

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS**

**AVALIAÇÃO DE DUAS TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO
FLEXÍVEL *IN SITU* COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND PARA A
UTILIZAÇÃO EM CAMADA DE BASE, EM UM TRECHO DA RODOVIA
VISCONDE DE PORTO SEGURO/SP**

JOSÉ COSTA FEITOZA

**MANAUS
2015**

JOSÉ COSTA FEITOZA

AVALIAÇÃO DE DUAS TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO FLEXÍVEL “*IN SITU*” COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND PARA A UTILIZAÇÃO EM CAMADA DE BASE, EM UM TRECHO DA RODOVIA VISCONDE DE PORTO SEGURO/SP

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Rita Moura Fortes

**MANAUS
2015**

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

F311a	<p>Feitoza, José Costa</p> <p>Avaliação de duas técnicas de reciclagem de pavimento flexível "in situ" com adição de cimento Portland para a utilização em camada de base, em um trecho da Rodovia Visconde de Porto Seguro/SP / José Costa Feitoza. 2015 95 f.: il. color; 31 cm.</p> <p>Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rita Moura Fortes Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas.</p> <p>1. Camada de base. 2. Pavimentos flexíveis - Reciclagem a frio. 3. Cimento Portland - Reciclagem. 4. Cimento Portland - Teor. 5. Deflexões - Determinação. I. Fortes, Prof^a. Dr^a. Rita Moura II. Universidade Federal do Amazonas III. Título</p>
-------	---

JOSÉ COSTA FEITOZA

AVALIAÇÃO DE DUAS TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO FLEXÍVEL *IN SITU* COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND PARA A UTILIZAÇÃO EM CAMADA DE BASE, EM UM TRECHO DA RODOVIA VISCONDE DE PORTO SEGURO/SP

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 29 de abril de 2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Dr.^a. Rita Moura Fortes, Presidente
Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof.^a. Dr.^a. Consuelo Alves da Frota, Membro
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr.^a. Ana Maria Guerra Seráfico Pinheiro, Membro
Universidade Federal do Amazonas

Dedico esta pesquisa a minha esposa Hozana e a minha filha Joanna, por toda a resiliência causada ao longo deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A nossa conquista sempre a Deus, por ter nos dado saúde, perspicácia e força para superar os obstáculos.

Aos meus pais, Raimundo e Hosanah, pelo apoio incondicional na minha formação educacional e, aos meus irmãos (Rosana, Jane, Jander e James) pelas conversas motivadoras.

À minha esposa Hozana e a minha filha Joanna, por compartilharem comigo todo este projeto, e sei o quanto foi difícil a nossa convivência ao longo do curso.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Rita Moura Fortes, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções, sugestões e comentários essenciais para o desenvolvimento e conclusão desta dissertação.

À Prof^a. Dr^a. Consuelo Alves da Frota, fonte de inspiração para a realização de trabalhos voltados para a pesquisa científica e incentivo para continuar indo mais além.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

Aos colegas do mestrado e do Grupo de Geotecnia (Geotec): Rodolfo Munhoz, Cláudia Ávila, Cleiton da Silva, Alexandre Leocádio, Patrícia Aragão, Marcos Raiker, Daniela D'Antona e Cleudinei da Silva pelas soluções apresentadas diante da realização dos experimentos laborais.

Aos servidores do IFAM Campus Centro: Rubervan Souza, Mauro Barreto e Roberto Bianco pelo acesso irrestrito dos laboratórios e disponibilização dos equipamentos. Também, ao diretor Jurandir Moreira Ayres, do IFAM Campus Coari, pelo apoio na liberação às atividades do mestrado.

Agradeço a CAPES pela bolsa auxílio.

Aos servidores da UFAM, em especial ao secretário Maurício Soares, ao laboratorista Messias Lopes e por fim, a assessora Rose Mary.

RESUMO

Esta pesquisa avaliou duas técnicas de reciclagem a frio de pavimentos flexíveis *in situ* com adição de cimento Portland (CP II E 32) para camada de base, por meio de análises dos resultados de ensaios laboratoriais e avaliações de trechos experimentais executados na Rodovia Visconde de Porto Seguro/SP, denominada de SP 332, sob a concessão do DER-SP. Os ensaios laboratoriais foram conduzidos a fim de comprovar a influência da variabilidade dos agregados e o efeito do teor de cimento Portland na dosagem de misturas recicladas a frio, utilizando resultados de comportamento mecânico como parâmetros de avaliação para atestar a qualidade técnica da reciclagem da camada de base. A concepção dos trechos na pista experimental permitiu determinar os métodos de reciclagem do pavimento flexível *in situ* com a usina móvel KMA 200 e com a recicladora Wirtgen 2500 S. O acompanhamento da execução, pelas empresas fomentadoras, contribuiu para compreender as vantagens e limitações do conjunto de equipamentos empregados nas duas técnicas de reciclagem da pista experimental. O monitoramento dos trechos experimentais, durante o processo construtivo e posterior a execução, permitiu verificar que a solução de reciclagem a frio do pavimento flexível para as técnicas em estudo, é benéfica para a condição estrutural e funcional dos mesmos.

Palavras-chave: Camada de base. Pavimentos flexíveis - Reciclagem a frio. Cimento Portland - Reciclagem. Cimento Portland - Teor. Deflexões - Determinação.

ABSTRACT

This study evaluated two cold flexible pavement recycling techniques "in situ" with the addition of Portland cement (CP II E 32) for the base layer, through analysis of the laboratory tests results and reviews of experimental sections performed on Highway Visconde Porto Seguro / SP, called SP 332, in the granting of DER-SP. Laboratory tests were conducted to prove the influence of the variability of the aggregates and the effect of Portland cement content in the dosage of recycled cold mixtures using mechanical behavior results as evaluation criteria in order to certify the technical quality of recycling layer base. The design of the passages in the experimental track allowed the determination of the flexible pavement recycling methods *in situ* with the mobile plant KMA 200 and the Wirtgen 2500S equipment for recycling. The monitoring the implementation, by companies, helped to understand the advantages and limitations the set of equipment employed in both recycling techniques of the experimental lane. The monitoring of experimental sections, during and after the construction process, allowed to verify that the cold recycling solution of flexible pavement for technical study, is beneficial to the structural and functional condition thereof.

Keys-word: Base layer. Cold recycling of flexible pavements. Recycling with Portland cement. Portland cement content. Deflections tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhe do processo de fresagem/reciclagem.....	23
Figura 2 – Usina Misturadora Móvel.....	26
Figura 3 – Usina <i>Drum Mixer</i>	27
Figura 4 – a) Esquema de funcionamento de Usina de Solos; b) Usina Estacionária de Mistura a frio.....	28
Figura 5 – Trem de reciclagem com adição de cimento Portland.....	33
Figura 6 – Trem de reciclagem com máquina misturadora.....	33
Figura 7 – Localização da pista experimental.....	39
Figura 8 – Avaliação Objetiva da Superfície da pista experimental – sentido Campinas.....	40
Figura 9 – Avaliação Objetiva da Superfície da pista experimental – sentido Valinhos.....	41
Figura 10 – Patologias encontradas no pavimento da pista experimental SP 332.....	41
Figura 11 – Ponto de máxima depressão das trilhas de rodas – Sentido Campinas.....	42
Figura 12 – Ponto de máxima depressão das trilhas de rodas – Sentido Valinhos.....	42
Figura 13 – Coleta de material e verificação da espessura da camada de revestimento..	43
Figura 14 – Curvas granulométricas dos materiais para a base reciclada.....	45
Figura 15 – Curva granulométrica do material fresado na faixa de serviço.....	46
Figura 16 – Curva de dosagem granulométrica com 3% de CP II E 32; 10% de Pó de pedra e 87% de material fresado.....	47
Figura 17 – Curva de dosagem granulométrica com 2% de CP II E 32; 10% de Pó de Pedra e 88% de material fresado.....	48
Figura 18 – a) Usina KMA 200 sobre cavalo mecânico; b) Operador calibrando a usina.....	50
Figura 19 – a) Abastecimento do silo com pá carregadeira (material fresado); b) Peneiramento do fresado retido com diâmetro superior.....	51
Figura 20 – a) Segundo silo recebendo pó de pedra; b) Materiais sobre a correia para a dosagem.....	51
Figura 21 – a) Adição do CP II E 32; b) Rosca sem fim; c) Dosagem do cimento nos materiais; d) Carregamento de caminhão basculante com material dosado de cimento	52
Figura 22 – a) Recebimento dos sacos de cimento (CP II E 32); b) Espalhamento manual do cimento Portland sobre a pista experimental.....	54
Figura 23 – a) Recicladora WR 2500 S em operação; b) Recicladora WR 2500 S em operação; c) Camada com adição de CP II E 32 à esquerda e material reciclado à direita.....	54
Figura 24 – a) Compactação da camada com rolo pé de carneiro; b) Vibroacabadora em operação na pista experimental; c) Vibroacabadora em operação na pista experimental.....	55
Figura 25 – Disposição em “V” das ferramentas de corte da recicladora Wirtgen 2500 S.....	56
Figura 26 – Gráfico de Compactação da base reciclada do Trecho A.....	57
Figura 27 – Gráfico de Compactação da base reciclada – Trecho D.....	58
Figura 28 – Gráfico de Compactação da base reciclada com BGS do Trecho C.....	59
Figura 29 – Gráficos do ISC do trecho experimental A constituído por: 2% de CP II E 32 e 10% de material reciclado.....	60
Figura 30 – Gráficos do ISC do trecho experimental C constituído por: 15% de BGS para o processo usual de reciclagem.....	61

Figura 31 – Gráficos do ISC do trecho experimental C constituído por: 15% de BGS para o processo usual de reciclagem no lado esquerdo da faixa.....	62
Figura 32 – Gráficos do ISC do trecho experimental D constituído por: 3% de CP II E 32 e 15% de BGS para o processo usual de reciclagem.....	63
Figura 33 – Gráficos do ISC do trecho experimental D constituído por: 3% de CP II E 32 e 15% de BGS para o processo usual de reciclagem.....	64
Figura 34 – Resistência à Compressão Axial do trecho experimental A.....	65
Figura 35 – Resistência à Compressão Axial do trecho experimental D.....	66
Figura 36 – Gráfico da RT do trecho experimental A aos 7 dias de cura do CP II E 32.	67
Figura 37 – Gráfico da RT do trecho experimental D aos 7 dias de cura do CP II E 32.	68
Figura 38 – Ensaio para determinação da deflexões com a viga de Benkelman.....	69
Figura 39 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho A (LD) após a base reciclada.....	70
Figura 40 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho A (LE) após a base reciclada.....	71
Figura 41 – Gráfico de medidas das deflexões (Do) após intervenção na base reciclada.....	73
Figura 42 – Gráfico de medidas das deflexões (Do) após intervenção na base reciclada.....	73
Figura 43 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho A (LE) após a base reciclada.....	74
Figura 44 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho D (LD) após a base reciclada.....	75
Figura 45 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho D (LE) após dois meses da base reciclada Trecho D.....	76
Figura 46 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho D (LD) após dois meses da base reciclada Trecho D.....	77
Figura 47 – Gráfico das curvas de compactação dos materiais reciclados na energia do proctor modificado.....	78
Figura 48 – Gráfico das bases recicladas na faixa granulométrica do DER/SP.....	79
Figura 49 – Resistência média à Compressão Axial (MPa).....	81
Figura 50 – Resistência média a Tração na Compressão Diametral (MPa).....	81
Figura 51 – Medidas da deflexão obtidas com a viga de Benkelman em 15/01/2009.....	82
Figura 52 – Medidas da deflexão obtidas com a viga de Benkelman após a reciclagem, dos trechos em estudos da pista experimental.....	83
Figura 53 – Medidas da deflexão obtidas com a viga de Benkelman após um mês de reciclagem da base, dos trechos experimentais em estudo.....	83
Figura 54 – Medidas da deflexão obtidas com a viga de Benkelman após dois meses de reciclagem da base, dos trechos experimentais em estudo.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de reciclagem.....	23
Tabela 2 – Classificação de reciclagem.....	24
Tabela 3 – Escolha do método de reciclagem.....	25
Tabela 4 – Ensaio Preliminares e de Desenvolvimento.....	43
Tabela 5 – Composição granulométrica dos materiais.....	45
Tabela 6 – Faixa granulométrica de serviço.....	46
Tabela 7 – Ensaio de Equivalente de Areia do Pó de Pedra – (Basalto 5)	48
Tabela 8 – Ensaio de Equivalente de Areia da Base Reciclada (87% Fresado+10% Pó de Pedra+3% CP II E 32)	49
Tabela 9 – Ensaio de Compactação da Base Reciclada do Trecho A.....	57
Tabela 10 – Ensaio de Compactação da Base Reciclada do Trecho D.....	58
Tabela 11 – Ensaio de Compactação da Base Reciclada com BGS do Trecho C.....	59
Tabela 12 – Ensaio de Resistência à Compressão Axial do Trecho A.....	65
Tabela 13 – Ensaio de Resistência à Compressão Axial do Trecho D.....	66
Tabela 14 – Ensaio de Resistência à Tração (RT) do trecho experimental A.....	67
Tabela 15 – Ensaio de Resistência à Tração (RT) do trecho experimental D.....	68
Tabela 16 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após a reciclagem no LE.....	70
Tabela 17 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após a reciclagem no LD.....	71
Tabela 18 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após dois meses à reciclagem da base no LE.....	72
Tabela 19 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após dois meses à reciclagem da base no LD.....	72
Tabela 20 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após a reciclagem no LE.....	74
Tabela 21 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após a reciclagem no LD.....	74
Tabela 22 – Medidas da deflexão com a viga de Benkelman após dois meses à reciclagem da base no LE.....	75
Tabela 23 – Medidas da deflexão com a viga de Benkelman após dois meses à reciclagem da base no LD.....	76
Tabela 24 – Grau de compactação (GC) e desvio do teor de umidade (ΔW).....	80
Tabela 25 – Índice de Suporte Califórnia (ISC); Massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{máx.}$) e teor de umidade ótimo ($W_{ótimo}$).....	80
Tabela 26 – Deflexões médias dos trechos com a viga de Benkelman.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARRA	Asphalt Recycling & Reclaiming Association
<i>Apud</i>	Citado por
BGS	Brita Graduada Simples
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAP	Cimento Asfalto de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAVEL	Consultoria de Engenharia Ltda.
CP II E 32	Cimento Portland, Classe II, Escória, Resistência de 32,0 MPa
CPs	Corpos de Prova
D	Desgaste
DER/SP	Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo
DERSA	Desenvolvimento Rodoviário S/A
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
Do	Deflexão inicial
E	Escorregamento do ligante asfáltico
EA	Ensaio de Equivalente de Areia
<i>et al.</i>	E outros
EUA	Estados Unidos da América
EX	Exudação do ligante asfáltico
FC-1	Trinca isolada com abertura menores que 1,0 mm
FC-2	Trinca isolada com abertura superior a 1,0 mm e sem erosão nas bordas
FC-3	Trinca isolada com abertura superior a 1,0 mm e com erosão nas bordas
FDR	Full Depth Reclamation
FHA	Federal Highway Administration
FWD	Falling Weight Deflectometer
GC	Grau de Compactação
GEEs	Gases de Efeito Estufa
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LD	Faixa direita
LE	Faixa esquerda
LENC	Laboratório de Engenharia e Consultoria
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PMF	Pré Misturado a Frio
PMQ	Pré Misturado a Quente

RBLE	Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio
RC	Raio de curvatura
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
TRE	Trilha de roda externa
TRI	Trilha de roda interna
UPM	Universidade Presbiteriana Mackenzie
VSA	Valor de Serventia

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
g	Gramma
g/cm ³	Gramma por centímetro cúbico
kgf	Quilograma força
kgf/cm ²	Quilograma por centímetro ao quadrado
km	Quilômetro
KN	Quilo newton
lb/po ²	Libra por polegada ao quadrado
m	Metro
m/min	Metro por minuto
m ²	Metro quadrado
mm	Milímetro
Mpa	Mega Pascal
N	Newton

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Estrutura do trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Breve histórico de reciclagem de pavimentos	19
2.2	Fresagem de pavimentos	20
2.3	Classificação da fresagem	21
2.4	Métodos de reciclagem	22
2.5	Reciclagem a frio	25
2.5.1	Reciclagem a frio em usina móvel	26
2.5.2	Reciclagem a frio <i>in situ</i>	28
2.6	Vantagens da reciclagem a frio	30
3	RECICLAGEM A FRIO COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND	32
3.1	Processo executivo	32
3.2	Teor de cimento	33
3.3	Compactação	34
3.4	Tempo de cura	36
3.5	Granulometria do material reciclado	37
4	TRECHO EXPERIMENTAL	39
4.1	Estabilização granulométrica das bases recicladas com adição de cimento Portland	45
4.2	Equivalente de areia	48
4.3	Primeira técnica de reciclagem de pavimento flexível <i>in situ</i> – trecho experimental A	49
4.3.1	Processo executivo – trecho experimental A	49
4.4	Segunda técnica de reciclagem de pavimento flexível <i>in situ</i> - trecho experimental D	53
4.5	Recicladora Wirtgen 2500 S	56
4.6	Compactação do material reciclado para camada de base	56

4.6.1	<i>Compactação do trecho experimental A</i>	57
4.6.2	<i>Compactação do trecho experimental D</i>	58
4.6.3	<i>Compactação do trecho experimental C</i>	59
4.7	Índice de Suporte Califórnia – ISC	59
4.8	Resistência à compressão axial	64
4.8.1	<i>Resistência à compressão axial do trecho experimental A</i>	64
4.8.2	<i>Resistência à compressão axial do trecho experimental D</i>	66
4.9	Resistência à tração por compressão diâmetral - RT	67
4.9.1	<i>Trecho experimental A</i>	67
4.9.2	<i>Trecho experimental D</i>	68
4.10	Deflexões pela viga de Benkelman – ensaio de acompanhamento	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
6	CONCLUSÃO	86
6.1	Sugestões para pesquisas futuras	87
	REFERÊNCIAS	88
	OBRAS CONSULTADAS	93

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Comissão Mundial sobre Meio ambiente e Desenvolvimento, criada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1983, o desenvolvimento sustentável envolve a integração entre crescimento econômico, social e respeito ao equilíbrio e às limitações dos recursos naturais (SILVA, 2012).

Neste cenário de desenvolvimento sustentável, a engenharia de pavimentos pesquisa novas tecnologias ou alternativas ambientalmente corretas com vista à redução no consumo de combustíveis com a correspondente atenuação na emissão de gases causadores do efeito estufa e busca por materiais alternativos capazes de substituir satisfatoriamente, ainda que parcial, os tradicionais da mistura asfáltica.

Dentre as tecnologias direcionadas à área de pavimentação, a produção das misturas asfálticas como uso de material reciclado da própria rodovia, vem merecendo destaque no Brasil, sendo uma técnica capaz de reabilitar o pavimento degradado por meio do aproveitamento do mesmo, transformando-o em uma estrutura com a capacidade de suportar os esforços gerados pelo tráfego.

Segundo Fortes e Merighi (2007) o pavimento sofre com o passar do tempo e perde a sua capacidade de servir ao tráfego de forma satisfatória, devido ao aparecimento de patologias, que, se não tratadas, evoluem até a incapacitação do pavimento. A fim de evitar a evolução das patologias atingindo o ponto de incapacidade do pavimento da rodovia, deve-se realizar intervenções como as manutenções periódicas, ou reconstrução com o fito de restabelecer a serventia.

No processo da reabilitação dos pavimentos degradados, a técnica da reciclagem utiliza os materiais já existentes para a confecção de uma nova camada, com ou sem adição de agentes estabilizantes. Os agentes estabilizantes mais utilizados são o Cimento Portland (CP) e o Cimento Asfalto de Petróleo (CAP) que são capazes de ligar as partículas individuais dos agregados para aumentar a resistência da mistura (BARROS; MERIGHI, 2011).

O processo mais comum de reciclagem contempla a fresagem da camada de rolamento e a utilização do material resultante como agregados para a composição de novas misturas. Contudo, pavimentos com problemas estruturais graves necessitam de uma intervenção mais profunda, de forma que as camadas subjacentes atinjam à camada de rolamento (ARANHA, 2013).

A reciclagem de base promove uma melhoria considerável às condições estruturais do pavimento, uma vez que a reconstrução atinge um maior número de camadas. Quando se

adiciona cimento em uma base granular, o ganho estrutural é ainda maior, já que o pavimento passa de flexível para semirrígido (YODER; WITCZAK, 1975).

Os materiais utilizados na reciclagem apresentam uma grande variedade que ocorre pelo próprio processo de deterioração mecânica e química, bem como pelas diferentes origens desse material. Dessa forma, quando se utilizam agregados reciclados para as misturas asfálticas, ou cimentadas, esse material deve passar por uma extensa caracterização (ARRA, 2001).

Os materiais reciclados objetos desse estudo são misturas de macadame hidráulico e capa asfáltica, provenientes da base do pavimento da Rodovia Visconde de Porto Seguro/SP, entre os quilômetros 95,38 e 101,4, acrescidos de cimento Portland e agregados para a correção granulométrica, caracterizando, dessa forma, uma nova mistura para compor a base reciclada cimentada do pavimento restaurado.

Este trabalho destaca um estudo de caso sobre a avaliação de duas técnicas de reciclagem de pavimento asfáltico flexível *in situ* com adição de cimento Portland para utilização em camada de base, em um trecho na Rodovia Visconde de Porto Seguro/SP (atual SP 332).

Salientam-se nesta dissertação os respectivos objetivos, geral e específicos:

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a técnica de execução em usina e de reciclagem a frio *in situ* das camadas superiores do pavimento asfáltico, para utilização em camada de base, com adição de cimento Portland.

1.1.2 Objetivos Específicos

Analisar por meio de coleta de dados de ensaios laboratoriais realizado na pista experimental Rodovia Visconde de Porto Seguro/SP, o desempenho do pavimento asfáltico reciclado com adição de cimento Portland para utilização em camada de base, isto é, a sua capacidade de suporte ao tráfego.

1.2 Justificativa

De acordo com pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), no ano de 2014, os acidentes de trânsito, o aumento do custo do frete e a perda de competitividade da produção estão entre os principais danos decorrentes das más condições das rodovias brasileiras. Os problemas na infraestrutura rodoviária brasileira aumentam o custo operacional de transporte no país na média de 26%. Este impacto econômico ocorre, por exemplo, no aumento dos gastos com a manutenção dos veículos e do combustível em função do tempo de viagem (BRASIL, 2014).

A Região Norte do país apresenta o maior prejuízo com a elevação dos gastos que chegam a 37%, a Região Centro-Oeste aparece em segundo lugar com alta de 27%, o Nordeste com as más condições das rodovias elevam os custos em 26%, no Sul em 25% e no Sudeste em 20%, segundo dados obtidos na pesquisa anual da CNT (BRASIL, 2014).

A pesquisa da CNT serve de instrumento de diagnóstico das condições reais da malha rodoviária brasileira, abrangendo toda uma extensão de 98.475 km, com coleta de dados sobre as condições dos pavimentos, da sinalização e da geometria das principais rodovias federais e estaduais. Com base na pesquisa envolvendo estes elementos (pavimento, sinalização e geometria) as rodovias avaliadas foram classificadas com 10,1% como ótimas, 27,8% como boas, 38,2% são regulares, 17,0% ruins e 6,9% estão péssimas (BRASIL, 2014).

No que se refere à questão ambiental, a respeito da qualidade do ar, às emissões dos gases de efeito estufa (GEEs) e o uso racional de energia, o estado precário da infraestrutura rodoviária do país contribui expressivamente para o aumento do consumo de combustíveis e o consequente aumento das emissões atmosféricas advindas do transporte. Se todas as rodovias fossem consideradas boas ou ótimas, o volume de 737 milhões de litros de óleo diesel poderiam deixar de ser consumidos, representando uma economia de quase 1 bilhão e 800 milhões de reais (BRASIL, 2014).

No Brasil, já vem sendo realizados serviços de fresagem nos pavimentos asfálticos envelhecidos (desgastados), uma vez que não adianta mais usar como solução o recapeamento dos mesmos, evitando assim o desnível deixado entre as faixas de rolamento e o acostamento. A reciclagem deste material fresado surge como solução para atender as exigências normativas do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) na Resolução nº 37 de 05 de julho de 2002 sobre a destinação final de um passivo ambiental que era descartado em aterros ou bota-fora determinados pela fiscalização da obra.

A técnica de reciclagem a frio *in situ* de pavimentos asfálticos flexíveis deve-se ao fato de existir grande possibilidade de aplicação deste tipo de reciclagem no Brasil, onde diversas rodovias apresentam espessas camadas asfálticas devido a sucessivos recapeamentos, viabilizando a aplicação da reciclagem juntamente com a camada de base e adição de agente estabilizante (cimento Portland). Além disso, a evolução dos equipamentos recicladores garante o melhor controle de qualidade na execução da técnica, com possibilidade de aproveitamento de todo o material fresado (DELLABIANCA, 2004).

1.3 Estrutura do trabalho

Essa dissertação está organizada nos capítulos conforme a seguinte sequência lógica:

No capítulo 1 – o texto de apresentação da dissertação, no qual se descreve os benefícios da tecnologia de reciclagem, na reabilitação do pavimento deteriorado, para o meio ambiente e os objetivos (geral e específicos), além da justificativa e estrutura da pesquisa.

No capítulo 2 – Corresponde à revisão bibliográfica, isto é, o estado da arte trazendo em seu bojo breve histórico das técnicas de reciclagem de pavimentos.

No capítulo 3 – Descreve-se o estudo de caso envolvendo os materiais utilizados para a técnica de reciclagem, suas propriedades e procedimentos utilizados para a realização dos ensaios.

No capítulo 4 – Apresentam-se os resultados relacionados ao trecho experimental desde sua construção até o monitoramento por meio de ensaios de campo e de laboratório.

No capítulo 5 – Exposição das conclusões com base no estudo do caso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve histórico de reciclagem de pavimentos

De acordo com Aranha (2013), a Europa foi o primeiro continente a utilizar a reciclagem na pavimentação nos modelos atuais, com a utilização de equipamentos apropriados e a preocupação com a ciência dos materiais. A reciclagem foi uma medida econômica e rápida para a reconstrução de rodovias após a Segunda Grande Guerra Mundial, com o emprego do concreto proveniente da demolição de construções como agregado na reconstrução de rodovias (BUCK, 1977).

Nos Estados Unidos da América (EUA) a técnica de reciclagem de pavimentos urbanos se iniciou em 1915. Entretanto, a partir de 1930, com o aumento da oferta de asfalto no mercado, torna-se economicamente viável a construção de um novo revestimento asfáltico do que a aplicação da técnica da reciclagem dos mesmos (KANDHALL & MALLICK, 1997a; CASTRO, 2003 *apud* DAVID, 2006).

Na década de 1970 teve início a crise do petróleo com a descoberta de que o recurso natural não era renovável. Com esta justificativa os representantes da Organização dos Países Exportadores de Petróleo/OPEP diminuíram a oferta de petróleo com o aumento dos valores de *royalties* pagos pelas empresas transnacionais (INFOESCOLA, 2014). Em decorrência da crise do petróleo, ocorreu a falta de materiais asfálticos que levou os técnicos rodoviários internacionais, juntamente com organismos de fomento a dar ênfase ao reaproveitamento dos materiais existentes nos pavimentos deteriorados, por meio da técnica da reciclagem (BONFIM, 2000).

Jimenez (1980) destaca que a tecnologia da reciclagem de pavimentos asfálticos difundiu-se rapidamente pela Europa e na América do Norte, em virtude dos sucessivos aumentos dos derivados do petróleo, em 1973 e da necessidade de restauração contínua dos pavimentos.

A primeira experiência científica com a reciclagem de pavimentos flexíveis ocorreu nos Estados Unidos, em 1975, com um estudo experimental, que executou a reciclagem de 122 metros de seções de teste, apresentando bons resultados após o término do processo (KARI *et al.*, 1979; MEHNDRATTA *et al.*, 1989 *apud* PETERSON, 1994). A reciclagem a frio *in situ* do revestimento asfáltico, tem sido realizada em New York por aproximadamente 30 anos, sendo executada inicialmente em estradas rurais. O recobrimento com

aproximadamente 40 mm de revestimento asfáltico, tem uma estimativa de vida de 5 a 8 anos, sendo necessária somente a realização de pequenas manutenções (PETERSON *et al.*, 1994).

Inicialmente o material asfáltico era extraído da pista por meio de escarificação do pavimento e levado para o processamento em usinas. Entretanto, esse procedimento era inadequado, pois resultava no aparecimento de pedaços muito grandes, que necessitavam ser quebrados ou rebitados, antes de serem utilizados na reciclagem (BONFIM, 2000 *apud* DELLABIANCA, 2004).

Segundo Castro (2003), no Brasil foi a Prefeitura Municipal da Cidade do Rio de Janeiro, em 1960, que empregou a reciclagem dos revestimentos asfálticos das ruas, com uso de marteletes, e depois transportados para serem misturados em usina.

Os primeiros serviços de fresagem da capa asfáltica ocorreram no Estado de São Paulo a partir de 1980 e a primeira grande obra de reciclagem em usina do tipo *drum mix* teve início em 1986 pela empresa de Desenvolvimento Rodoviário S/A (DERSA), em trechos da Via Anhanguera, entre São Paulo e Campinas, num total de 90,0 km. Entretanto, a primeira máquina recicladora chegou ao país em meados da década de 1990 (PETROBRAS, 2005 *apud* GUSMÃO, 2008).

Ainda na década de 1980, alguns trechos experimentais da rodovia Anchieta foram realizados a reciclagem a frio executados em usina e na década seguinte (1990) se empregou a mesma técnica na Rodovia do Açúcar, pelo Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) (PARANHOS & TUCHUMANTEL, 1992 *apud* REIS, 2013).

Atualmente, a reciclagem vem ganhando destaque em obras de recuperação de pavimentos de vias urbanas no Brasil graças ao surgimento de novos equipamentos ou máquinas recicladoras e ao compartilhamento de informações técnicas entre as instituições de pesquisa na execução de trechos experimentais.

2.2 Fresagem de pavimentos

A deterioração de estruturas de pavimentos rodoviários ocorre gradualmente com a deterioração de seus componentes físicos, ocasionando a queda de sua serventia ao longo do tempo (SACHET, 2007).

Esse processo é acionado pela ação repetida das cargas de serviço, pelas intempéries, e pelas ações físicas e químicas naturais dos materiais. O controle da degradação dos pavimentos é efetuado pela especificação dos materiais, pelo dimensionamento estrutural e pela própria concepção da estrutura (REIS, 2013).

Na tentativa de prolongar a vida útil dos pavimentos, os órgãos responsáveis pela manutenção de estradas, em todo o mundo, durante muitos anos, mantiveram a rede de estradas pela adição de camadas sucessivas de concreto asfálticos sobre pistas de concreto de cimento Portland ou concreto asfáltico, isto é, demandando recapeamentos periódicos. No entanto, com adição subsequente de camadas de recapeamentos, surgem problemas em relação à altura útil de túneis, sob viadutos, altura de meio fio e defensas, formação de degraus nos acostamentos, desnível entre a pista e tampões de ferro das concessionárias, provocando desconforto e acidentes ao usuário da via (TUCHUMANTEL JR., 1988).

A reciclagem *in situ* ajuda a resolver este problema técnico de ajuste de alturas, manutenção do greide das vias existentes e outros associados à disposição dos materiais deteriorados (KANDHAL; MALLICK, 1997a).

De acordo com o Laboratório de Engenharia e Consultoria (LENC, 2004), a reciclagem *in situ* é constituída a partir da fresagem do pavimento existente, que pode ser de forma superficial ou profunda, sem adição de aglomerantes em bases estabilizadas granulometricamente ou com a adição de aglomerantes transformando o material em base ou sub-base reciclada a frio e *in situ* ou ainda, através da reciclagem do revestimento asfáltico, que tanto pode ser a quente como a frio, com adição de emulsões rejuvenescedoras.

Segundo Bernucci *et al.* (2008), a fresagem é a operação de corte, por uso de máquinas especiais, de parte ou de todo o revestimento asfáltico existente em um trecho de via, ou até englobando outra camada de pavimento, como forma de restauração da qualidade ao rolamento da superfície, ou como melhoria da capacidade de suporte.

Reis (2013), afirma que a fresagem proporciona o corte do pavimento, podendo ser realizada a frio ou a quente, resultando em partículas de dimensões finais dependentes da profundidade do corte, da velocidade do avanço da máquina, do sentido de rotação do cilindro fresador, da qualidade do material, do teor do cimento, das condições do revestimento e das condições ambientais.

2.3 Classificação da fresagem

Reis (2013) classifica a fresagem quanto à espessura de corte e quanto à rugosidade da pista. A fresagem é classificada quanto à espessura do corte em:

- Fresagem superficial é a operação de corte realizada para pavimentos cujos defeitos encontram-se apenas na superfície;

- Fresagem rasa é a operação de corte para a correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais dos pavimentos;
- Fresagem profunda é a operação de corte para solucionar problemas estruturais do pavimento.

De acordo com a rugosidade da pista que depende do tipo de cilindro fresador utilizado na execução da fresagem, além da velocidade da operação (BONFIM, 2000) a rugosidade é classificada em:

- Fresagem padrão é a operação de corte utilizada para a remoção da estrutura total dos pavimentos;
- Fresagem fina é a operação de corte utilizada para a restauração do atrito ou regularização dos pavimentos;
- Microfresagem quando consiste na remoção de faixas de sinalização e adequação do perfil longitudinal.

O material fresado pode ser transportado para ser reciclado em usina ou pode ser reciclado no próprio local, tratando-se, respectivamente de reciclagem em usina e reciclagem *in situ*. O pavimento reaproveitado pode ser processado a quente ou a frio (DNER, 1996).

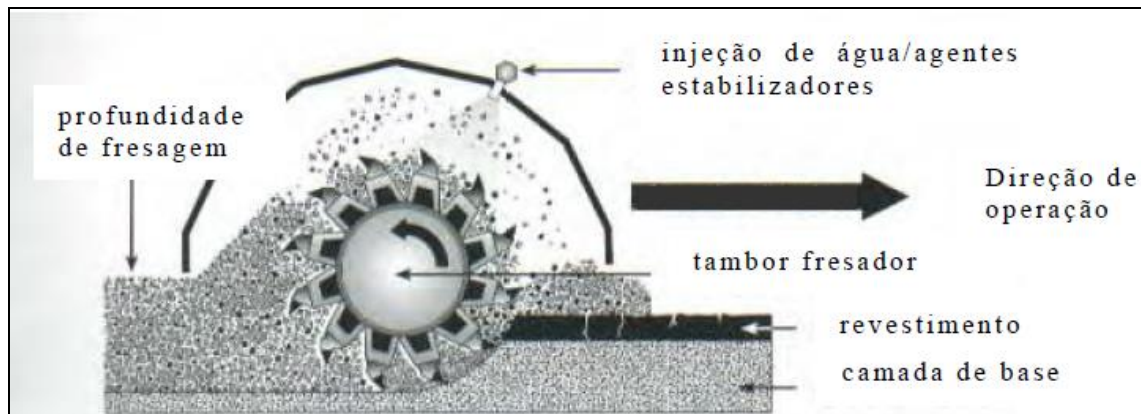
O agregado fresado é constituído por grumos de agregados cobertos ou parcialmente recobertos por asfalto envelhecido a eles aderido, o que confere características bastantes peculiares devido à sua composição. Existem três situações sobre o material fresado a saber: a primeira o agregado fresado é tratado como um agregado e o ligante oxidado presente nos grumos não é considerado na dosagem; a segunda situação o asfalto aderido ao agregado negro é passível de regeneração até a consistência original ou próxima a ela, por incorporação de agentes rejuvenescedores e, por fim, a última situação que é a interferência no resultado de ensaios mecânicos devido ao relativo grau de amolecimento do asfalto, de difícil mensuração (ARRA, 2001; SILVA, 2011 *apud* REIS, 2013).

2.4 Métodos de reciclagem

Dellabianca (2004) define a reciclagem de pavimento como uma técnica de reparação, onde ocorre o reaproveitamento total ou parcial do material fresado, com adição ou

não de outros materiais e construção de nova camada, com características que atendam às especificações de projeto, abaixo segue a figura 1.

Figura 1 – Detalhe do processo de fresagem/reciclagem.



Fonte: Dellabianca (2004).

As técnicas de reciclagem segundo a *Asphalt Recycling & Reclaiming Association* (ARRA) classifica os processos executivos em cinco categorias: reciclagem a frio *in situ* ou em usina; reciclagem a quente *in situ* ou em usina e a reciclagem profunda de pavimentos (*Full Depth Reclamation*) (ARRA, 2001 *apud* ARANHA, 2013).

Com relação aos tipos de reciclagem, Bonfim (1999) classifica as técnicas de reciclagem de pavimentos quanto ao local de processamento e quanto à profundidade de corte, conforme se apresenta na tabela 1.

Tabela 1 – Tipos de reciclagem

Quanto ao local de processamento	Em usina	A frio	Usina Móvel
		A quente	Usina Fixa
	“In situ”	A frio	Emulsão Asfáltica
		A quente	Espuma de Asfalto Cimento Portland
Procedimentos de reciclagem quanto à profundidade de corte	Superficial		Somente da camada de revestimento
	Profunda		Camada de revestimento, base e até sub-base

Fonte: Bonfim (1999).

A tabela 2 demonstra a classificação dos processos de reciclagens conforme a geometria, local de processamento, profundidade de corte, mistura, material a ser adicionado durante o processo (BONFIM, 1999 *apud* GUSMÃO, 2008).

Tabela 2 – Classificação de reciclagem.

Quanto à geometria	Sem modificação	Quando mantém as cotas do greide
	Com modificação	
Quanto ao local de processamento	Em usina	Fixa ou móvel, a quente ou a frio
	“In situ”	
	“In situ com usinado”	Reciclado “in situ” da base e aplicação de material reciclado a quente, processado em usina com material fresado
Quanto à fresagem do material	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do pavimento
Quanto à profundidade de corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e até sub-base
Quanto à mistura reciclada	Mistura a frio	PMF (Pré-Misturado a frio)
	Mistura a quente	CAUQ, PMQ (Pré Misturado a quente)
Quanto ao uso da mistura	Como base reciclada	
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	
Quanto aos materiais adicionados	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão asfáltica, CAP, Polímeros	Rejuvenescimento
	Mistura asfáltica	Adição de material fresado

Fonte: Bonfim (1999).

A tabela 3 demonstra uma proposta de análise das condições do pavimento ao selecionar o método de reciclagem. A escolha do método de reciclagem depende, de acordo com Motta, Pinto e Guarçoni (2002), dos respectivos fatores condicionantes:

- Tipo de idade do revestimento;
- Espessura da camada de revestimento;
- O estágio de conservação do revestimento e porcentagem de área remendada;
- Condição estrutural do pavimento;
- Tipo do material de base e sua condição estrutural;
- Tráfego futuro estimado;
- Disponibilidade de materiais a serem adicionados, custos de aquisição, obtenção de equipamentos e distância de transporte.

Tabela 3 – Escolha do método de reciclagem.

Condições de Pavimento	Reciclagem a quente em usina	Reciclagem a quente “in situ”	Reciclagem “in situ” a frio
Defeitos de Superfície			
Desagregação	X	X	
Exudação	X	X	
Empolamento	X	X	
Deformação			
Corrugações	X	X	
Afundamento de trilha de roda	X	X	
Depressões	X		X
Trincamento (associado à carga)			
Trincas em bloco	X		X
Trincas longitudinais na trilha de roda	X	X	
Trinca de borda	X		
Trincamento parabólico			
Trincamento (não associado à carga)			
Blocos de retração	X		X
Trincas longitudinais nas juntas	X	X	
Trincas transversais	X		X
Reflexão de trincas	X		X
Remendos de manutenção	X		X
Qualidade de rolamento			
Desnível generalizado	X	X	
Adensamentos	X	X	
Afundamentos localizados	X	X	

Fonte: Federal Highway Administration *apud* Motta, Pinto e Guarçoni (2002).

As normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) 006/2003 – PRO e DNIT 009/2003 – PRO, são referentes aos procedimentos da avaliação objetiva e subjetiva da superfície do pavimento flexível e semirrígidos, respectivamente. Utilizou-se a norma DNIT 006/2003 PRO para realização do inventário e classificação de ocorrências aparentes e deformações permanentes nas trilhas de roda da pista experimental Rodovia Visconde de Porto Seguro/SP, isto é, descrição do tipo de degradações em que se encontra o pavimento.

2.5 Reciclagem a frio

De acordo com o *Asphalt Institute* (1983), a reciclagem a frio é definida como um processo em que o material removido do pavimento é combinado com o ligante asfáltico novo e/ou agentes de reciclagem, agregados virgens (se necessário), produzindo misturas a frio no local ou em usina para serem utilizados como camada de base. Sobre essa camada aplica-se um tratamento superficial ou uma mistura asfáltica como microrrevestimento asfáltico ou

concreto asfáltico, com a função de proteger a camada reciclada dos danos causados pela água e da abrasão provocados pelo tráfego (KANDHAL; MALLICK, 1997 *apud* DAVID, 2006).

Segundo Rogge & Hicks (1993), os pavimentos mais adequados para se usar a técnica da reciclagem a frio são os pavimentos trincados, com recapeamentos sucessivos, com problemas de drenagem entre as camadas originais e de reforço, com desagregação do revestimento, quando do volume médio diário de veículos seja inferior a 5.000 e nas regiões com escassez de material pétreo (agregado) (SILVA, 2011). A reciclagem a frio pode ser dividida em duas categorias:

- Reciclagem a Frio em Usina;
- Reciclagem a Frio *in situ*.

2.5.1 Reciclagem a frio em usina móvel

O revestimento é fresado e transportado para uma unidade móvel de mistura a frio localizado nas proximidades do trabalho. O material é misturado com emulsão asfáltica ou rejuvenescedor para que seja produzida uma nova mistura a frio, adequada para a pavimentação imediata (SILVA, 2011).

A unidade móvel, ou melhor, a usina misturadora móvel é montada em um semirreboque com comando de acionamento elétrico pelo seu próprio motor a diesel; logo não depende de energia elétrica proveniente da rede pública e controle de dosagem da mistura por meio de microprocessador. Este *design* móvel permite um transporte fácil e uma montagem rápida no local da obra. A figura 2 mostra modelo de equipamento, KMA 220, fabricado pela Wirtgen Group, utilizado no trecho experimental da Rodovia Visconde de Porto Seguro/São Paulo (atual SP 332).

Figura 2 – Usina Misturadora Móvel.



Fonte: FREMIX, 2014.

Segundo a Wirtgen (1999) a reciclagem em usina móvel pode produzir misturas de alta qualidade com material granular virgem e também com material fresado. Essa usina permite a execução de misturas com espuma de asfalto, destinadas à camada de base, mas também possibilita a execução de misturas com emulsão e/ou cimento.

De acordo com Reis (2013) a usina possibilita a pré-fabricação a frio de misturas para uso como camadas de base ou de rolamento. Sendo instalada perto da obra se economiza tempo e a mistura é facilmente transportada por caminhões até o local desejado. Por outro lado, essas usinas, por serem a frio, não aproveitam a importante propriedade do ligante asfáltico de variar sua viscosidade com o aquecimento, que proporciona melhor ligação agregado-ligante.

Na pista, a operação prossegue com o espalhamento e a compactação da camada por meio de acabadoras convencionais, seguida da compactação final, feita com rolos compactadores (PINTO, 2002).

2.5.1.1 Reciclagem a frio em usina estacionária

Na reciclagem a frio, em usinas estacionárias, a mistura do material é realizada em usinas de solos, podendo também ser empregadas às usinas gravimétricas e as usinas *drum mixer* (KANDALL E MALLICK, 1997b).

Para Beligni (1995) a usina *drum mixer* trabalha a quente, de tal forma que os agregados novos entram no início do cilindro junto ao maçarico, enquanto o pavimento asfáltico fresado é conduzido na temperatura ambiente de estocagem, à frente dos agregados novos superaquecidos, evitando-se sua queima e juntando-se com o ligante no final do misturador cilíndrico. A figura 3 mostra um tipo de usina *drum mixer*.

Figura 3 – Usina *Drum Mixer*.



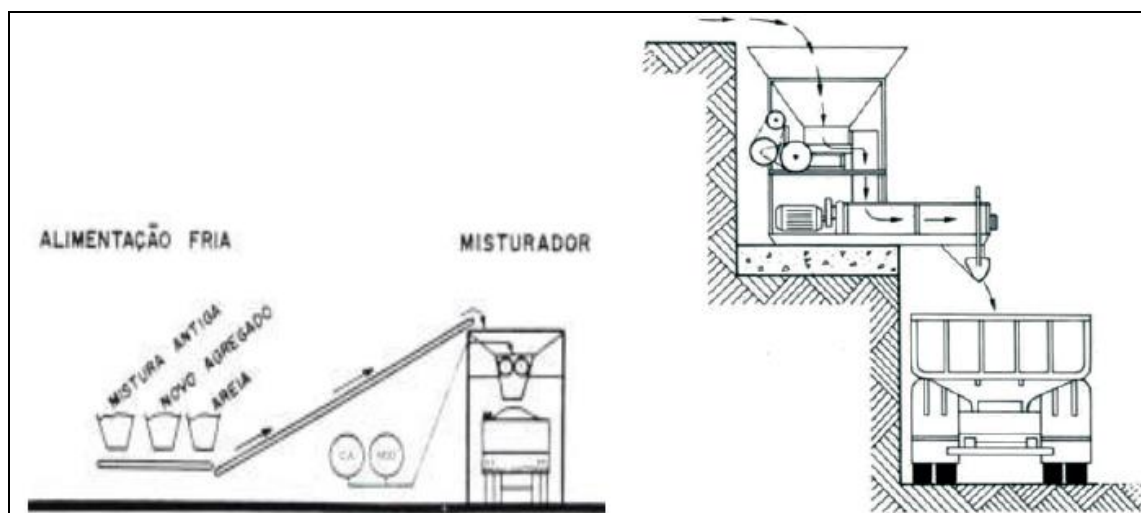
Fonte: Cotril, 2014.

Castro (2003) ressalta que a reciclagem a frio em usina representa uma alternativa para situações onde o equipamento de reciclagem a frio *in situ* não é comportado pelas vias, devido às suas dimensões.

O processo básico de operação é a retirada do material antigo, pela fresagem, e o posterior transporte deste material fresado para a usina de solos, a fim de processar a mistura com os agregados novos e, se necessário, adicionar material de enchimento e agente rejuvenescedor emulsionado (REIS, 2013).

Bonfim (1999) salienta que esta técnica é muito utilizada nos países europeus e a porcentagem de reaproveitamento do material fresado pode atingir cerca de 90%. A figura 4 mostra o esquema de funcionamento de uma Usina de Solos e Usina estacionária de mistura a frio.

Figura 4 – Esquema de funcionamento de a) Usina de Solos e b) Usina Estacionária de Mistura a frio.



Fonte: Consmarq S.A., 1994 (a); Bernucci, 2008.

2.5.2 Reciclagem a frio *in situ*

O termo reciclagem a frio *in situ* é denominado quando se utiliza o processo de fresagem e mistura no local onde se deseja recuperar o pavimento, sendo este processo realizado por equipamento denominado de fresador-reciclador. Este método produz uma mistura de novos materiais de construção, em apenas uma passada do equipamento reciclador (SILVA, 2011).

A reciclagem a frio *in situ* é definida como uma técnica em que os materiais existentes no pavimento são reutilizados no próprio local. Os materiais são misturados sem

aplicação de aquecimento (REIS, 2013). Realiza-se o corte (fresagem) da capa asfáltica, a adição de material novo (asfalto, agregados e agente rejuvenescedor), a mistura e a reciclagem no local em equipamento móvel (PETROBRÁS, 2005).

Conforme Kandhal & Mallick (1997a) a técnica de reciclagem a frio *in situ* pode ser desenvolvida de duas maneiras: parcial ou total. Na reciclagem total, o revestimento asfáltico juntamente com a camada granular é reciclado, enquanto que na reciclagem parcial recicla-se somente o revestimento asfáltico, ou parte dele (USACE, 2005 *apud* DAVID, 2006).

Dellabianca (2004) classifica a reciclagem a frio *in situ* em função do tipo de aditivo que se incorpora ao material fresado, isto é, reciclagem com modificação da composição original, como apresentado a seguir:

- com adição de emulsão;
- com adição de cimento portland;
- com adição de cimento portland e emulsão;
- com adição de asfalto espuma;
- com adição de agregados.

2.5.1.2 Reciclagem a frio in situ com adição de emulsão

A técnica consiste na realização de uma fresagem a frio com adição de emulsão especial (ligante rico em maltenos), seguido de mistura, espalhamento, pré-adensamento e compressão do material na pista. Nesse caso se tem um PMF – Pré Misturado a Frio. Esse tipo de reciclagem pode ser usado como camada intermediária (bider) e como revestimento (capa asfáltica).

2.5.1.3 Reciclagem a frio in situ com adição de cimento Portland

Ocorre inicialmente o espalhamento do cimento Portland que pode ser com o *spreader*, em forma de nata de cimento, seguido da fresagem a frio, injeção da emulsão, mistura, espalhamento e compactação. Esse tipo de reciclagem pode ser usado na base ou sub-base. O espalhamento do cimento Portland também pode ser realizado manualmente, com o material no estado seco, a partir da abertura dos sacos na pista. O mesmo procedimento descrito também pode ser adotado na reciclagem com a adição de cal hidratada.

Por se tratar do objeto de estudo deste trabalho, veremos com mais detalhes sobre os processos de execução com o uso da adição do cimento Portland em pavimentos flexíveis reciclados *in situ* e com usina móvel.

2.5.1.4 Reciclagem a frio *in situ* com adição de cimento Portland e emulsão

Inicialmente é realizado o espalhamento do cimento Portland, que pode ser com *spreader*, em forma de nata de cimento, seguido da fresagem a frio, injeção da emulsão, mistura, espalhamento e compactação. Esse tipo de reciclagem pode ser usado como base ou sub-base.

2.5.1.5 Reciclagem a frio *in situ* com adição de asfalto espuma

Nesse caso se tem primeiramente o espalhamento de cimento Portland ou pó de pedra (se necessário), seguido da fresagem a frio, injeção do CAP na forma de espuma, mistura, espalhamento e compactação. Esse tipo de reciclagem pode ser usado como base ou sub-base.

2.5.1.6 Reciclagem a frio *in situ* com adição de agregados

A técnica desta reciclagem consiste inicialmente com o espalhamento dos agregados novos (brita, pó de pedra, areia), seguido da fresagem a frio, mistura, espalhamento e compactação. Esse tipo de reciclagem pode ser usado como base ou sub-base.

2.6 Vantagens da reciclagem a frio

David (2006) cita algumas das vantagens para a técnica de reciclagem a frio *in situ* que são:

- a) Aproveitamento total dos agregados pétreos existentes no pavimento, reduzindo a exploração de pedreiras e conferindo a esta técnica um componente ecológico muito importante. Nesse caso as rodovias tornam-se fontes de agregados;
- b) Conservação de energia, já que não é necessário o aquecimento do asfalto e o agregado não requer secagem. Estudos comprovam que a energia consumida na produção da mistura reciclada a frio *in situ* é aproximadamente 20% da energia

necessária para produzir novas misturas asfálticas a quente, considerando a mesma quantidade de massa. Além disso, a emissão de gases é reduzida, trazendo benefícios ao meio ambiente (DAVIDSON; BLAIS; CROTEAU, 2004 *apud* DAVID, 2006);

- c) A reciclagem retarda o aparecimento das trincas da base. As misturas asfálticas recicladas a frio têm propriedades mecânicas que diferem significativamente das misturas asfálticas convencionais a quente. O volume de vazios das misturas asfálticas recicladas a frio provocam uma atenuação na reflexão das trincas. De acordo com Pinto *et al.*(1994) citam que a reconstrução da camada asfáltica por meio do processo de reciclagem permite criar uma camada intermediária, com característica mecânica inibidora do mecanismo de propagação de trincas do revestimento antigo para a camada de rolamento;
- d) Empregar ou dispor do aproveitamento do asfalto envelhecido na mistura;
- e) Obtenção de uma camada reprocessada com características mecânicas mais homogêneas que um conjunto de recapeamentos sucessivos fraturados (MOMM; DOMINGUES, 1995);
- f) Rapidez na execução do serviço, minimizando o transtorno causado aos usuários;
- g) Preservação da geometria do pavimento. A técnica de reciclagem pode ser aplicada, se for o caso, em um único lado da pista e evita o desnível entre a pista e o acostamento. Também faz com que não haja aumento de cotas a cada recapeamento, o que provocaria problemas em viadutos (altura livre), pontes (sobrecargas), meios-fios e elementos de drenagem superficial;
- h) Economia de recursos financeiros. A reciclagem de pavimentos pode proporcionar uma redução de custo de 40% a 50% em relação aos métodos convencionais (KANDHAL; MALLICK, 1997a; ROGGE & HICKS, 1993). Esta redução se deve, entre outros fatores, à eliminação do custo devido ao transporte de materiais e à redução do consumo de energia, pois o processo é realizado a frio.

3 RECICLAGEM A FRIO COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

De acordo com ARRA (2001) a reciclagem profunda *Full Depth Reclamation* (FDR) é uma técnica de reabilitação na qual o revestimento asfáltico e uma quantidade pré-determinada de material subjacente (base, sub-base e subleito) são pulverizados e misturados uniformemente para fornecer um material de base melhorado e homogeneizado.

A reciclagem de pavimento *in situ* a frio com adição de cimento Portland, conforme dito anteriormente, é definida como um processo de restauração de pavimento executada no local. Este tipo de reciclagem requer o uso de equipamentos apropriados reaproveitando total ou parcialmente o revestimento existente, incorporando parte ou toda a base existente com adição de cimento Portland, água e se necessário, a adição de agregados novos. Como processo executivo há o espalhamento do aditivo, no caso, o cimento Portland e a compactação da mistura resultante obtendo-se desta forma uma base reciclada (DER-SP, 2006 *apud* BARROS; MERIGHI, 2011).

3.1 Processo executivo

O processo executivo para a execução da reciclagem *in situ* do pavimento flexível começa pela instalação do trem de reciclagem que atende ao arranjo ou *layout* de organização conforme a figura 5. Os equipamentos que formam este trem de reciclagem, citados pelo DER/SP, são basicamente os seguintes:

- Distribuidor de agregados;
- Distribuidor de aglomerante hidráulico;
- Recicladora;
- Caminhão-tanque para abastecimento de água;
- Motoniveladora;
- Rolo liso vibratório;
- Rolo de pneumáticos de pressão variável;

Primeiramente para o revolvimento e ou quebra do revestimento asfáltico e incorporação da base do material deverá ser realizado por uma recicladora tipo Wirtgen 2500 S.A. recicladora deve possuir um dispositivo que proporcione uma mistura homogênea e

regular o que impeça o arranchamento dos blocos (PORTUGAL, 2009 *apud* BARROS; MERIGHI, 2011).

De acordo com Portugal (2009), a recicladora deverá ser acoplada a uma unidade móvel de armazenamento de água para ser utilizado no umedecimento da mistura. O trem de reciclagem está apresentado na figura 5, onde o espalhador pode ser mecânico ou simplesmente manual. Se o espalhador for mecânico, deve ser capaz de espalhar e conformar a mistura no alinhamento, na cota e pontos requeridos conforme norma do DER/SP ET-DE-P00/35.

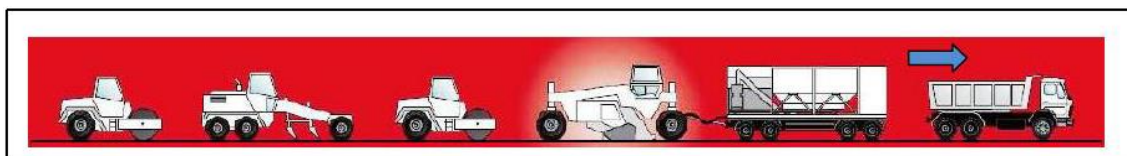
Figura 5 – Trem de reciclagem com adição de cimento Portland.



Fonte: Wirtgen (2004).

Batista (2009), explica o funcionamento do trem tipo de reciclagem com uma máquina misturadora de suspensão a frente da recicladora. A misturadora adaptada serve para mesclar a água e o cimento de maneira a manter um processo contínuo como pode ser observado na figura 6, trabalhando com estocagem interna de água substituindo o caminhão pipa para realizar essa mescla.

Figura 6 – Trem de reciclagem com máquina misturadora.



Fonte: Batista (2009).

3.2 Teor de cimento

O cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica (PETRUCCI, 1995).

Segundo Wang (2002), a maioria dos solos pode ser estabilizada quimicamente, as exceções são os solos orgânicos, as argilas muito plásticas e solos arenosos pouco reativos. O

tipo de cimento Portland varia de acordo com as propriedades desejadas e o tipo de solo. A quantidade necessária de cimento para a estabilização será maior quanto mais fina for a granulometria do solo e, esta quantidade de cimento pode variar de 4% a 16% do peso de solo seco.

Geralmente, quando a proporção de solo argiloso aumenta, a quantidade de cimento necessária também aumentará. Esta presença de solo argiloso pode ser detectada por meio do ensaio de equivalente de areia para o material da base reciclada, indicando a maior ou menor porcentagem do teor de cimento Portland.

No Brasil, a porcentagem em massa de cimento Portland a ser incorporada à mistura reciclada é fixada de modo a atender a resistência à compressão simples e à tração no ensaio de compressão diametral, ambas aos 7, e 28 dias de cura, fixadas no projeto da estrutura do pavimento (DER-SP ET-DE-P00/035).

Balbo (2007) informa que quanto maior o consumo de cimento na mistura, maiores serão os valores de resistência obtidos, porém quanto maior o teor de cimento maior são as chances da ocorrência de fissuras ou trincas de retração na mistura, dessa forma a dosagem da mistura é feita de modo que se atendam parâmetros de resistência de projeto com a menor quantidade possível de cimento Portland.

Guthrie *et al.* (2002) em estudo de base estabilizada com cimento Portland e agregado calcário, encontrou teor ótimo de cimento igual a 3,0% em massa, valor com o qual os corpos de prova atingiram valores satisfatórios de resistência, durabilidade e suscetibilidade à água. Miller *et al.* (2009) determinou que 4,0% em massa de cimento levavam a resistência à compressão não confinada após 7 dias de cura a valores satisfatórios para quatro diferentes tipos de agregado, todos provenientes de fresagem de revestimentos asfálticos ou base granular de diferentes localidades.

Nesse mesmo estudo verificou-se que fresados de revestimento asfáltico de mistura descontínua necessitam um percentual de cimento Portland entre 6,0 e 8,0% em massa, devido à descontinuidade do esqueleto sólido original, aumentando a quantidade de cimento necessária.

3.3 Compactação

Entende-se por compactação de um solo, o processo manual ou mecânico que visa reduzir o volume de seus vazios e, assim, aumentar a sua resistência, tornando-o mais estável (CAPUTO, 1989).

A compactação é a estabilização mecânica dos materiais que permite alcançar e conservar a maior resistência de qualquer estrutura de terra sem a utilização de qualquer aditivo (FIDELIS, 2011).

A compactação do solo visa à melhoria das propriedades mecânicas, não somente quanto à resistência, mas, também, nos aspectos de permeabilidade, compressibilidade e absorção de água (CAPUTO, 1989). De acordo com Gregório (2010) esta estabilização está relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima.

O teor ótimo de umidade é determinado por meio do ensaio de compactação, realizado em cilindro padrão tipo Proctor, de modo que ocorra a maior densificação. O processo de compactação para misturas de material reciclado do revestimento asfáltico, juntamente com o solo da base e com adição de cimento Portland é a mesma metodologia para solos, segundo a norma ABNT NBR 7182:1986.

Conforme se adiciona água à mistura aumenta-se a lubrificação entre as partículas permitindo que essas se movam com mais facilidade diminuindo o volume de vazios com a compactação (PINTO, 2007).

Segundo o mesmo autor, a mistura atinge uma umidade denominada de umidade ótima de compactação que confere uma densidade máxima seca para a energia de compactação aplicada. A partir desse ponto, ao se adicionar água na mistura, esta passa a dificultar a compactação por se posicionar em meio aos grãos e ser um fluido incompressível (PINTO, 2007).

A especificação técnica do DER/SP para a execução de camadas de bases recicladas com adição de cimento Portland e brita define que deve ser empregada a energia intermediária de compactação. As normas internacionais não contemplam tal energia, prevendo apenas a energia normal e a modificada (ARANHA, 2013).

As características de resistência de misturas que contém aglomerante hidráulico dependem basicamente da relação água/cimento contida na mistura. Quanto maior a quantidade de água contida na mistura, maior será seu volume de vazios após a hidratação completa do cimento. Por sua vez, quanto maior o volume de vazios da mistura, menor será a sua resistência. Dessa forma, para o aumento da resistência se buscam menores relações de água/cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008 *apud* ARANHA, 2013).

Contudo, de acordo com Pinto (2007), a redução da umidade na mistura afeta seu grau de compactação (GC), resultando em densidades máximas menores da mistura compactada. A fim de se compensar os efeitos negativos na compactação, causados por teor de umidade inferior, Balbo (1993) sugere adotar a energia modificada de compactação. A

energia modificada de compactação foi adotada no controle da pista experimental deste trabalho. Por fim, é importante ressaltar que independente do material utilizado na camada do pavimento e da adição ou não do aglomerante hidráulico, há a necessidade de se definir o grau de compactação mínimo a ser atingido em campo (FIDELIS, 2011 *apud* ARANHA, 2013).

3.4 Tempo de cura

A avaliação da evolução nas propriedades mecânicas de misturas estabilizadas com cimento Portland se faz necessária justamente pelas características de hidratação desse aglomerante, que faz com suas características químicas e físicas se modifiquem, passando do estado de pasta plástica a sólido.

Conforme Mehta e Monteiro (2008), o processo de hidratação do cimento possui três fases principais, que são determinadas a partir do contato do aglomerante em contato com a água. Na primeira fase, a pasta plástica de cimento se torna não trabalhável e é denominada de início de pega. Este ponto marca o fim do período onde é possível fazer a mistura e compactação da camada.

Na segunda fase, ocorre o fim da pega, onde é marcado o fim do processo de solidificação da mistura, contudo, sua resistência ainda é considerável muito baixa. Na terceira e última fase, ocorre o endurecimento da mistura, processo no qual há o ganho de resistência provocado pela hidratação do cimento.

A evolução nas propriedades de misturas com cimento e as reações químicas que as provocam são dependentes do tipo de materiais envolvidos, justificando assim a necessidade de uma avaliação do período de cura em misturas recicladas com a incorporação de cimento Portland. Em termos de aplicação para a pavimentação rodoviária, a determinação da evolução das propriedades mecânicas de uma mistura cimentada define o tempo para a abertura ao tráfego, que se dá quando a camada atingir a resistência compatível aos níveis de solicitação locais (ARANHA, 2013).

O tempo para incremento de resistência mostra-se dependente do teor de cimento utilizado, isto é, quanto maior a quantidade de cimento empregado maior será o tempo necessário para a mistura chegar à constância de resistência, sendo os valores observados para a estabilização de 7 a 14 dias de cura para 3,5% e 7,0% de cimento, respectivamente (ARANHA, 2013).

De acordo com Merighi *et al.* (2005a), estudos laboratoriais vêm analisando a execução das bases recicladas com adição de cimento, estudando as características mecânicas

nas primeiras idades das misturas e determinaram quais períodos de cura menores são suficientes para agilizar a liberação de abertura do tráfego.

O citado autor determinou que uma camada de base reciclada com adição de 3,0% a 5,0% de cimento é capaz de suportar um eixo padrão de 80.000 N após um período de 24 horas do início da mistura por meio de ensaios de resistência à tração e resistência à compressão. Miller (2009) verificou que após 2 (dois) dias de cura, uma base reciclada cimentada possui módulo elástico entre 200 e 700% superior em relação ao mesmo material sem a adição de cimento.

A abertura ao tráfego se dá quando a base atinge resistência compatível aos níveis de solicitação locais. Para tanto, deve-se realizar a pintura de ligação e o salgamento para a criação de uma camada de proteção mecânica da base (DER/SP ET-DE-P00/035). Apesar de a recomendação ser de 7 (sete) dias antes da execução da próxima camada, na prática adotam-se muitas vezes períodos de espera inferior, devido a limitações operacionais, especialmente em rodovias de tráfego intenso.

3.5 Granulometria do material reciclado

A análise granulométrica, ou seja, a determinação das dimensões das partículas do agregado e das proporções relativas em que elas se encontram, é representada, graficamente, pela curva granulométrica e segue a metodologia da norma DNER – ME 083/94. A curva granulométrica é traçada por pontos em um diagrama semilogarítmico, no qual, sobre o eixo das abscissas, são marcados os logaritmos das dimensões das partículas e sobre o eixo das ordenadas as porcentagens, em peso, de material com dimensão média menor que a dimensão considerada (CAPUTO, 1989).

Somente após a análise granulométrica, determina-se o Tamanho Nominal do Agregado, efetua-se o enquadramento da composição da mistura mineral em uma das faixas para emprego em camada de revestimento ou de ligação que deve satisfazer os requisitos da norma DNIT 031/2006 – ES para a pista experimental.

Entretanto, a granulometria da mistura reciclada pode ser corrigida pela adição de um ou mais agregados, de acordo com a dosagem ou por indicação do projeto. Entende-se por dosagem a quantidade de agentes rejuvenescedores ou estabilizantes que será utilizado na mistura, assegurando que sejam atendidos os interesses da restauração (PETERSON *et al.*, 1994).

A mistura reciclada deverá apresentar uma composição granulométrica bem graduada capaz de gerar uma menor quantidade de vazios e uma maior quantidade de pontos de contatos entre grãos e pasta de cimento após sua compactação e cura.

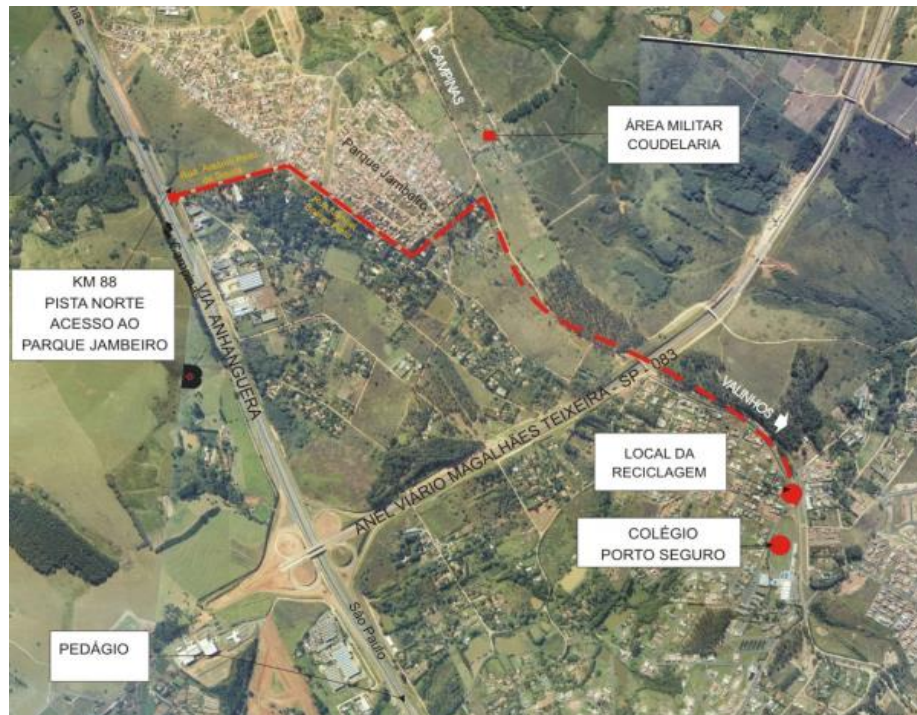
4 TRECHO EXPERIMENTAL

O Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) em parceria com a Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM) firmaram em setembro de 2007, convênio para implantação de uma Pista Experimental com o objetivo de promover a capacitação técnica e desenvolver tecnologias (BARROS; MERIGHI, 2011).

A pista experimental está localizada na Estrada Velha de Campinas, atualmente denominada SP 332 - Rodovia Visconde de Porto Seguro/São Paulo, entre os quilômetros 96,393 e 97,100, trecho compreendido entre a estaca 334+13,00m e a estaca 370, situado entre os bairros Joapiranga e Recreio dos Cafezais, passando em frente ao Colégio Visconde de Porto Seguro, em Valinhos (FORTES *et al.*, 2011). A figura 7 apresenta uma vista da pista experimental.

A Estrada Velha de Campinas (SP 332) é uma rodovia do estado de São Paulo conhecida por seu trajeto de fazer a ligação original entre São Paulo e Campinas. Sua construção foi iniciada por Washington Luís, governador de São Paulo no período de 1920 a 1924, que utilizou presidiários na sua construção, de acordo com uma lei estadual que ele conseguira aprovação, em 1913, quando era deputado estadual, lei estadual nº1.406 de 1913.

Figura 7 – Localização da pista experimental.



Fonte: Fortes *et al.*, 2011.

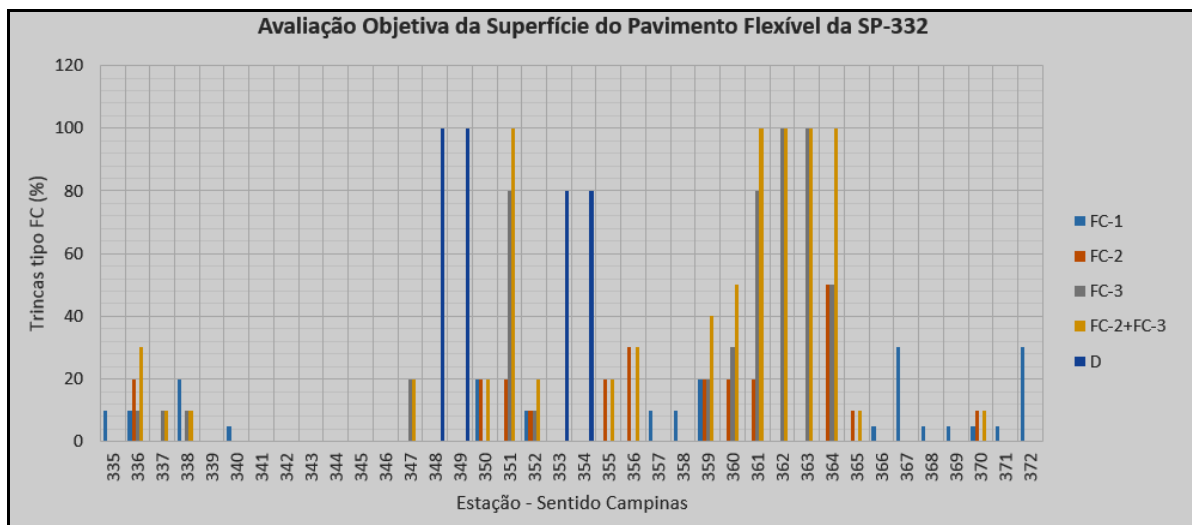
No decorrer dos anos o pavimento em estudo passou a apresentar problemas funcionais e estruturais, consequentes das condições de sua base e seu subleito. A avaliação funcional de um pavimento relaciona-se à apreciação da superfície dos pavimentos e como este estado influencia no conforto e rolamento dos usuários.

De acordo com o DNIT (2003), esta avaliação é uma medida subjetiva das condições de superfície de um pavimento, feita por um grupo de avaliadores que percorrem o trecho sob análise, registrando suas opiniões sobre a capacidade do pavimento de atender às exigências do tráfego e apresenta-se como Valor de Serventia Atual (VSA). Bernucci *et al.* (2008), cita o guia de dimensionamento de pavimentos da AASHTO (1993) que atribui como limite de aceitabilidade os valores de 2,5 para vias de alto volume de tráfego e 2,0 para as demais.

A norma DNIT 006/2003 – PRO, foi o instrumento metodológico aplicado para a avaliação objetiva da superfície do pavimento flexível da SP 332. O levantamento das patologias e a medida da trilha de roda foram realizados em seções amostrais, cadastradas conforme sentido da rodovia (Campinas para Valinhos ou Valinhos para Campinas), faixa esquerda (LE) ou faixa direita (LD) e o tipo de revestimento encontrado.

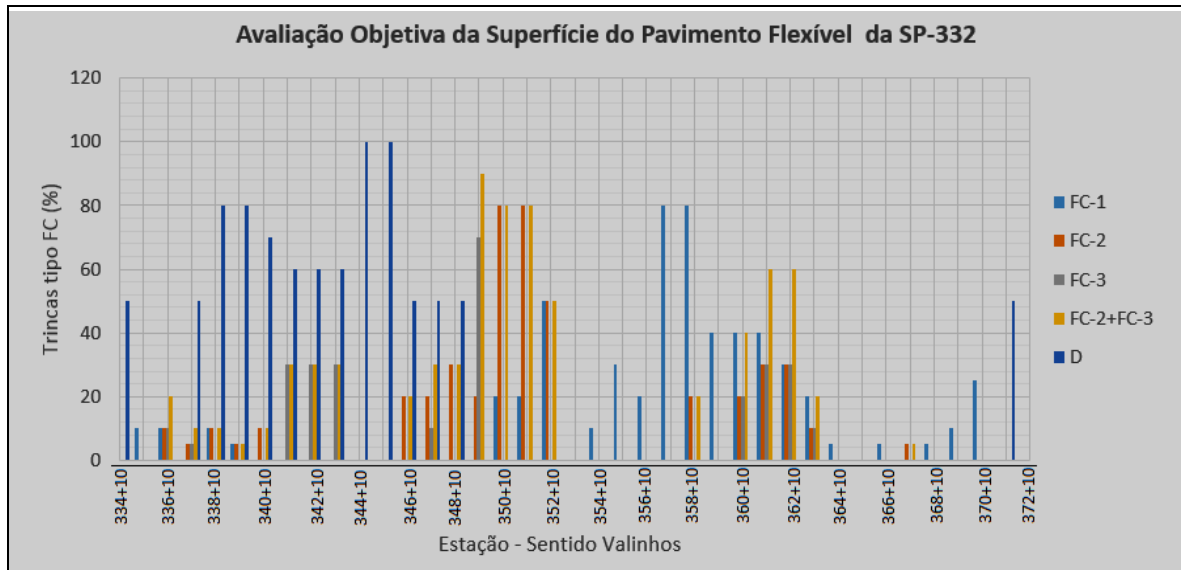
A figura 8 mostra o gráfico obtido com as informações da Avaliação Objetiva da Superfície do Pavimento Flexível da pista experimental SP 332, sentido para Campinas, na faixa direita (LD) e com revestimento do tipo CBUQ. Da mesma forma a figura 9 apresenta a avaliação objetiva da superfície no sentido para Valinhos, na faixa esquerda (LE) e com o revestimento do tipo CBUQ.

Figura 8 – Avaliação Objetiva da Superfície da pista experimental – sentido Campinas.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 9 – Avaliação Objetiva da Superfície da pista experimental – sentido Valinhos.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Ao longo da pista experimental, não foram encontrados escorregamentos (E) do revestimento betuminoso (CBUQ) e nem problemas de exudação (EX) do ligante asfáltico. Verificam-se, por meio dos gráficos da avaliação objetiva da superfície, a presença de desgaste (D) acentuado (no sentido Valinhos), trincas isoladas e interligadas (do tipo “jacaré” e em blocos), representados por FC-2 e FC-3. A figura 10 mostram exemplos de situações patológicas do pavimento antes da reciclagem.

Figura 10 – Patologias encontradas no pavimento da pista experimental SP 332.

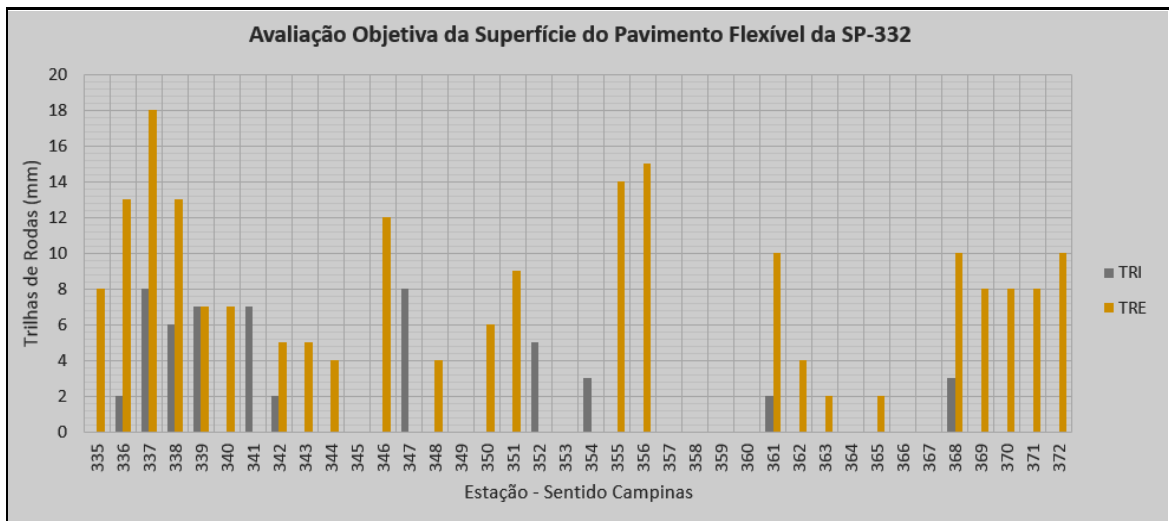


Fonte: Fortes *et al.*, 2011.

As medidas, em milímetros, da deformação permanente no sulco formado nas trilhas de roda interna (TRI) e externa (TRE), correspondente ao ponto de máxima depressão da pista experimental SP 332, estão registradas ao longo das estações, conforme as figuras 11 e 12.

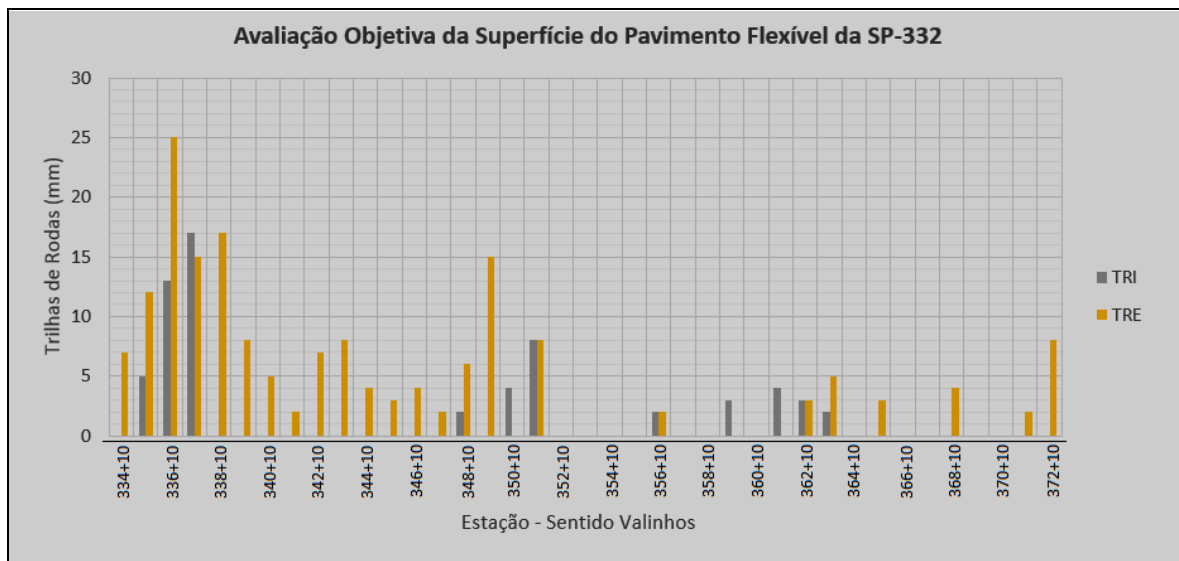
As máximas trilhas de roda externa encontradas na pista experimental da SP 332 foram de 18,0 mm (sentido Campinas) e 25,0 mm (sentido Valinhos). Enquanto que, as máximas trilhas de roda interna foram de 8,0 mm e 17,0 mm nos respectivos sentidos.

Figura 11 – Ponto de máxima depressão das trilhas de rodas – Sentido Campinas.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 12 – Ponto de máxima depressão das trilhas de rodas – Sentido Valinhos.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Foram executados ensaios preliminares e de desenvolvimento realizados pelo Departamento de Estradas e Rodagens do estado de São Paulo (DER-SP), Universidade Presbiteriana Mackenzie e empresas conveniadas - conforme tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Ensaio Preliminares e de Desenvolvimento.

Ensaio Preliminares	Ensaio de Desenvolvimento
<ul style="list-style-type: none"> • Sondagem de reconhecimento de pavimento; • Ensaio de dosagem de materiais para reciclagem de pavimento com cimento Portland, com diferentes porções de pó de pedra ou de pedriscos e teores de cimento para melhor composição da mistura final. 	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação Objetiva das superfícies de pavimentos flexíveis e semirrígidos; • Análise granulométrica por peneiramento; • Equivalente de Areia; • Compactação dos solos; • Massa Específica Aparente <i>in situ</i>, com o cilindro biselado; • Resistência à Tração por Compressão Diametral em corpos de prova cilíndricos; • Resistência à Compressão Axial; • Densidade Aparente de corpos de prova extraídos por broqueamento; • Deflexões recuperáveis pela Viga de Benkelman; • Espessura dos corpos de prova extraídos por broqueamento –Método do paquímetro; • Índice de Suporte Califórnia; • Ensaio de Marshall; • Ensaio de caracterização do ligante;

Fonte: Adaptado de Barros; Merighi, 2011.

No levantamento da camada de base existente entre o Colégio Porto Seguro e o Condomínio Itamaracá, foram encontrados os valores médios de 5,0 cm de capa asfáltica (CAUQ) e 5,0 cm de macadame hidráulico, estando essa estrutura assentada diretamente no subleito (solo arenoso/vermelho) (figura 13).

Entende-se por macadame hidráulico a camada de base ou sub-base obtida por compressão de agregados graúdos, uniformemente distribuídos, cujos vazios são preenchidos por pó-de-pedra ou areia (material de enchimento) a princípio a seco e depois com ajuda de água.

Figura 13 – Coleta de material e verificação da espessura da camada de revestimento.



Fonte: Fortes *et al.*, 2011.

O projeto do pavimento ficou definido em sete subtrechos com as dimensões de cem metros de comprimento por sete metros e cinquenta centímetros de largura (100 m x 7,5 m) com base nas informações técnicas dos ensaios preliminares, isto é, das patologias encontradas e catalogadas por inventário, espessuras das camadas que compõem o pavimento (capa asfáltica, base), tipos de materiais que compõem a base e subleito.

Os subtrechos foram identificados pelas estacas, isto é, marcação do serviço topográfico ao longo da pista experimental, através de pinturas realizadas nos meios fios e depois disponibilizadas para as empresas participantes da pesquisa conforme a seguir:

- Trecho A. Inicia-se na Estaca 334+13 e termina na Estaca 340. Neste trecho ocorreu a técnica de reciclagem *in situ* do pavimento flexível com adição de cimento por meio da usina móvel KMA 200. Este trecho é objeto de estudo deste trabalho e a empresa responsável foi o Grupo Ane.
- Trecho B. Começa na Estaca 340 e termina na Estaca 345. Neste trecho utiliza-se também a técnica de reciclagem *in situ* por meio da usina móvel KMA 200, mas com a aplicação de espuma de asfalto. Este trecho foi de responsabilidade do Grupo Ane.
- Trecho C. A partir da Estaca 345 até a Estaca 350. Neste trecho ocorreu o processo usual de reciclagem *in situ* do pavimento flexível com adição de bica corrida. Utilizam-se os resultados obtidos deste trecho para fins de comparação.
- Trecho D. Este trecho também é objeto de estudo desta dissertação. Origina-se a partir da Estaca 350 e encerra-se na Estaca 355. Neste trecho ocorreu o processo usual de reciclagem *in situ* do pavimento flexível com adição de cimento Portland e de agregados provenientes da Pedreira Basalto.
- Trecho E. É o último trecho da pista experimental reciclado. Deriva-se a partir da Estaca 355 e vai até a Estaca 360. A reciclagem *in situ* do pavimento flexível consiste no processo usual citado anteriormente mas, com aplicação de espuma de asfalto com adição de cimento Portland e pó de pedra para correção granulométrica. Os trechos C, D e E foram de responsabilidades da empresa PAVISAN.

4.1 Estabilização granulométrica das bases recicladas com adição de cimento Portland

A empresa COPAVEL – Consultoria de Engenharia Ltda., realizou a dosagem de base reciclada com incorporação de cimento, sendo necessários os estudos de granulometria do material fresado da Rodovia SP 332, pó de pedra e do cimento Portland (CP II E 32) da Votoran. A Tabela 5 mostra a composição granulométrica do material fresado, do cimento Portland (CP II E 32) e pó de pedra conforme norma DER/SP ET DE P00/035.

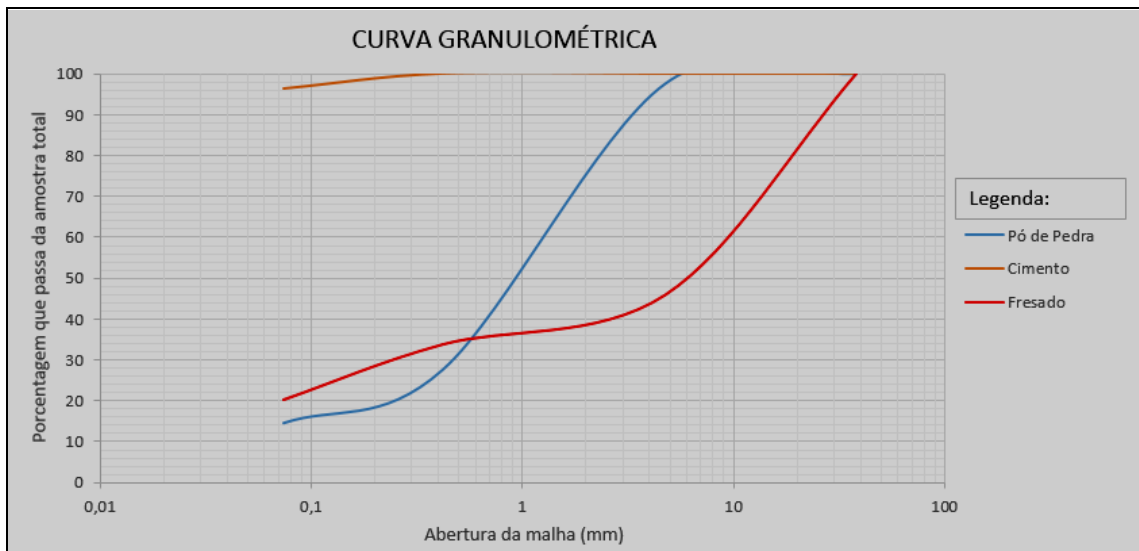
Tabela 5 – Composição granulométrica dos materiais.

Peneiras	Abertura (mm)	Porcentagem que passa da amostra total (%)		
		Pó de pedra	Cimento	Fresado
1 1/2"	38,1	100	100	100
4	4,75	97,6	100	46
40	0,42	27,5	100	33,9
200	0,074	14,4	96,3	20,4

Fonte: COPAVEL, 2009.

Com base nos dados da tabela 5 pode-se traçar o gráfico das curvas granulométricas dos materiais, conforme figura 14, a seguir:

Figura 14 – Curvas granulométricas dos materiais para a base reciclada.



Fonte: Adaptado de COPAVEL, 2009.

A partir da composição granulométrica do material fresado, pó de pedra e do cimento Portland se buscou atender os percentuais de dosagem da mistura, de forma a realizar um

enquadramento em uma faixa granulométrica de trabalho, isto é, capaz de satisfazer aos requisitos da tabela 6, conforme a norma DER/SP ET-DE-P00/35.

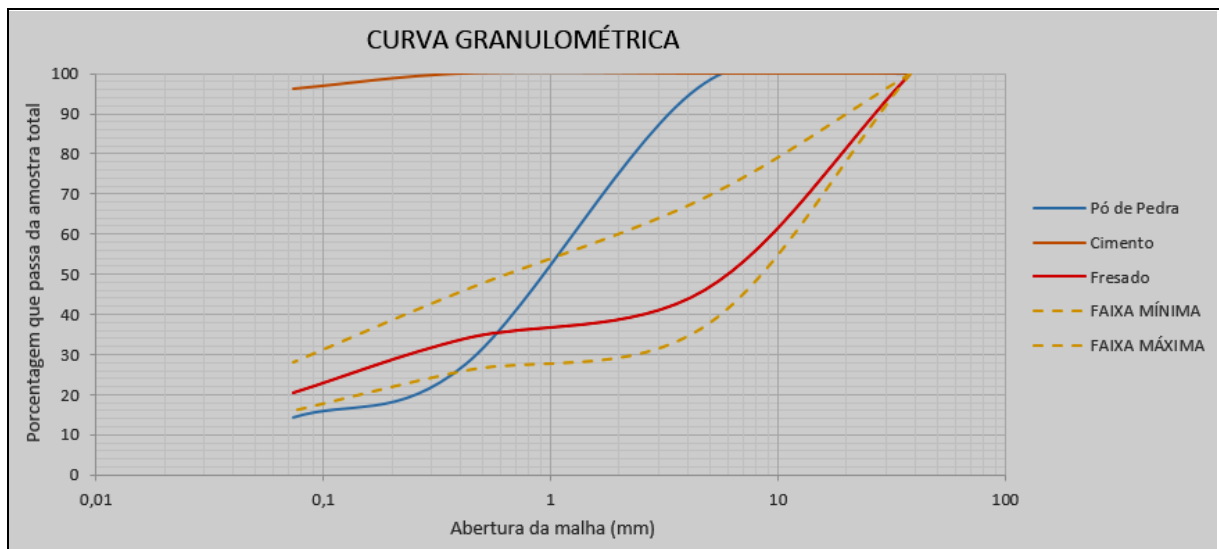
Tabela 6 – Faixa granulométrica de serviço

Peneiras	Abertura (mm)	FAIXA GRANULOMÉTRICA (%)	
		MÍNIMA	MÁXIMA
1 1/2"	38,1	100	100
4	4,75	37	69
40	0,42	26	46
200	0,074	16	28

Fonte: Norma DER/SP ET-DE-P00/35.

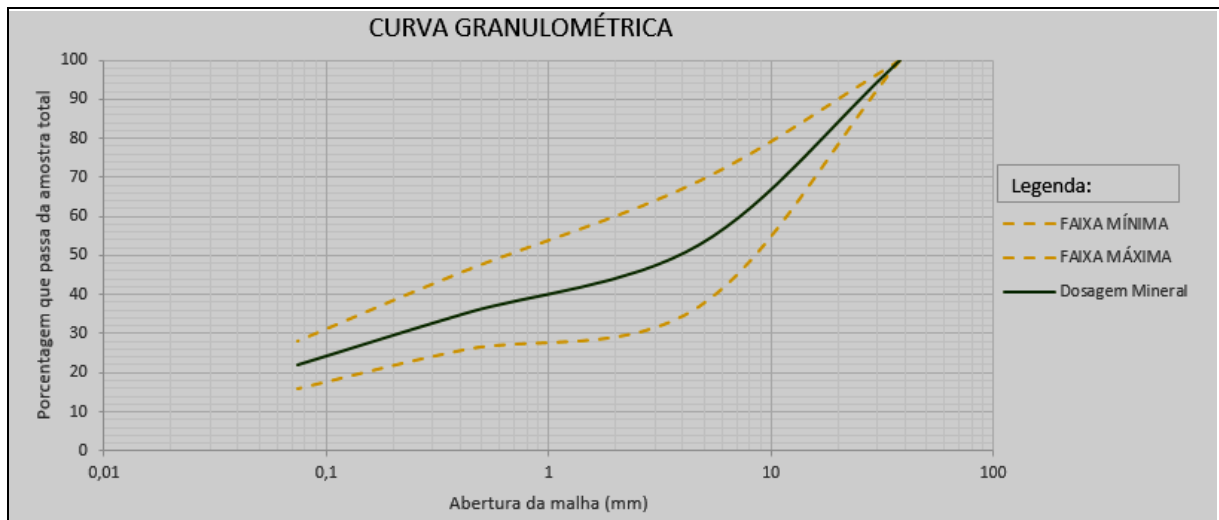
Verifica-se na figura 15 que o gráfico da curva granulométrica do material fresado sem adição de cimento Portland e agregado adicional (pó de pedra) consegue realizar o enquadramento na faixa granulométrica por si mesmo. Entretanto, realizou-se inicialmente o enquadramento com 87% de material fresado, 10% de pó de pedra e 3% de cimento Portland conforme a figura 16.

Figura 15 – Curvas granulométricas do material fresado na faixa de serviço.



Fonte: Adaptado de COPAVEL, 2009.

Figura 16 – Curva de dosagem granulométrica com 3% de CP II E 32; 10% de Pó de pedra e 87% de material fresado.



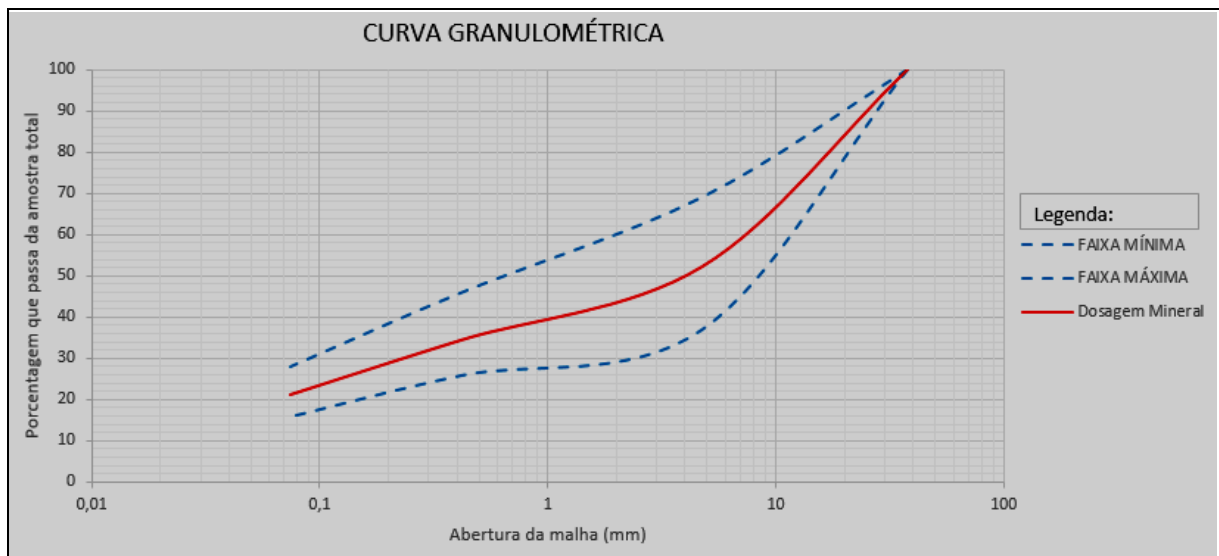
Fonte: Adaptado de COPAVEL, 2009.

Também se realizou a composição da mistura do material fresado com as respectivas dosagens:

- Dosagem com 86% de material fresado, com adições de 10% de pó de pedra e 4% de cimento Portland CP II E 32;
- Dosagem com 88% de material fresado, com adição de 10% de pó de pedra e 2% de cimento Portland CP II E 32;
- Dosagem com 83% de material fresado, com adição de 15% de pó de pedra e 2% de cimento Portland CP II E 32;
- Dosagem com 85% de material fresado, com adição de 10% de BGS (Brita Graduada Simples) e sem adição de cimento Portland.

Realizaram-se estudos complementares de compactação para determinação das massas específicas, umidade ótima, equivalente de areia da mistura e do pó de pedra e ensaios de tração por compressão simples e por compressão diametral aos 28 dias. Com base nos resultados destes ensaios, recomendou-se para o trecho A, compreendido entre as Estacas 334+13 e Estaca 340, a dosagem com 88% de material fresado, 10% de pó de pedra e adição de 2% de cimento Portland (CP II E 32).

Figura 17 – Curva de dosagem granulométrica com 2% de CP II E 32; 10% de Pó de Pedra e 88% de material fresado.



Fonte: Adaptado de COPAVEL, 2009.

4.2 Equivalente de areia

A empresa COPAVEL – Consultoria de Engenharia Ltda., realizou os ensaios de compactação, limites físicos e equivalentes de areia para as dosagens de forma a acompanhar o comportamento das misturas do material fresado com a adição de cimento Portland (CP II E 32).

O ensaio de equivalente de areia (EA) foi realizado de acordo com a metodologia da norma DNER-ME 054/97 apresentou os respectivos resultados conforme as tabelas 7 e 8 para o Pó de Pedra da Basalto 5 e base reciclada da pista experimental constituída por 87% de material fresado, mais 10% de Pó de Pedra e adição de 3% de cimento Portland (CP II E 32).

Tabela 7 - Ensaio de Equivalente de Areia do Pó de Pedra – (Basalto 5)

Nº Provena	5	6	5	6	5	6
Altura do Floculado + Areia (h1)	20,1	21,6	20,1	21,6	20,1	21,6
Altura da Areia (h2)	11,7	11,7	11,5	11,4	11,7	11,7
Equivalente de Areia (EA)	58,2	54,2	57,2	52,8	58,2	54,2
Média Global do EA (%)	55,8					

Fonte: Adaptado de COPAVEL, 2009.

Tabela 8 - Ensaio de Equivalente de Areia da Base Reciclada (87% Fresado+10% Pó de Pedra+3% CP II E 32)

Nº Proveta	5	6	5	6	5	6
Altura do Floculado + Areia (h1)	24	24	24	24	24	24
Altura da Areia (h2)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,6	4,5
Equivalente de Areia (EA)	18,8	18,8	18,8	18,8	19,2	18,8
Média Global do EA (%)	18,8					

Fonte: Adaptado de COPAVEL, 2009.

4.3 Primeira técnica de reciclagem de pavimento flexível *in situ* – trecho experimental A

A primeira técnica de reciclagem de pavimento flexível *in situ* com adição de cimento Portland para utilização em camada de base, em trecho da Rodovia Visconde de Porto Seguro/SP ocorreu entre as Estacas 334+13 e 340, sob a supervisão do Grupo Ane e com uso da Usina Móvel KMA 200.

Estudos preliminares de caracterização dos materiais foram realizados anteriormente ao processo de reciclagem na usina móvel para melhor definir a dosagem de base reciclada com a incorporação de cimento Portland, do tipo CP II E 32 e correção granulométrica com o pó de pedra.

Os materiais pétreos utilizados no trecho experimental são de dois tipos, isto é, o material fresado dos revestimentos asfálticos envelhecidos provenientes da Rodovia SP 332 e o outro pó de pedra, oriundo da Pedreira Basalto 5, que foram adicionados na mistura asfáltica reciclada.

O material fresado foi obtido pelo equipamento WR 2500 S que é uma recicladora a frio compacta de alto desempenho para reciclar estruturas completas de rodovias e, ao mesmo tempo, adiciona agentes ligantes como cimento, emulsão betuminosa ou espuma de asfalto. Este equipamento é responsável pelo estudo da segunda técnica de reciclagem deste trabalho com a adição de cimento Portland a ser detalhado mais a diante.

4.3.1 Processo executivo – trecho experimental A

Iniciou-se no dia 26/03/2010 a remoção da capa asfáltica e da base nos trechos compreendidos entre as estacas 334+13m e estaca 345. Realizou-se a escarificação e

compactação do subleito. Após a compactação efetuou-se a pintura de ligação com emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida do tipo RR-2C. A aplicabilidade da emulsão asfáltica RR-2C foi utilizada por espargimento e penetração invertida do ligante para o recebimento da base reciclada. A estocagem do material fresado ficou ao lado da usina instalada no canteiro de obras para dar início ao projeto de dosagem da mistura (base reciclada).

A usina móvel de reciclagem a frio KMA 200 foi rebocada por um cavalo mecânico, possibilitando que fosse instalada o mais próximo possível de onde seria aplicada a base reciclada, reduzindo com isso, o custo para o transporte. Ao chegar ao local de usinagem, o cavalo mecânico foi liberado e no intervalo de tempo aproximado de uma hora e meia, encerrou-se a montagem e instalação da usina para a operação.

A cada deslocamento da usina móvel KMA 200, deve-se realizar a calibragem para o início dos trabalhos. Realizada a calibragem, efetua-se o abastecimento dos dois silos da usina.

Figura 18 – a) Usina KMA 200 sobre cavalo mecânico; b) Operador calibrando a usina.



Fonte: FREMIX, 2014.

O primeiro silo foi abastecido com o material fresado da pista experimental. O material fresado com diâmetro superior a 50,0 mm foi prontamente descartado pela peneira vibratória localizada na entrada de cada silo e, este material pode ser reaproveitado posteriormente com o auxílio de um britador.

Figura 19 – a) Abastecimento do silo com pá carregadeira (material fresado); b) Peneiramento do fresado retido com diâmetro superior.



Fonte: FREMIX, 2014.

O segundo silo, situado no lado oposto, é abastecido por pó de pedra para a correção granulométrica do material fresado na faixa de reciclagem do projeto. Neste processo deve-se ter um mínimo de 5% de material passando pela peneira de número 200, isto é, abertura de malha de 0,074 mm.

Figura 20 – a) Segundo silo recebendo pó de pedra; b) Materiais sobre a correia para a dosagem.



Fonte: FREMIX, 2014.

Vale ressaltar que os silos são abastecidos simultaneamente para que não haja interrupção na usinagem. A saída do material dos silos é volumétrica e sob a correia de transferência existem células de carga que realizam a pesagem do material para o controle de dosagem.

A introdução do cimento Portland na mistura é feita por meio de um tubo dotado de uma rosca sem fim, sendo o material depositado sobre os agregados na entrada do misturador (do tipo *pug-mill*). O material reciclado é carregado em caminhões basculantes por meio de correia transportadora.

Figura 21 – a) Adição do CP II E 32; b) Rosca sem fim; c) Dosagem do cimento nos materiais; d) Carregamento de caminhão basculante com material dosado de cimento.



Fonte: Fremix (2014).

O painel de controle da usina móvel encontra-se instalado numa cabine fechada e climatizada que oferece total visibilidade da operação. Através deste painel se tem o controle da dosagem dos materiais. O *display* mostra simultaneamente o processo de reciclagem e o volume produzido, com armazenagem de dados que podem ser resgatados ao término do dia ou no final da obra (FREMIX, 2014).

Para o trecho da estaca 334+13m à estaca 340, projeto de dosagem da mistura com 88% de material fresado, com adição de 2% de cimento Portland (CP II E 32) e correção granulométrica com 10% de pó de pedra.

No dia seguinte, 27 de março de 2010, ocorreu a conclusão dos serviços iniciados no dia anterior com uso da vibro-acabadora. O trecho em estudo recebeu a aplicação de capa asfáltica com 3,0 cm de CAUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente) que foi avaliado por meio de ensaios realizados pelas empresas de controle tecnológico, pertencente à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE).

A liberação para o tráfego de veículos ocorreu após três dias de execução dos serviços para a cura do cimento Portland (CP II E 32), e foram realizados ensaios de teor de umidade pelo método da frigideira e com uso do umidímetro (aparelho de Speedy), ensaios de deflexões por meio da viga de Benkelman e pelo FWD. Em todos os trechos da pista experimental SP 332 aplicou-se a técnica da reciclagem a frio *in situ* com a usina móvel KMA

200, utilizando-se a quantidade de 6.000,00 kg (120 sacos de 50 kg) de cimento Portland CP II E 32.

Uma grande vantagem da reciclagem em usina é que possibilita a avaliação do pavimento remanescente. Desta forma realizou-se na sequência programada uma “reperfilagem” deste trecho experimental constatando a necessidade de recuperação da base, isto é, tiveram que refazer toda a base, pois a mesma apresentou desagregação, além da realização de alguns reparos profundos em pontos localizados. A re-execução da base com aproveitamento do material existente com acréscimo de BGS (Brita Graduada Simples) na espessura de 20,0 cm foi efetuada em conformidade ao projeto inicial a fim de prolongar a vida útil do pavimento neste trecho experimental.

4.4 Segunda técnica de reciclagem de pavimento flexível *in situ* - trecho experimental D

A segunda técnica de reciclagem de pavimento flexível *in situ* com adição de cimento Portland para utilização em camada de base, em trecho da Rodovia Visconde de Porto Seguro/SP ocorreu entre as estacas 350 e 355, sob a supervisão da empresa PAVISAN.

Determinou-se o projeto de dosagem da mistura reciclada, como descrito anteriormente, isto é, com o enquadramento da curva granulométrica da dosagem em uma faixa específica de trabalho do DER-SP. A reciclagem foi realizada com 3% de teor de cimento Portland (CP II E 32) com a adição de 15% de bica corrida, proveniente da Pedreira Basalto 5, para a correção granulométrica.

O procedimento da reciclagem de pavimento asfáltico com adição de cimento Portland consistiu primeiramente na limpeza do pavimento asfáltico, isto é, na retirada de materiais impróprios (madeira, vidro etc.) que poderiam comprometer o desempenho estrutural ao ser fresado junto com as camadas do pavimento.

Distribuiu-se ao longo da pista, a bica corrida proveniente da Pedreira Basalto 5 (Campinas/SP) e com o auxílio da motoniveladora (PATROL) se consegue manter uma distribuição homogênea na espessura da camada e espalhamento na superfície plana. Após este procedimento, posicionaram-se os sacos de cimento Portland da Votoran (CP II E 32) no trecho da pista experimental e, de forma manual, realizou-se o espalhamento dos mesmos conforme a figura 22, a seguir.

Figura 22 – a) Recebimento dos sacos de cimento (CP II E 32); b) Espalhamento manual do cimento Portland sobre a pista experimental.



Fonte: BARROS; MERIGHI, 2011.

Para reduzir a perda de material pulverulento e minimizar o decréscimo do teor de umidade do agregado graúdo, empregou-se o Rolo Compressor Pé de Carneiro para compactar o cimento Portland, misturando-o um pouco com a bica corrida. Nesta etapa, pode-se conferir a altura de projeto por meio de abertura de um buraco de referência, para medições de profundidade das camadas.

Em seguida, iniciou-se o processo de fresagem da superfície do pavimento, na profundidade de projeto, por meio da recicladora Wirtgen 2500 S, conforme pode ser verificado na figura 23. A recicladora tritura a camada existente adicionando água à mistura por meio do caminhão pipa homogeneizando o material (CATERPILLAR, 2005). Coletou-se uma quantidade do material fresado para os ensaios laboratoriais de acompanhamento.

Figura 23 – a) e b) Recicladora WR 2500 S em operação; c) Camada com adição de CP II E 32 à esquerda e material reciclado à direita.



Fonte: Caterpillar, 2005.

Procedeu-se após a fresagem uma nova compactação, agora do material da base reciclada, com emprego do rolo compactador vibratório de aço com patas curtas e de pneu. Seguiu-se a regularização da camada de base reciclada com adição de CP II E 32 por meio da motoniveladora e o uso destes equipamentos serviu para evitar a desagregação e o despenamento da superfície.

Posterior a compactação, esperou-se um intervalo de tempo igual a 7 (sete) dias para a estabilização da base reciclada com adição de cimento Portland (cura) e aplicação da massa asfáltica. A operação de distribuição da massa asfáltica sobre a pista do trecho experimental foi feita por meio da vibroacabadora, vista na figura 24 e, com a liberação do tráfego sobre a pista experimental ocorrendo após algumas horas.

Figura 24 a) Compactação da camada com rolo pé de carneiro; b) e c) Vibroacabadora em operação na pista experimental.



Fonte: BARROS; MERIGHI, 2011.

Esta segunda técnica de reciclagem de pavimento flexível *in situ* com adição de cimento Portland foi aplicada em uma área de 750 m² e com o respectivo consumo total de materiais:

- Cimento Portland (CP II E 32): Utilizou-se a quantidade de 4.350 kg (87 sacos de 50 kg) com rendimento de um saco de cimento CP II E 32 a cada 80 cm para meia pista experimental. Ao todo neste trecho utilizou-se 12.400 kg (248 sacos de 50 kg);
- Bica corrida da Pedreira Basalto 5: A quantidade de 61.800 kg, espalhado na pista com espessura de 4,5 cm;
- Pó de pedra para a capa selante: Uso de 87.000 kg;
- CAP 50-70: Consumo de 10.000 kg.

Após a reciclagem da base, houve uma colocação de 4 cm de capa asfáltica como revestimento.

4.5 Recicladora Wirtgen 2500 S

A recicladora Wirtgen 2500 S foi projetada para fazer a reciclagem de pavimentos *in situ* e a estabilização de solos. O equipamento consiste em um chassi apoiado sobre quatro pneus independentes e tracionados por sistema hidráulico, com peso máximo de deslocamento de 320 kN, com dimensões de largura máxima de trabalho igual a 2.438 mm e rotor de fresagem com alcance de profundidade até 500 mm.

No mercado se pode encontrar equipamentos com largura da plataforma de trabalho com 3.048 mm. As principais características referem-se à velocidade de avanço que pode ir de 15 m/min até 200 m/min quando está somente se deslocando. A velocidade de arraste depende do tipo de material a ser cortado/fresado e da carga de serviço. A figura 25 mostra o dispositivo de corte da recicladora Wirtgen 2500 S, com 216 “bits” dispostos em forma de “V”.

Figura 25 - Disposição em “V” das ferramentas de corte da recicladora Wirtgen 2500 S.



Fonte: WIRTGEN, 1999.

4.6 Compactação do material reciclado para camada de base

Realizou-se no dia 25 de março de 2010, as coletas e os ensaios de compactação dos materiais para as bases recicladas dos trechos C (estaca 345 a estaca 350) e D (estaca 350 a

estaca 355), mas, somente no dia 27 de março de 2010, as coletas de amostras e ensaios de compactação do trecho A (estaca 334+13m a estaca 340) nesta ordem respectiva, por meio da norma NBR 7182/86.

Utilizou-se a energia de compactação do proctor modificado, com 55 golpes por camadas, em um total de cinco camadas, e com o reuso de material dos trechos experimentais em estudo.

4.6.1 Compactação do trecho experimental A

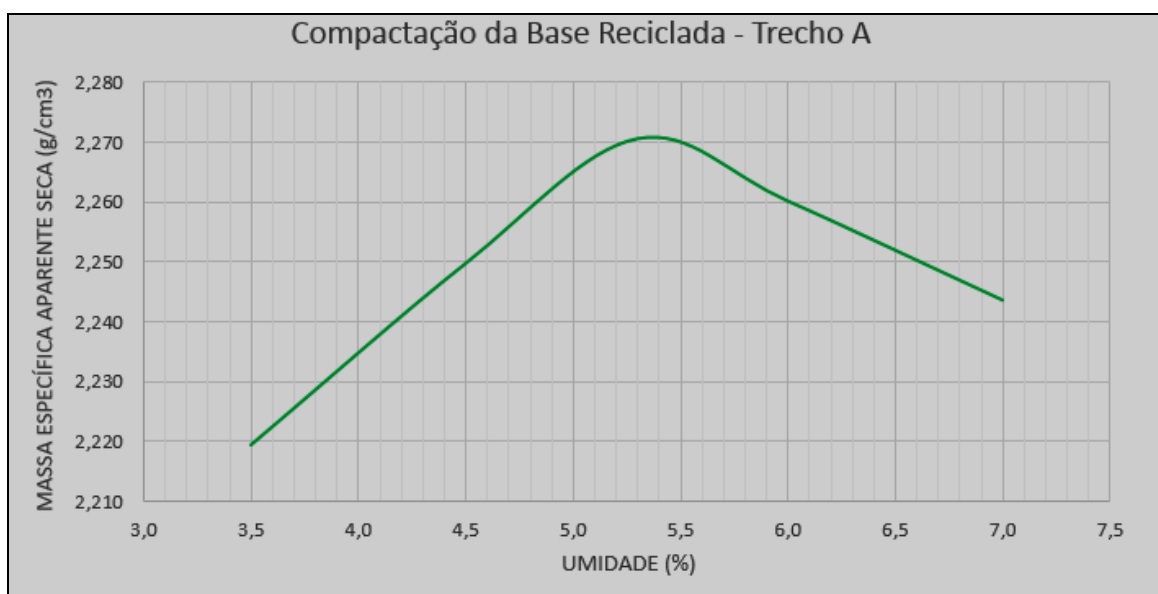
A tabela 9 apresenta os dados obtidos do ensaio de compactação do trecho experimental A em estudo e a figura 26 o gráfico da curva de compactação com a obtenção das massas específicas aparentes seca igual a 2,27 g/cm³ no teor ótimo de 5,30%.

Tabela 9 – Ensaio de Compactação da Base Reciclada do Trecho A.

Umidade (%)	3,5	4,5	5,3	6,0	7,0
Ensaio	1	2	3	4	5
Massa do CP úmido + cilindro (g)	10315	10427	10510	10520	10530
Massa do CP úmido (g)	4764	4876	4959	4969	4979
Massa do CP seco (g)	4603	4666	4709	4688	4653
Massa Específica Aparente Seca (g/cm ³)	2,219	2,250	2,271	2,260	2,244

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 26 – Gráfico de Compactação da base reciclada do Trecho A.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

4.6.2 Compactação do trecho experimental D

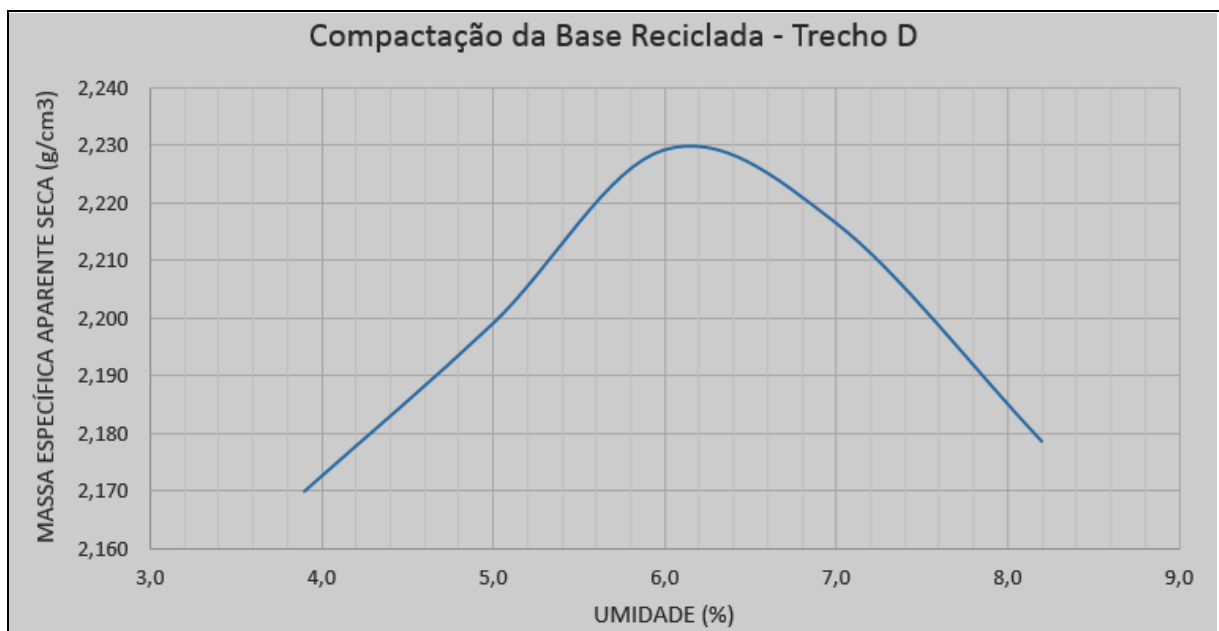
Da mesma forma, a tabela 10 apresenta os dados obtidos do ensaio de compactação do trecho experimental em estudo e a figura 27 o gráfico da curva de compactação com a obtenção das massas específicas aparentes, seca igual a 2,23 g/cm³ no teor ótimo de 6,20%.

Tabela 10 - Ensaio de Compactação da Base Reciclada do Trecho D.

Umidade (%)	3,9	5,0	6,0	7,0	8,2
Ensaio	1	2	3	4	5
Massa do CP úmido + cilindro (g)	10227	10340	10452	10470	10440
Massa do CP úmido (g)	4676	4789	4901	4919	4889
Massa do CP seco (g)	4500	4561	4623,6	4597	4518
Massa Específica Aparente Seca (g/cm ³)	2,170	2,199	2,229	2,217	2,179

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 27 – Gráfico de Compactação da base reciclada – Trecho D.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

4.6.3 Compactação do trecho experimental C

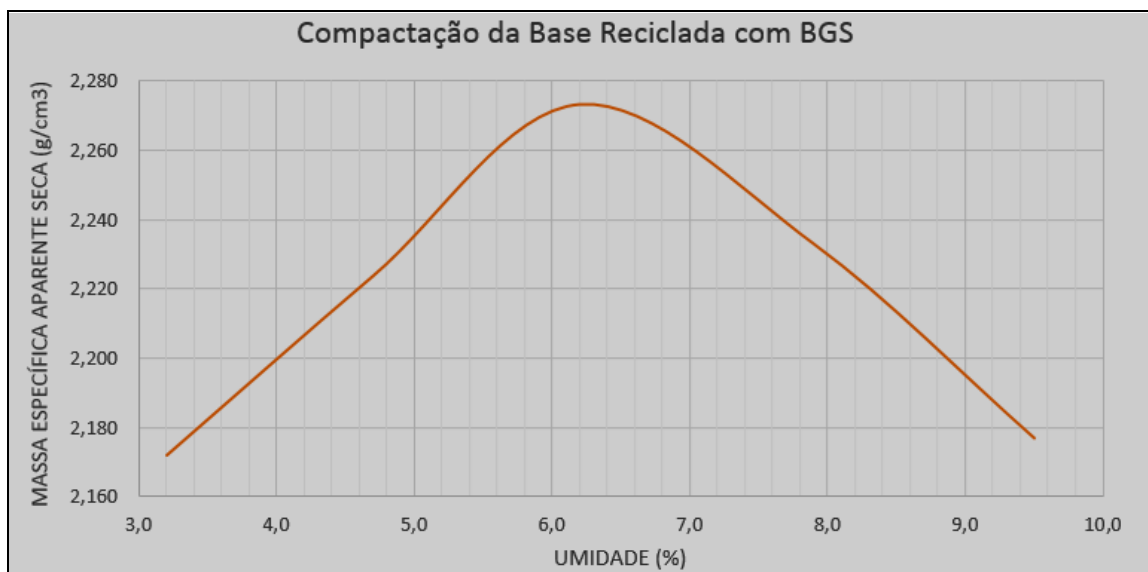
A fim de comparar os resultados, realizou-se a compactação do material reciclado da pista experimental do trecho C, sem a presença do aglomerante hidráulico, mas com a adição de 15% de brita graduada simples (BGS) obtendo-se do ensaio de compactação o gráfico da curva de compactação (tabela 11) com a obtenção das massas específicas aparente seca igual a 2,27 g/cm³ no teor ótimo de 6,40%.

Tabela 11 – Ensaio de Compactação da Base Reciclada com BGS – Trecho C.

Umidade (%)	3,2	4,7	6,2	7,9	9,5
Ensaio	1	2	3	4	5
Massa do CP úmido + cilindro (g)	10200	10380	10558	10548	10495
Massa do CP úmido (g)	4649	4829	5007	4997	4944
Massa do CP seco (g)	4505	4612	4714	4632	4515
Massa Específica Aparente Seca (g/cm ³)	2,172	2,224	2,273	2,223	2,177

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 28 - Gráfico de Compactação da base reciclada com BGS do Trecho C.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

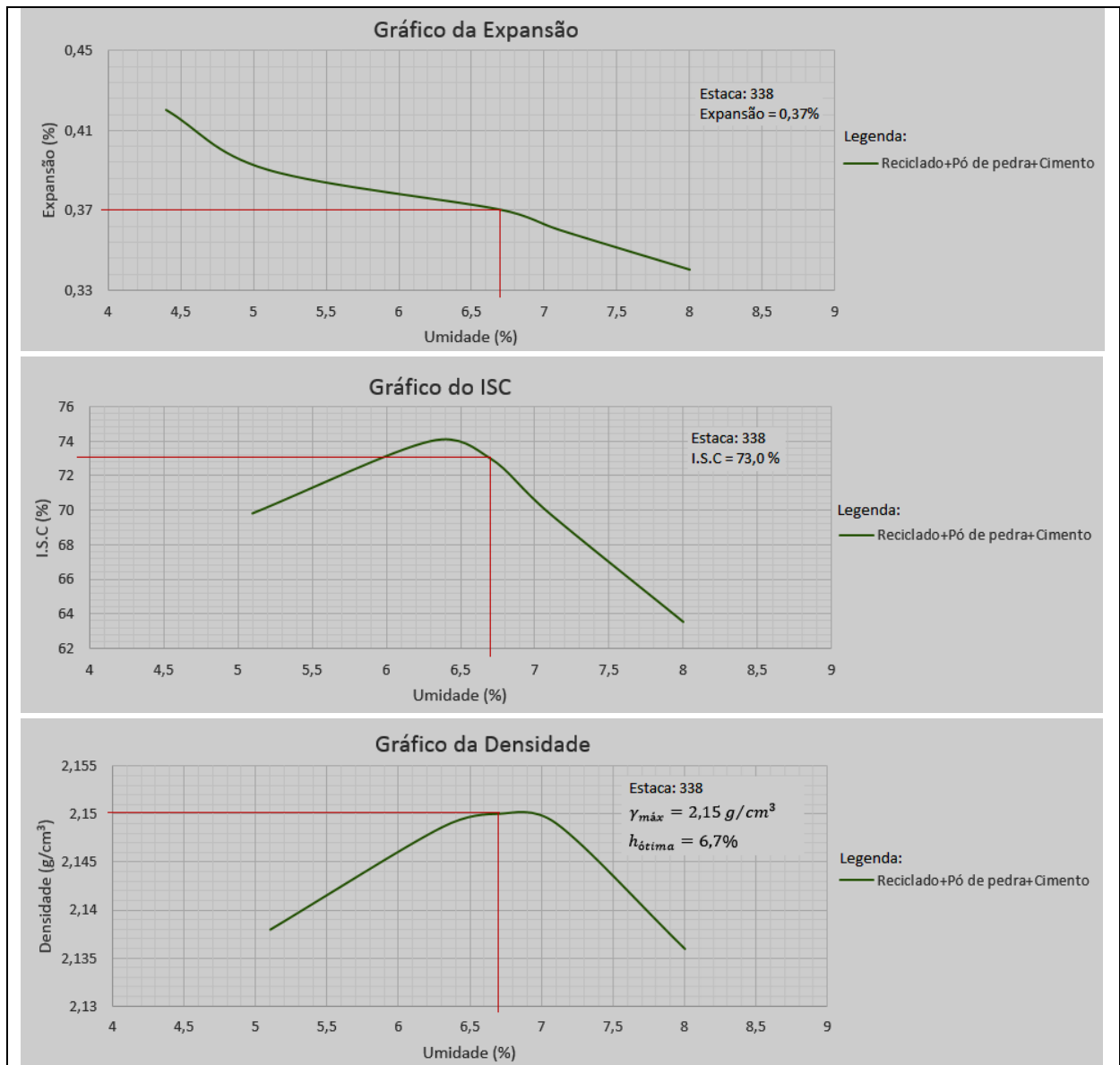
4.7 Índice de Suporte Califórnia – ISC

Empregou-se o ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) para verificar a resistência e a estabilidade do material reciclado com a adição de cimento e de agregados (BGS e pó de pedra). O ISC é definido como uma porcentagem da resistência de um material padrão, obtida pela penetração de um pistão de 5,0 cm de diâmetro, numa velocidade

padronizada, num corpo de prova compactado pelo ensaio de Proctor, em cilindro de seis polegadas de diâmetro e disco espaçador. O corpo de prova é imerso por 4 (quatro) dias, com uma sobrecarga de equivalente a 20 cm de pavimento e, somente depois realiza-se a ruptura, por penetração do pistão.

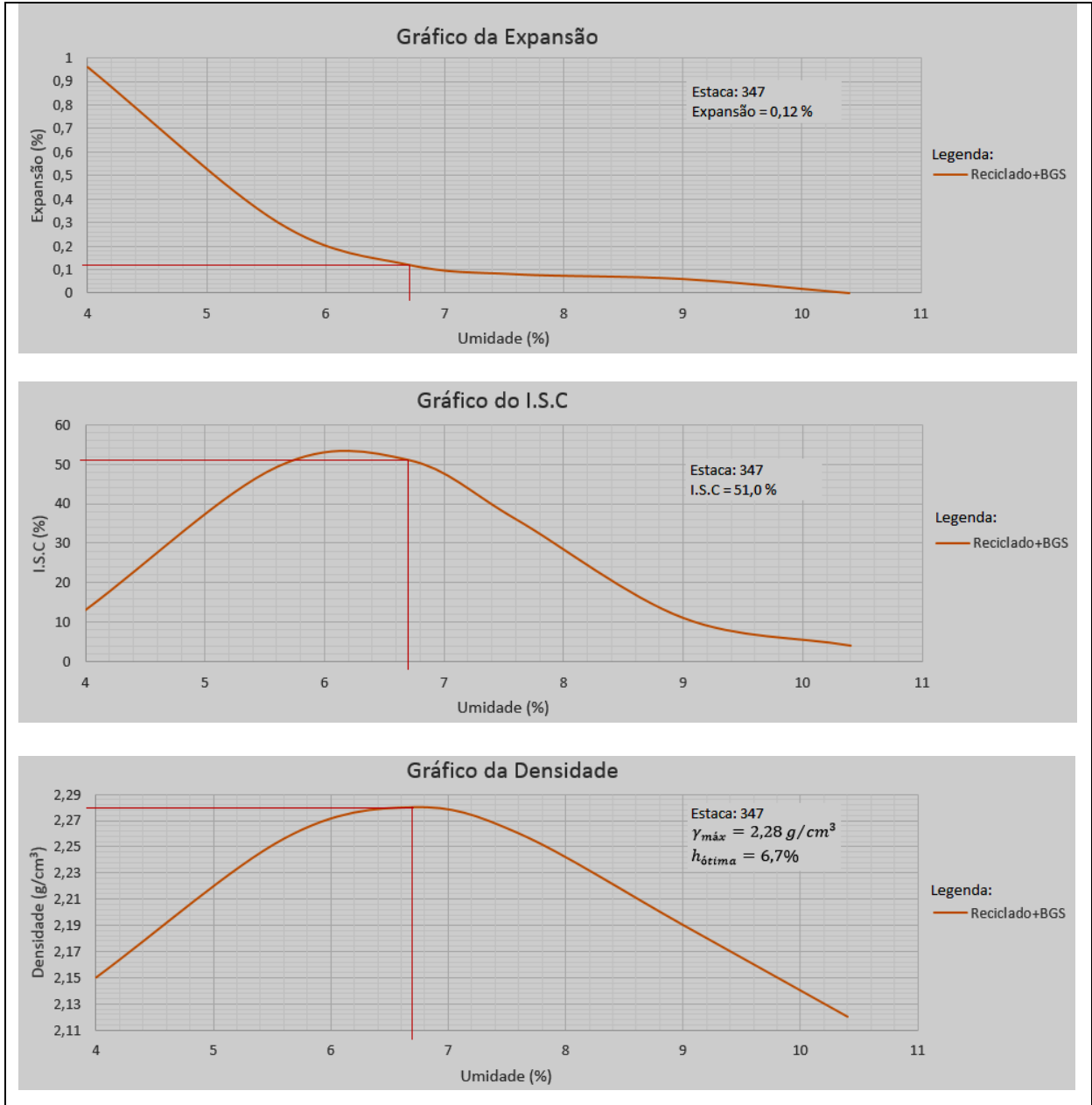
Executou o ensaio de ISC com a coleta dos materiais reciclados dos trechos da pista experimental das estacas 338, 347, 352 e 354, na energia de compactação modificada. A seguir são apresentados os gráficos de expansão, do Índice de Suporte Califórnia e da densidade em função dos teores de umidade.

Figura 29 – Gráficos do ISC do trecho experimental A constituído por: 2% de CP II E 32 e 10% de material reciclado.



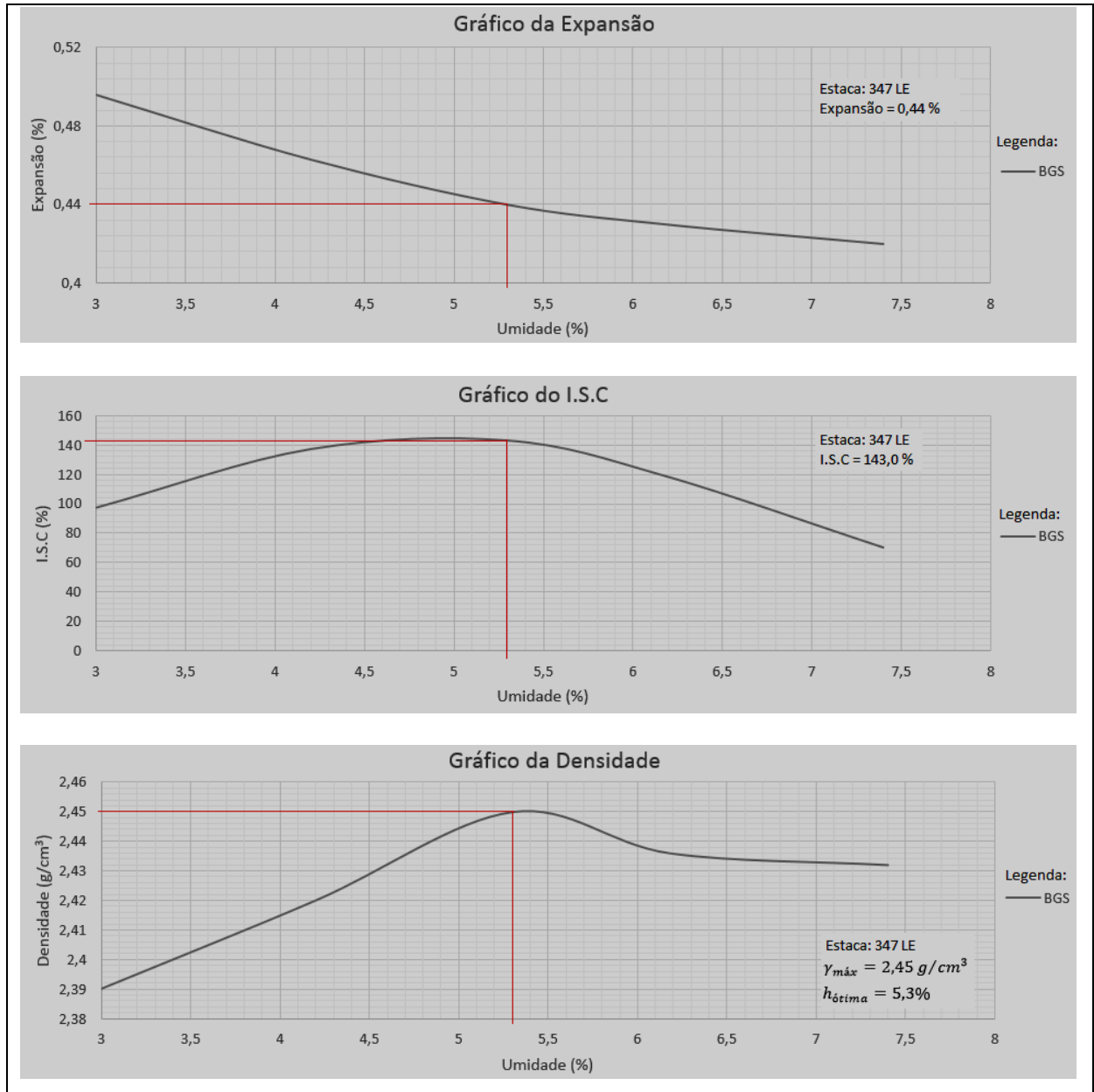
Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 30 - Gráficos do ISC do trecho experimental C constituído por: 15% de BGS para o processo usual de reciclagem.



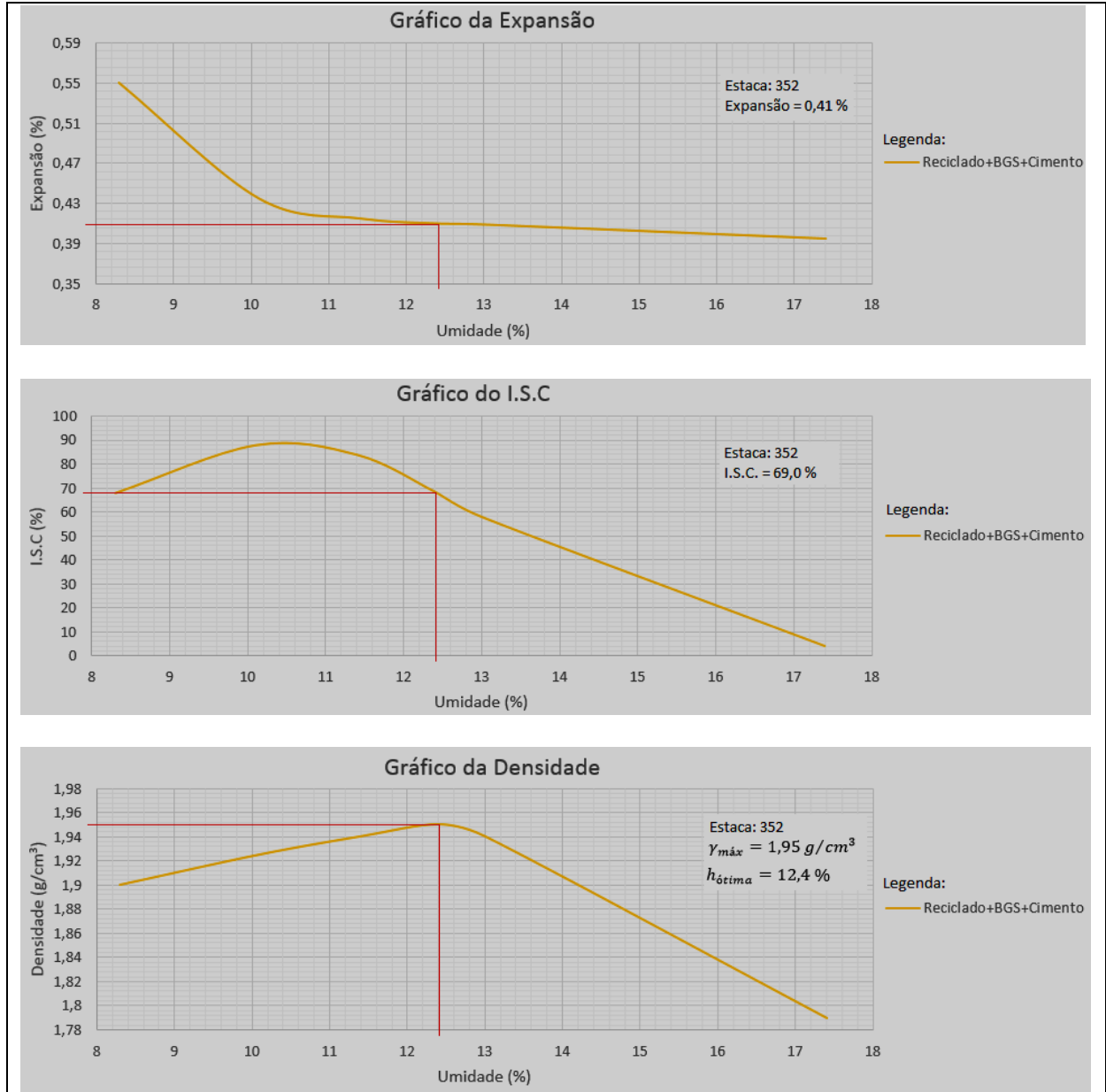
Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 31 - Gráficos do ISC do trecho experimental C constituído por: 15% de BGS para o processo usual de reciclagem no lado esquerdo da faixa.



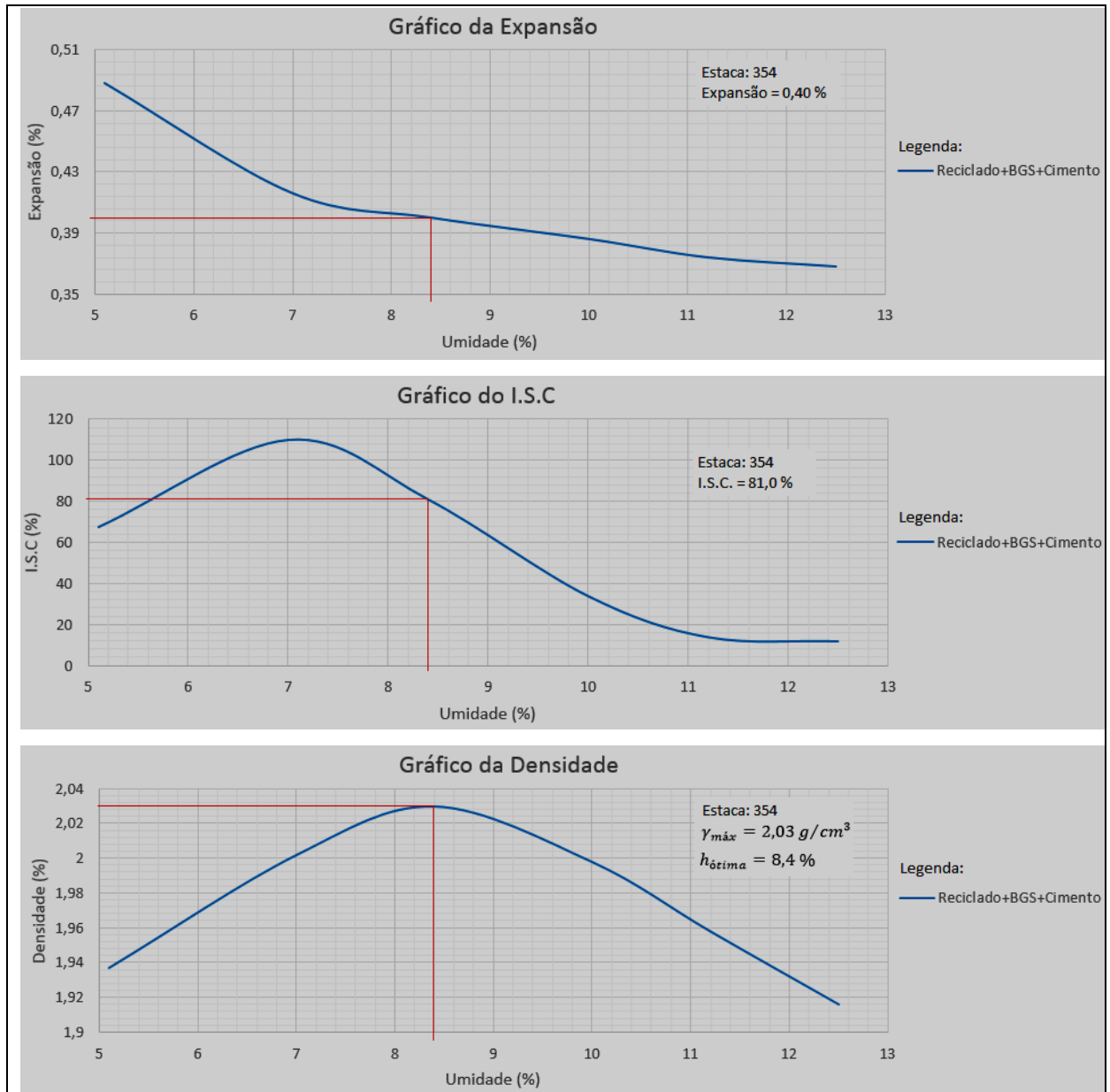
Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 32 - Gráficos do ISC do trecho experimental D constituído por: 3% de CP II E 32 e 15% de BGS para o processo usual de reciclagem.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 33 - Gráficos do ISC do trecho experimental D constituído por: 3% de CP II E 32 e 15% de BGS para o processo usual de reciclagem.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

4.8 Resistência à compressão axial

4.8.1 Resistência à compressão axial do trecho experimental A

Realizou-se o ensaio de compressão axial do material reciclado entre os trechos de estaca 334+13m à estaca 340, com 2% de teor de cimento Portland (CP II E 32) mais 10% de

correção granulométrica com o pó de pedra. O ensaio foi realizado conforme metodologia da norma NBR 5739/2007 com moldagem dos corpos de provas (CP's) no dia 23 de março de 2010 e ruptura aos 7 (sete) dias de idade.

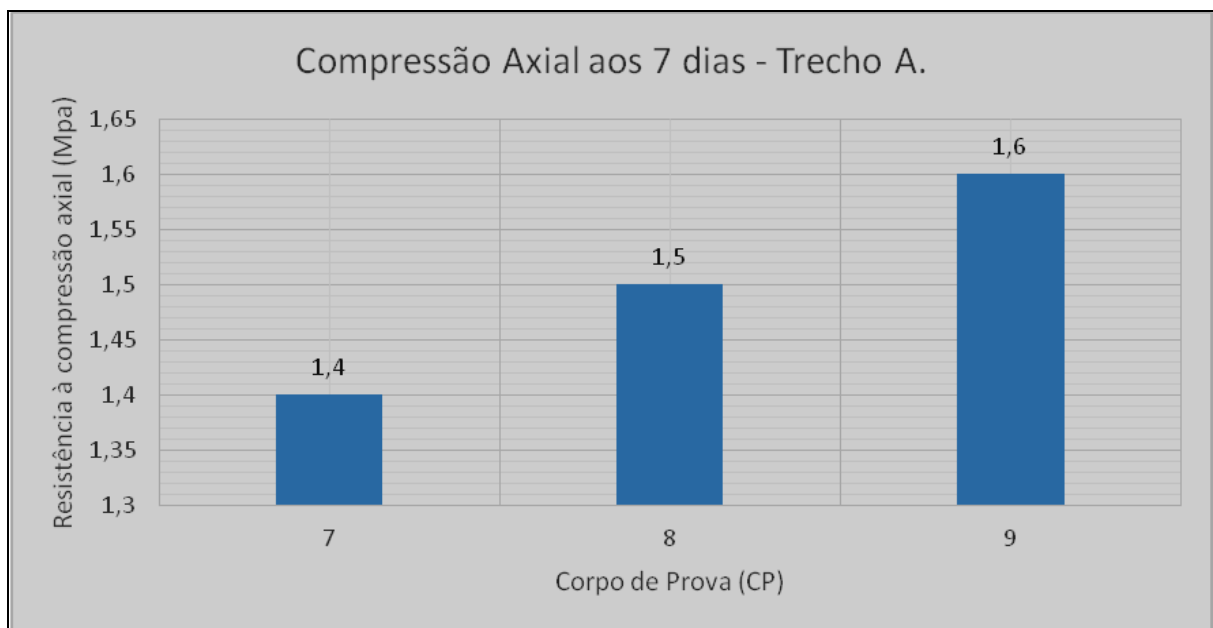
A metodologia da norma citada sugere que se molde um corpo de prova cilíndrico de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, existindo uma relação entre altura e diâmetro. A tabela 12 detalha as dimensões dos corpos de prova, o valor da carga aplicada e a obtenção da resistência à compressão axial em MPa.

Tabela 12 – Ensaio de Resistência à Compressão Axial do Trecho A.

CP	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CARGA (kgf)	DATA DO ENSAIO	IDADE (dias)	ÁREA DO CP (cm ²)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
							CALC.	FATOR CORR.	CORRIG .
07	100,0	212,0	1120	30/3/2010	7	78	1,4	1	1,4
08	101,0	211,0	1180	30/3/2010	7	80	1,5	1	1,5
09	100,0	210,0	1280	30/3/2010	7	78	1,6	1	1,6

Fonte: Adaptado de LENC, 2010.

Figura 34 – Resistência à Compressão Axial do trecho experimental A.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

4.8.2 Resistência à compressão axial do trecho experimental D

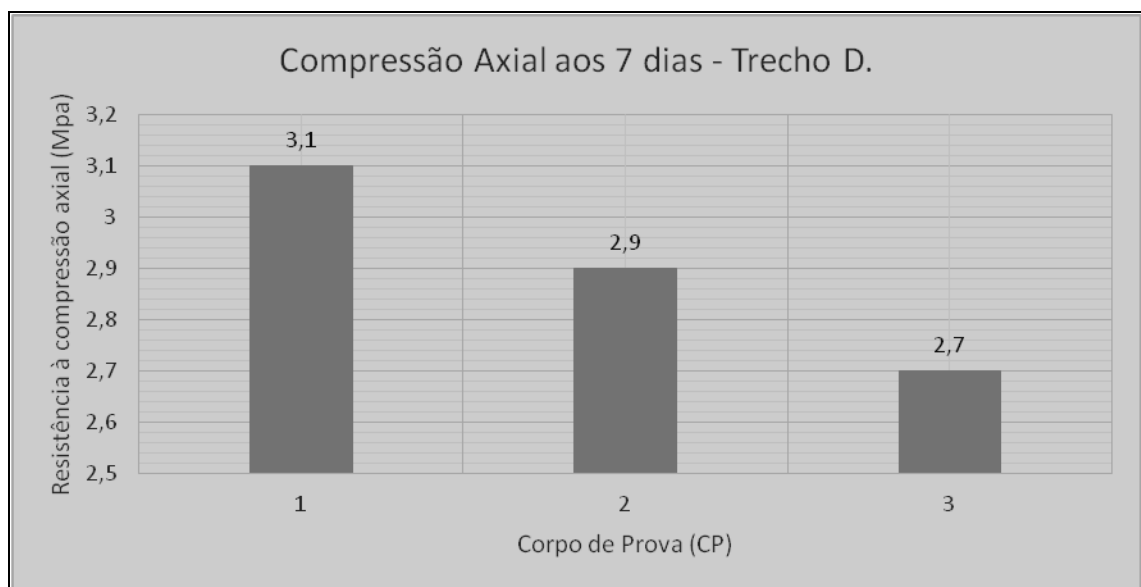
Da mesma forma se realizou o ensaio de compressão axial do material reciclado entre os trechos de estaca 350 e estaca 355, com a adição de agregados (15% em massa de bica corrida da Pedreira Basalto 5) mais 3% em massa de cimento Portland (CP II E 32). O ensaio foi realizado conforme metodologia da norma NBR 5739/2007 com moldagem dos corpos de provas (CP's) no dia 25 de março de 2010 e ruptura aos 7 (sete) dias de idade. A tabela 13 detalha as dimensões dos corpos de prova (CP), carga aplicada e a resistência à compressão axial em MPa.

Tabela 13 – Ensaio de Resistência à Compressão Axial do Trecho D.

CP	DIÂMETRO (mm)	ALTURA (mm)	CARGA (kgf)	DATA DO ENSAIO	IDADE (dias)	ÁREA DO CP (cm ²)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
							CALC.	FATOR CORR.	CORRIG.
01	101,0	210,0	2477	1/4/2010	7	80	3,1	1	3,1
02	101,0	210,0	2314	1/4/2010	7	80	2,9	1	2,9
03	101,0	210,0	2156	1/4/2010	7	80	2,7	1	2,7

Fonte: Adaptado de LENC, 2010.

Figura 35 – Resistência à Compressão Axial do trecho experimental D.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

4.9 Resistência à tração por compressão diâmetral - RT

4.9.1 Trecho experimental A

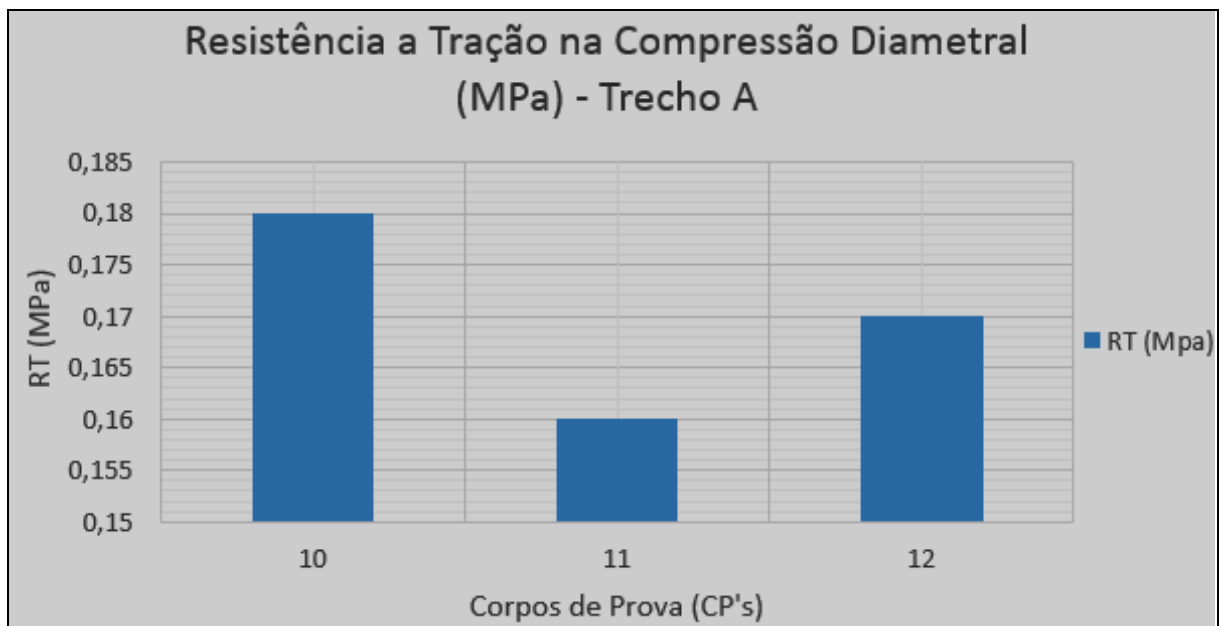
Moldou-se, no dia 27/03/2010, os corpos de prova cilíndricos para o ensaio de resistência à tração por compressão diâmetral (RT) para a ruptura aos sete dias, de acordo com a norma DNER ME 201/94. A tabela 14 apresenta os resultados obtidos e a figura 36 o gráfico de RT do trecho experimental A.

Tabela 14 – Ensaio de Resistência à Tração (RT) do trecho experimental A.

CP	DIMENSÕES (mm)		CARGA (kgf)	DATA DE ENSAIO	IDADE (dias)	ÁREA (cm ²)	RT (MPa)
	DIÂMET.	ALTURA					
04	100,0	200,0	566,0	1/4/2010	7	78,543	0,18
05	100,0	201	506,0	1/4/2010	7	78,543	0,16
06	100,0	200,0	535,0	1/4/2010	7	78,543	0,39

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 36 – Gráfico da RT do trecho experimental A aos 7 dias de cura do CP II E 32.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

4.9.2 Trecho experimental D

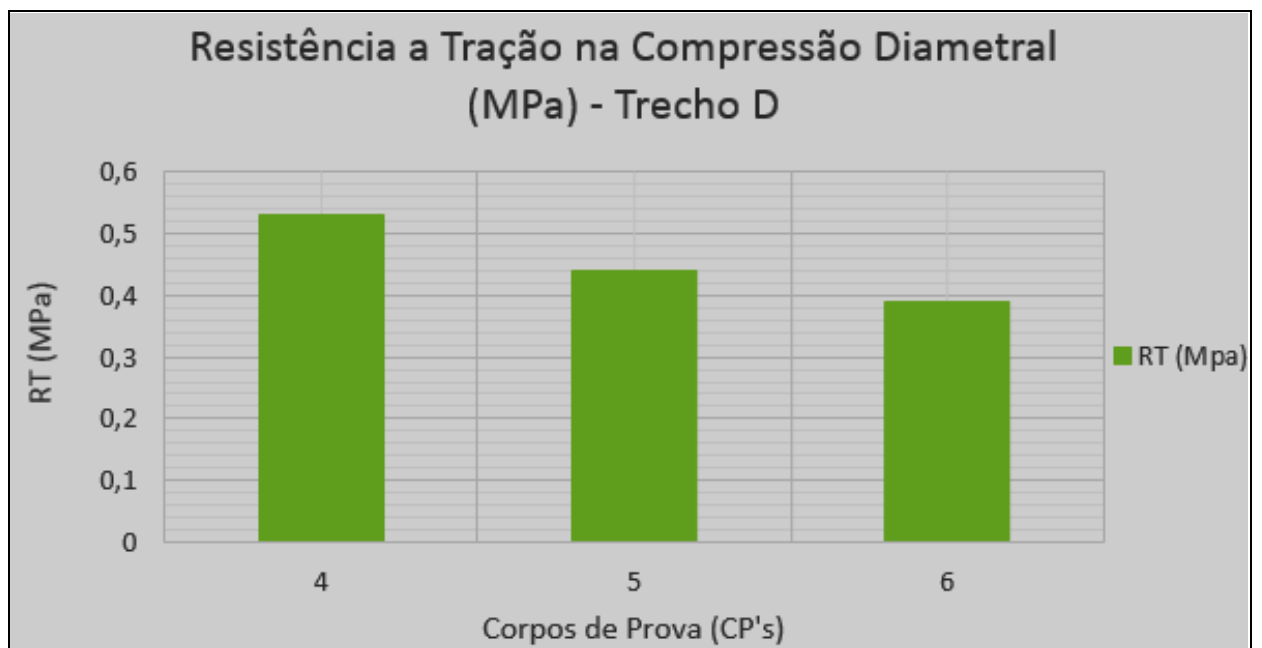
Analogamente se confeccionou corpos de prova cilíndricos da pista experimental D, isto é, do material reciclado, brita graduada simples, solo e cimento Portland conforme a norma citada anteriormente com obtenção dos valores da Resistência à Tração na compressão diametral (RT) expressos na tabela 15 e representados graficamente na figura 37.

Tabela 15 – Ensaio de Resistência à Tração (RT) do trecho experimental D.

CP	DIMENSÕES (mm)		CARGA (kgf)	DATA DE ENSAIO	IDADE (dias)	ÁREA (cm ²)	RT (MPa)
	DIÂMET.	ALTURA					
04	100,0	200,0	1662	1/4/2010	7	78,543	0,53
05	100,0	201	1395	1/4/2010	7	78,543	0,44
06	100,0	200,0	1220	1/4/2010	7	78,543	0,39

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 37 - Gráfico da RT do trecho experimental D aos 7 dias de cura do CP II E 32.



Fonte: Adaptado de LENC 2004.

4.10 Deflexões pela viga de Benkelman – ensaio de acompanhamento

Nos dias 24, 26 e 27 de março de 2010, foi realizado sobre as bases recicladas da pista experimental, nos sentidos de Valinhos-Campinas e Campinas-Valinhos, correspondente as faixas direita e esquerda desta pista simples, o ensaio para a determinação das deflexões recuperáveis por meio da Viga de Benkelman. O ensaio seguiu a metodologia da norma DNER –ME 024/94. Empregou-se neste ensaio, veículo com carga no eixo traseiro com rodas duplas de 8.200 kg, pressão nos pneus de 80 lb/poP (5,62 kgf/cm²) após carregamento.

A figura 38 mostra a realização do ensaio de deflexão com o uso da viga de Benkelman, constituída de um conjunto de sustentação em que se articula uma alavanca interfixa formando dois braços cujos comprimentos obedecem a relação de 4 para 1 (4:1).

Figura 38 – Ensaio para determinação das deflexões com a viga de Benkelman.



Fonte: Fortes *et al.*, 2011.

Nas tabelas 16 e 17 encontram-se as medidas da deflexão da base reciclada obtidas com a viga de Benkelman, logo após a reciclagem nas estacas do trecho experimental A para as faixas esquerda (LE) e direita (LD). Padronizou-se que as leituras de deflexão na faixa esquerda são realizadas nas estacas fracionárias e as leituras de deflexão na faixa direita (sentido Campinas) medidas sobre as estacas inteiras. Vale ressaltar que as leituras de deflexão correspondem à deflexão inicial (Do), no ponto de aplicação da carga, com o caminhão parado nessa posição.

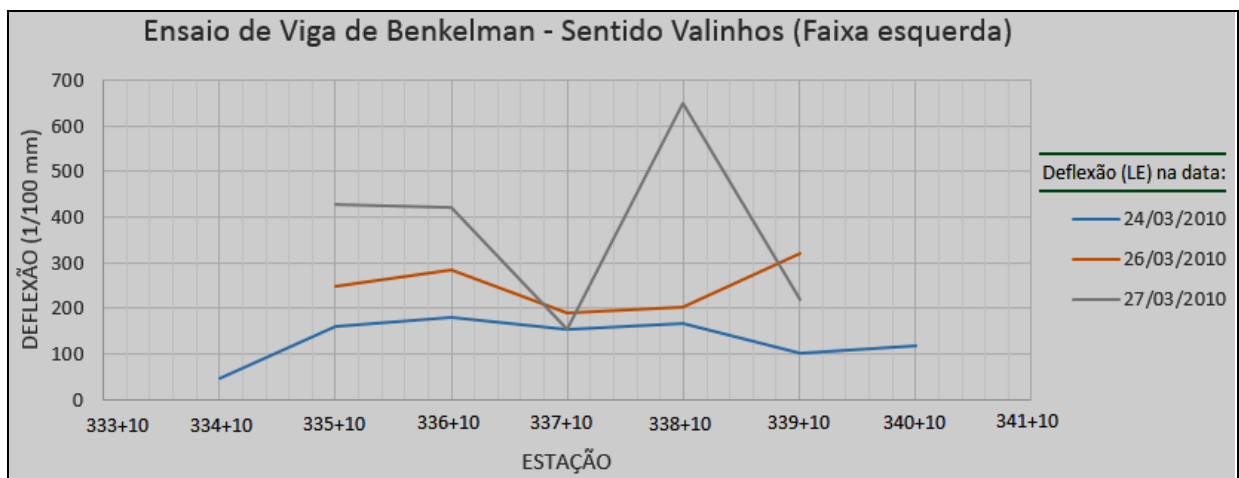
Tabela 16 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após a reciclagem no LE.

Sentido: Valinhos – Faixa esquerda (LE)			
ESTACA	Deflexão (1/100) mm		
	24/03/2010	26/03/2010	27/03/2010
334+10	48		
335+10	160	248	428
336+10	180	284	420
337+10	156	192	156
338+10	168	204	648
339+10	104	320	220
340+10	120		

Fonte: Adaptado de LENC, 2010.

Com os dados das deflexões iniciais (Do), pode-se organizar um gráfico para visualizar e analisar os valores deflectométricos chamados de Deflectograma, conforme as figuras 39 e 40. O ensaio com a viga de Benkelman neste trecho experimental apresentou o Raio de Curvatura (RC), no ponto médio do estaqueamento fracionado igual a 24,0; 52,0; e 130,0 metros respectivamente na ordem cronológica.

Figura 39 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho A (LE) após a base reciclada.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

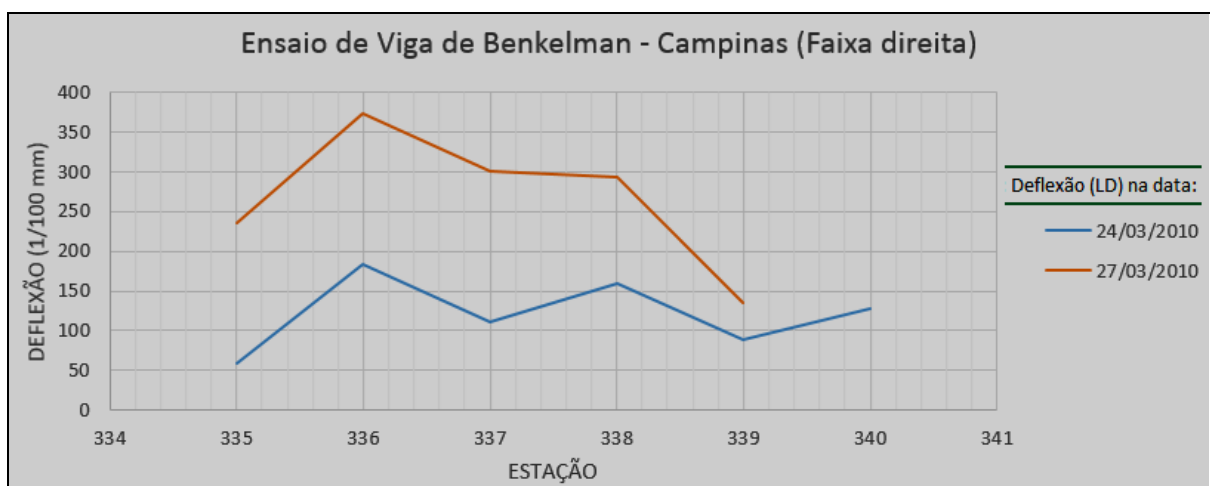
Tabela 17 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após a reciclagem no LD.

Sentido: Campinas – Faixa direita (LD)		
ESTACA	Deflexão (1/100) mm	
	24/03/2010	27/03/2010
335	60	236
336	184	372
337	112	300
338	160	292
339	88	136
340	128	

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

O ensaio com a viga de Benkelman neste trecho experimental apresentou o Raio de Curvatura (RC) médio igual a 46,0 e 65,0 metros (na estaca 339) respectivamente na ordem cronológica. A figura 40 representa o deflectograma do trecho A, sentido Campinas – Faixa direita.

Figura 40 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho A (LD) após a base reciclada.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Conforme análise dos valores deflectométricos e dos raios de curvatura do trecho experimental A, sentido Valinhos-Campinas, ocorreu a necessidade de realizar uma

intervenção, isto é, refez-se toda a base reciclada, pois a mesma apresentou muita desagregação, além da realização de alguns reparos profundos em pontos localizados.

A reexecução da base foi com o aproveitamento do material existente com acréscimo de brita graduada simples (BGS) com espessura de 20 cm e as tabelas 18 e 19 apresentam as medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após o intervalo de tempo de um a dois meses, nas estacas do trecho experimental A para as faixas esquerda (LE) e direita (LD).

Tabela 18 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após dois meses à reciclagem da base no LE.

Sentido: Valinhos – Faixa esquerda (LE)		
ESTACA	Deflexão (1/100) mm	
	12/04/2010	26/05/2010
335+10	180	104
336+10	180	100
337+10	136	68
338+10	132	64
339+10	60	68
340+10		84

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

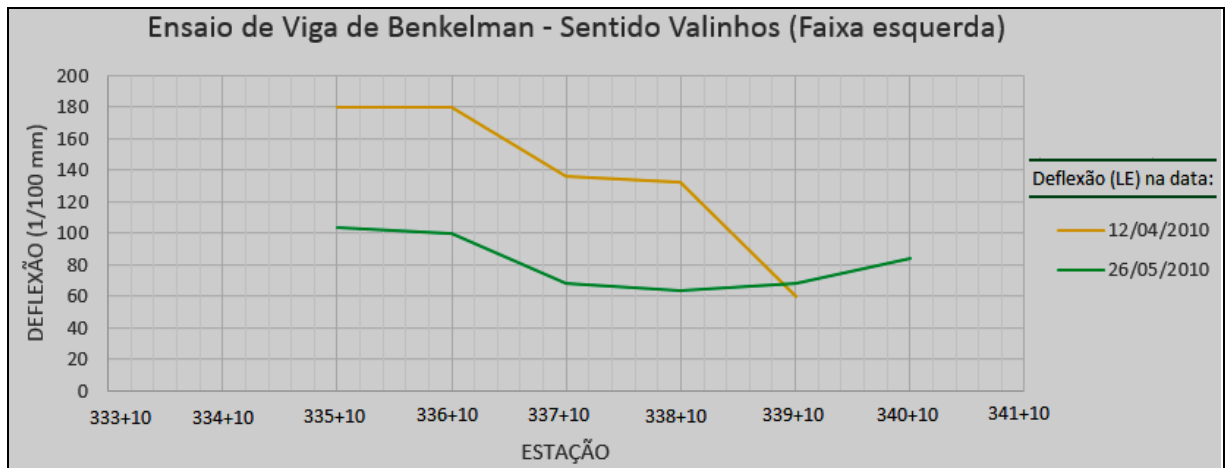
Tabela 19 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após dois meses à reciclagem da base no LD.

Sentido: Campinas – Faixa direita (LD)		
ESTACA	Deflexão (1/100) mm	
	12/04/2010	26/05/2010
335	140	88
336	136	84
337	132	64
338	128	64
339	120	76
340	92	80

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

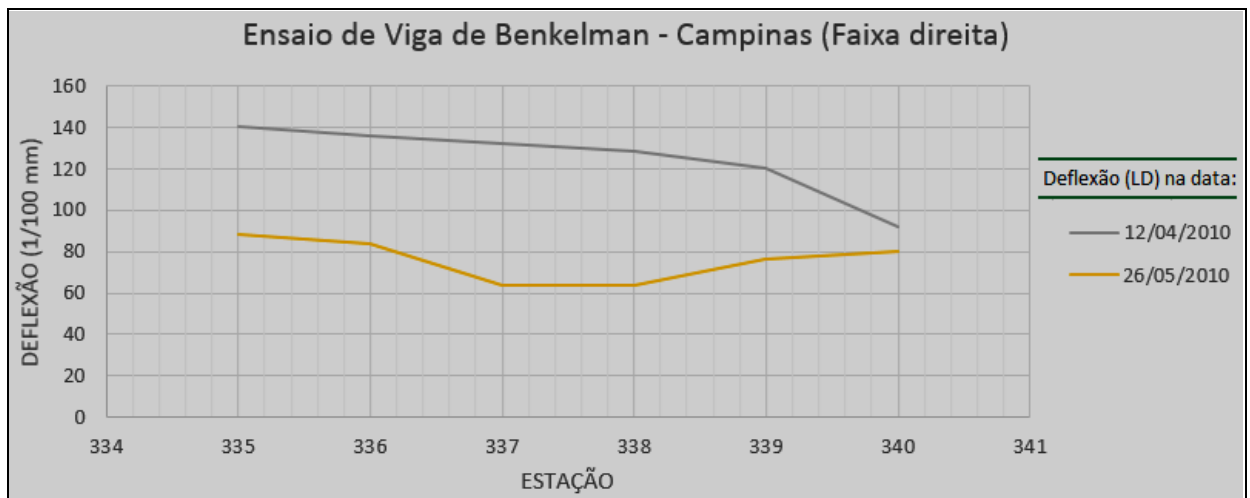
Com os dados das deflexões iniciais (D_0), pode-se organizar um gráfico para visualizar e analisar os valores deflectométricos chamados de Deflectograma, conforme as figuras 41 e 42. O ensaio com a viga de Benkelman neste trecho experimental apresentou o Raio de Curvatura (RC) na data final de 98m (estaca 336) e 260m (estacas 338 e 340).

Figura 41 – Gráfico de medidas das deflexões (D_0) após intervenção na base reciclada (LE).



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 42 – Gráfico de medidas das deflexões (D_0) após intervenção na base reciclada (LD).



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Com base na mesma metodologia, seguem as tabelas 20 e 21 com as medidas da deflexão inicial (D_0) da base reciclada obtidas por meio da viga de Benkelman logo após a reciclagem nas estacas do trecho experimental D, para as faixas esquerda (LE) e direita (LD) no sentido Valinhos e Campinas.

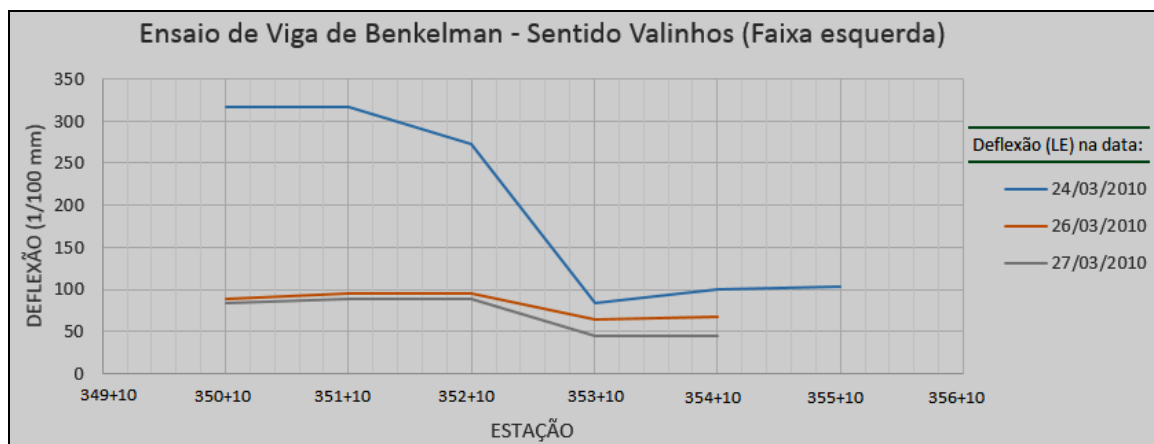
Tabela 20 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após a reciclagem no LE.

Sentido: Valinhos – Faixa esquerda (LE)			
ESTACA	Deflexão (1/100) mm		
	24/03/2010	26/03/2010	27/03/2010
350+10	316	88	84
351+10	316	96	88
352+10	272	96	88
353+10	84	64	44
354+10	100	68	44
355+10	104		

Fonte: Adaptado de LENC, 20040.

A evolução das medições dos Raios de Curvatura conforme ordem cronológica para a estaca 351+10 foram iguais a 17m e 195m.

Figura 43 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho A (LE) após a base reciclada.



Fonte: Adaptado de LENC, 20040.

Tabela 21 – Medidas da deflexão inicial (Do) com a viga de Benkelman após a reciclagem no LD.

Sentido: Campinas – Faixa direita (LD)		
ESTACA	Deflexão (1/100) mm	
	24/03/2010	27/03/2010
350	292	
351	288	60

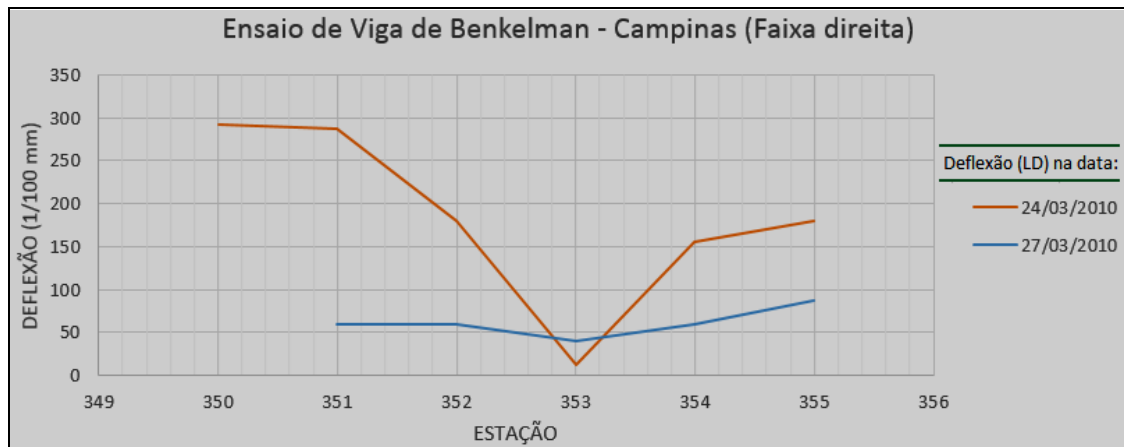
Cont.

ESTACA	Deflexão (1/100) mm	
	24/03/2010	27/03/2010
352	180	60
353	12	40
354	156	60
355	180	88

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Observou-se a medição do Raio de Curvatura igual a 71m na estaca 352, na data inicial da tabela acima.

Figura 44 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho D (LD) após a base reciclada.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Nas tabelas 22 e 23 se encontram as medidas da deflexão inicial (D_0) obtidas com a viga de Benkelman após o intervalo de tempo de um a dois meses, nas estacas do trecho experimental D para as faixas da esquerda (LE) e da direita (LD).

Tabela 22 – Medidas da deflexão com a viga de Benkelman após dois meses à reciclagem da base no LE.

Sentido: Valinhos – Faixa esquerda (LE)		
ESTACA	Deflexão (1/100) mm	
	12/04/2010	26/05/2010
350+10	68	60
351+10	52	64
352+10	72	64
353+10	32	36

Cont.

ESTACA	Deflexão (1/100) mm	
	12/04/2010	26/05/2010
354+10	28	36
355+10		28

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Os Raios de Curvatura medidos na data final do ensaio foram 391m (estaca 350+10), 260m (estaca 352+10) e 391m (estaca 354+10).

Tabela 23 – Medidas da deflexão com a viga de Benkelman após dois meses à reciclagem da base no LD.

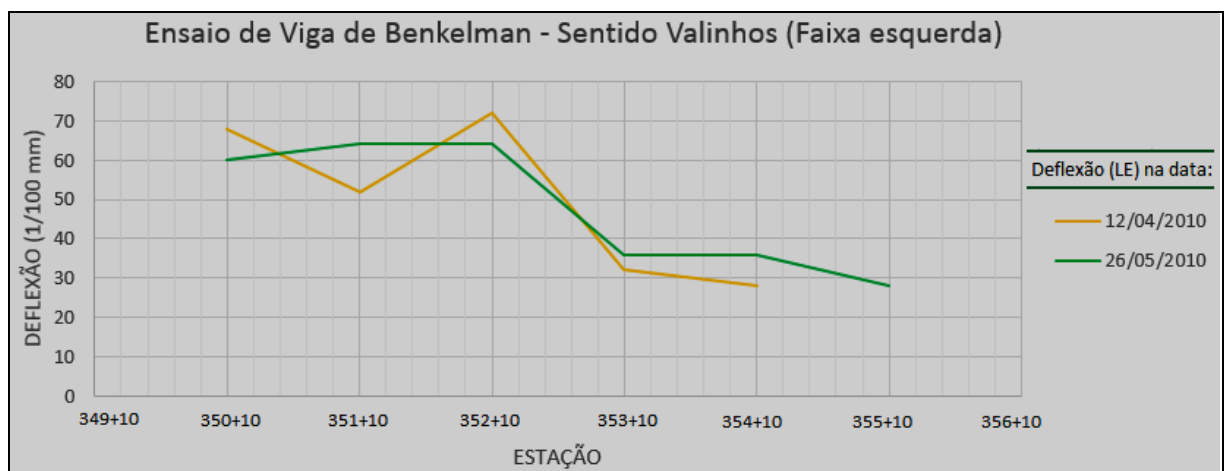
Sentido: Campinas – Faixa direita (LD)

ESTACA	Deflexão (1/100) mm	
	12/04/2010	26/05/2010
350		76
351	68	80
352	44	44
353	40	24
354	48	64
355	84	68

Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

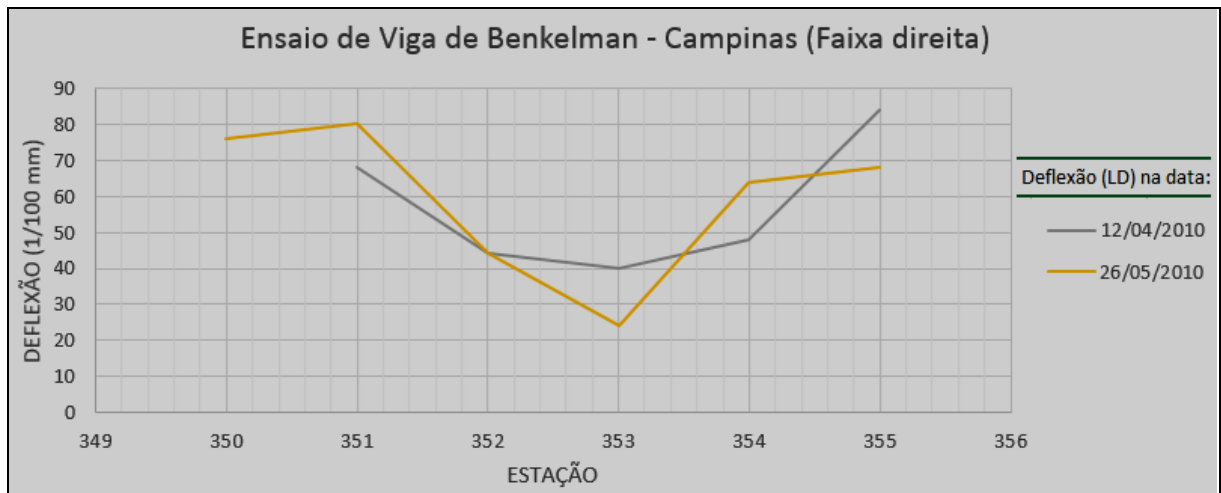
Os Raios de Curvatura (RC) obtidos no mês de abril/2010 foram iguais a 391m (estaca 352) e 260m (estaca 260).

Figura 45 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho D (LE) após dois meses da base reciclada – Trecho D.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

Figura 46 – Deflectograma da viga de Benkelman do trecho D (LD) após dois meses da base reciclada – Trecho D.



Fonte: Adaptado de LENC, 2004.

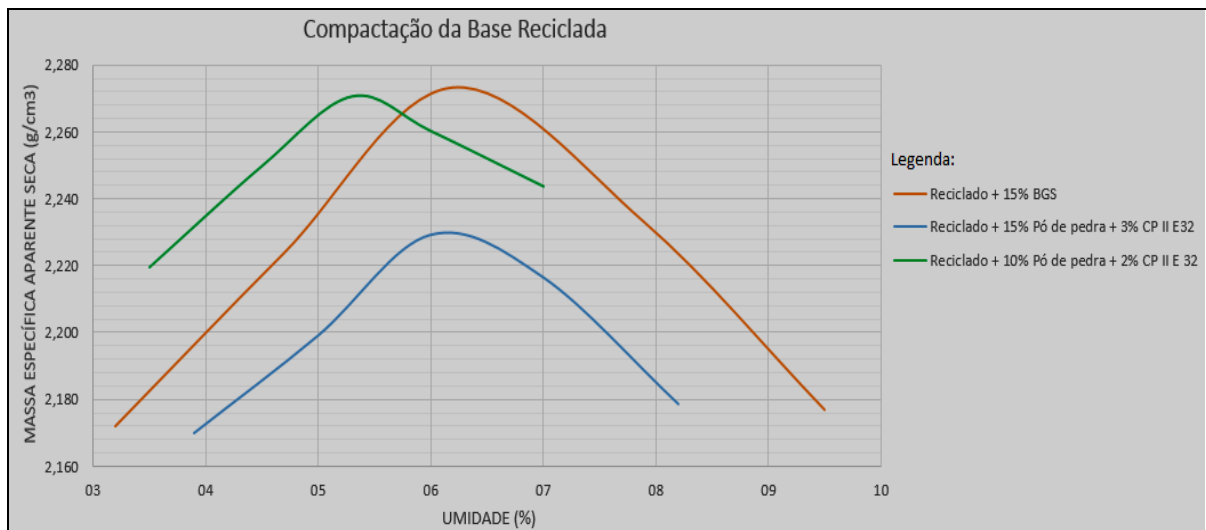
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios de Equivalente de Areia (EA) para o Pó de Pedra, fornecido pela empresa Basalto 5, atendeu ao valor exigido pela norma DNER-ME 054/97 que deve ser igual ou superior a 40%. Entretanto, o valor de EA igual a 18,8% para a base reciclada constituída de 87% material fresado, mais 10% Pó de Pedra e 3% de cimento Portland (CP II E 32) ficou abaixo da condição especificada pela norma citada.

Com relação à distribuição granulométrica da camada de revestimento betuminoso reciclada juntamente com a base existente, obteve-se com a energia de compactação do proctor modificado, o mesmo valor de massa específica aparente seca igual a $2,27 \text{ g/cm}^3$ nos trechos experimentais compreendidos pelas estacas 345 a 350 (material reciclado com 15% de BGS) e estacas 334+10 a 340 (reciclagem com 2% de teor de cimento CP II E 32 e 10% de correção granulométrica com pó de pedra), porém com teores de umidade ótima respectivos de 6,4% e 5,3%.

Entretanto, no trecho compreendido pelas estacas 350 a 355 (reciclagem com adição de 3% de teor de cimento CP II E 32 e 15% de correção granulométrica com pó de pedra) apresentou massa específica aparente seca igual a $2,23 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade ótima de compactação de 6,2%. A figura 47 mostra as curvas de compactação dos materiais reciclados nos trechos da pista experimental na energia modificada.

Figura 47 – Gráfico das curvas de compactação dos materiais reciclados na energia do proctor modificado.

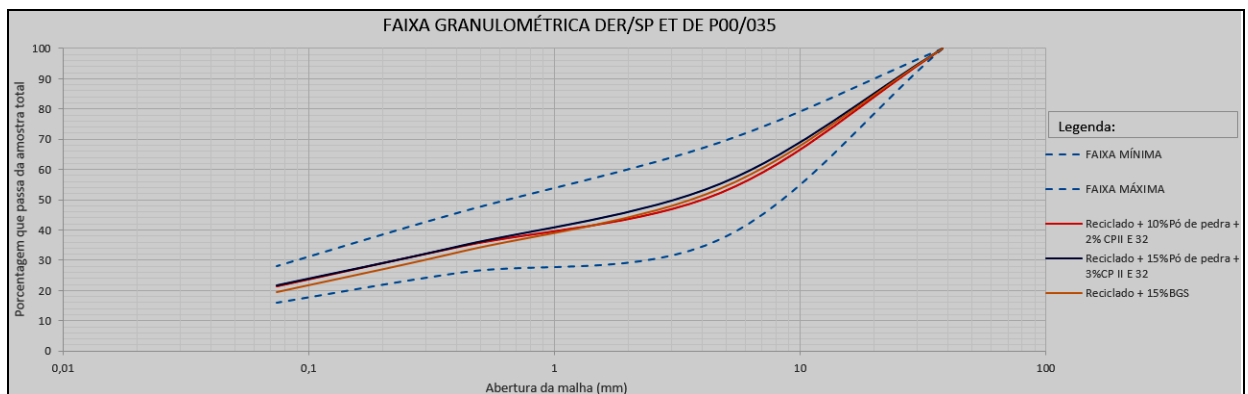


Fonte: Adaptado de COPAVEL, 2009.

Levando em consideração os gráficos das dosagens das misturas para a base reciclada com as adições dos agregados (BGS e pó de pedra) para a correção granulométrica (enquadramento na faixa do DER/SP) e de cimento Portland (CP II E 32), pode-se entender o comportamento dos resultados do ensaio de compactação na energia de proctor modificada.

A base reciclada composta por 10% de pó de pedra mais 2% de cimento Portland é a que mais se aproxima do material formado com a base reciclada constituída de 15% de brita graduada simples e sem a adição do aglomerante hidráulico e, também do limite mínimo da faixa granulométrica da norma do DER/SP conforme o gráfico da figura 48. Esta mistura com o emprego de apenas 2% de cimento Portland atende aos critérios técnicos de economia e estrutural com a redução do aglomerante hidráulico, menor quantidade de água de hidratação no teor de umidade, maior consumo do reciclado (cerca de 88,0%) e menor quantidade de agregado miúdo (apenas 10% de pó de pedra).

Figura 48 – Gráfico das bases recicladas na faixa granulométrica do DER/SP.



Fonte: Adaptado de COPAVEL, 2009.

Uma das características dos materiais reciclados é a falta de homogeneidade, especialmente quando o pavimento foi extensivamente remendado ou quando há significativas variações dos materiais da base e/ou espessuras variadas da capa asfáltica. Vale ressaltar que, quanto maior o percentual de capa asfáltica na mistura, maior será a dificuldade de compactação do material.

Como exemplo, citam-se alguns estudos que mostram que a natureza angular das partículas do revestimento triturado dificulta à formação de muitos vazios na estrutura do material. Outro inconveniente é a presença de filmes asfálticos nos agregados que diminui o ângulo de atrito interno das partículas. Esta característica é responsável pelo aumento do repique elástico durante a compactação e redução da energia efetivamente armazenada a cada

golpe. Além de tudo, quando há a formação de placas de asfalto durante a trituração do revestimento, a compactação também poderá ser prejudicada devido a necessidade de se aplicar maiores energias para atingir uma boa densificação do material.

Diante do exposto, é necessário que a compactação seja tratada como um dos aspectos mais importantes do processo executivo: Deverá ser efetuada na energia de compactação do proctor modificado e os rolos compactadores deverão reunir características que permitam que o fundo da camada seja bem densificado para assegurar uma boa resistência à fadiga. Na tabela 24 estão compilados os resultados do grau de compactação e do desvio do teor de umidade.

Tabela 24 – Grau de compactação (GC) e desvio do teor de umidade (ΔW)

ESTACA	TRECHO	CAMADA	GC (%)	ΔW (%)
334+10 a 340	A	Base = Reciclado + Pó de pedra + CP II E 32	87,80	-0,7
345 a 350	C	Reciclado = CBUQ + Solo + M.B	84,40	0,4
350 a 355	D	Reciclado = CBUQ + Solo + M.B + CP II E 32	93,00	-1,3

Fonte: Adaptado de Fortes *et al.*, 2011.

Observa-se que o grau de compactação não foi atendido e que o desvio do teor de umidade entre as estacas 334+10 a 340 (trecho com a usina KMA 220 – reciclagem com cimento Portland) e estacas 350 a 355 (trecho com o procedimento usual de reciclagem – Reciclagem com adição de agregados e cimento 1% em massa), demonstraram que a camada estava úmida. Na tabela 25 estão os valores da capacidade de suporte, da massa específica aparente seca máxima e do teor de umidade ótimo.

Tabela 25 – Índice de Suporte Califórnia (ISC); Massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{m\acute{a}x.}$) e teor de umidade ótimo ($W_{\acute{o}timo}$).

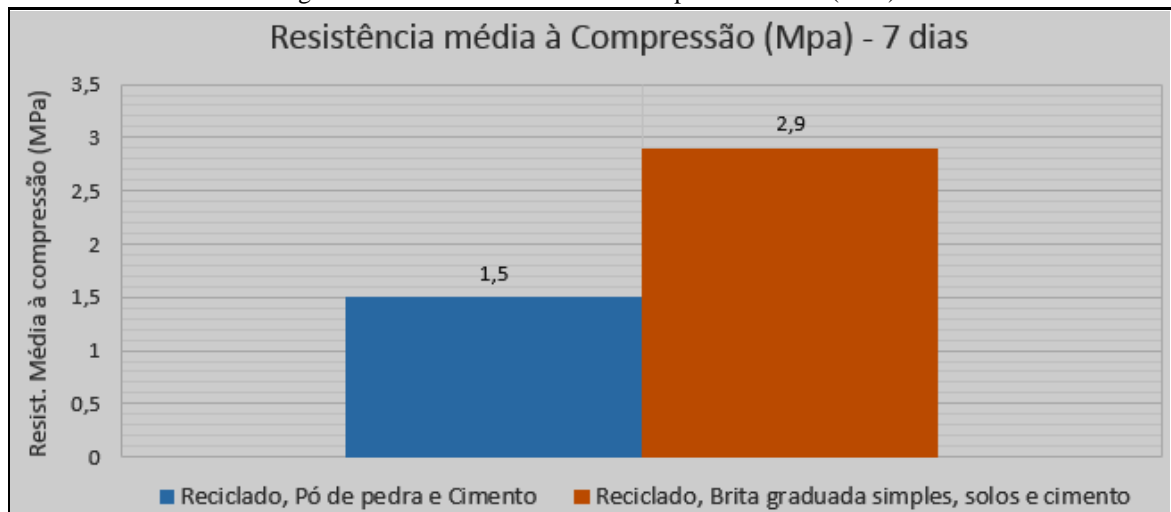
Material	Estaca	Energia do Proctor	Expansão (%)	ISC (%)	$\gamma_{m\acute{a}x.}$ (kg/m^3)	$W_{\acute{o}timo}$ (%)
Reciclado + Pó de pedra + CP II E 32	338	Modificado	0,37	73	2150	6,7
Solo Reciclado + BGS	347	Modificado	0,12	51	2280	6,7
BGS	347 LE	Modificado	0,44	143	2450	5,3
Reciclado + BGS + Solo + CP II E 32	352	Modificado	0,41	69	1950	12,4
	354	Modificado	0,40	81	2030	8,4

Fonte: Adaptado de Fortes *et al.*, 2011.

Verificou-se que os valores de expansão foram satisfatórios, isto é, inferiores a 0,50%, quanto aos valores da capacidade de suporte (ISC), somente os obtidos nas camadas de Reciclado + BGS + Solo Cimento” e BGS atenderam ao valor preconizado de 80%.

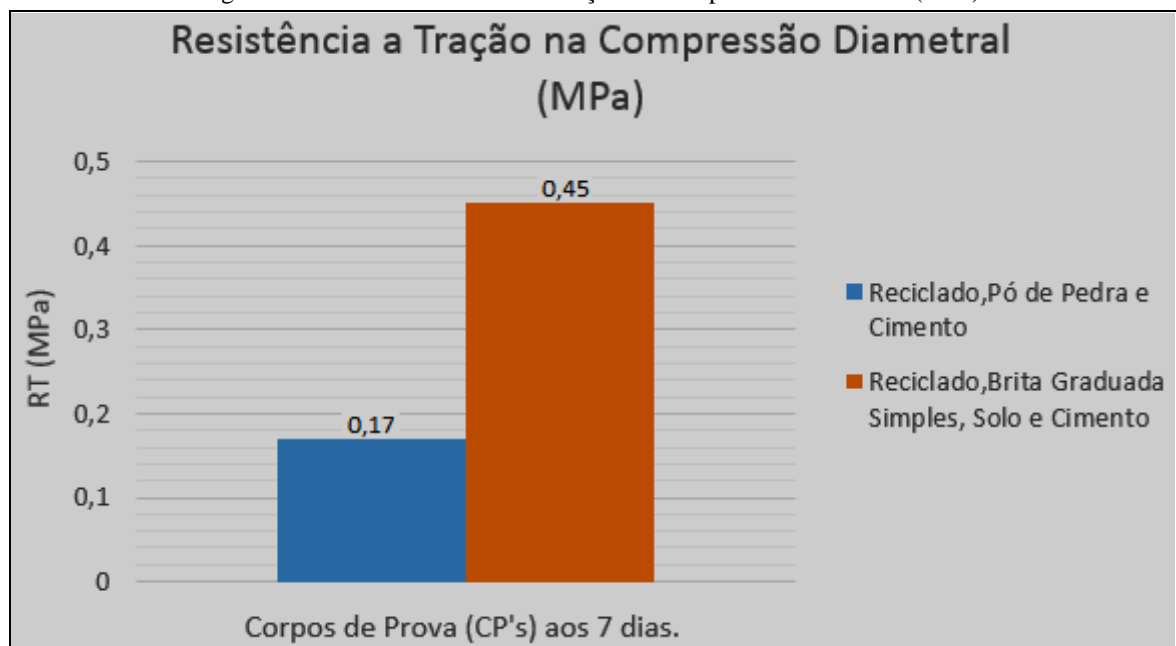
Nas figuras 49 e 50 estão os gráficos com os valores médios da resistência à compressão axial e da resistência à tração diametral.

Figura 49 – Resistência média à Compressão Axial (MPa).



Fonte: Adaptado de Fortes *et al.*, 2011.

Figura 50 – Resistência média a Tração na Compressão Diametral (MPa).



Fonte: Adaptado de Fortes *et al.*, 2011.

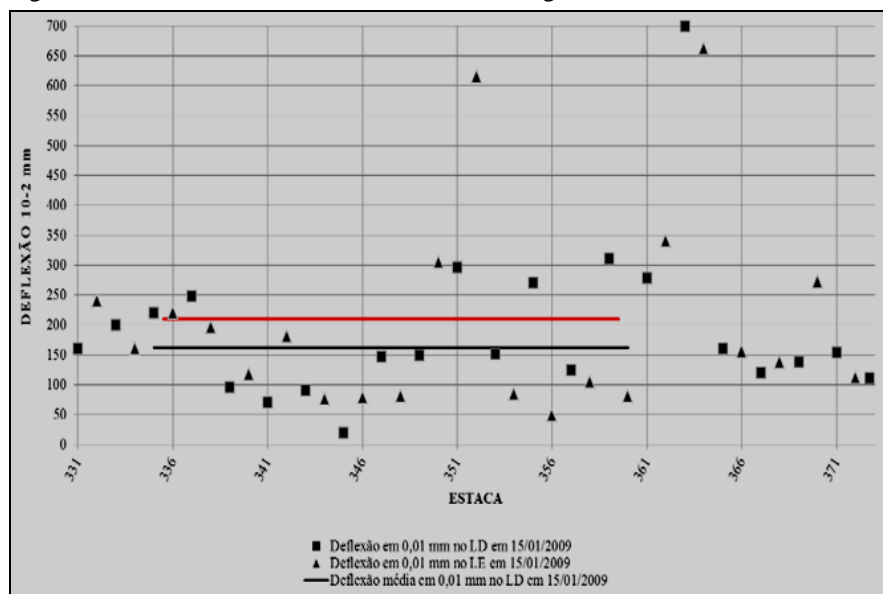
Verificou-se que os valores médios de Resistência à Compressão Simples ou Axial na pista experimental foram de 2,90 MPa e 1,50 MPa. O melhor resultado alcançado foi com o material reciclado, brita graduada simples, solos e cimento Portland que conforme a literatura técnica internacional “*Guide to Full-Depth Reclamation with Cement*” adota resistências entre 2,10 e 2,80 MPa aos sete dias enquanto o “*Manual de Firmes Reciclado in situ con cemento*” indica valores entre 2,50 e 3,50 MPa como sendo satisfatórios.

Nem sempre são exigidos ensaios de Resistência à Tração na Compressão Diametral (RT) nos projetos de reciclagem com cimento no Brasil. Embora seja uma avaliação importante sobre o comportamento mecânico do material, o ensaio padrão é o de resistência à compressão simples citado anteriormente.

De acordo com o Manual de Reciclagem da Wirtgen (2005), o valor mínimo de referência do ensaio de RT é de 0,25 MPa. Diante desta condição técnica o ensaio de RT com material reciclado, mais pó de pedra e cimento Portland não atingiu um bom resultado (valor médio igual a 0,17MPa), ao contrário do material reciclado, mais brita graduada simples e cimento que alcançou a RT média de 0,45 MPa.

Na figura 51 estão apresentadas as deflexões medidas com a viga de Benkelman em 15 de janeiro de 2009, antes da recuperação do pavimento. Verifica-se que o valor médio de 162×10^{-2} mm para o lado direito (LD), assim como o valor de 210×10^{-2} mm para o lado esquerdo (LE) são valores de deflexões bastante elevados, confirmando que a estrutura do pavimento estava comprometida.

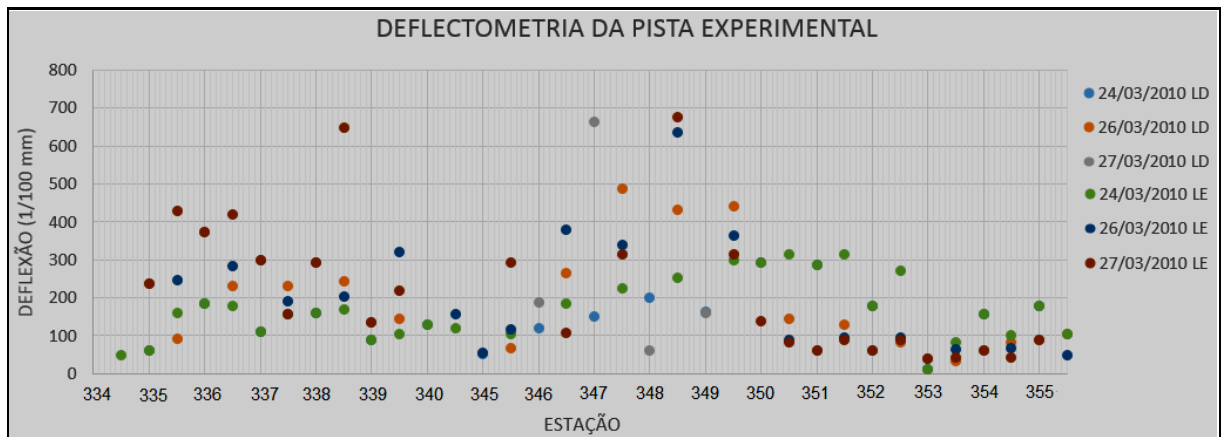
Figura 51 – Medidas da deflexão obtidas com a viga de Benkelman em 15/01/2009.



Fonte: Fortes *et al.*, 2011.

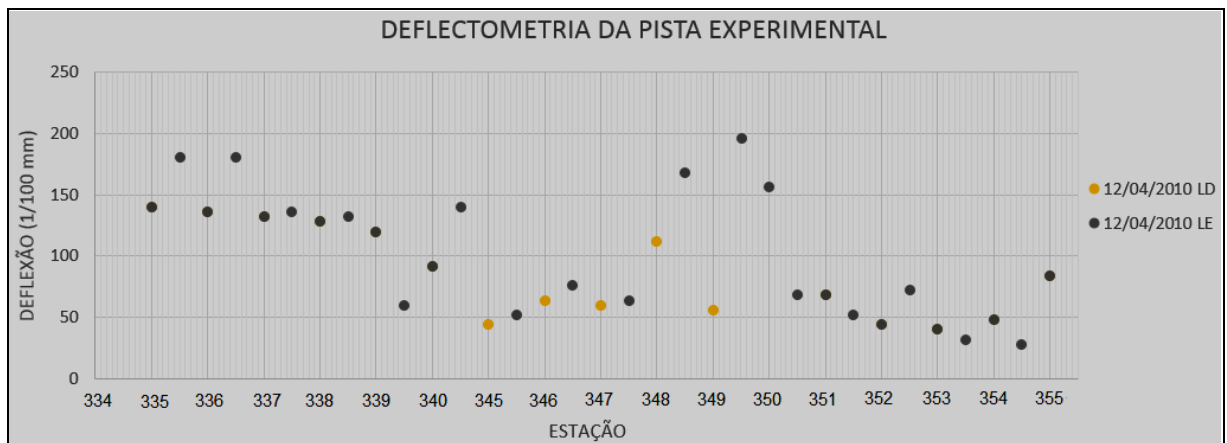
Na figura 52 estão apresentadas as medidas da deflexão obtidas com a viga de Benkelman logo após a reciclagem do pavimento dos trechos da pista experimental em estudo nesta pesquisa e, na figura 53 estão apresentadas as medidas das deflexões após um mês da intervenção.

Figura 52 – Medidas da deflexão obtidas com a viga de Benkelman após a reciclagem, dos trechos em estudos da pista experimental.



Fonte: Adaptado de Fortes *et al.*, 2011.

Figura 53 – Medidas da deflexão obtidas com a viga de Benkelman após um mês de reciclagem da base, dos trechos experimentais em estudo.



Fonte: Adaptado de Fortes *et al.*, 2011.

Após a reciclagem da base, dos trechos experimentais em estudo, encontraram-se os valores médios da deflexão com a viga de Benkelman igual a $148,7 \times 10^{-2}$ mm para o lado direito (LD) e o valor médio de $148,7 \times 10^{-2}$ mm para o lado esquerdo (LE). Ocorreu a necessidade de se refazer a base reciclada com adição de cimento Portland compreendida

entre os trechos 334+10 a 340 devido a constatação de valores de deflexão elevado, este fato foi atribuído a problemas de drenagem, gerando acúmulo de umidade nas camadas inferiores.

A tabela 26 apresenta os resultados das medidas de deflexão média para os intervalos de tempo, apenas para os trechos experimentais em estudo, com base nas informações adquiridas.

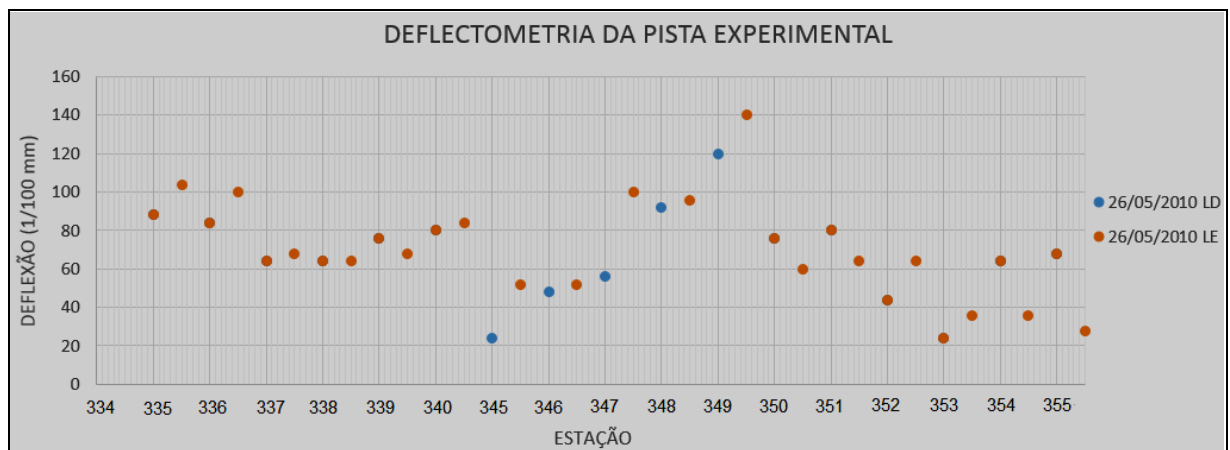
Tabela 26 – Deflexões médias dos trechos com a viga de Benkelman.

ESTACA	DEFLEXÃO MÉDIA (1/100) mm									
	24/mar		26/mar		27/mar		12/abr		26/mai	
	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE	LD	LE
334+13 a 340	122,0	128,3	188,8	234,0	267,2	320,8	124,7	131,3	76,0	78,7
345 a 350	137,6	212,8	338,4	315,3	268,0	341,6	67,2	111,2	68,0	88,0
350 a 355	184,7	191,7	96,0	76,7	61,6	72,4	56,8	62,9	59,3	53,7

Fonte: Adaptado de Fortes *et al.*, 2011.

Decorridos dois meses de reciclagem da base, dos trechos experimentais em estudo, encontraram-se os valores médios da deflexão com a viga de Benkelman igual a $67,8 \times 10^{-2}$ mm para o lado direito (LD) e o valor médio de $69,9 \times 10^{-2}$ mm para o lado esquerdo (LE). A figura 54 apresentou as medidas de deflexão para o intervalo de tempo de dois meses somente para os trechos experimentais objetos de estudo.

Figura 54 – Medidas da deflexão obtidas com a viga de Benkelman após dois meses de reciclagem da base, dos trechos experimentais em estudo.



Fonte: Adaptado de Fortes *et al.*, 2011.

A camada reciclada com adição de cimento Portland (CP II E 32), inicia o processo de cura na compactação e as deflexões inicialmente são elevadas. Com o passar dos dias

(meses) o material ganha coesão e resistência mecânica, então os valores de deflexão obtidos na viga de Benkelman passam a diminuir e se tornam constantes. Isso é comprovado pelos resultados gráficos anteriores, justificando a importância do controle de qualidade no serviço de compactação, ou melhor, do grau de compactação.

6 CONCLUSÃO

A primeira técnica de reciclagem de pavimentos flexíveis *in situ* com adição de cimento Portland para a utilização em camada de base, com uso da Usina Móvel KMA 200 no trecho A é uma alternativa de recuperação não identificadas na revisão bibliográfica, objeções técnicas ao emprego do método.

Entretanto, esta primeira técnica não alcançou resultados superiores quando comparada com a segunda técnica de reciclagem de pavimentos flexíveis *in situ* em que foi empregada a recicladora Wirtgen 2500 S com o espalhamento do aglomerante hidráulico de forma manual no trecho D. Tal fato, verificou-se nos dados obtidos entre o comportamento mecânico do material reciclado com a adição de cimento quando variados os seus teores e na distribuição granulométrica de agregados adicionados presentes na base.

Com base nos resultados dos trechos da pista experimental, os que apresentaram melhor desempenho foram os de reciclagem com adição de cimento Portland, isto é, confirmando que a presença do aglomerante hidráulico contribui de maneira efetiva para o aumento da resistência do pavimento asfáltico. Vale ressaltar aqui, a importância de se obter uma curva granulométrica bem graduada com a adição de outros agregados, permitindo o melhor contato dos grãos para viabilizar a redução no consumo do cimento Portland e problemas futuros de retração por fadiga ou pela rigidez da base cimentada.

Após um ano de abertura ao tráfego, os pesquisadores do convênio (DER/SP e Universidade Mackenzie/SP) não constataram nenhum tipo de defeito do ponto de vista funcional e estrutural, apresentando a pista experimental bom conforto e segurança ao rolamento, que atesta o sucesso das técnicas envolvidas na reciclagem do pavimento flexível *in situ* com adição de cimento Portland.

Portanto, para o alcance dos objetivos propostos no projeto de reabilitação de pavimentos flexíveis, com a utilização das duas técnicas de reciclagem *in situ* por meio da adição de cimento Portland são importantes alguns cuidados observados a seguir:

- Controle adequado das quantidades e da uniformidade da aplicação do cimento Portland;
- Controle da umidade da mistura reciclada durante o processo executivo, para facilitar a adequada densificação do material, evitando o reprocesso;
- Controle de compactação da mistura reciclada por meio do número adequado de passadas do equipamento compactador;

- O processo de cura da camada de base reciclada tem um papel fundamental para o futuro do bom desempenho do pavimento e deve ser melhor investigado ou pesquisado para um melhor procedimento executivo;
- A importância da drenagem na obra de pavimentação e também o ajuste da metodologia no processo executivo por meio de ensaios preliminares de dosagem em laboratório;

No âmbito da preservação ambiental, a reciclagem proporciona a total utilização das camadas existentes, evitando bota-foras e a abertura de novas áreas para a exploração e utilização de materiais naturais.

6.1 Sugestões para pesquisas futuras

No decorrer da Revisão Bibliográfica e desenvolvimento do trabalho verificou-se a necessidade de aprofundamento em alguns temas relevantes para a pesquisa os quais deverão ser dirigidos para a rapidez de liberação da pista e em função do tipo de tráfego.

- Ensaio de Creep Dinâmico;
- Ensaio de Módulo de Resiliência;
- Ensaio de Módulo Elástico.

Todos os ensaios deverão ser feitos em função da compactação com uso da metodologia SUPERPAVE, isto é, com o compactador giratório, da hidratação, do tempo de cura da mistura reciclada e de outros tipos de cimento Portland.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO). **Guide for design of pavement structures**. Whashington: AASHTO, 1993.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- ARANHA, A. L. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. 2013. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- ARRA. **Asphalt Reclaiming and Recycling Association** – Basic Asphalt Recycling Manual. 2001.
- ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Cold-Mix Recycling**. Maryland, Manual Series N° 21 (MS-21). 1983. 68f.
- BALBO, J. T. **Estudo das Propriedades Mecânicas das Misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação aos Pavimentos Semirrígidos**. São Paulo: Pini, 1993.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos. 2007.
- BARROS, G. N. V.; MERIGHI, L. F. **Estudo das técnicas de reciclagem a frio das camadas superiores do pavimento asfáltico com adição de cimento Portland e espuma de asfalto com uso de recicladora para utilização em camada de base**. 2011. 85f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2011.
- BATISTA, F. G. M. R. **Reabilitação de pavimentos flexíveis através da reciclagem com cimento**. 2009. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Técnica de Lisboa, 2009.
- BELIGNI, M. **Estudo do desempenho de misturas asfálticas recicladas a quente e a frio utilizadas em bases de pavimentos**. 1995. 141f. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ADEBA, 2008. 504 f.
- BONFIM, V. **Estudo da granulometria resultante da fresagem de revestimentos asfálticos com vistas à reciclagem “in situ” a frio**. 1999. 179f. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

BONFIM, V. Fresagem de Pavimentos Asfálticos. 2 ed. São Paulo: Editora Fazendo Artes, 2000. 112 f.

BRASIL. Confederação Nacional de Transporte. Cresce número de pontos críticos em rodovias por todo o país, **Agência CNT de Notícias**, Infraestrutura, 2014. Disponível em: http://www.cnt.org.br/Paginas/Agencia_Noticia.aspx?noticia=cresce-numero-de-pontos-criticos-em-rodovias-por-todo-o-pais-20102014. Acesso em: 12 nov. 2014.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de pavimentação**: DNER. Rio de Janeiro, 2ª Edição, 1996. 320 f.

_____. _____. _____. **Agregados – Análise granulométrica**. DNER ME 083/94. Rio de Janeiro, 1994. 5 f.

_____. _____. _____. **Equivalente de areia**. DNER ME 054/97. Rio de Janeiro, 1997. 10 f.

_____. _____. _____. **Solo-cimento: Compressão axial de corpos de prova cilíndricos**. DNER ME 201/94. Rio de Janeiro, 1994. 4 f.

_____. _____. _____. **Pavimento – Determinação das deflexões pela viga Benkelman**. DNER ME 024/94. Rio de Janeiro, 1994. 6 f.

_____. _____. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos - Procedimentos**. DNIT 006/2003 – ES. Rio de Janeiro, 2003. 10 f.

_____. _____. _____. **Pavimentos flexíveis: Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço**. DNIT 031/2006 – ES. Rio de Janeiro, 2006. 14 f.

BUCK, A. D. **Recycled Concrete as a source of aggregate**. American Concrete Institute Journal. 1977.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações – Fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Ltda., 1989. 233 f.

CASTRO, L. N. **Reciclagem a frio “in situ” com espuma de asfalto**. 2003. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CATERPILLAR. **A reciclagem na recuperação de pavimentos**. Minas Gerais, 2005.

CONSMARQ COMÉRCIO DE PEÇAS E MECÂNICA DE PEÇAS LTDA – **Usina de Solos**. Disponível em: <http://www.promaquinas.com.br/produtos/produtos.shtm>. Acesso em: 12 nov. 2014.

COPAVEL. Engenharia e Tecnologia de Pavimentos. 2009. Disponível em: <http://www.copavel.com.br/>. Acesso em: 12 nov. 2014.

COTRIL. **Máquinas e equipamentos** – Drum Mixer. Disponível em: <http://www.cotril.com.br/cusina.html>. Acesso em: 12 nov. 2014.

DAVID, D. **Misturas asfálticas recicladas à frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 110 f. Tese (Doutorado em Geotecnia)- Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

FIDELIS, R. **Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos**. 2011. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

FORTES, R. M. et al. **Estudo da reciclagem de pavimento flexível na pista experimental do DER-SP/Mackenzie**. 2011. In: 5ª Congresso de Infraestrutura de Transportes – CONINFRA, São Paulo, 2011.

FORTES, R. M.; MERIGHI, J. V. **Pista Experimental. Revista de Engenharia Mackenzie. Publicação do Centro Acadêmico Horácio Lane** – Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, Ano 92, n.187, p. 22-27, nov /2007.

FREMIX ENGENHARIA E COMÉRCIO LTDA. Disponível em: <http://fremix.com.br>. Acesso em: 10 out. 2014.

GREGÓRIO, J. **Estabilização de um solo da formação Palermo com aditivo PZ Solution**. 2010. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Civil da Universidade do Extremo Sul, Criciúma, 2010.

GUSMÃO, C. B. **Evolução temporal da resistência mecânica em laboratório, de misturas simulando a reciclagem de pavimento asfáltico com adição de cimento Portland**. 2008. 167 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

GUTHRIE, W.S.; SEBESTA, S.; SCULLION, T. **Selecting Optimum Cement Contents for Stabilizing Aggregate Base Materials**. Texas Transportation Institute, Texas, 2002. 64 f.

INFOESCOLA. Crise do Petróleo. 2014. Disponível em: <http://www.infoescola.com/economia/crise-do-petroleo/>. Acesso em: 23 set. 2014.

JIMENEZ, R. A. **State-of-art of Surface Recycling**. Transportation Research Record, nº 780, 1980.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. Federal Highway Administration**, U. S. Departamento of Transportation. FHWA-AS-98-042. Washington, 1997a.

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

LENC – **LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E CONSULTORIA**. Relatório de Estudo de Reciclagem de Pavimentos, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MERIGHI, J. V.; FORTES, R. M. **Some aspects resistance's effect in the flexible pavements recycled with cement Portland**. In: International symposium on pavement recycling, São Paulo, 2005a.

MILLER, H. J.; GUTHRIE, W. S.; CRANE, R. A.; SMITH, B. **Evaluation of cement stabilized full-depth-recycled base materials for frost and early traffic conditions**. Recycled Materials Resource Center, University of New Hampshire, Durham, NH, 2009.

MOMM, L. & DOMINGUES, F. A. A. Reciclagem de pavimentos a frio “in situ” superficial e profunda. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais...**, Cuiabá, 1995.

MOTTA, L. M. G.; PINTO, S.; GUARÇONI, D. S. **Trecho de reciclagem a frio na BR 393 – Avaliação após 8 anos da implantação**. IBP03102, 2002.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13 ed. São Paulo: Editora Globo, 1995.

PETROBRÁS. PETRÓLEO BRASILEIRO S/A. **Emulsão Rejuvenescedora**. 2005. Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br/minisite/refinarias/portuguese/six/produtos/er.html>. Acesso em: 28 jun. 2014.

PETERSON et al. **Effect of composition on asphalt recycling agent performance**. Washington: Transportation Research Record 1436, National Research Council, 1994.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

PINTO, I. E. **Estudo das características físicas e mecânicas de misturas recicladas com espuma de asfalto**. 2002. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

PINTO, S. et al. **Pré-misturado a frio reciclado “in situ”**. In: 12º Encontro de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, 1994.

PORTUGAL. **Instituto de Infra-estrutura Rodoviárias IP. Construção e reabilitação de pavimentos reciclagem de pavimentos**. Lisboa, 2009. Disponível em: <http://www.inir.pt/potal/LinkClick.asp?fileticket...tabid=116&mid>. Acesso em: 12 set. 2011.

REIS, A. C. C. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida**. 2013. 114f. Dissertação (Mestrado)- Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2013.

ROGGE, D. F.; HICKS, R. G. **Use of asphalt emulsions in-place recycling: Oregon experience**. In: Transportation Research Record. Washington, nº 1342, 7 f., 1993.

SACHET, T. **Controle tecnológico de obras rodoviárias envolvendo a reciclagem “in situ” de bases granulares de pavimentos asfálticos**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, RS, 2007.

SÃO PAULO. Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP. **Reciclagem de pavimento asfáltico in situ com cimento e brita – ET-DE-P00/35**. São Paulo, 2006. 22 f.

_____. **Reciclagem de pavimento asfáltico in situ a frio com espuma de asfalto – ET-DE-P00/33**. São Paulo, 2006. 28 f.

SILVA, H. O. **Qualidade das águas dos balneários naturais do Município de Coari/AM**. 2012. 31 f. Dissertação (Mestrado)- Projeto de Urbanização do Município de Coari/AM. Coari. Amazonas, 2012.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. 2011. 145f. Tese (Doutorado)- Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF.

TUCHUMANTEL JR., O. **Reciclagem de Pavimentos – Conceitos, Interpretações e Controle**. Betumel Indústria e Comércio Ltda. São Paulo, 1988. 21 f.

WANG, L. **Cementitious Stabilization of soils in the presence of sulfate**. Departamento of Civil & Environmental Engineering (Thesis). Wuhan University of Technology. Louisiana. 2002.

WIRTGEN GmbH. **Wirtgen Cold Recycling Manual**. Windhagen, 2004. 248 f.

WIRTGEN. **Manual Wirtgen de Reciclagem a Frio**. Windhagen, Alemanha, 1999.

YODER, E.; WITCZAK, M. **Principles of pavement design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.

OBRAS CONSULTADAS

BALBO, J. T. **Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura.** Transportes. 2006.

BALBO, J. T. **Materiais Estabilizados com Aglomerantes Hidráulicos para Pavimentos de Concreto de Cimento Portland.** Curso de Especialização para Projetista de Pavimento de Concreto – ABCP. 2002.

BARROS, R. M. V. **Concepção de soluções de restauração eficazes e econômicas.** 2005. In: 1º Seminário sobre novas tecnologias para reciclagem e estabilização dos solos, produção de misturas asfálticas e pavimentação, São Paulo, 2005.

BARROS, R. M. V. **Foamed Bitumen Experiences in Pavement Rehabilitation in Brasil: Potencial for use on high volume roads.** 2001. In: Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Estados Unidos, 2001.

BONFIM, V.; DOMINGUES, F. A. A. **Utilização de fresagem e reciclagem “in situ” a frio: Alternativas na recuperação de pavimentos asfálticos.** In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Volume 3, Cuiabá, MT, 1995.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos: DNER.** Rio de Janeiro, 1998. 242 f.

_____. _____. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação IPR-719.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Pavimentação: Reciclagem profunda de pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço.** DNIT 167/2013 – ES. Rio de Janeiro, 2013. 11 f.

COSTA, C. J. B. **Aplicação de técnicas de reciclagem de pavimentos, como forma de minimizar os impactos ambientais causados em obras rodoviárias no Brasil,** ABPV: Revista de pavimentação, Rio de Janeiro, ano V, n. 16, p. 38-49, 2010.

DAMA, M. A. **Análise de comportamento da camada reciclada com espuma de asfalto na rodovia BR-290/RS.** 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

DAVIDSON, J. K.; BLAIS, C.; CROTEAU, J. **A review of in-place cold recycling/reclamation in Canada.** In: Transportation Association of Canada Fall 2004 Meeting. Canadá, 2004.

ESTADOS UNIDOS. Governo de Washigton D. C. Federal Highway Administration. **Asphalt Recycling and Reclaiming Association – ARRA.** Annapolis, Maryland: 2008. Disponível em:

http://www.arra.org/index.php?option=com_content&view=article&id=32&Itemid=77.
Acesso em: 02 out. 2014.

GRECA ASFALTOS. **Reciclagem a frio**: Uma opção econômica e ecológica de restauração de pavimentos. Texto informativo da empresa Greca Asfaltos. Paraná, 2003.

MERIGHI, J. V.; FORTES, R. M. **Estudo do aumento da resistência da mecânica em função do tempo nas misturas de reciclagem com cimento Portland**. In: IV Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos, Porto, 2007.

MERIGHI, J. V.; FORTES, R. M. **Recycling of base course with cement**. 2005. In: Fourth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control – MAIREPAV 4-the, Belfast, 2005b.

MILLER, H. J.; AMATRUDO, M.; KLESTLER, M. A.; GUTHRIE, W. S. **Mechanistic Analysis of Reconstructed Roadways Incorporating Recycled Base Layers**. In: TRB 2011 Annual Meeting. 2011.

MILLER, H. J.; GUTHRIE, W. S.; KESTLER, M. A.; CARBO, C. **Cement Treatment of Frost-Susceptible New England Base Materials Blended with Reclaimed Asphalt Pavement**. Cold Regions Engineering, ASCE, 2006.

OLIVEIRA, P. C. A. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis**. 2003. 177 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

PCA. **Full-Depth Reclamation with Cement**. 2014. Disponível em:
http://www.cement.org/pavements/pv_sc_fdr.asp. Acesso em: 28 set. 2014.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária**: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro: Editora Copiarte, 2002. 380 f.

SANTOS, A. G. B. **Bases Granulares de Agregados Reciclados**. 2009. Dissertação (Mestrado)- Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro. Aveiro, 2009.

SÃO PAULO. Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo – DER/SP. **Reciclagem de Pavimentos Flexíveis com cimento Portland** – Relatório, 2006.

_____. _____. **Sub-base ou base estabilizada granulometricamente** – ET-DE-P00/14. São Paulo, 2006. 23 f.

SPECHT, L. P. **Comportamento de Misturas de Solo-Cimento-Fibra submetidas a carregamentos Estáticos e Dinâmicos**. 2002. 142f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. **Avaliação do desempenho as reciclagem do pavimento da rodovia SC 303**. CBR & C BRASVIAS. Foz do Iguaçu. 2011.

USACE. **Cold mix recycling**. United States Army Corps of Engineers, UFGS 02965. Washington, 2005. 19 f.

WIRTGEN AMERICA. **Recycling e Estabilization**. Disponível em:
<http://www.wirtgenamerica.com/flash.htm>. Acesso em: 16 abril 2006.