas das deteriorações é possível determinar o melhor método de recuperação dos pavimentos asfálticos. Segundo Bernucci *et al.* (2008), devem-se realizar avaliações funcionais e estruturais do pavimento para obterem-se dados das condições superficiais e estruturais, identificando os problemas existentes para determinar a solução mais adequada de reabilitação.

2.8.1 Recuperação das características funcionais

As técnicas de recuperação superficiais devem ser aplicadas somente em pavimentos sem problemas estruturais, uma vez que não aumenta a capacidade estrutural (FONTES, 2009). Os métodos para recuperação das características funcionais relacionam-se aos problemas de superfície do pavimento, normalmente causados pelo envelhecimento do betume ou trincamentos na capa devido às forças térmicas (WIRTGEN GMBH, 2012).

Segundo Wirtgen GmbH (2012), os métodos mais utilizados para lidar com problemas superficiais são:

- Recapeamento asfáltico sobreposto: adiciona-se uma camada fina de asfalto quente (40 a 50 milímetros) sobre a superfície existente.
- Fresagem e substituição: retira-se a camada deteriorada e substitui-se por uma nova camada de asfalto quente, geralmente com a adição de um ligante modificado.
- Reciclagem: retira-se o material asfáltico por fresagem e recicla-se. A reciclagem pode ser feita em usina misturadora a frio ou *in situ*.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), os tipos de revestimento mais empregados para recuperação funcional, podendo ou não ser combinados e com ou sem remoção da camada antiga por fresagem, são:

- Lama asfáltica: selagem de trincas e rejuvenescimento.
- Tratamento superficial simples ou duplo: selagem de trincas e recuperação da aderência superficial.
- Microrrevestimento asfáltico a frio: idem ao tratamento superficial simples ou duplo, porém empregado quando há possibilidade de ação abrasiva acentuada do tráfego.
- Concreto asfáltico: utilizado quando o principal problema funcional é a irregularidade acentuada.
- *Stone Matrix Asphalt* (matriz pétreas asfáltica – SMA), mistura do tipo camada porosa de atrito ou misturas descontínuas: para melhorar a condição de atrito e o escoamento de água superficial.

2.8.2 Recuperação estrutural

A recuperação estrutural deve ser realizada quando houver danos estruturais ou necessidade de reforços devido a um aumento de tráfego, sendo relacionada ao reestabelecimento ou incremento da capacidade de suporte do pavimento. Pode ser feita através de recapeamento, ou seja, adição de novas camadas à estrutura, e/ou tratamento das camadas do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo ainda com Bernucci *et al.* (2008), utiliza-se normalmente para o recapeamento: concreto asfáltico, SMA, misturas descontínuas e o pré-misturado a quente. Empregam-se a estes revestimentos os cimentos asfálticos convencionais, com adição de polímeros ou borracha moída de pneus.

Para Wirtgen GmbH (2012), entre as alternativas de recuperação estrutural encontram-se:

- Reconstrução total: destruir o antigo e iniciar a construção de um novo pavimento.
- Recapeamento: construção de novas camadas sobre o revestimento antigo.
- Reciclagem profunda: na profundidade até onde está deteriorado o pavimento, podendo-se adicionar novas camadas de asfalto após a camada reciclada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do estudo foi escolhida uma rua de acordo com a programação de obras da SMOP de Curitiba. A rua utilizada como foco do estudo foi a Hermenegildo Luca, situada no bairro Butiatuvinha, entre as ruas Brasília Cuman e Elis Regina. No total, foi reciclado um trecho de pavimento de 430 metros.



Figura 10 - Rua Hermenegildo Luca
Fonte: Autores (2014)

O processo de reciclagem asfáltica na rua selecionada ocorreu nos dias 12 e 13 de Maio de 2014, e a reciclagem foi acompanhada durante toda sua execução para que se pudesse identificar como era realizado o processo de reciclagem pela PMC. Tendo em mãos a metodologia utilizada pela prefeitura e a normatizada pelo DNIT 167/2013-ES, foi possível confrontar os dois métodos e apontar se o que é realizado pela prefeitura está de acordo com o normatizado, ou se o processo precisa de correções para atingir um resultado adequado.

No primeiro dia de reciclagem foram colhidos 70 kg de amostra da mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico), esta amostra foi retirada com o auxílio de pá e colocada em sacos de estopa. O material foi coletado após a recicladora fazer um corte no asfalto na mesma profundidade em que aconteceria a reciclagem, isso antes do espalhamento de cimento e agregados na via.



**Figura 11 - Coleta de amostra na rua Hermenegildo Luca
Fonte: Autores (2014)**

Além da mistura reciclada, foi coletada uma amostra de 40 kg de brita graduada, que foi utilizada na reciclagem para correção da granulometria da mistura, este material foi coletado com o auxílio de pá e colocado em sacos de estopa. Após devidamente ensacados e identificados, os materiais foram levados ao laboratório de mecânica dos solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Curitiba - Sede Ecoville.

No laboratório, a mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico) foi utilizada para realização dos seguintes ensaios: limite de plasticidade e limite de liquidez, análise granulométrica por peneiramento e determinação da massa específica máxima e teor de umidade ótima. Já a brita graduada foi submetida apenas ao ensaio de análise granulométrica por peneiramento. Além destes dois materiais, foram coletados 4 kg de cimento Portland CPII-Z-32 nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Curitiba - Sede Ecoville, mesmo tipo de cimento utilizado na reciclagem. Este foi submetido ao ensaio de módulo de finura para obter-se a sua granulometria.

Após os ensaios de caracterização foram confeccionados corpos de prova utilizando-se uma mistura dos três componentes ensaiados, estes corpos de prova foram submetidos aos ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral.

- Análise granulométrica por peneiramento

Este ensaio foi realizado conforme método prescrito na norma DNER-ME 080/94, tanto para a mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico) quanto para a brita graduada. Para o cimento Portland foi realizado o ensaio de módulo de finura, conforme descrito na NBR 11579.

O objetivo desse ensaio era descobrir a granulometria resultante da mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico) e do cimento, e determinar se a granulometria resultante da mistura destes dois materiais enquadrava-se em pelo menos uma das faixas granulométricas estipuladas pela norma DNIT 167/2013-ES (tabela 2). A quantidade de cimento utilizada nesta mistura foi na mesma proporção da quantidade utilizada durante a reciclagem. A curva granulométrica encontrada para a mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico) serviu de base para sua caracterização.

Tabela 2 - Faixas granulométricas a serem atendidas por misturas recicladas

Composição granulométrica				
Peneira de malha quadrada		Percentagem passando, em massa (%)		Tolerância da faixa de projeto (%)
ABNT	Abertura (mm)	I	II	
2"	50,80	100	100	-
1"	35,40	75 – 90	100	± 7
3/8"	9,50	40 – 75	50 - 85	± 7
Nº 4	4,75	30 – 60	35 - 65	± 5
Nº10	2,00	20 – 45	25 - 50	± 5
Nº40	0,425	15 – 30	15 - 30	± 2
Nº200	0,075	5 – 15	5 – 15	± 2

Fonte: Adaptado de DNIT (2013)

O resultado obtido na análise granulométrica da brita graduada serviu para realizar a correção da curva obtida para a mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico) com o cimento Portland, enquadrando-a numa das faixas estipuladas pela norma DNIT 167/2013-ES.

A correção da granulometria com a adição de brita graduada foi feita através do método gráfico, onde foram traçadas as curvas das porcentagens retidas acumuladas dos materiais a serem misturados, e as faixas de referência estipuladas pela norma DNIT 167/2013-ES. Após a plotagem das curvas, procurou-se através do

procedimento gráfico compor uma mistura cujo resultado se enquadrasse dentro de uma das faixas granulométricas limitantes.

- Determinação do teor de umidade ótima e massa específica seca máxima

Para a obtenção do teor de umidade ótima e massa específica seca máxima foram realizados ensaios de compactação. Primeiramente corrigiu-se a granulometria da mistura triturada com o cimento Portland através da adição de brita graduada, conforme descrito no item anterior.

O ensaio de compactação foi adaptado da norma ABNT NBR 12023/90, sendo utilizada neste caso a energia de compactação Proctor Modificado, conforme estipula a norma DNIT 167/2013-ES.

Os valores encontrados de teor de umidade ótima e massa específica seca máxima orientaram a moldagem dos corpos de prova utilizados para a determinação da resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral.

- Ensaios de consistência do solo

A amostra triturada de solo mais capa asfáltica foi caracterizada pelos ensaios de consistência do solo. O ensaio do LP foi realizado conforme a norma DNER-ME 082/94, e o LL conforme a norma DNER-ME 122/94. Posteriormente, através da diferença numérica entre o LL e o LP obteve-se o IP.

- Ensaios de resistência

Foram moldados dez corpos de prova conforme a norma DNER-ME 202/94, para posterior rompimento de cinco destes à compressão simples e cinco à tração por compressão diametral, de acordo com as normas DNER-ME 201/94 e DNER-ME 181/94, respectivamente.

A preparação da amostra e a proporção de solo, cimento e brita graduada utilizada para moldagem dos corpos de prova foram realizadas da mesma maneira que o procedimento aplicado para determinação do teor de umidade ótima e a massa específica seca máxima. A quantidade de água adicionada à mistura foi de

6,53%, sendo a umidade ótima previamente determinada igual a 6,03% e somando 0,5% para compensar a perda de água por evaporação, conforme recomendação da norma DNER-ME 202/94.

A norma de reciclagem de pavimentos DNIT 167/2013-ES recomenda a moldagem de pelo menos três corpos de prova cilíndricos para ensaio de resistência à compressão simples e três à tração por compressão diametral, com diâmetro e altura igual a 10 e 20 centímetros, respectivamente. Como não havia molde com estas dimensões no laboratório de solos, utilizou-se um molde cilíndrico de diâmetro igual a 10 cm e 12,7 cm de altura. Conforme a norma, utilizou-se soquete de 4,48 quilogramas e a moldagem foi feita em 5 camadas, com 41 golpes cada, ou seja, energia Proctor Modificado.

Para realização da cura, os corpos de prova foram colocados em câmara úmida onde permaneceram por sete dias, quando foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples e a tração por compressão diametral.

- Ensaio de determinação das deflexões pela viga Benkelman

Antes do início do processo de reciclagem, realizou-se o ensaio para determinação das deflexões no pavimento através da aplicação da viga Benkelman, conforme o procedimento da norma DNER-ME 024/94.

Após a reciclagem, com a conclusão do revestimento asfáltico na superfície, executou-se novamente o ensaio para determinação das deflexões, com o intuito de comparar a capacidade estrutural do pavimento antes e depois do processo de reciclagem da camada de base.

O ensaio ocorreu nos dois sentidos da rua, primeiramente na pista à direita e depois na pista à esquerda.

- Marcação dos pontos: a equipe da PMC fez as marcações dos pontos onde seriam medidas as deflexões a cada 30 metros, com auxílio de trena e giz para marcação.
- Posicionamento do caminhão e da viga Benkelman: o caminhão estava carregado com 8,2 toneladas de brita no eixo traseiro, conforme DNER-ME 024/94. Posicionou-se a roda dupla direita do eixo traseiro na marcação feita anteriormente. Então, colocou-se a

ponta de prova da viga entre os pneus da roda e em cima da marcação.

- Leitura inicial (Li): após a realização dos posicionamentos, liberou-se a trava da viga Benkelman e ajustou-se o pé traseiro (figura 12) até que o extensômetro estivesse, aproximadamente, a meio curso. O vibrador foi ligado e então se realizou a leitura inicial (Li).
- Leitura final (Lf): depois da leitura inicial, o caminhão deslocou-se lentamente para o próximo ponto e, após, quando o ponteiro do extensômetro parou de se movimentar, realizou-se a leitura final (Lf). O vibrador foi então desligado, a viga foi travada novamente e então carregada para o próximo ponto marcado.



Figura 12 – Ajuste do pé traseiro da Viga Benkelman
Fonte: Autores (2014)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

- Análise do método de reciclagem profunda de pavimento asfáltico *in situ* com adição de cimento Portland

Após a observação do método de reciclagem de pavimento asfáltico executado pela PMC, foi montado o quadro 2:

	Principais etapas do procedimento de reciclagem profunda de pavimento <i>in situ</i> segundo norma DNIT 167/2013-ES	Procedimento executado pela Prefeitura Municipal de Curitiba
Etapas anteriores à reciclagem	Coleta de amostras para confecção do projeto de dosagem	Não realizado
	Projeto de dosagem	Não realizado
Etapas durante a reciclagem	Espalhamento de agregados adicionais (quando necessário)	Ok
	Espalhamento do cimento Portland sobre a superfície na taxa indicada no projeto de mistura	Ok (a taxa de cimento foi determinada de acordo com experiência em obras anteriores)
	Tempo máximo entre a aplicação do cimento e o início da mistura dos materiais de 30 minutos	Ok
	Reciclagem da seção do pavimento: adição de água, mistura e homogeneização da mistura dos materiais existentes no pavimento com os agregados adicionais	Ok
	Pré-compactação, realizada logo após a passagem da recicladora	Ok
	Conformação inicial dos perfis transversais e longitudinais da camada com emprego de motoniveladora	Ok
	Compactação final	Ok
	Acerto final da superfície com emprego de motoniveladora	Ok
	Proteção da camada reciclada por meio de aplicação de produto asfáltico isento de solvente	Não realizado
	Controle da mistura reciclada em campo	Não realizado
Controle da compactação	Não realizado	
Etapas posteriores à reciclagem	Aplicação do revestimento final na camada reciclada	Ok
	Controle da mistura reciclada em laboratório	Não realizado

Quadro 2 - Comparativo do método de reciclagem profunda *in situ* descrito pela norma DNIT 167/2013-ES, com o executado pela PMC

Fonte: Autores (2014)

No quadro 2 pode-se ver as principais etapas do processo de reciclagem profunda *in situ* com adição de cimento Portland e quais dessas etapas foram executadas pela PMC. Levando-se em consideração as etapas não realizadas, pode-se concluir que as principais falhas presentes no método seguido pela PMC encontram-se no planejamento e controle tecnológico das obras de reciclagem.

A PMC não realiza um estudo aprofundado de cada via que irá passar pelo procedimento de reciclagem de pavimento asfáltico, acarretando em falta de dados essenciais para a elaboração do projeto de dosagem. A falta de um projeto de dosagem adequado deixa o processo sem informações importantes, como por exemplo, a granulometria, massa específica seca máxima e teor de umidade ótima da mistura reciclada, além do teor de cimento. Outro fator que pode ser observado no quadro 2 é a falta de controle do procedimento, tanto em campo quanto em laboratório. O não cumprimento dessas etapas pela PMC impacta diretamente na qualidade e resultado final do serviço executado, pois sem o devido controle não há como garantir que o procedimento realizado trará o resultado esperado.

Um ponto observado durante o acompanhamento em campo, mas que não se encontra no quadro 2, foi a questão do descarte da mistura retirada para a conformação e acabamento da via. Esta mistura possuía cimento, um material nobre, que era descartado junto com o restante dos materiais.

Após três semanas decorridas do dia da realização da reciclagem foi retirada uma amostra do trecho reciclado (figura 13). Através dela pode-se perceber que a camada efetivamente tratada durante a reciclagem foi de cerca de 8 centímetros, espessura muito abaixo do que era previsto, pois a espessura de corte durante o procedimento foi de 25 centímetros.

A amostra retirada ressalta a questão do controle de execução do procedimento, pois com o controle seria mais fácil perceber que a mistura dos materiais integrantes da camada reciclada não está sendo efetiva, necessitando, desta maneira, uma correção para atingir melhores resultados.



**Figura 13 - Amostra retirada da rua reciclada com indicação da camada tratada pelo procedimento de reciclagem profunda com adição de cimento Portland
Fonte: Autores (2014)**

As sugestões para o processo de reciclagem utilizado pela PMC são:

- Designação de uma equipe laboratorial para realização dos estudos prévios à reciclagem dos pavimentos e controle tecnológico da obra, durante sua execução e após;
 - Definir uma destinação mais apropriada para o material descartado, que poderia ser utilizado até mesmo em outras obras de pavimentação realizadas pela PMC.
-
- Análise granulométrica

O resultado obtido na análise granulométrica da mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico) pode ser visto na figura 14.

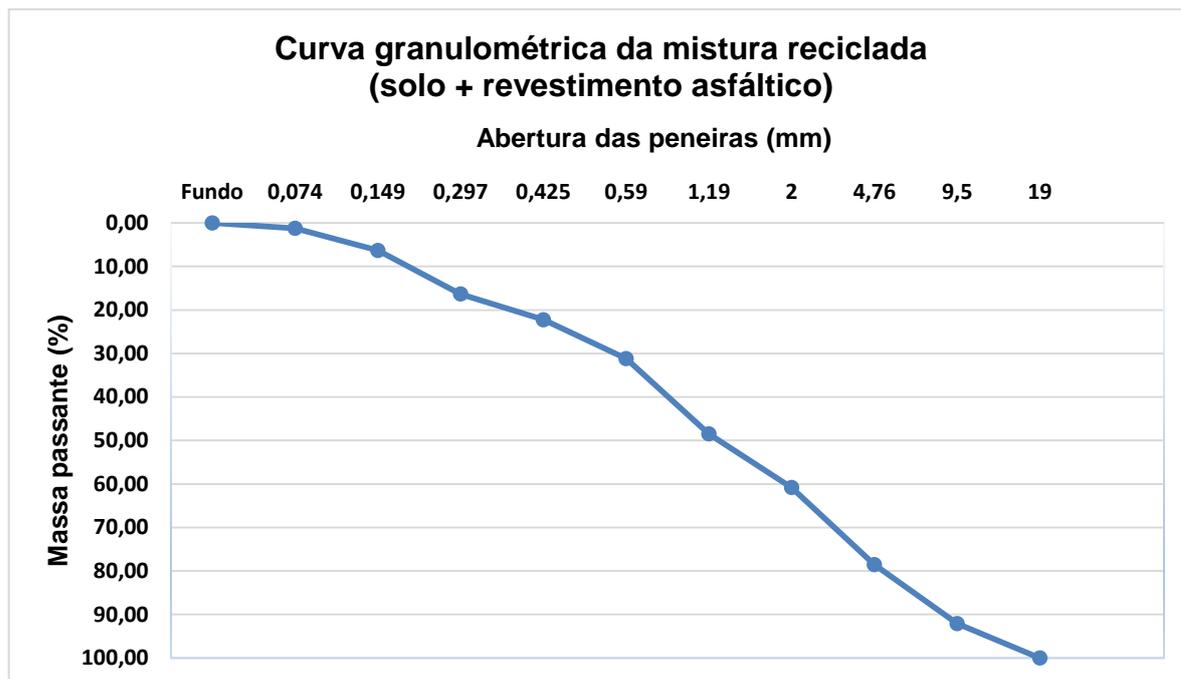


Figura 14 - Curva granulométrica da mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico)
Fonte: Autores (2014)

Através do traçado da curva granulométrica pode-se perceber que a mistura reciclada apresenta uma granulometria contínua e também, através das informações retiradas da análise da curva, pode-se determinar a classificação do solo.

Com a curva granulométrica da mistura reciclada determinou-se a classificação do solo pela tabela da USCS (tabela 1). Segundo análise, o material estudado é classificado como uma areia mal graduada (SP) com pedregulho. O valor encontrado para o C_u foi 6,734 e para o C_c foi 0,586, calculados, respectivamente, pelas fórmulas 2 e 3. O coeficiente de uniformidade também é usado como parâmetro para se determinar a uniformidade do material, segundo Avilla (2008), solos com C_u entre 5 e 15 são solos medianamente uniformes.

Confrontando a curva granulométrica da mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico) com as faixas granulométricas estipuladas pela norma DNIT 167/2013-ES, encontradas na tabela 2, nota-se que essa mistura não se enquadra em nenhuma das faixas, mesmo com a adição de cimento Portland. Desta maneira necessitou-se corrigir a granulometria deste material com a adição da brita graduada. O resultado da granulometria da brita graduada junto com o da mistura reciclada (solo + revestimento asfáltico) e do cimento Portland encontra-se na tabela 3 e no gráfico da figura 15.

Tabela 3 - Resultado da análise granulométrica dos materiais utilizados na reciclagem

Composição granulométrica				
Peneiras		Massa passante (solo + revestimento asfáltico) (%)	Massa passante (brita graduada) (%)	Massa passante (cimento) (%)
Número	Abertura (mm)			
3/4"	19,00	100,00	98,89	100,00
3/8"	9,50	92,10	64,05	100,00
4	4,76	78,55	48,42	100,00
10	2,00	60,81	35,57	100,00
16	1,19	48,49	28,86	100,00
30	0,59	31,19	20,03	100,00
40	0,425	22,26	15,94	100,00
50	0,297	16,32	12,98	100,00
100	0,149	6,32	8,04	100,00
200	0,074	1,23	4,72	96,97

Fonte: Autores (2014)

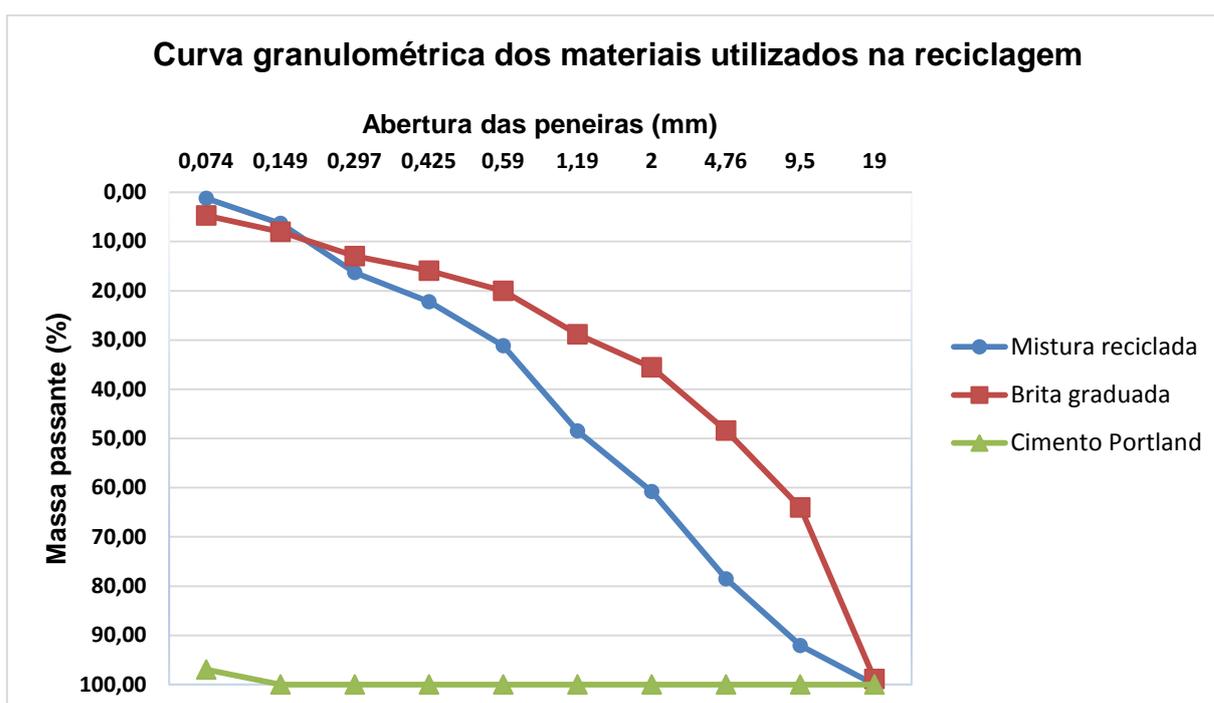


Figura 15 - Curva granulométrica dos materiais utilizados na reciclagem

Fonte: Autores (2014)

Com os resultados obtidos para granulometria dos materiais determinou-se uma nova mistura a partir do método gráfico, considerando que a proporção de cimento utilizada foi a mesma usada na reciclagem *in situ*. A proporção de cada material adicionada na composição da nova mistura foi: 64,20% de solo mais revestimento asfáltico, 34,56% de brita graduada e 1,24% de cimento Portland, a granulometria resultante da mistura destes materiais encontra-se na tabela 4.

Tabela 4 - Granulometria resultante da mistura dos materiais

Composição granulométrica		
Peneiras		Massa passante (%)
Número	Abertura (mm)	
3/4"	19,00	99,62
3/8"	9,50	82,50
4	4,76	68,40
10	2,00	52,57
16	1,19	42,34
30	0,59	28,18
40	0,425	21,03
50	0,297	16,20
100	0,149	8,07
200	0,074	3,62

Fonte: Autores (2014)

A granulometria obtida para nova mistura reciclada enquadra-se na faixa granulométrica II estipulada pela norma DNIT 167/2013-ES, conforme pode ser observado na tabela 5 e no gráfico da figura 16.

Tabela 5 - Composição granulométrica da mistura reciclada e faixas granulométricas estipuladas pela norma DNIT 167/2013-ES

Composição granulométrica					
Peneiras		Massa passante da mistura (%)	Massa passante da mistura estipulada pela norma (%)		Tolerância da faixa de projeto (%)
Número	Abertura (mm)		I	II	
2"	50,80	100	100	100	-
1"	35,40	100	75 - 90	100	± 7
3/4"	19,00	99,62	-	-	-
3/8"	9,50	82,50	40 - 75	50 - 85	± 7
4	4,76	68,40	30 - 60	35 - 65	± 5
10	2,00	52,57	20 - 45	25 - 50	± 5
16	1,19	42,34	-	-	-
30	0,59	28,18	-	-	-
40	0,425	21,03	15 - 30	15 - 30	± 2
50	0,297	16,20	-	-	-
100	0,149	8,07	-	-	-
200	0,074	3,62	5 - 15	5 - 15	± 2

Fonte: Autores (2014)

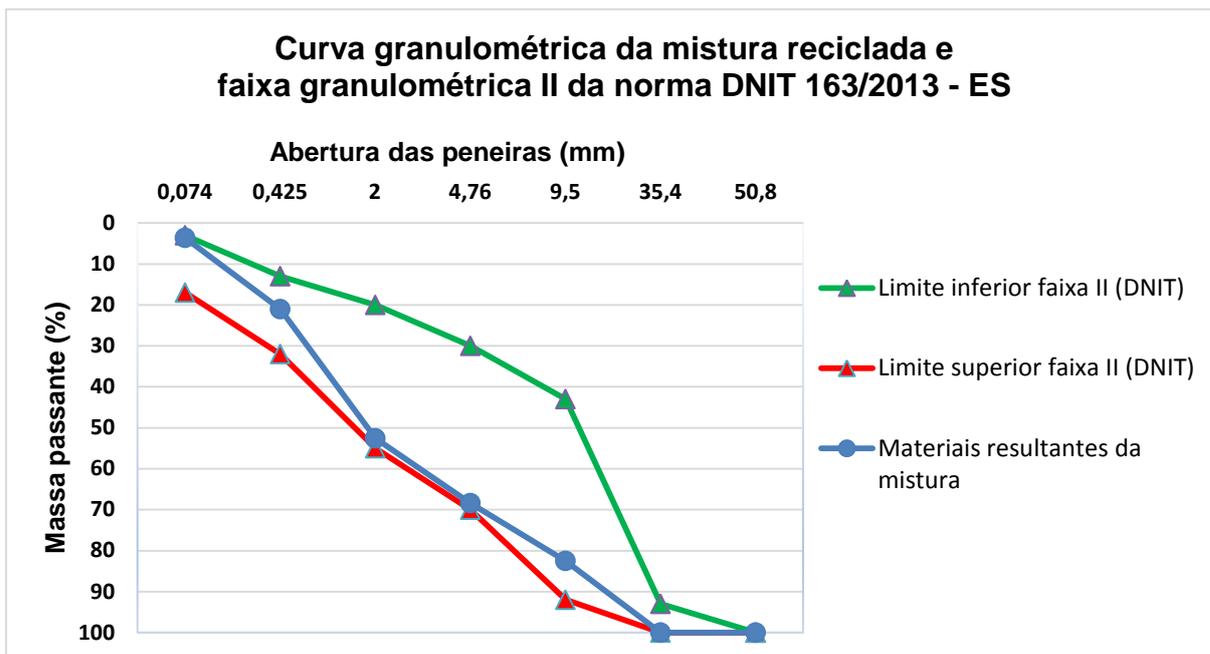


Figura 16 - Curva granulométrica da mistura reciclada e faixa granulométrica II da norma DNIT 167/2013 - ES
Fonte: Autores (2014)

Esta nova composição granulométrica serviu como base para realização do ensaio de massa específica seca máxima e teor de umidade ótima, e ensaios de resistência.

- Teor de umidade ótima e massa específica seca máxima

A tabela 6 apresenta os valores de massa específica aparente seca obtidos de cinco amostras e suas respectivas umidades, resultantes do ensaio de compactação pela energia Proctor Modificado.

Tabela 6 - Resultados obtidos no ensaio de compactação (Proctor Modificado)

Teor de umidade e massa específica					
Cápsula	Peso solo h (g)	Peso solo seco (g)	Umidade (%)	Massa específica aparente h (kg/m ³)	Massa específica aparente seca (kg/m ³)
Z007	114,18	109,22	4,54	2105,09	2013,64
Z016	104,18	98,60	5,66	2204,95	2086,85
Z019	126,79	117,88	7,56	2196,96	2042,57
8	130,56	120,49	8,36	2171,00	2003,55
19 1	150,93	138,94	8,63	2159,01	1987,50

Fonte: Autores (2014)

Esses resultados foram inseridos em um gráfico (figura 17), com a umidade no eixo das abscissas e a massa específica aparente seca nas ordenadas. Então se traçou a curva de compactação e a linha de tendência. O valor da umidade ótima foi obtido a partir da equação desta linha, resultando em 6,03%, e a massa específica seca máxima correspondente de 2090,59 kg/m³.

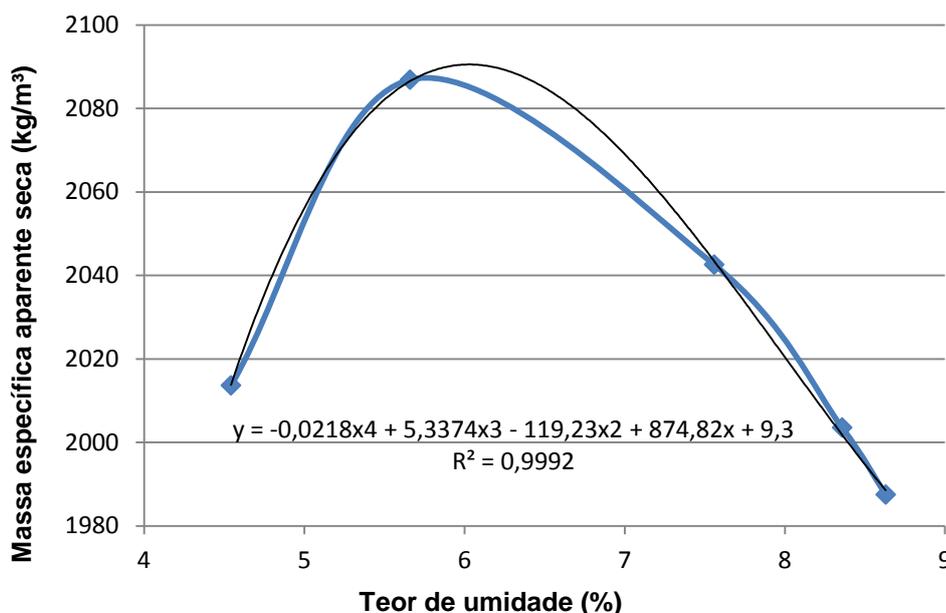


Figura 17 - Curva de compactação
Fonte: Autores (2014)

- Limite de Liquidez (LL)

A tabela 7 apresenta os valores obtidos no ensaio de LL, que correlacionam a umidade da amostra com os respectivos números de golpes necessários para a união das bordas inferiores da canelura na extensão de um centímetro.

Tabela 7 - Valores obtidos no ensaio de limite de liquidez

Limite de Liquidez					
Cápsula	Peso cápsula (g)	Peso cáp. + solo h (g)	Peso cáp. + solo seco (g)	Umidade (%)	Nº golpes
A055	6,69	17,34	15,34	23,12	32
A002	7,64	19,38	17,14	23,58	29
A077	7,55	22,69	19,68	24,81	25
A023	7,75	26,5	22,64	25,92	14
A021	7,28	19,18	16,73	25,93	15

Fonte: Autores (2014)

A partir desses resultados foi possível traçar a curva de fluidez (figura 18), e conseqüentemente definir o teor de umidade correspondente a 25 golpes, que representa o LL da amostra. O LL obtido foi de 24,36%. Porém, como indica a norma DNER-ME 122/94, o resultado adotado para o LL deve ser o valor obtido aproximado para o número inteiro mais próximo. Então, o LL final será neste caso 24%.

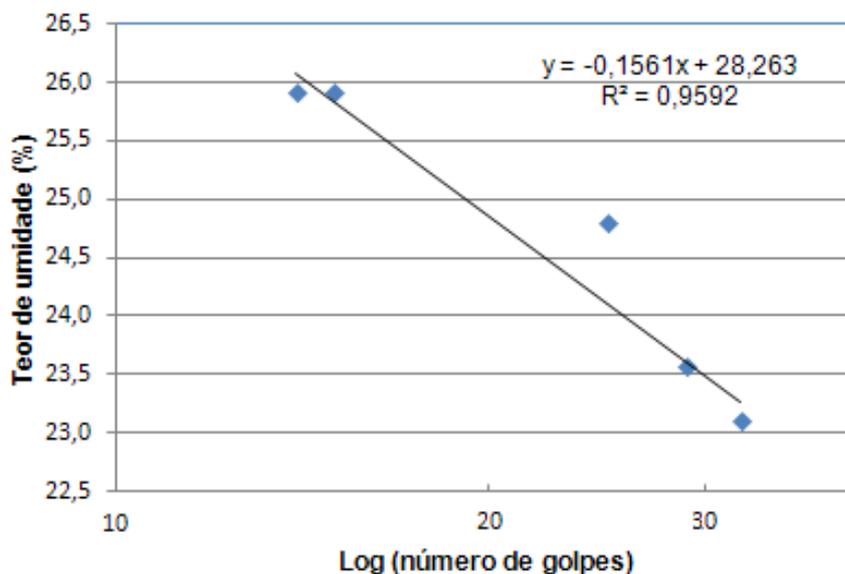


Figura 18 - Curva de fluidez
Fonte: Autores (2014)

De acordo com a bibliografia este resultado está adequado para materiais reciclados de revestimentos asfálticos, pois é inferior a 35%.

- Limite de Plasticidade (LP)

Para o ensaio de LP foram determinadas as umidades de três amostras (tabela 8).

Tabela 8 - Valores obtidos no ensaio de limite de plasticidade

Limite de plasticidade				
Cápsula	Peso cápsula (g)	Peso cáp. + solo h (g)	Peso cáp. + solo seco (g)	Umidade (%)
A072	6,64	10,69	9,96	21,99
A040	6,73	10,24	9,60	22,30
E006	7,46	10,2	9,71	21,78

Fonte: Autores (2014)

Os valores de umidade obtidos não diferem de sua média em mais de 5%. Logo, esta média representa o limite de plasticidade da amostra, de 22,02%.

- Índice de Plasticidade (IP)

O IP foi obtido pela diferença numérica entre o LL e o LP, resultando em 1,98%.

Como sugere a bibliografia, este resultado de IP está adequado para misturas recicladas de pavimentos asfálticos, pois atende o parâmetro de ser inferior a 15%, e juntamente com o LL inferior a 35% não sugere a necessidade de estabilizar a mistura com cal. Além disso, o baixo resultado de IP (menor que 6%) representa uma condição normal para misturas oriundas da reciclagem de pavimentos, já que estas possuem a capa asfáltica triturada, que torna a mistura grossa e áspera, ou seja, menos plástica. Inclusive, o baixo IP caracteriza uma boa condição para a estabilização da mistura com cimento.

- Ensaio de Resistência

De acordo com a norma DNER-ME 202/94, a umidade dos corpos de prova não deve diferir mais de 1% da umidade ótima que é de 6,03%. Por isso, foram descartados dois corpos de prova. Na tabela 9, apresentam-se os resultados obtidos:

Tabela 9 – Resistência à compressão e à tração aos sete dias

Resistência à compressão e à tração				
Corpo de prova	Umidade (%)	Massa específica aparente seca (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
1	6,24	2052,84	1,69	-
2	6,22	2066,49	1,84	-
3	6,13	2068,12	1,49	-
4	6,67	2052,07	1,53	-
5	5,84	2071,99	-	0,20
6	6,71	2071,85	-	0,15
7	6,11	2070,52	-	0,19
8	7,00	2027,14	-	0,22

Fonte: Autores (2014)

O valor médio de resistência apresentado pelos corpos de prova aos sete dias foi de 1,63 MPa quanto à compressão simples e de 0,19 MPa quanto à tração por compressão diametral. Segundo a norma DNIT 167/2013-ES, para a energia modificada (2,7 MN.m/m³), os corpos de prova deveriam apresentar, aos sete dias de cura, resistência à compressão simples entre 2,1 e 2,5 MPa e resistência à tração por compressão diametral entre 0,25 MPa e 0,35 MPa. Como a altura do molde utilizado era menor do que a recomendada, aplicando-se a fórmula 4 descobriu-se que a energia de compactação utilizada foi de 4,1 MN.m/m³, ou seja, mesmo com a energia de compactação maior os corpos de prova não atingiram os valores mínimos de resistência estipulados pela norma.

- Ensaio de determinação das deflexões pela viga Benkelman

Com as leituras iniciais e finais coletadas, pôde-se calcular a deflexão do pavimento através da fórmula 5 apresentada anteriormente, onde o valor da constante K (relação entre o braço maior e o menor) do aparelho utilizado no ensaio era igual a 2,014.

Nas tabelas 10 e 11 estão apresentados os dados coletados e os resultados das deflexões do pavimento antes da reciclagem na pista do lado direito e esquerdo, respectivamente:

Tabela 10 – Deflexões pista lado direito antes da reciclagem

Deflexões no pavimento			
Estaca (m)	Li (10⁻²mm)	Lf (10⁻²mm)	Deflexão (10⁻²mm)
30	500	320	362,5
60	500	288	427,0
90	500	452	96,7
120	500	435	130,9
150	500	420	161,1
180	500	392	217,5
210	500	238	527,7
240	500	429	143,0
270	500	450	100,7
300	500	408	185,3
330	500	420	161,1
360	500	452	96,7
Deflexão média corrigida			143,7

Fonte: Autores (2014)

Tabela 11 – Deflexões pista lado esquerdo antes da reciclagem

Deflexões no pavimento			
Estaca (m)	Li (10⁻²mm)	Lf (10⁻²mm)	Deflexão (10⁻²mm)
30	500	353	296,1
60	500	440	120,8
90	500	395	211,5
120	500	445	110,8
150	500	470	60,4
180	500	443	114,8
210	500	435	130,9
240	500	370	261,8
270	500	427	147,0
300	500	410	181,3
330	500	347	308,1
360	500	445	110,8
Deflexão média corrigida			141,0

Fonte: Autores (2014)

Nas tabelas 12 e 13 estão apresentados os dados coletados e os resultados das deflexões do pavimento depois da reciclagem na pista do lado direito e esquerdo, respectivamente:

Tabela 12 – Deflexões pista lado direito depois da reciclagem

Deflexões no pavimento			
Estaca (m)	Li (10 ⁻² mm)	Lf (10 ⁻² mm)	Deflexão (10 ⁻² mm)
30	500	460	80,6
60	500	480	40,3
90	500	468	64,4
120	500	465	70,5
150	500	435	130,9
180	500	440	120,8
210	500	415	171,2
240	500	459	82,6
270	500	463	74,5
300	500	461	78,5
330	500	451	98,7
360	500	472	56,4
Deflexão média corrigida			80,8

Fonte: Autores (2014)

Tabela 13 – Deflexões pista lado esquerdo depois da reciclagem

Deflexões no pavimento			
Estaca (m)	Li (10 ⁻² mm)	Lf (10 ⁻² mm)	Deflexão (10 ⁻² mm)
30	500	451	98,7
60	500	448	104,7
90	500	447	106,7
120	500	440	120,8
150	500	415	171,2
180	500	438	124,9
210	500	450	100,7
240	500	465	70,5
270	500	453	94,7
300	500	470	60,4
330	500	441	118,8
360	500	442	116,8
Deflexão média corrigida			109,7

Fonte: Autores (2014)

Após a reciclagem, na pista à direita houve redução média de $62,9 \times 10^{-2}$ mm na deflexão do pavimento, ou seja, 43% de diminuição nas deformações elásticas. Porém, na pista do lado esquerdo a redução foi de apenas 22%, diminuindo $31,3 \times 10^{-2}$ mm do valor médio antes da reciclagem.

Os resultados obtidos também podem ser visualizados através dos gráficos a seguir (figuras 19 e 20):

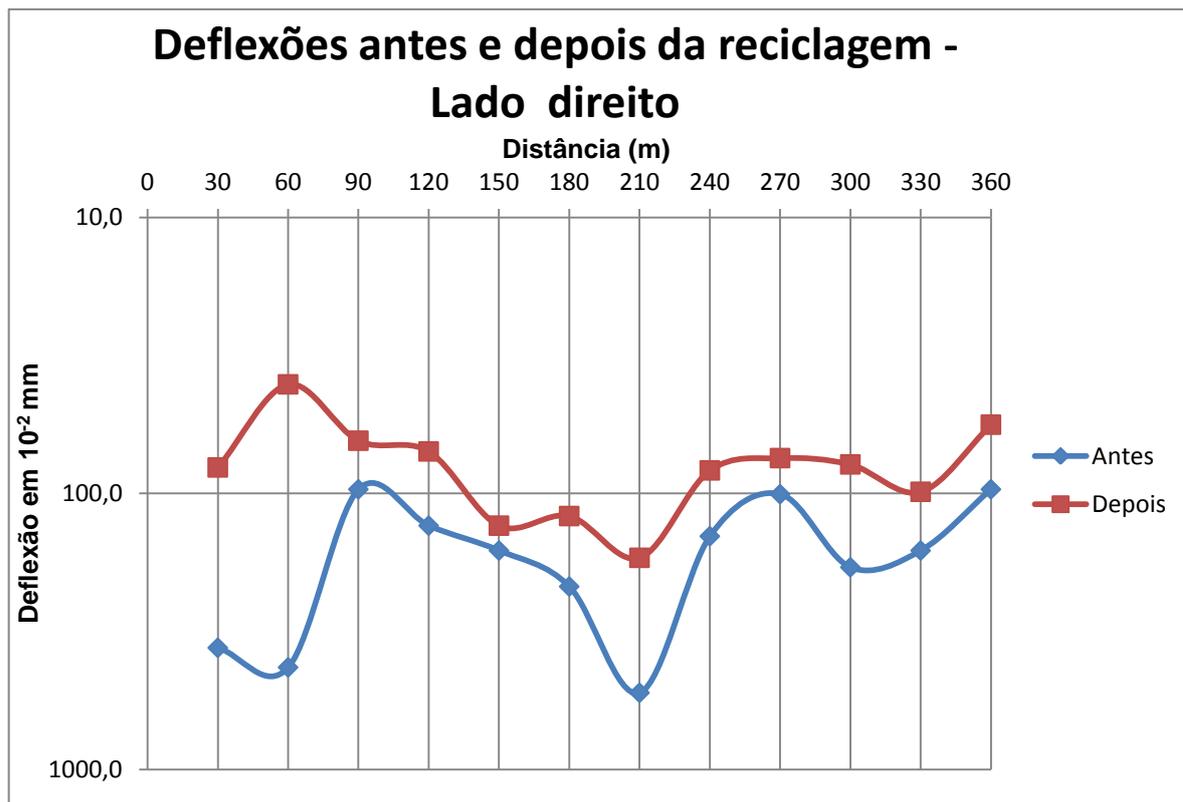


Figura 19 – Deflexões no lado direito do pavimento antes e depois da reciclagem
Fonte: Autores (2014)

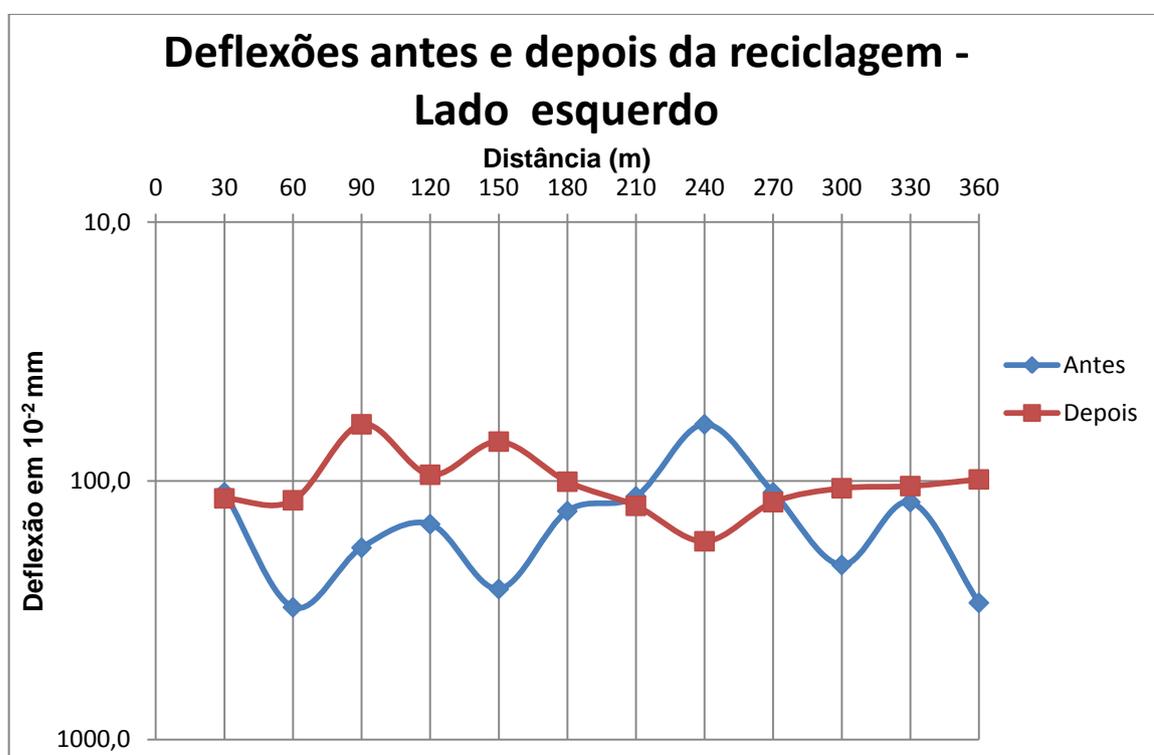


Figura 20 – Deflexões no lado esquerdo do pavimento antes e depois da reciclagem
Fonte: Autores (2014)

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A seguir serão listadas as principais conclusões obtidas no estudo realizado, de modo a permitir um panorama geral do tema estudado.

- A reciclagem profunda *in situ* com adição de cimento Portland é um procedimento extremamente viável na recuperação do pavimento das ruas da cidade, que tende a ganhar mais espaço como técnica para reestruturação de vias, devido a sua praticidade e bons resultados.
- O procedimento de reciclagem realizado especificamente pela PMC atende, em sua maior parte, os requisitos estipulados pela norma DNIT 167/2013-ES, pecando apenas na questão de controle e planejamento da obra, já que como visto na análise, as etapas da reciclagem em si correspondem ao exigido pelo DNIT.
- A quantidade de 1,24% de cimento adicionado à mistura reciclada foi considerada baixa, visto que para um solo ser enquadrado na categoria de solo melhorado com cimento a porcentagem deve ficar em torno de 3%. Esse foi considerado um dos motivos pelos quais os corpos de prova confeccionados não atingiram a resistência mínima estipulada pela norma DNIT 167/2013-ES.
- Os ensaios realizados em laboratório demonstraram que um estudo aprofundado do material que será submetido ao processo de reciclagem é de extrema importância, pois sabendo-se as características do material reciclado pode-se determinar os requisitos necessários para se garantir um bom desempenho desse material.
- A viga Benkelman se mostrou uma excelente ferramenta na avaliação das deflexões do pavimento, ela serviu de parâmetro para determinar se o procedimento de reciclagem realizado gerou uma melhoria na capacidade de suporte da via. Devido ao bom desempenho demonstrado por este equipamento, aconselha-se que seja utilizado como critério para análise do resultado da reciclagem de pavimentos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a pesquisa realizada sobre a reciclagem profunda de pavimentos asfálticos, e através dos resultados obtidos, pode-se listar algumas sugestões de trabalhos a serem desenvolvidos:

- Realizar uma análise comparativa do custo/benefício do emprego da técnica de reciclagem profunda utilizada pela PMC em relação à execução de uma pista convencional na cidade de Curitiba;
- Realizar novos ensaios de laboratório utilizando a mesma metodologia aplicada, porém comparando as resistências obtidas através da aplicação de algumas variáveis como: diferentes teores de cimento, granulometrias, porcentagens de revestimento asfáltico na mistura, e etc.;
- Realizar outros ensaios, como CBR e módulo de resiliência, com a finalidade de ampliar os conhecimentos sobre o comportamento das misturas recicladas com a incorporação de cimento;
- Analisar a viabilidade de utilizar os aditivos que são empregados em concreto no processo de reciclagem de pavimentos asfálticos com cimento. Avaliar a possibilidade de melhorar características específicas da mistura como, por exemplo, acelerar o desenvolvimento da resistência nas idades iniciais, melhorar a trabalhabilidade e reduzir a permeabilidade.

REFERÊNCIAS

ARRA – ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **Basic Asphalt Recycling Manual**. Annapolis: ARRA, 2001. 265p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207**: Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12023**: Solo-cimento – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1992.

AVILLA, Célio A. de. **Apostila de mecânica dos solos**. Disponível em: <<ftp://ftp.ifes.edu.br/cursos/Transportes/CelioDavilla/Solos/Literatura%20complementar/Apostila%20de%20Mec%20nica%20dos%20solos%202008.02.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2014.

BARRETA, Ana C.; FORTES, Rita M. **Estudo comparativo da utilização de duas tecnologias na reciclagem de pavimento asfáltico com espuma de asfalto para utilização em camada de base**. In: Jornada de Iniciação Científica, VII, 2011, São Paulo.

BERNUCCI, Liedi B.; MOTTA, Laura M. G.; CERATTI, Jorge A. P.; SOARES, Jorge B. **Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Imprinta, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo os Municípios da Federação - DEZ/2013**. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2013.htm>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

DER/PR - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. ES-P 11/05, **Pavimentação: Solo-cimento e solo tratado com cimento**. Curitiba, 2005a.

_____. ES-P 18/05, **Pavimentação: Tratamentos Superficiais**. Curitiba, 2005b.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME-024. **Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman**, 1994a.

_____. ME-080. **Solos – análise granulométrica por peneiramento**, 1994b.

_____. ME-082. **Solos – determinação do limite de plasticidade**, 1994c.

_____. ME-122. **Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito**, 1994d.

_____. ME-181. **Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada - determinação da resistência à tração por compressão diametral**, 1994e.

_____. ME-201. **Solo-cimento - compressão axial de corpos de prova cilíndricos**, 1994f.

_____. ME-202. **Solo-cimento – moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos**, 1994g.

_____. ME-216. **Solo-cimento – determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente**, 1994h.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
TER- 005. **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Manual de pavimentação**. 3ª ed. Rio de Janeiro: 2006a.

_____. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**, 2ª ed. Rio de Janeiro: 2006b.

_____. ES-140. **Pavimentação - Sub-base de solo melhorado com cimento**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. ES-142. **Pavimentação - Base de solo melhorado com cimento**. Rio de Janeiro, 2010b.

_____. ES-143. **Pavimentação - Base de solo-cimento**. Rio de Janeiro, 2010c.

_____. **ES-167. Pavimentação – Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro, 2013.

FHWA – *FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION*. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant’s.** Springfield: National Technical Information Service, 1997.

FONTES, Liseane P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos.** 2009. 541 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Vias de Comunicação, Universidade do Minho, 2009.

GEWEHR, Juliano. **O que é a reciclagem de asfalto?**, fev. 2014. Disponível em: <<http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2014/02/o-que-e-reciclagem-de-asfalto.html>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

_____. **Recicladoras de Asfalto**, dez. 2012. Disponível em: <<http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2012/12/recicladoras-de-asfalto.html>>. Acesso em: 24 fev. 2014.

GONÇALVES, Fernando P.; SACHET, Taís. Reciclagem *in situ* de bases granulares de pavimentos asfálticos. **Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, v. 8, n. 11, abr. 2008. Disponível em: <http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art4_N11.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2014.

GRECO, Jisela Aparecida Santanna. **Solos – Conceitos e ensaios da mecânica dos solos e classificação dos solos para fins rodoviários.** Disponível em: <<http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/Notas%20de%20aula%20solos.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010.** Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=410690&search=parana|curitiba>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

MARÍN, C. B., ÁLVAREZ, M. G. **Reciclado In Situ con Cemento. Futuras Prescripciones Técnicas de La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento de España.** 10 Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y Reciclado In Situ de Firmes con Cemento. Salamanca, España, 2001.

OLIVEIRA, Paulo C. A. de. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis**. 2003. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual técnico de pavimentação**: volume 2. 2ª ed. São Paulo: Pini, 2007.

VILLIBOR, Douglas F.; NOGAMI, Job S. **Pavimentos econômicos** – Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Arte e Ciência, 2009.

WIRTGEN GMBH. **Tecnologia de reciclagem a frio**. Windhagen: Wirtgen GmbH, 2012. 370 p.

_____. **Wirtgen Road Construction Manual - Internal Training Brochure for sales Managers and service Engineers**. Windhagen: Wirtgen GmbH, 2002. 164 p.