

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Carolina Lima dos Santos

**ESTUDO DE PROJETO DA REABILITAÇÃO DE
PAVIMENTO DE TRECHO DA RODOVIA RSC-453
COM A TÉCNICA DA RECICLAGEM COM CIMENTO**

Porto Alegre
julho 2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Carolina Lima dos Santos

**ESTUDO DE PROJETO DA REABILITAÇÃO DE
PAVIMENTO DE TRECHO DA RODOVIA RSC-453
COM A TÉCNICA DA RECICLAGEM COM CIMENTO**

Porto Alegre
julho 2015

CAROLINA LIMA DOS SANTOS

**ESTUDO DE PROJETO DA REABILITAÇÃO DE
PAVIMENTO DE TRECHO DA RODOVIA RSC-453
COM A TÉCNICA DA RECICLAGEM COM CIMENTO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Washington Peres Núñez

Porto Alegre
julho 2015

CAROLINA LIMA DOS SANTOS

**ESTUDO DE PROJETO DA REABILITAÇÃO DE
PAVIMENTO DE TRECHO DA RODOVIA RSC-453
COM A TÉCNICA DA RECICLAGEM COM CIMENTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2015

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. Pela UFRGS
Orientador

Prof. Jean Marie Désir
Dr. pelo COPPE/UFRJ
Coordenador

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul (UFRGS)

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
(UFRGS)**
DSc. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul (COPPE/UFRJ)

Engenheiro William Fedrigo (UPF)
Mestre Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul (UFRGS)

**Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito
(PUCRS)**
PhD Pela University of Nottingham

Dedico este trabalho a meus pais, Carlos e Marlei, minhas irmãs Manoela, Nathalia e Gabriela, e meu namorado Thiago que sempre me apoiaram e, especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado dando um apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Washington, orientador deste trabalho, pela dedicação e pelo tempo disponibilizado a mim, pelo apoio e por todo conhecimento a mim passado.

Agradeço aos amigos conquistados ao longo destes longos anos de graduação que contribuíram de alguma forma para que eu chegasse aqui.

Agradeço aos meus pais, Carlos e Marlei que sempre fizeram mais do que possível para me proporcionar as melhores oportunidades, e por muitas vezes (senão dizer, toda nossa vida) abdicarem e sacrificarem tanto por nós, e minhas irmãs Manoela, Nathalia e Gabriela, pela compreensão, carinho e apoio todos estes anos, sem vocês todos com certeza não estaria aqui hoje.

Agradeço ao meu namorado, amigo e companheiro Thiago pela paciência, compreensão e apoio mesmo nos momentos mais difíceis. Obrigada por estar sempre ao meu lado.

Os dias prósperos não vêm por acaso; nascem de muita
fadiga e persistência.

Henri Ford

RESUMO

Este trabalho visa o estudo do processo de reciclagem profunda de pavimento asfáltico com adição de cimento Portland, visando a recuperação do pavimento de trecho da rodovia RSC-453. Foi descrito, a partir de extensa revisão da literatura, os tipos de defeitos que ocorrem nos pavimentos e suas medidas de avaliação. Foi feito um estudo dos métodos de reciclagem, equipamentos utilizados, estudo das vantagens e desvantagens do uso da reciclagem. Tratou-se ainda, da escolha do método de dimensionamento como sendo o mecanístico-empírico com utilização do software EVERSTRESS 5.0 para as análises mecanísticas, com o qual se determinou as respostas estruturais nas camadas do pavimento. Com base nessas respostas e utilizando-se modelos de viga de fadiga estimar a durabilidade da estrutura. Pavimento este composto por estrutura de 20 cm de base reciclada e 8 cm de revestimento asfáltico, o qual atendeu ao tráfego imposto, situação esta verificada com base nos modelos propostos.

Palavras-chave: Reciclagem de Pavimento Asfáltico, Reciclagem Profunda, Cimento Portland.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da rodovia.....	18
Figura 2 – Diagrama das etapas da pesquisa	21
Figura 3 – Estrutura de pavimento-tipo rígido	25
Figura 4 – Estrutura de pavimento-tipo flexível	26
Figura 5 – Seção transversal típica – Autoestrada	29
Figura 6 – Equipamento FWD.....	41
Figura 7 – Configuração do rolo fresador/misturador.....	47
Figura 8 – Vantagens e desvantagens dos agentes estabilizadores de cimento.....	49
Figura 9 – Trem de reciclagem.....	50
Figura 10 – Tela de entrada com as características do pavimento.....	55
Figura 11 – Categorias de estradas e níveis de confiabilidade.....	59
Figura 12 – Diagrama do método Sul-Africano de projeto.....	59
Figura 13 – Representação esquemática das camadas.....	64
Figura 14 – Coordenadas da carga aplicada.....	65
Figura 15 – Pontos de interesse do pavimento para análise.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Níveis de serventia.....	36
-------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do FWD em relação à viga Benkelman.....	42
Tabela 2 – Casos de aplicação da reciclagem com cimento no Brasil.....	51
Tabela 3 – Variáveis do modelo de vida de fadiga do método mecanístico da República da África do Sul.....	61
Tabela 4 – FC para modelo de deformação horizontal.....	62
Tabela 5 – Respostas estruturais da estrutura proposta.....	67

LISTA DE SIGLAS

BGS – Brita Graduada Simples

CBR – *California Bearing Ratio*

CNT – Confederação Nacional de Transportes

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FWD – *Falling Weight Deflectometer*

MR – Módulo de Resiliência

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

VSA – valor da serventia atual

X – valores de serventia atual individuais atribuidos por cada membro do grupo

n – número de membros do grupo de avaliação

d_0 – flexão máxima

L_i – leitura inicial do extensómetro

L_f – leitura final do extensómetro

K – constante da viga dada pela relação entre o braço maior e o braço menor

R – raio de curvatura

d_{25} – deflexão à 25 cm do eixo de carga

MR – módulo de resiliência

σ_d – tensão-desvio aplicada repetidamente

ϵ_r – deformação específica resiliente

Δ_h – deformação resiliente registrada no computador

H_0 – distancia entre alças

P – carga vertical aplicada diretamente no corpo-de-prova

Δ – deslocamento elástico ou resiliente

H – altura do corpo-de-prova

μ - coeficiente de *Poisson*

N_f – vida de fadiga;

A, B – variáveis dependentes do módulo de resiliência e da classe da rodovia;

ε_h – tensão horizontal (μ_s).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	19
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	19
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	19
2.2.1 Objetivo Principal	19
2.2.2 Objetivo Secundário	19
2.3 PRESSUPOSTO	20
2.4 PREMISA	20
2.5 DELIMITAÇÕES	20
2.6 LIMITAÇÕES	20
2.7 DELINEAMENTO	20
3 PAVIMENTO RODOVIÁRIO.....	23
3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	23
3.1.1 Rígido	23
3.1.2 Flexível	24
3.1.3 Semi-rígido	25
3.2 CAMADAS CONSTITUINTES	26
3.2.1 Reforço do Subleito	27
3.2.2 Sub-base	27
3.2.3 Base	28
3.2.4 Revestimento	28
4 DEFEITOS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	30
4.1 DEFEITOS DE SUPERFÍCIE.....	31
4.1.1 Fendas	31
4.1.2 Afundamentos	32
4.1.3 Corrugações ou Ondulações	32
4.1.4 Exsudação	33
4.1.5 Desgaste ou Desagregação	33
4.1.6 Panela ou Buraco	33
4.1.7 Remendo	34
4.2 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	34
5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS PAVIMENTO.....	37

5.1 AVALIAÇÃO OBJETIVA DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	37
5.2 AVALIAÇÃO SUBJETIVA DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	37
5.3 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	39
6 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	43
6.1 RECICLAGEM A FRIO EM USINA.....	44
6.2 RECICLAGEM A FRIO NO LOCAL.....	45
6.3 RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTO COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.....	47
6.3.1 Dosagem da mistura reciclada.....	51
7. MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO.....	53
7.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	55
7.2 FADIGA.....	57
7.3 MODELOS DE FADIGA.....	58
8 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS.....	63
8.1 PARÂMETROS DE ENTRADA.....	63
8.1.1 Espessura das camadas.....	63
8.1.2 Módulo de resiliência das camadas.....	64
8.1.3 Coeficiente de Poisson.....	64
8.1.4 Carregamento da estrutura.....	65
8.1.5 Raio de aplicação da carga.....	65
8.1.6 Pontos críticos.....	65
8.1.7 Resultados.....	66
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A.....	72
APÊNDICE B.....	74

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem experimentado um grande crescimento econômico nos últimos anos, o que tem gerado um aumento da demanda por produtos e serviços, devido ao aumento de consumo da população. Segundo a CNT, 65% do transporte de cargas e 90% do de passageiros ocorrem através de rodovias (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES, 2013).

Esse aumento no número de viagens através da malha rodoviária tem causado uma intensa deterioração das rodovias e, conforme esta degradação vai ocorrendo é importante que se determine o momento em que as intervenções devem acontecer, fazendo com que se prolongue a vida útil deste pavimento, pois conforme afirmam Bernucci *et al.* (2007, p. 9), é esta estrutura denominada que deve “[...] resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.”.

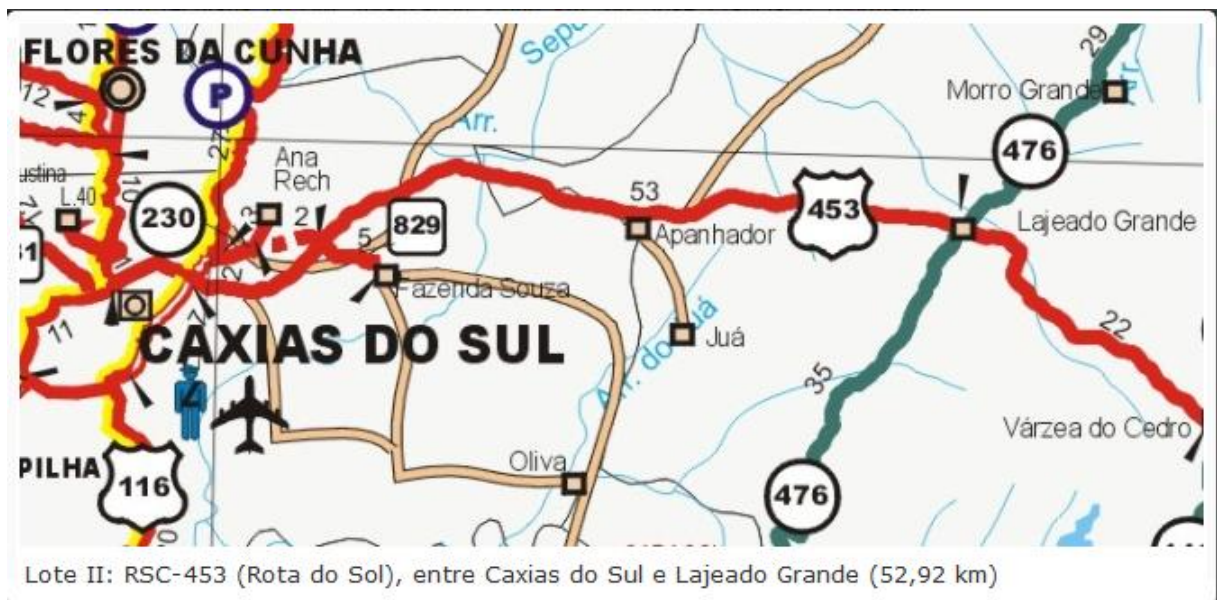
Percebendo esta intensa degradação dos pavimentos o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER-RS) lançou o Programa de Conservação, Restauração e Manutenção das Rodovias (Crema), que tem por objetivo “[...] instituir um processo sistemático e contínuo de conservação, por meio de ações de restauração e manutenção, da malha de rodovias pavimentadas.” (DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM, 2013). O DAER-RS, de acordo com a Instrução de Serviço para Estudos e Projetos Crema, determina que seja realizado levantamento visual da rodovia, medidas de irregularidade, medidas de deflexão, contagens de tráfego e sondagens do pavimento, pois somente baseado em estudos das condições do pavimento já existente é que se consegue propor adequadamente alternativas de restauração.

Dentre as alternativas possíveis podemos destacar a reciclagem do pavimento, que é uma técnica que visa o reaproveitamento do material oriundo de um pavimento deteriorado, o transformando em uma camada homogênea capaz de resistir ao tráfego gerado, caracterizando-se assim, a reciclagem como uma técnica sustentável. Entre às modalidades de reciclagem destaca-se a reciclagem com adição de cimento Portland devido às inúmeras vantagens como a disponibilidade do material, o custo e a fácil aplicação.

Tendo em vista os itens abordados, o que se busca neste estudo é a elaboração de um projeto de reciclagem com incorporação de cimento Portland, do pavimento “[...] de forma a se obter uma camada de ‘base reciclada’, utilizando-se material removido do pavimento (proveniente da fresagem de revestimento asfáltico e base) [...]” (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2013).

O trecho considerado no estudo está situado na RSC-453, contemplado no Lote II do programa Crema-Serra (figura 1), localizado entre os municípios de Caxias do Sul e Lajeado Grande e a estrutura do pavimento é constituída de revestimento asfáltico sobre base de brita graduada simples.

Figura 1 – Localização da rodovia



(fonte: DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGENS, 2012)

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: definido o melhor método para elaboração do projeto de restauração de pavimento empregando a reciclagem profunda do pavimento com a adição do cimento Portland, qual é a solução projetual adequada para o trecho estudado?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a elaboração de um projeto de restauração de pavimento empregando a técnica de reciclagem profunda de pavimento com adição de cimento Portland, para o trecho estudado.

2.2.2 Objetivos secundários

O trabalho tem como objetivo secundário a descrição da técnica de reciclagem profunda de pavimento com adição de cimento Portland.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem como pressuposto que com base nas condições funcionais e na capacidade estrutural do pavimento a escolha da reciclagem com uso de cimento Portland é a mais adequada.

2.4 PREMISSE

A premissa do trabalho é que sempre se deve considerar a possibilidade de reciclagem dos materiais para recuperação de pavimentos visto a economia de novos materiais e a diminuição de descarte dos mesmos.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo do projeto de reciclagem do pavimento da rodovia RSC-453.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

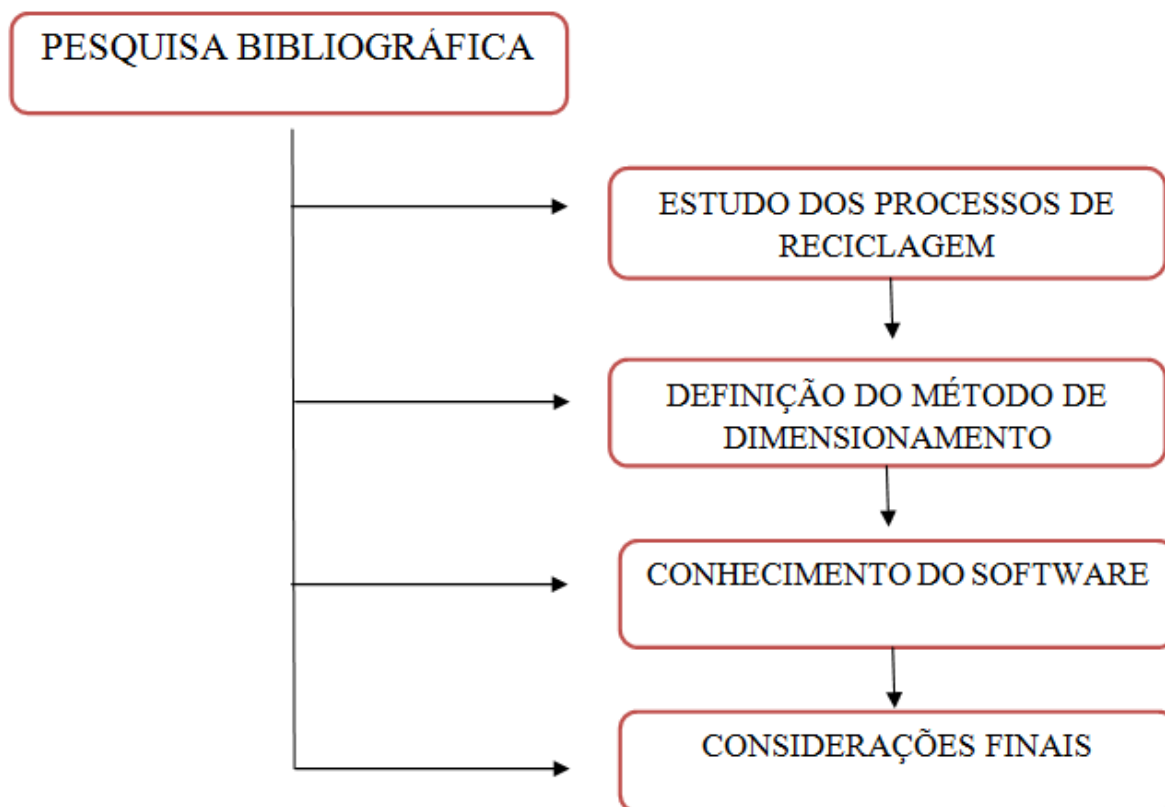
- a) que a dosagem de mistura reciclada com cimento a ser utilizado no projeto será obtida através de método proposto por mestrando em outra pesquisa;
- b) utilização do *software* EVERSTRESS 5.0;

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 2 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) estudo dos processos de reciclagem;
- c) definição do método de dimensionamento;
- d) conhecimento do *software*;
- e) considerações finais.

Figura 2 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

A **pesquisa bibliográfica** é a etapa inicial do trabalho, sendo constante durante todo o seu processo de formulação, a fim de se buscar embasamento teórico em todas as etapas da pesquisa, utilizando normas e bibliografia indicada para serviços de restauração do programa Crema.

Para o desenvolvimento do projeto de reabilitação deste pavimento primeiramente foram realizados **estudos dos processos de reciclagem** para maior conhecimento referente ao método e das variáveis às quais o processo está condicionado, e além dos vários processos executivos e etapas da reciclagem.

Posteriormente, foi determinado como **método de dimensionamento** do pavimento o mecanístico-empírico, por ter como embasamento as propriedades mecânicas dos solos e dos

materiais utilizados na pavimentação, visto que a grande maioria dos problemas ocorre pela solicitação de tráfego e efeitos climáticos.

Após a etapa anterior foi realizado um estudo em trabalhos anteriores, pesquisas na rede e também no guia disponibilizado do *software* **EVERSTRESS 5.0** o qual foi utilizado para se realizar o dimensionamento do pavimento, e então calcular-se as deformações nas fibras inferiores do revestimento asfáltico e da camada reciclada para então, utilizando-se os valores das deformações, estimar a vida de fadiga do pavimento, ou seja, a sua durabilidade.

Chegou-se assim ao final do cronograma proposto, em **considerações finais**, onde serão realizadas as análises finais em relação à elaboração do projeto e a solução encontrada para a reciclagem.

3 PAVIMENTO RODOVIÁRIO

Segundo Pinto e Preussler (2002, p. 11) pavimento é “[...] uma estrutura constituída por uma ou mais camadas, com características para receber as cargas aplicadas na superfície e distribuí-las, de modo que as tensões resultantes fiquem abaixo das tensões admissíveis dos materiais que constituem a estrutura.”.

De acordo com Balbo (2007, p. 35) a estrutura do pavimento deve ser “[...] adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.”.

Dentre as funções das camadas citadas anteriormente, Balbo (2007, p. 35) também destaca que elas “[...] devem proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte e rolamento em qualquer condição climática.”. Ainda de acordo com Bernucci *et al.* (2007, p. 337) estas camadas estão diretamente ligadas ao comportamento do pavimento, visto que “O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito [...]”.

Segundo Senço (2007, p. 6-7):

Pavimento é a estrutura construída sobre a terraplenagem e destina-se, técnica e economicamente, a:

- a) resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los;
- b) melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança;
- c) resistir aos esforços horizontais (desgaste), tornando mais durável a superfície de rolamento.

De acordo com Pinto e Preussler (2002, p. 3) “Com o crescimento do volume de tráfego, é justificável uma estrutura capaz de suportar as solicitações cada vez maiores, produzidas pelo tráfego [...]”, e trazem como benefícios dos investimentos empregados:

- a) redução do custo de transportes;
- b) diminuição do tempo de viagem;

- c) diminuição do consumo de combustível;
- d) aumento do conforto e segurança;
- e) diminuição das despesas de conservação;
- f) redução do índice de acidentes.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PAVIMENTOS

3.1.1 Rígido

Pavimento rígido é “[...] aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.” (PINTO; PREUSSLER, 2002, p. 11).

Balbo (2007, p. 61) também classificou como sendo “[...] o pavimento no qual uma camada, absorvendo grande parcela de esforços horizontais solicitantes, acaba por gerar pressões verticais bastante aliviadas e bem distribuídas sobre as camadas inferiores.”.

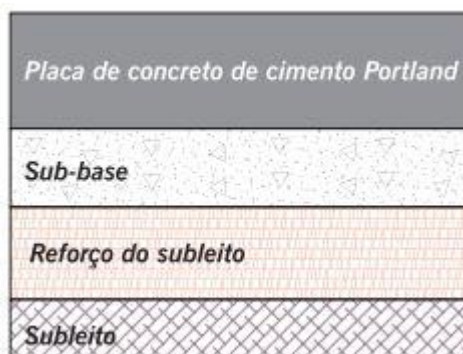
Seu dimensionamento é definido pela resistência do próprio pavimento, tendo placas de concreto de cimento Portland como material constituinte do pavimento, conforme indicam Pinto e Preussler (2002, p. 11)

Já Bernucci et al. (2007, p. 337) afirmam que:

Os pavimentos rígidos, em geral associados aos de concreto de cimento Portland, são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland (em geral placas, armadas ou não), apoiada geralmente sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento (chamada sub-base), assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito quando necessário.

Conforme representado pela figura 3.

Figura 3 – Estrutura de pavimento-tipo rígido



(fonte: BERNUCCI et al., 2007)

3.1.2 Flexível

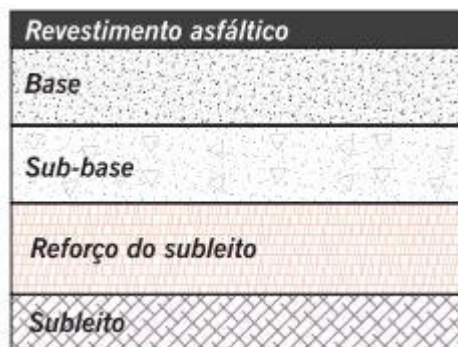
De acordo com Pinto e Preussler (2002, p. 11), pavimento flexível pode ser definido como “[...] aquele em que todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.”.

Já Bernucci et al. (2007, p. 337-338) definem que:

Os pavimentos flexíveis, em geral associados aos pavimentos asfálticos, são compostos por camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes.

De acordo com Medina e Motta (2005, p. 16) o pavimento flexível (figura 4) é “[...] constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente.”.

Figura 4 – Estrutura de pavimento-tipo flexível



(fonte: BERNUCCI et al, 2007)

3.1.3 Semi-rígido

Conforme afirmam Pinto e Preussler (2002, p. 11), pavimento semi-rígido é aquele que “[...] caracteriza-se por uma base cimentada quimicamente, como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica.”

Já Bernucci et al. (2007, p. 338) “[...] têm empregado a terminologia de pavimentos semi-rígidos para aqueles com revestimentos asfálticos que possuam em sua base ou sub-base materiais cimentados, que também são solicitados à tração.”

De acordo com Balbo (2007, p. 61), o pavimento semi-rígido pode ser composto das seguintes formas:

- a) estrutura **convencional**: base, e eventualmente, sub-base em mistura tratada com ligante hidráulico;
- b) estrutura **híbrida** ou **mista**: base em mistura betuminosa e sub-base em material tratado com cimento;
- c) estrutura **invertida**: base granular não tratada e sub-base tratada com cimento.

3.2 CAMADAS CONTITUENTES

Bernucci et al. (2007, p. 338-339) afirmam que para o dimensionamento de um pavimento deve-se levar em consideração tanto questões relacionadas ao clima onde a rodovia estará inserida, quanto questões relacionadas ao tráfego, e que:

As diferentes camadas devem resistir aos esforços solicitantes e transferi-los, por sua vez, às camadas subjacentes. As tensões e deformações as quais a estrutura está sujeita dependem principalmente da espessura das camadas e da rigidez dos materiais. Se a estrutura estiver bem projetada para as cargas que atuarão e bem construída, essas cargas gerarão deslocamentos que não provocam ruptura ou deformações excessiva após uma única passada de roda ou algumas poucas solicitações.

3.2.1 Reforço do Subleito

Sabe-se que um baixo suporte da camada do subleito tende a tornar necessárias elevadas espessuras da camada de sub-base através do emprego de uma camada estabilizada, executada sobre o subleito.

O uso desta camada não é indispensável, mas acaba tornando-se mais viável economicamente, visto que “[...] subleitos de resistência baixa exigiriam, para alguns tipos de pavimentos (especialmente aos flexíveis), do ponto de vista de projeto, camadas mais espessas de base e sub-base.” (BALBO, 2007, p. 38).

Conforme concluíram Pinto e Preussler (2002, p. 13) “A simples utilização do reforço do subleito indica um pavimento de elevada espessura advindo de um subleito de má qualidade, ou de um subleito de regulares condições associado a um tráfego intenso e pesado.”.

3.2.2 Sub-base

A sub-base pode ser caracterizada como uma camada localizada entre a base e o reforço do subleito, ou subleito, com as mesmas funções da base e complementar a ela.

Pinto e Preussler (2002, p. 14) recomendam que “A sub-base deve ter estabilidade e capacidade de suporte, ótima capacidade para drenar água acumulada e reduzida suscetibilidade às variações volumétricas.”.

Os materiais utilizados devem ter boa capacidade de suporte e possuírem características superiores às dos materiais empregados no reforço ou subleito. Outra característica muito importante está relacionada à capacidade de evitar o acúmulo de água sobre o pavimento, sendo indicado o uso de aparelhos de drenagem ou, até mesmo, o uso de materiais constituintes da sub-base com granulometria drenante (PINTO; PREUSSLER, 2002, p. 15).

3.2.3 Base

A camada de base surge com a finalidade de aliviar as tensões nas camadas de solo inferiores e resistir aos esforços oriundos do tráfego, distribuindo-os de forma adequada às outras camadas.

Segundo Pinto e Preussler (2002, p. 15):

A base deve reduzir as tensões de compressão no subleito e na sub-base a níveis aceitáveis, ou seja, deve distribuir as cargas aplicadas na superfície do pavimento de modo a minimizar ou eliminar as deformações de consolidação e cisalhamento no subleito e/ou sub-base.

Em relação aos materiais indicados para a camada, Balbo (2007, p. 38) sugere que “As bases podem ser constituídas de solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos etc.”.

Deve-se também, tomar um cuidado maior no momento da escolha deste tipo de material quando se trata da camada de base, pois é ela que dará a sustentação do pavimento, sendo responsável pela rigidez e resistência à fadiga. Dentre as características dos materiais que devem ser analisados, destaca-se a “[...] resistência, plasticidade, graduação e durabilidade.” (PINTO; PREUSSLER, 2002, p. 15)

3.2.4 Revestimento

De acordo com Senço (2007, p. 20), revestimento “É a camada, tanto quanto possível, impermeável, que recebe diretamente a ação do tráfego e destinada a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste, ou seja, aumentando a durabilidade da estrutura.”

É uma camada composta por uma mistura de agregados e materiais betuminosos, que devem ser “[...] bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal.” (BALBO, 2007, p. 36).

Outras designações também são feitas para a camada de revestimento, como camada de rolamento, camada de ligação, camada de nivelamento ou camada de reforço, isto se deve ao

fato de que em alguns casos ocorre subdivisão do revestimento, devido a questões de projeto e também, financeiras (BALBO, 2007, p. 37).

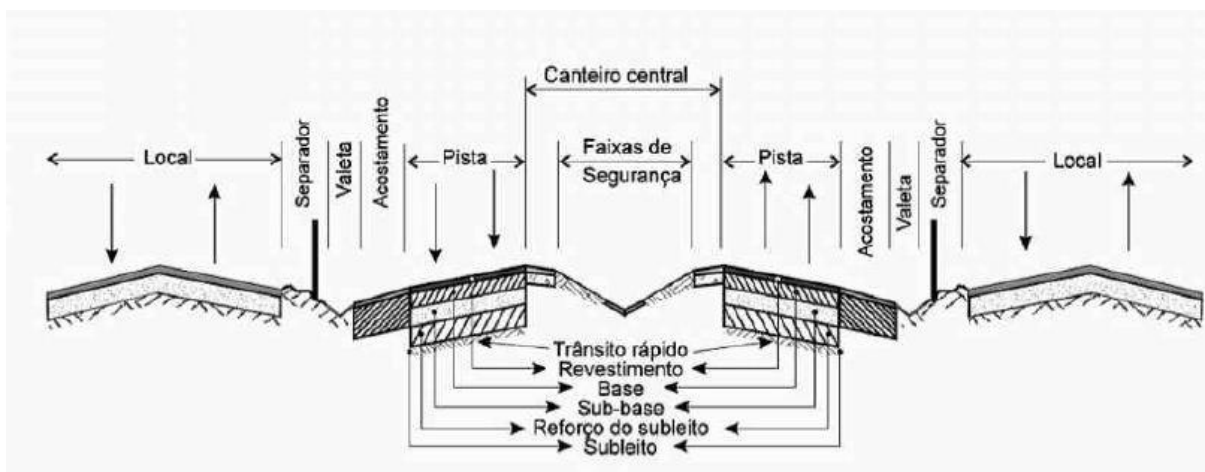
Pinto e Preussler (2002, p. 18) afirmam que:

Em adição à sua principal função como componente estrutural do pavimento, ela deve ser projetada para:

- a) resistir à forças abrasivas do tráfego;
- b) reduzir a penetração de água superficial do pavimento;
- c) proporcionar uma superfície resistente ao deslizamento dos veículos;
- d) proporcionar um rolamento suave e uniforme ao tráfego.

A figura 5 representa as camadas do pavimento.

Figura 5: Seção transversal típica – autoestrada



(fonte: SENÇO, 2007)

4 DEFEITOS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Pinto e Preussler (2002, p. 32) afirmam que segurança e conforto são características de uma boa implementação de um pavimento, o que se define como o grau de serventia do pavimento.

Afirmam ainda que:

Com o passar do tempo, sob o efeito do tráfego e das intempéries, o pavimento vai diminuindo seu grau de serventia, devido ao aparecimento de:

a) deformações no seu perfil longitudinal e transversal devido a afundamentos ‘diferenciais’ e em trilhas de roda;

b) a presença de remendos que, num bom serviço de conservação rotineira vão substituindo as inevitáveis fissuras, afundamentos localizados e panelas.

Conforme afirmaram Bernucci et al. (2007, p. 339), “As estruturas de pavimento são projetadas para resistirem a numerosas solicitações de carga, dentro do período de projeto, sem que ocorram danos estruturais fora do aceitável e previsto.”, afirmam também que a repetição de carga e os efeitos climáticos devem ser de grande conhecimento para um correto dimensionamento dos pavimentos

Bernucci et al. (2007, p. 413) definem os defeitos de superfície como sendo “[...] os danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos que podem ser identificados a olho nu [...]” e, afirmam ainda que:

O levantamento dos defeitos de superfície tem por finalidade avaliar o estado de conservação dos pavimentos asfálticos e embasa o diagnóstico da situação funcional para subsidiar a definição de uma solução tecnicamente adequada e, em caso de necessidade, indicar a melhor ou melhores alternativas de restauração do pavimento.

Segundo Bernucci et al. (2007, p. 414), “Os defeitos de superfície podem aparecer precocemente (devido a erros ou inadequações) ou a médio ou longo prazo (devido a utilização pelo tráfego e efeitos das intempéries)”. Os danos precoces surgem nos primeiros meses depois de finalizado o pavimento, enquanto os danos de longo e médio prazo surgem após anos até o final da vida útil estimada.

Em relação ao surgimento destes erros, Bernucci et al. (2007, p. 414) destacam as seguintes causas: “[...] erros de projeto; erros ou inadequações na seleção, na dosagem ou na produção de materiais; erros ou inadequações construtivas; erros ou inadequações nas alternativas de restauração e manutenção.”.

Dentre os erros de projetos, muitos podem ser relacionados à dificuldade em prever o tráfego futuro, erros no dimensionamento estrutural por incompatibilidade estrutural entre camadas, erros devido à má seleção do tipo de solo para reforço e dosagem errada do teor de ligante asfáltico e também, problemas relacionados à drenagem, como afirmaram Bernucci et al. (2007, p. 414).

Bernucci et al. (2007, p. 415) ainda afirmam que deve ser realizado um criterioso estudo dos defeitos para então se definir qual o método de restauração, já que:

[...] para corrigir ou minimizar uma consequência (defeito), deve-se conhecer as prováveis causas que levaram ao seu aparecimento. Para tanto, recomenda-se: verificação *in situ* dos problemas de superfície, relações com as condições geométricas, dos taludes e de drenagem; levantamentos de dados climáticos, de tráfego, de mapas geológicos, pedológicos ou geotécnicos; levantamento de um cenário global dos defeitos e sua relação com todos os dados observados e levantados.

A seguir são descritos os tipos de defeitos considerados e suas classificações.

4.1 DEFEITOS DE SUPERFÍCIE

Os chamados defeitos de superfície são classificados por Bernucci et al. (2007, p. 413) como sendo:

[...] os danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos que podem ser identificados a olho nu e classificados [...]. O levantamento dos defeitos de superfície tem por finalidade avaliar o estado de conservação dos pavimentos asfálticos e embasa o diagnóstico da situação funcional para subsidiar a definição de uma solução tecnicamente adequada e, em caso de necessidade, indicar a melhor ou melhores alternativas de restauração do pavimento.”.

4.1.1 Fendas

Bernucci et al. (2007, p. 415) definem fendas como sendo “[...] aberturas na superfície asfáltica e podem ser classificadas como **fissuras**, quando a abertura é perceptível a olho nu

apenas à distância inferior a 1,5 m, ou como **trincas**, quando a abertura é superior à da fissura.”, sugerem ainda que “As fendas representam um dos defeitos mais significativos dos pavimentos asfálticos e são subdivididas dependendo da tipologia e da gravidade.”.

De acordo com a Norma DNIT 005 (BRASIL, 2003a, p. 2) fissura é uma “Fenda de largura capilar existente no revestimento, posicionada longitudinal, transversal ou obliquamente ao eixo da via [...]”, já as trincas são definidas como “Fenda existente no revestimento, facilmente visível à vista desarmada, com abertura superior à da fissura, podendo apresentar-se sob a forma de trinca isolada ou trinca interligada.”.

4.1.2. Afundamentos

De acordo com Bernucci et al. (2007, p. 415-416) afundamentos são “[...] derivados de deformações permanentes seja do revestimento asfáltico ou de suas camadas subjacentes, incluindo o subleito.”, e ainda que:

Os afundamentos são classificados como: afundamento por consolidação (AC), quando as depressões ocorrem por densificação diferencial, podendo ser localizado (ALC) quando a extensão não supera 6 m, ou longitudinal nas trilhas de roda (ATC) no caso que exceda 6 m de extensão; ou afundamentos plásticos (AP), quando as depressões são decorrentes principalmente da fluência do revestimento asfáltico, podendo ser localizado (ALP) ou longitudinal nas trilhas de roda (ATP).

4.1.3 Corrugações ou Ondulações

As corrugações podem ser definidas como sendo “[...] deformações transversais ao eixo da pista, em geral compensatórias, com depressões intercaladas de elevações, com comprimento de onda entre duas cristas de alguns centímetros ou dezenas de centímetros.” (BERNUCCI et al., 2007, p. 416).

Já as ondulações podem ser definidas como “[...] deformações transversais ao eixo da pista, em geral decorrentes da consolidação diferencial do subleito, diferenciadas da corrugação pelo comprimento de onda entre duas cristas da ordem de metros.” (BERNUCCI et al., 2007, p. 416).

Pinto e Preussler (2002, p. 58) definem as possíveis causas como:

- a) instabilidade da mistura betuminosa da camada de revestimento e /ou da base;

- b) excesso de umidade das camadas subjacentes;
- c) contaminação da mistura asfáltica por materiais estranhos;
- d) retenção de água na mistura asfáltica.

4.1.4 Exsudação

Conforme Pinto e Preussler (2002, p. 61):

A exsudação é um fenômeno em que a película ou filme de material betuminoso forma-se na superfície do pavimento e se caracteriza por manchas de variadas dimensões. Estas manchas resultantes comprometem seriamente a aderência do revestimento aos pneumáticos, principalmente sob tempo chuvoso [...]

Os mesmos autores ainda citam como possíveis causas do surgimento da exsudação:

- a) dosagem inadequada da mistura asfáltica, acarretando teor excessivo de ligante e/ou índice de vazios muito baixo;
- b) temperatura do ligante acima da especificada no momento da mistura, acarretando a dilatação do asfalto e ocupação irreversível dos vazios entre as partículas ou falta de agregado no caso de tratamentos superficiais.

4.1.5 Desgaste ou Desagregação

De acordo com a Norma DNIT 005 (BRASIL, 2003a, p. 3) desgaste é definido como sendo “Efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento, caracterizado por aspereza superficial do revestimento e provocado por esforços tangenciais causados pelo tráfego.”.

Pinto e Preussler (2002, p. 60) citam como causas:

- a) perda de coesão entre agregado e ligante devido à presença de material estranho no momento da construção;
- b) presença de água no interior do revestimento que originam sobrepressões hidrostáticas capazes de provocar o deslocamento da película betuminosa;
- c) deficiência localizada de ligante asfáltico nos serviços por penetração decorrente de entupimento dos bicos ou má regulagem da barra espargidora.

4.1.6 Panela ou Buraco

A Norma DNIT 005 (BRASIL, 2003a, p. 3) define panela ou buraco “Cavidade que se forma no pavimento por diversas causas (inclusive por falta de aderência entre camadas superpostas, causando o deslocamento das camadas), podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação destas camadas.”.

4.1.7 Remendo

De acordo com Bernucci et al. (2007, p. 416), remendo pode ser definido como “[...] um tipo de defeito apesar de estar relacionado a uma conservação da superfície e caracteriza-se pelo preenchimento de panelas ou de qualquer outro orifício ou depressão com massa asfáltica.”.

Pinto e Preussler (2002, p. 63) citam como causas:

- a) solicitações intensas de tráfego;
- b) emprego de material de má qualidade;
- c) agressividade das condições ambientais;
- d) problemas construtivos.

4.2 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DOS PAVIMENTOS

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (BRASIL, 2006, p. 41), afirma que:

Os pavimentos são concebidos para durarem um determinado período. Durante cada um destes períodos ou ‘ciclos de vida’, o pavimento inicia uma condição ótima até alcançar uma condição ruim. O decréscimo da condição ou da serventia do pavimento ao longo do tempo é conhecida como deterioração do pavimento.

Assim como a maioria dos materiais utilizados na construção, os utilizados nas camadas dos pavimentos também sofrem um processo de desgaste com o passar dos anos causado pelo tráfego, em muitos casos pelo excesso de peso no transporte de cargas, além dos fatores ambientais (BALBO, 2007, p. 257).

Conforme o Manual (BRASIL, 2006, p. 46), as deformações ocasionadas pelo tráfego ocorrem:

- a) quando os esforços induzidos nos materiais constituintes dos pavimentos são suficientes para causar cisalhamento, promovendo deslizamentos no interior do material. Neste caso, poucas cargas concentradas ou pressões excessivas nos pneus podem causar tensões que excedem a resistência ao cisalhamento dos materiais e ainda causam fluência plástica, cujo resultado são afundamentos sob a carga de roda e, frequentemente, solevamentos ao redor da área carregada;
- b) carregamentos estáticos ou de longa duração podem causar afundamentos em materiais de comportamento viscoso, como as misturas betuminosas e alguns tipos de solo;
- c) finalmente, um grande número de repetições de cargas de pressões reduzidas podem causar pequenas deformações que se acumulam ao longo do tempo e se manifestam como afundamentos canalizados nas trilhas de roda.

Balbo (2007, p. 257) afirma que “Não se pode estabelecer, de modo inquestionável, o processo de degradação ou de danificação estrutural de dado pavimento, ou, ainda, dos materiais que especificamente são empregados em sua estrutura.”, complementa ainda, que:

Ao se considerarem os possíveis mecanismos de ruptura em pavimentos, deve-se pensar que existem sítios geológicos e pedológicos diversos; diferentes condições climáticas e morfológicas; políticas de cargas para diferentes veículos comerciais em diversos países; utilização de materiais peculiares em cada região do planeta, além de tradições construtivas e de projeto muito variadas.

Com isso, Balbo (2007, p. 257) conclui que:

[...] há razões de sobra para que não exista um critério universalmente aceito por todos os técnicos de como se dá a ruptura de um pavimento, nem mesmo ainda uma combinação de vários critérios universalmente aceita. Quando se procura desenvolver, ajustar ou aprimorar critérios de dimensionamento estrutural, deve-se considerar necessário o entendimento dos mecanismos de ruptura apresentado por determinado tipo de pavimento.

No que se refere às misturas asfálticas, Balbo (2007, p. 275-276) ressalta que elas:

[...] além de apresentarem comportamento elastoplástico (a deformação sofrida tem duas componentes, uma de natureza elástica e outra de natureza plástica), possuem também comportamento viscoelástico, isto é, apresentam deformações elásticas dependentes do tempo de aplicação de carga.

Bernucci et al. (2007, p. 99) afirmam que à medida que o ligante asfáltico vai envelhecendo “[...] vai perdendo alguns de seus componentes e sofre certo enrijecimento.” e afirmam também que “Uma das técnicas de recuperação da flexibilidade do ligante é a reciclagem a quente ou a frio.” com a utilização de um agente rejuvenescedor quando o processo é executado a quente, ou agentes rejuvenescedores emulsionados quando o processo é realizado a frio.

5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS PAVIMENTOS

Segundo Bernucci et al. (2007, p. 415) para que se desenvolva uma alternativa de restauração deve-se fazer a avaliação do pavimento com base em dados relativos aos defeitos da superfície, irregularidades, condições de tráfego e da estrutura deste pavimento.

Pode-se destacar três métodos para avaliação das condições de degradação dos pavimentos flexíveis:

- a) avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos;
- b) avaliação subjetiva da superfície de pavimentos asfálticos;
- c) avaliação estrutural do pavimento asfáltico.

5.1 AVALIAÇÃO OBJETIVA DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

De acordo com Bernucci et al. (2007, p. 424) “ A condição de superfície de um pavimento asfáltico deve ser levantada, analisados seus defeitos e causas, e atribuídos indicadores numéricos que classifiquem seu estado geral.” e ainda segundo Pinto e Preussler (2002, p. 45) o procedimento “[...] fixa as condições de avaliação da superfície de pavimentos, mediante a contagem e classificação de ocorrências de defeitos e da medida de deformações permanentes nas trilhas de roda.”.

O parâmetro que é utilizado para esta avaliação é denominado Índice de Gravidade Global (IGG).

5.2 AVALIAÇÃO SUBJETIVA DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

De acordo com a Norma DNIT 009 (BRASIL, 2003b, p. 2), serventia pode ser definida como sendo a “Capacidade de um trecho específico de pavimento de proporcionar, na opinião do

usuário, rolamento suave e confortável em determinado momento, para quaisquer condições de tráfego.”.

Conforme Bernucci et al. (2007, p. 404) “A avaliação funcional de um pavimento relaciona-se à apreciação da superfície dos pavimentos e como este estado influencia no conforto ao rolamento.”. Afirmam ainda que “O valor da serventia atual é uma atribuição numérica compreendida em uma escala de 0 a 5, dada pela média de notas de avaliadores para o conforto ao rolamento de um veículo trafegando em um determinado trecho, em um dado momento da vida do pavimento.”.

Esta escala pode ser visualizada no quadro 1.

Quadro 1 – Níveis de serventia

Padrão de conforto ao rolamento	Avaliação (faixa de notas)
Excelente	4 a 5
Bom	3 a 4
Regular	2 a 3
Ruim	1 a 2
Péssimo	0 a 1

(fonte: BERNUCCI et al., 2007)

Bernucci et al. (2007, p. 404) reforçam a ideia de que têm-se elevados valores de VSA na conclusão da construção do pavimento pois neste momento ele ainda não possui irregularidades e que, um padrão de conforto ao rolamento classificado como excelente (VSA=5) não é encontrado. Os autores ainda afirmam que “O VSA do pavimento diminui com o passar do tempo por dois fatores principais: o tráfego e as intempéries.”.

De acordo com a Norma DNIT 009 (BRASIL, 2003b, p. 4) para se calcular e analisar os trechos do pavimento utiliza-se a fórmula 1 para o cálculo da serventia atual:

$$VSA = \frac{\sum X}{n} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

VSA: Valor da Serventia Atual;

X: Valores de serventia Atual individuais atribuídos por cada membro do grupo;

n: número de membros do grupo de avaliação.

Ainda de acordo com a Norma DNIT 009 (BRASIL, 2003, p. 4), “Para a determinação do Valor de Serventia Atual, devem ser escolhidos, previamente, trechos homogêneos, com extensão máxima de 2 quilômetros, após rápida inspeção prévia pela equipe de avaliadores.”.

5.3 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO ASFÁLTICO

Para Bernucci et al. (2007, p. 441), “Os pavimentos são estruturas que em geral não apresentam ruptura súbita, mas sim deterioração funcional e estrutural acumuladas a partir de sua abertura ao tráfego. A parcela estrutural é associada aos danos ligados à capacidade de carga pó pavimento [...]”. Os autores ainda afirmam que “Os defeitos estruturais resultam especialmente da repetição das cargas e vinculam-se às deformações elásticas ou recuperáveis e plásticas ou permanentes.” e que as deformações elásticas “[...] são responsáveis pelo surgimento da maioria dos trincamentos ao longo da vida do pavimento, e que podem levar à fadiga do revestimento.”, já no que diz respeito às deformações plásticas, afirmam que “[...] são acumulativas durante os anos de vida de um pavimento e resultam em defeitos do tipo afundamento localizado ou nas trilhas de roda [...]”.

A condição da estrutura de um pavimento pode ser realizada através dos métodos: destrutivo, semidestruutivo ou não-destrutivo. De acordo com Gonçalves (2007, p. 72), o método destrutivo “[...] consiste da abertura de furos de sondagem para identificação da natureza e das espessuras das camadas do pavimento, bem como da abertura de poços de sondagem para coleta de amostras dos materiais que serão ensaiados em laboratório.”.

Gonçalves (2007, p. 72) define o método não-destrutivo como aquele que “[...] consiste da realização de provas-de-carga para medidas de parâmetro de resposta da estrutura às cargas de roda em movimento. Os deslocamentos verticais de superfície (‘deflexões’) são os parâmetros de resposta cuja medida é mais simples e confiável, em comparação com tensões ou deformações [...]”.

Já para Trichês e Cardoso¹ (2001 apud BERNUCCI et al., 2007, p. 443) e Trichês et al.² (2004 apud BERNUCCI et al., 2007, p. 443), o método semidestrutivo “[...] é aquele que se vale de aberturas menores de janelas no pavimento que permitam utilizar um instrumento portátil de pequenas dimensões para avaliar a capacidade de carga de um pavimento, tal como o uso de cones dinâmicos de penetração [...]”.

Bernucci et al. (2007, p. 443) indicam que:

A avaliação mais adequada para ser feita em grandes extensões de pistas e com possibilidade de inúmeras repetições no mesmo ponto, de forma a acompanhar a variação da capacidade de carga com o tempo, é a que lança mão de medidas não-destrutivas, representadas por medidas de deflexão.

Os ensaios não-destrutivos, de acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (BRASIL, 2006, p. 80), podem servir para:

- a) auxiliar o projeto de reforço estrutural;
- b) distinguir os diferentes segmentos para efeito de projeto, em função dos valores de deflexão encontrados;
- c) determinar causas de defeitos e verificar locais com falta de suporte ou excesso de vazios;
- d) diferenciar os períodos críticos de deterioração do pavimento, em função das variações sazonais nas deflexões;
- e) indicar a capacidade da estrutura do pavimento em suportar o tráfego atual e futuro;
- f) avaliação dos módulos de elasticidade por retroanálise.

De acordo com Bernucci et al. (2007, p. 445-446) os defletômetros mais utilizados são:

- a) viga Benkelman;
- b) FWD – *falling weight deflectometer*.

1 TRICHÊS, G.; CARDOSO, A. B. Avaliação da capacidade de aterros e subleitos de rodovias e utilizando o penetrômetro dinâmico de cone e a viga Benkelman. In: TRANSPORTE em transformação. São Paulo: Makron Books, 2001. v. 1. p.

2 TRICHÊS, G.; FONTES, L. P. T. L.; DAL PAI, C. M. Procedimentos técnicos para o emprego do cone de penetração e investigação de pavimentos urbanos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35., 2004, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABPV, 2004. v. 1. p. 1-13.

Estes equipamentos citados medem, conforme afirmam Bernucci et al. (2007, p. 446):

- a) deflexão máxima: deslocamento sob o centro da carga (FWD) ou sob o centro das rodas duplas de um eixo simples (viga Benkelman), sendo a deflexão normalmente expressa em 10^{-2} mm (d_0);
- b) raio de curvatura: círculo ou arco de parábola que passa por dois pontos da deformada (viga Benkelman), normalmente soba carga e a 25 cm do centro da mesma (d_0 e d_{25});
- c) deformada, bacia de deformação ou bacia defletométrica: medidas dos deslocamentos elásticos ou recuperáveis em vários pontos a partir do centro do carregamento (d_0 , d_{25} , d_{50} etc).

O FWD (figura 6) ou defletômetro de impacto é definido pelo Manual do DNIT (BRASIL, 2006, p. 86) como sendo equipamentos que “[...] empregam um peso que é elevado até uma altura pré-estabelecida e solto em queda livre para atingir uma placa apoiada sobre a superfície do pavimento. Esta placa transmite uma força de impulso à estrutura, a qual pode ser modificada, alterando-se o peso e/ou a altura da queda [...]”.

Figura 6 – Equipamento FWD



(fonte: PAVESYS, 2015)

O equipamento registra em cada ponto de ensaio a bacia defletométrica, a carga aplicada, temperatura do ar e do pavimento e as coordenadas geográficas.

Bernucci et al. (2007, p. 448) afirmam que “O ensaio consiste em se aplicar a carga de impacto e ler os deslocamentos em vários sensores colocados ao longo de um suporte em posições convenientemente escolhidas para se obter a linha de deslocamentos.”. Os autores alertam para a diferença de deflexões encontradas com o FWD e a viga Benkelman, sendo assim, para cada estrutura de pavimento deve ser estudada sua correlação.

Os mesmos autores identificam ainda as principais vantagens e desvantagens do uso do FWD em relação à viga Benkelman (tabela1).

Tabela 1- Vantagens e desvantagens do FWD em relação à viga Benkelman

MEDIDAS DE DEFLEXÃO – FWD EM RELAÇÃO À VIGA BENKELMAN	
Vantagens	Desvantagens
Acurácia nas medições	Custo do equipamento
Possibilidade de aplicação de vários níveis de carga	Necessidade de calibrações mais sofisticadas
Maior produtividade	Diferenças de resultados entre marcas
Ensaio não influenciado pelo operador	
Registro automático de temperatura e de distâncias dos pontos de ensaio	

(fonte: adaptado de BERNUCCI et al., 2007)

6 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Bernucci et al. (2007, p. 473) afirmam que “A reciclagem de revestimento antigo deteriorado é uma alternativa utilizada para reduzir ou eliminar camadas com trincas com potencial de reflexão. Se houver também necessidade de aumento de capacidade de suporte, segue-se à reciclagem de uma nova camada de rolamento.”.

O Manual do DNIT (BRASIL, 2006, p. 175) expõe que:

Entre os benefícios que a reciclagem pode oferecer, podem ser citados os seguintes:

- a) conservação de agregados, de ligantes e de energia;
- b) preservação do meio ambiente; e;
- c) restauração das condições geométricas existentes.”.

Este Manual ainda afirma que (BRASIL, 2006, p. 175), a reutilização dos agregados, dos ligantes asfálticos e do asfalto envelhecido engloba muitas vantagens, como as já mencionadas anteriormente, mas considera também o fato da economia de materiais, visto que poderão ser utilizados os materiais constituintes do pavimento antigo, no que se relaciona à preservação do meio ambiente têm-se a redução dos descartes de materiais, além de minimizadas as interrupções de tráfego.

O processo de reciclagem pode ser realizado a frio ou a quente, no local ou em usina, a escolha do método deve ser seguida da consideração dos seguintes itens, segundo o mesmo Manual (BRASIL, 2006, p. 176-177):

- a) condição da superfície (trincamentos, desgastes , afundamentos nas trilhas de roda, etc.);
- b) capacidade estrutural;
- c) qualidade do material;
- d) disponibilidade do material virgem;
- e) irregularidade longitudinal;
- f) resistência à derrapagem (se o material for usado para camada de revestimento);

- g) localização e extensão do trecho;
- h) classe da rodovia;
- i) seção transversal do pavimento;
- j) condições geométricas;
- k) tráfego (atual e futuro);
- l) condições de remanejamento do tráfego;
- m) disponibilidade de equipamento;
- n) características do subleito e da base;
- o) objetivo da restauração.

6.1 RECICLAGEM A FRIO EM USINA

De acordo com o Manual (BRASIL, 2006, p. 191):

A reciclagem a frio é um processo no qual toda a estrutura do pavimento, ou parte dela, é removida e reduzida a dimensões apropriadas para depois ser misturada a frio no próprio local ou em usina. Poderão ser adicionados materiais betuminosos (emulsão asfáltica), agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos.

Conforme o Manual (BRASIL, 2006, p. 201), no processo de reciclagem a frio em usina “O material é removido da rodovia e misturado a frio numa usina misturadora.” e cita como principal vantagem “[...] o excelente controle de qualidade obtido na adição do estabilizador e no processo de mistura.”, já com relação às desvantagens, cita “[...] os transportes adicionais, os custos de execução adicionais e os maiores prazos de execução.”.

Quando se está falando em justificativas para o uso da reciclagem a frio, o Manual (BRASIL, 2006, p. 193) sugere:

- a) a melhoria da capacidade estrutural, que é o principal benefício diretamente atribuído a esta técnica;
- b) a reelaboração completa de camada(s) do pavimento, que permite a melhoria das propriedades do material, correção dos problemas de dosagem e, conseqüentemente, dos defeitos de superfície; e;
- c) a utilização de agentes estabilizadores que proporcionam ao material reciclado uma maior impermeabilização e reduzem a sensibilidade em relação aos efeitos da umidade.

Para Wirtgen (2002, P. 77), “O processamento em usina é geralmente a opção mais cara em termos de custo por metro cúbico de material processado, principalmente devido a custos de transporte ausentes na reciclagem *in situ*.”.

Como limitantes ao uso da reciclagem a frio, o Manual (BRASIL, 2006, p. 193) sugere:

- a) a interrupção do tráfego devido ao processamento e cura do material pode ser ainda maior do que os outros tipos de atividades de restauração. Essa interrupção pode ser bastante reduzida se for utilizada uma técnica de passagem única;
- b) quando é utilizado um estabilizante químico, os ganhos de resistência e a construção são suscetíveis às condições climáticas (temperatura e umidade); e;
- c) o controle da qualidade e uniformidade nas operações de reciclagem a frio no local não é inferior do que nas operações de reciclagem em usina; e;
- d) quando for utilizada emulsão asfáltica para elevar a resistência da base, são necessários cuidados especiais no processo de reciclagem a frio.

6.2 RECICLAGEM A FRIO NO LOCAL

Conforme afirma o Manual (BRASIL, 2006, p. 201), “O objetivo da reciclagem a frio é obter uma boa homogeneização do pavimento fragmentado (com ou sem adição de novo agregado), com a correta quantidade de estabilizante (quando for utilizado) e umidade suficiente para permitir a máxima densidade durante a compactação.”

O processo de mistura no local, conforme indica o Manual (BRASIL, 2006, p. 199), é aquele no qual:

O material é fragmentado, misturado com o agente estabilizador (material asfáltico, cimento ou cal) e redistribuído em uma única passada. Em geral, um único equipamento é utilizado para as tarefas de fresagem a frio, estabilização com material asfáltico ou com aditivos químicos.

O Manual (BRASIL, 2006, p. 199), caracteriza como vantagens:

- a) o material não tem que ser transportado para fora da pista;

b) o equipamento exigido para o processo é mínimo e proporciona a oportunidade de corrigir rapidamente problemas estruturais e de qualidade do material; e, por conseguinte;

c) evitar prolongada interrupção de tráfego.

Para Wirtgen (2002, p. 97) além das vantagens citadas anteriormente, pode-se destacar também as vantagens de cunho ambiental, visto que há a utilização de todo material já existente, a qualidade da camada reciclada, quase não há perturbação no subleito visto que a máquina recicladora passa apenas uma vez, tempo de construção menor devido à alta taxa de produtividade, reduzindo assim os custos e também a segurança para a via, visto que o processo é realizado somente em uma faixa por vez.

Já como desvantagens, o Manual (BRASIL, 2006, p. 200) cita o fato da “[...] maior dificuldade no controle de qualidade do material misturado, quando comparado com o processo em usina. Neste ponto, tem havido melhorias substanciais nos equipamento de reciclagem para melhorar o controle de qualidade.”.

Segundo Wirtgen (2002, p. 75),

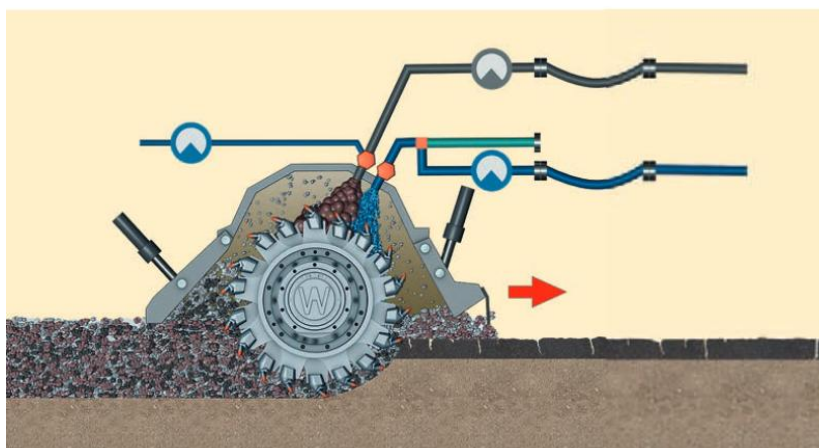
[...] a reciclagem a frio goza de uma ampla gama de aplicações, desde camadas relativamente finas que compreendem principalmente material asfáltico (também conhecido como ‘reciclagem a frio *in situ*’) até camadas espessas que incluem dois ou mais materiais diferentes do pavimento (também conhecido como ‘reciclagem em profundidade total’).

Ainda de acordo com Wirtgen (2002, p. 77), “Sempre que sua adoção for possível, a reciclagem *in situ* será o método de reciclagem preferencial devido exclusivamente às vantagens econômicas oferecidas.” e afirma ainda que:

Considerando-se a deterioração de pavimentos no mundo todo, a recuperação de pavimentos existentes ultrapassa a demanda por novas estradas, sendo que a reciclagem *in situ* foi aceita universalmente como o método preferencial para tratar desse enorme acúmulo de obras de recuperação de pavimentos.

Para Wirtgen (2002) a parte principal das máquinas recicladoras é o cilindro de corte, este cilindro gira, fresando o material existente no pavimento e a água ou agentes estabilizantes vão sendo introduzidos na câmara misturadora conforme o processo vai sendo realizado (figura 7).

Figura 7 – Configuração do rolo fresador/misturador



(fonte: WIRTGEN, 2002)

6.3 RECICLAGEM PROFUNDA DE PAVIMENTO COM ADIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

De acordo com a Norma DNIT 167 (BRASIL, 2013, p. 2):

Reciclagem profunda de pavimento com adição de cimento Portland é um processo de reconstrução parcial da estrutura do pavimento com emprego de equipamentos próprios para esta finalidade. Utilizam-se materiais existentes na estrutura do pavimento, cimento Portland, agregados adicionais (quando necessário) e água, em proporções previamente definidas no projeto de dosagem, e emulsão asfáltica para pintura e proteção.

De acordo com Oliveira (2003, p. 16), o processo de reciclagem profunda “[...] permite reconstruir parcialmente o pavimento velho, criando uma nova camada de base estabilizada de boa qualidade, homogênea e robusta, apta para receber novo pavimento.”, o autor propõe que:

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

Oliveira (2003, p. 21) afirma que:

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

Para Oliveira (2003, p. 21-22), “A camada reciclada poderá ser transformada numa nova base ou sub-base, ou ainda poderá atuar como uma camada de reforço do subleito [...]”, afirma ainda que “[...] a espessura da camada e a função da mesma na estrutura do pavimento dependerá de fatores como a vida útil prevista em projeto, tipo e quantidade de agente estabilizante e a espessura do revestimento novo.”.

Quando se trata de agentes estabilizantes, tem-se como fator importante o fato deste produto ser usado para manter ou melhorar as propriedades do material a ser tratado, quando se está falando em reciclagem profunda “[...] o agente estabilizante atua sobre materiais de características diferentes, pois a mistura reciclada pode ser composta por solo, agregado e material fresado.”(OLIVEIRA, 2003, p. 28), devido a este fato se deve conhecer bem os materiais da estrutura a ser reciclada, pois os agentes agem de forma diferente em diferentes tipos de materiais.

Oliveira (2003, p. 37) destaca que o cimento Portland “[...] é usado com uma variedade de tipos de solos, mas tem demonstrado mais eficiência para tratar solos bem graduados que possuem finos suficientes para produzir mistura homogênea.”.

O agente estabilizador mais comumente usado é o cimento, devido ao seu custo e disponibilidade, mas seu uso deve ser adequado ao projeto. Para sua adequada escolha deve-se analisar também suas vantagens e desvantagens (figura 8), algumas delas foram levantadas pelo Manual Witgen (2002, p. 160):

Oliveira (2003, p. 35) lembra que “O eventual trincamento de uma camada estabilizada é a principal desvantagem do emprego deste aditivo, principalmente se a camada aditivada venha a ficar imediatamente abaixo do revestimento, pois nesta situação o trincamento poderá se propagar para a capa asfáltica.”.

De acordo com Wirtgen (2002, p. 111) os trincamentos ocorrem por dois motivos “O primeiro motivo é a retração que é uma função da reação química que ocorre quando o cimento se hidrata na presença de água e, assim, não é um fenômeno induzido pelo tráfego. O segundo motivo é causado pela repetição de cargas de trânsito com o passar do tempo.”.

Figura 8 – Vantagens e desvantagens dos agentes estabilizadores de cimento

Estabilização com Cimento	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade. O cimento pode ser obtido em todo o mundo, sempre em sacos, e frequentemente a granel. • Custo. Em comparação com o betume, o cimento é barato. • Facilidade de aplicação. O cimento sempre pode ser espalhado manualmente na ausência de espargidores de grandes volumes ou unidades de mistura de cimento. • Aceitação. O cimento é bem conhecido pela indústria da construção. Métodos de teste padrão e especificações normalmente estão disponíveis. • Melhoria significativa da resistência à compressão e das propriedades de durabilidade da maioria dos materiais. 	<ul style="list-style-type: none"> • As rachaduras por encolhimento são inevitáveis. Contudo, podem ser minimizadas. • Aumenta a rigidez em pavimentos flexíveis. • Exige cura e proteção apropriadas do tráfego imediato, principalmente para veículos pesados com movimentação lenta.

(fonte: WIRTGEN, 2002)

Wirtgen (2002, p. 112-113) ainda destaca que os trincamentos por retração se devem pelo teor de cimento, tipo de material sendo estabilizado, teor de umidade da compactação e proporção de cimento, velocidade de secagem e a ligação entre as camadas. Já os trincamentos provenientes do trânsito têm como decorrência as tensões produzidas pelas cargas e tráfego.

Com relação aos equipamentos que são utilizados para a reciclagem profunda, Oliveira (2003, p. 76) afirma que são os mesmos utilizados na construção das rodovias, adicionando-se a recicladora e que a escolha de qual máquina é a mais adequada é feita com base nas características do pavimento e do tipo de estabilizante a ser utilizado. O Manual Wirtgen (2002, p. 80-81) afirma que “A reciclagem é realizada pelo acoplamento de caminhões-tanque à recicladora.” e que “A combinação mais simples consiste em uma recicladora acoplada a um único caminhão-pipa.” (figura 9).

Figura 9 – Trem de reciclagem



(fonte: WIRTGEN, 2002)

Oliveira (2003, p. 84) destaca que após escolhido o tipo de recicladora, segue-se a obra com os seguintes passos:

- a) trituração do pavimento existente;
- b) estabilização da mistura;
- c) pré-compactação;
- d) perfilamento da superfície e compactação final;
- e) acabamento da superfície;
- f) aplicação do selante;
- g) execução do revestimento.

No que diz respeito a normas técnicas quando se está falando em técnicas de reciclagem com adição de cimento Portland no Brasil tem-se:

- a) DER/PR ES-P 33/05 – Pavimentação: Reciclagem de pavimento *in situ* com adição de cimento;
- b) DER/SP ET-DE-P00/035 – Reciclagem de pavimento asfáltico *in situ* com cimento e brita;
- c) DNIT 167/2013 – ES – Pavimentação: Reciclagem profunda de pavimentos *in situ* com adição de cimento Portland – Especificação de Serviço.

Apesar desta técnica de reciclagem já ser utilizada em alguns países desde a década de 50, no Brasil os registros datam sua utilização há aproximadamente três décadas, principalmente no Estado de São Paulo, mas também em Estados como Minas Gerais e Santa Catarina. Alguns

exemplos de rodovias que passaram pelo processo de reciclagem com cimento Portland são apresentados na tabela 2 (FEDRIGO, 2015, p. 32):

Tabela 2 – Casos de aplicação da reciclagem com cimento no Brasil

Ano	Local	Característica da obra	Fonte
1998	Rodovia Fernão Dias (BR-381: São Paulo / SP - Belo Horizonte / MG)	Reciclagem de cerca de 30000 m ³ de pavimento	Silva e Miranda (2000)
2000	Rodovia SP-352	Reciclagem de revestimento asfáltico e base de solo-cimento	Paiva <i>et al.</i> (2013)
2004	Rodovia Pedro Monteleone (SP-351: Bebedouro - Palmares Paulista / SP)	Reciclagem de 22 Km de revestimento asfáltico e base de solo-cimento	Oliveira <i>et al.</i> (2005)
2007	Rodovia SC-150 (BR-282: Joaçaba - Capinzal / SC)	Reciclagem de 30 Km de revestimento asfáltico e base de brita graduada	Trichês e Santos (2013)
2011	Rodovia Fernão Dias (BR-381: São Paulo / SP - Belo Horizonte / MG)	Reciclagem de base de solo-brita	Aranha (2013)
-	Rodovia BR-040 / MG	Reciclagem de revestimento asfáltico e base de cascalho laterítico	Oliveira (2003)
-	Rodovia SP-294	Reciclagem de revestimento asfáltico e base de solo-cimento	Oliveira (2003)
-	BR-163 / BR-277	Reciclagem de pavimentos no estado do Paraná	Andrade (2007)
-	Rodovia BR-459 / MG	Reciclagem de trecho entre Pouso Alegre e Congonhal / MG	Gusmão (2008)
-	Rodovia BR-135 / MG	Reciclagem de revestimento asfáltico e base de cascalho laterítico	Paiva e Oliveira (2009)
-	Rodovia SP-563 (região de Andradina / SP)	Reciclagem de revestimento asfáltico de base de solo-cimento	Paiva e Oliveira (2010)

(fonte: FEDRIGO, 2015)

6.3.1 Dosagem da mistura reciclada

Conforme exposto no capítulo 2, o método proposto de dosagem da mistura reciclada é o estudado por Fedrigo (2015, p. 80), o qual descreve que dentre as características relevantes para a dosagem da mistura com cimento pode-se citar “[...] o tipo de cimento adequado, a porcentagem de material fresado admitida na mistura e a heterogeneidade dos materiais envolvidos.”.

No que diz respeito ao tipo de cimento mais adequado à rodovia de estudo, o autor indica o uso do cimento do tipo CP IV, devido a sua característica de tornar o produto mais impermeável e mais durável, apresentando também facilidade de aplicação em grandes volumes.

Como conclusão para um método de dosagem para misturas constituídas pelos materiais característicos do pavimento da rodovia RSC 453, Fedrigo (2015, p. 144) sugere que sejam adotados:

- a) valores mínimos de resistência a compressão simples igual a 2,5 MPa e para resistência a compressão diametral de 0,40 MPa, aos 7 dias de cura;
- b) utilização de teores de cimento de até 4%, devido ao fato de que elevadas rigidezes são obtidas com o emprego de cimento com respectivos teores de cimento.

Partindo-se do princípio que a utilização da reciclagem seja também por uma questão de economia, a escolha da utilização de cimentos com o teor indicado anteriormente também tem relevada importância, pois “[...] o emprego de teores mais elevados, apesar de aumentar significativamente a resistência contra a água, pode agravar os efeitos da retração por secagem e aumentar o custo da obra.” (FEDRIGO, 2015, p. 144), e como consequência dessa retração temos o trincamento, conforme já foi abordado no item 6.1.3, denotando assim, a grande importância de um adequado teor de cimento.

7 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO

O processo de dimensionamento de estruturas de pavimentos, segundo Franco (2007, p. 7):

[...] envolve o conhecimento de variáveis de difícil previsão e modelagem, tais como as características dos materiais de pavimentação, o comportamento deles em relação à aplicação das cargas, o próprio carregamento e o tipo de resposta da estrutura para suportar as cargas sob todas as variações das condições climáticas durante o período de análise.

A fim de se assegurar que não ocorrerá um excesso de trincamentos do revestimento por fadiga devido à ação da passagem dos veículos e assegurar também, que as camadas da estrutura do pavimento reduzam os efeitos do afundamento da trilha de roda é que se deve garantir um adequado dimensionamento de um pavimento asfáltico, visto que muitos pavimentos não foram dimensionados para resistir ao grande número de esforços aos quais são solicitados, pois a fadiga não é contemplada nos métodos tradicional e empírico (FRANCO, 2007, p. 1).

Franco (2007, p. 2) salienta que:

A necessidade da modelagem mecanística-empírica vem da busca constante de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, de modo a utilizar materiais, sobre cujo desempenho de campo ainda não se têm experiência suficiente, e considerar, também, os efeitos das condições ambientais e de tráfego, diferentes daquelas para as quais os Métodos Empíricos, ainda utilizados no país, foram desenvolvidos.

De acordo com Franco (2007, p. 11), o dimensionamento de um pavimento segue basicamente as seguintes diretrizes:

- a) reunir os dados referentes aos materiais de pavimentação, ao tráfego e às condições ambientais;
- b) correlacionar os dados de resistência dos materiais e tráfego em função das épocas sazonais e o comportamento dos materiais em função do tipo de carregamento;
- c) escolher as espessuras das camadas e calcular as tensões e deformações considerando as diversas correlações obtidas;

d) relacionar os valores críticos de tensões e deformações com os danos que a repetição das cargas pode causar ao pavimento por meio de modelos de previsão, e;

e) verificar se as espessuras escolhidas satisfazem as condições impostas no dimensionamento.

Franco (2007, p. 19) afirma ainda que, “Mesmo com essas ferramentas atuais de análises de pavimentos disponíveis que utilizam um método mecanicista, muitos projetos ainda são realizados por meio dos métodos de dimensionamento empírico com base nos ensaios de CBR.”.

Estas análises podem ser realizadas com o auxílio de programas computacionais, como o *software* EVERSTRESS 5.0, desenvolvido pelo *Washington State Department of Transportation* nos Estados Unidos. O programa é capaz de calcular as tensões, deformações e deflexões em um sistema de camadas semi-infinitas abaixo da superfície de cargas circulares e analisar um pavimento com até 5 camadas, 20 cargas e 50 pontos de avaliação (WASHINGTON STATE, 2005, p. 1, tradução nossa).

Para cada camada do pavimento devem ser definidos a espessura das camadas, o coeficiente de Poisson, o módulo de resiliência (característica fundamental para o dimensionamento), o carregamento da estrutura, o raio de aplicação da carga e os pontos críticos, ou seja, aqueles onde se deseja obter os dados. Estes parâmetros servem como dados de entrada do programa, o que pode ser visualizado na figura 10, a qual mostra a tela de entrada de dados.

A base das camadas asfálticas, a profundidade média das camadas não cimentadas da base e o topo do subleito são os pontos serão feitas as análises.

Figura 10 – Tela de entrada com as características do pavimento

No	Layer ID	Interface Contact	Poisson's Ratio	Thickness (in)	Modulus (ksi)	Multiplier (ksi)	Power
1		1.00					
2		1.00					
3		1.00					
4							
5							

(fonte: WASHINGTON STATE, 2005)

7.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Para Coutinho (2011, p. 102):

Um dos principais fatores necessários para a análise do desempenho de um pavimento asfáltico pela metodologia ME (mecanístico-empírico) no Brasil é o módulo de resiliência, isto é, um ‘módulo de elasticidade’ que expressa a relação tensão-deformação dos materiais, obtidas em ensaios de carga repetida, sob condições normalizadas.

Foi Francis Hveem que iniciou os estudos referentes ao comportamento resiliente dos materiais em meados de 1930, relacionando como causa das fissuras nos revestimentos asfálticos a resiliência ou deformações recuperáveis. (BERNUCCI et al., 2007, p. 291).

A Norma DNIT 134 (BRASIL 2010a, p. 2), define que “O módulo de resiliência (MR) dos solos é a relação entre a tensão-desvio (σ_d) aplicada repetidamente em uma amostra de solo e a correspondente deformação específica vertical recuperável ou resiliente (ϵ_r):” o que pode ser definido através da equação 2:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

MR = módulo de resiliência;

σ_d = tensão-desvio aplicada repetidamente;

ϵ_r = deformação específica resiliente.

Já a deformação específica resiliente, pode ser determinada pela fórmula 3 segundo a Norma DNIT 134 (BRASIL, 2010a, p. 4):

$$\epsilon_r = \frac{\Delta_h}{H_0} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

Δ_h = deformação resiliente registrada no computador;

H_0 = distância entre alças.

Em misturas asfálticas, o ensaio de módulo de resiliência é realizado conforme afirmam Bernucci et al. (2007, p. 303):

[...] aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo-de-prova cilíndrico regular. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura (T).

Com estes valores é calculado o módulo de resiliência com o uso da fórmula 4 (BERNUCCI et al., 2007, p. 296):

$$MR = \frac{P}{\Delta \times H} \times (0,9976 \mu + 0,2692) \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

MR = módulo de resiliência;

P = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova;

Δ = deslocamento elástico ou resiliente registrado para 300, 400 e 500 aplicações de carga;

H = altura do corpo-de-prova;

μ = coeficiente de Poisson.

De acordo com a Norma DNIT 135 (BRASIL, 2010b, p. 3):

- a) recomenda-se o valor de 0,30 para o coeficiente de Poisson;
- b) o MR do corpo-de-prova ensaiado será a média aritmética dos valores determinados a 300, 400 e 500 aplicações de carga (P);
- c) quando a temperatura de ensaio não for especificada, o MR deverá ser determinado na temperatura de $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Cabe ainda destacar que “[...] os módulos de resiliência das misturas asfálticas variam ao longo do tempo devido ao envelhecimento do ligante asfáltico, o que causa um enrijecimento do ligante e conseqüente aumento de rigidez dos revestimentos.” (BERNUCCI et al., 2007, p. 303).

7.2 FADIGA

De acordo com Bernucci et al. (2007, p. 312), “A fadiga ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas que não parecem críticas por si, se comparadas à resistência sob carregamento monotônico, mas na verdade são decisivas para a vida útil do material.”, e ainda afirmam que “A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura (Nf) ou vida de serviço (Ns).”.

Para Pinto e Preussler (2002, p. 110-111):

No nosso país, o principal defeito dos pavimentos flexíveis é o trincamento por fadiga do revestimento provocado pela repetição das cargas de tráfego. Por outro lado, a resiliência das camadas granulares é relativamente elevada para baixos níveis de tensões confinantes atuantes, contribuindo bastante para o aumento da deformabilidade elástica e, assim, acelerando o processo de degradação por fadiga dos revestimentos betuminosos ou de camadas cimentadas.

Já Franco (2007, p. 189), afirma que como causa da fadiga em materiais asfálticos e cimentados tem-se a “[...] repetição da aplicação das cargas oriundas do tráfego de veículos sobre os pavimentos, gerando micro-fissuras na estrutura que resultam na perda de rigidez do material. Ao longo do tempo as micro-fissuras vão se acumulando até a ruptura do material.”.

Tendo em vista o fato dos pavimentos flexíveis serem compostos por camadas granulares com posterior camada composta por agregado com ligantes betuminosos, Pinto e Preussler (2002, p. 143) afirmam que “Estes últimos, sofrem o dano por fadiga devido à repetição do tráfego rodoviário. Daí, a consideração de modelos representativos de previsão do número de repetições da carga para atingir o trincamento por fadiga.”, modelos estes, relacionados às tensões e deformações ocorridas nos pontos mais críticos do pavimento.

7.3 MODELOS DE VIDA DE FADIGA

Para esta pesquisa será utilizado para análise modelos de vida de fadiga o método da República Sul-Africana com o objetivo de determinar os valores admissíveis de tensão e deformação, visto que, conforme afirmou Marodin (2010, p. 53), “[...] os solos, agregados e demais materiais de pavimentação, assim como o clima, da República Sul-Africana são muito semelhantes aos que ocorrem em grande parte do sul do Brasil.”.

Ainda de acordo com Marodin (2010, p. 42):

Theyse atualizou em 1995 o Método da República Sul-Africana e inseriu o parâmetro de confiabilidade necessária para o desempenho aproximado dos níveis de serviço às diferentes categorias de estradas [...]. Os parâmetros são baseados em rodovias da África do Sul, sendo amplamente aceitos no Brasil.

Para este trabalho será utilizado como parâmetro de confiabilidade 90%, indicando rodovia do Tipo B, conforme mostra a figura 11.

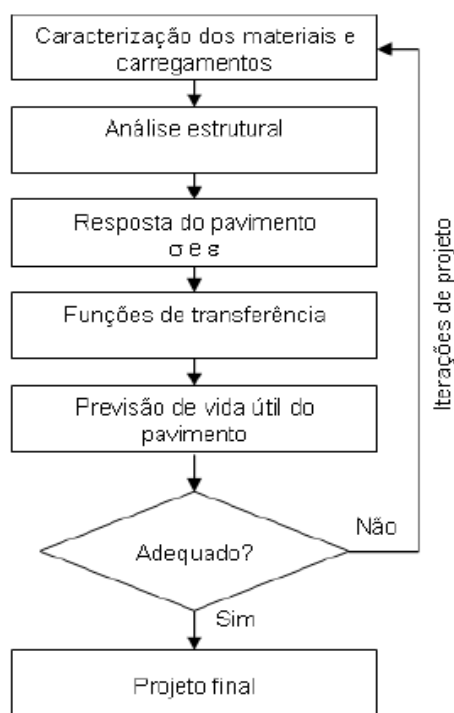
Figura 11 – Categorias de estradas e níveis de confiabilidade

Road Category	Description	Approximate design reliability (%)
A	Interurban freeways and major interurban roads	95
B	Interurban collectors and major rural roads	90
C	Rural roads	80
D	Lightly trafficked rural roads	50

(fonte: THEYSE et al., 1996)

Theyse et al. (1996, p. 6, tradução nossa) sugerem que o primeiro passo a ser realizado para a análise é a definição do carregamento e dos materiais, incluindo-se também a espessura das camadas e propriedades elásticas dos materiais em cada camada, a resposta será expressa em tensões e deformações, como já citado anteriormente, esta resposta servirá como parâmetro de entrada relacionando as tensões e deformações com o número de cargas de um eixo padrão, esta sequência de atividades pode ser visualizada na figura 12.

Figura 12 – Diagrama do método Sul-Africano de projeto



(fonte: adaptado de THEYSE et al., 1996)

Devido a repetição de cargas temos o surgimento dos trincamento por fadiga, como já exposto anteriormente, esse trincamento, segundo Marodin (2010, p. 44), “[...] é controlado pela deformação horizontal de extensão, sendo que nas fibras da camada de concreto asfáltico é onde acontecem os maiores esforços, sendo estes de tração.”

A forma geral do modelo de fadiga proposto por Theyse é dada pelo modelo 1, sendo os parâmetros A e B determinados neste caso através da classe B de rodovia e do módulo de resiliência de 5.000 MPa para o revestimento, os parâmetros são encontrados com base na tabela 3, indicada por Theyse et al. (1996, p. 25-26). Este modelo será utilizado para análise da base do revestimento asfáltico que é onde ocorrem os maiores esforços conforme já exposto, podendo-se assim estimar o número N suportado pela rodovia. Para se realizar a comparação, este N estimado pelos modelos foi comparado ao N de projeto encontrado pelo DAER (Apêndice A), que deve sofrer uma correção (fórmula 5), com isso o N_{USACE} equivale a um N_{AASHTO} igual a $3,38 \times 10^6$, podendo assim ser comparado aos modelos propostos.

$$N_{USACE} = 3,4 \times N_{AASHTO} \quad (\text{fórmula 5})$$

$$N_{iAASHTO} = 10^{A \left(1 - \frac{\log \epsilon_h}{B}\right)} \quad (\text{modelo 1})$$

Onde:

$N_{iAASHTO}$ = número de repetições de carga do início do trincamento;

A, B = variáveis dependentes do módulo de resiliência e da classe da rodovia;

ϵ_h = deformação horizontal de extensão (μ_s).

Sendo utilizados para este trabalho então, os coeficientes $A = 15,73$ e $B = 3,362$.

Tabela 3 – Variáveis do modelo de vida de fadiga do método mecanístico da República da África do Sul

Módulo de Resiliência (MPa)	Categoria da Rodovia	A	B
		5000	A
	B	15,73	3,362
	C	15,83	3,383
	D	16,10	3,441

(fonte: adaptado de THEYSE et al., 1996)

Para a camada reciclada serão analisadas a tensão vertical de compressão no topo da camada e a deformação horizontal de extensão na fibra inferior da camada, através dos modelos de fadiga especificados a seguir.

Para o topo da camada reciclada tem-se a verificação da tensão vertical de compressão, e de acordo com Theyse et al. (1996, p. 22) esta tensão é dada pelo modelo 2 utilizando-se classe B de rodovia, e um UCS igual a 7500 KPa.

$$N_{AASHTO} = 10^{8,384 \left(1 - \frac{\sigma_v}{1,23 \times UCS}\right)} \quad (\text{modelo 2})$$

Onde:

N_{AASHTO} = número de repetições de carga do pavimento da AASHTO;

σ_v = tensão vertical de compressão, em MPa;

UCS = resistência à compressão simples, em KPa.

Como a camada de base pode romper por tração, deve-se fazer a análise da deformação horizontal de extensão (ϵ_h), que de acordo com Theyse et al. (1996, p. 20) pode ser definida pelo modelo 3.

$$N_{\text{AASHTO}} = 10^{6,841 \left(1 - \frac{\varepsilon_h}{7,63 \times \varepsilon_b}\right)} \text{FC} \quad (\text{modelo 3})$$

Onde:

N_{AASHTO} = número de repetições de carga do pavimento;

ε_h = deformação horizontal de extensão;

ε_b = valor sugerido para deformação limite de ruptura;

FC = fator de correção.

O fator de correção é dependente da espessura da base e o ε_b é dependente do tipo de material, com base em Theyse et al. (1996, p.21), $\varepsilon_b = 145 \mu\varepsilon$, já o FC é dado pela tabela 4.

Tabela 4 – FC para modelo de deformação horizontal

Espessura total da base (cm)	FC	Espessura total da base (cm)	FC
20	1,89	26	2,81
21	2,02	27	3
22	2,16	28	3,2
23	2,3	29	3,42
24	2,46	30	3,65
25	2,63	31	3,89

(fonte: adaptado de MARODIN, 2010)

8 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Para que seja possível a análise da estrutura a ser proposta e posteriormente comparada ao modelo de vida de fadiga, foi utilizado o *software* Everstress 5.0, como já mencionado anteriormente, para isto serão especificados a seguir os parâmetros de entrada do programa.

8.1 PARÂMETROS DE ENTRADA

Como parâmetros de entrada, o *software* solicita (WASHINGTON STATE, 2005, p. 1, tradução nossa):





- a) espessura das camadas;
- b) módulo de resiliência das camadas;
- c) coeficiente de *Poisson* das camadas;
- d) carregamento da estrutura;
- e) raio de aplicação da carga;
- f) pontos críticos.

8.1.1 Espessura das camadas

A fim de se absorver as tensões horizontais de tração da camada reciclada podem ser usados alguns recursos, como o aumento da rigidez ou o aumento da espessura da camada, mas conforme concluiu Fedrigo (2015, p. 151) em seu estudo, “[...] rigidezes elevadas tornam as misturas cimentadas bastante frágeis, fato que pode acarretar em rupturas a baixos níveis de deformação.”, logo, é preferível a utilização de espessuras mais robustas, entre 20 e 35 cm.

Portanto, para a camada de base a espessura determinada foi de 20 cm e de 8 cm para a camada de revestimento asfáltico (figura 13).

Figura 13 – Representação esquemática das camadas

	Revestimento 8 cm MR = 5.000 MPa
	Base Reciclada 20 cm MR = 10.000 MPa
	Sub-base 20 cm MR = 300 MPa
	Sub-leito ~ MR = 200 MPa

(fonte: elaborado pela autora)

8.1.2 Módulo de resiliência das camadas

Para o revestimento asfáltico adotou-se um MR igual a 5.000 MPa, para a sub-base um MR igual a 300 MPa e para o sub-leito 200 MPa. Já para a base reciclada utilizou-se o valor proposto por Fedrigo (2015, p. 118) considerando como variáveis um teor de cimento igual a 4%, a quantidade de fresado igual a 20% aos 7 dias de cura, obtendo-se assim um valor para o MR de 12.571 MPa, mas por segurança se adotou MR = 10.000 MPa.

8.1.3 Coeficiente de *Poisson*

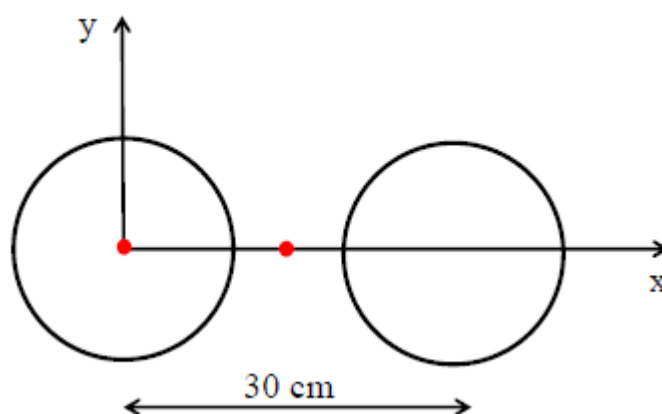
Para revestimento asfáltico foi adotado um μ igual a 0,30 e 0,35 para as camadas de base e sub-base, e 0,45 para o sub-leito.

8.1.4 Carregamento da estrutura

O carregamento foi constituído por duas cargas de 2.050 kgf, espaçadas de 30 cm e a pressão de inflação dos pneus foi 80 psi (0,56 MPa).

As coordenadas dos pontos de verificação das cargas (x;y) podem ser visualizadas na figura 13, sendo os pontos de avaliação em $x = 0$ e $x = 15$ cm e em $y = 0$ (MARODIN, 2010, p. 57):

Figura 14 – Coordenadas da carga aplicada



(fonte: MARODIN, 2010)

8.1.5 Raio de aplicação da carga

Calculado automaticamente pelo *software*.

8.1.6 Pontos críticos

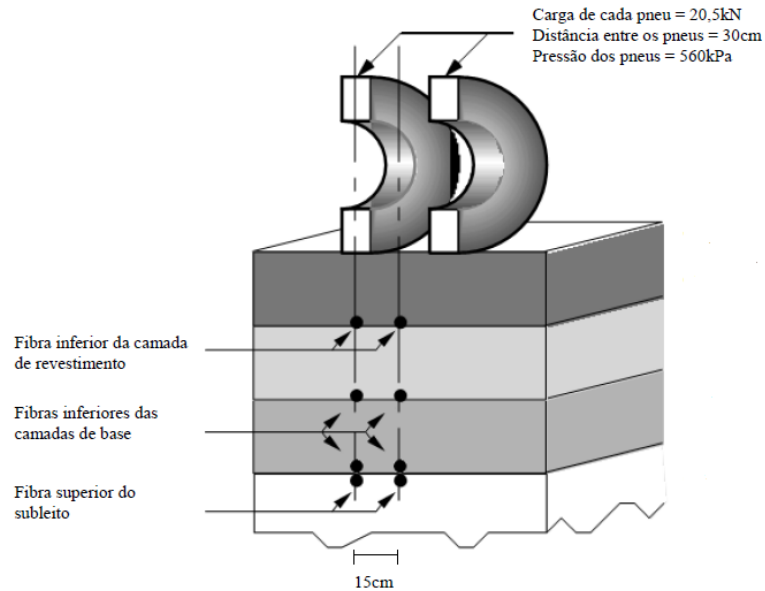
Nesta etapa foi realizada a definição dos pontos onde as tensões e deformação devido à tração são máximas. Esta configuração é ilustrada na figura 14.

Para a estrutura proposta as análises foram realizadas no revestimento asfáltico e na camada reciclada, tendo as respostas nas seguintes profundidades:

- a) $z = 0$ (deflexão superficial);
- b) $z = 7,999$ cm (tensão de tração e deformação de extensão);

- c) $z = 8,001$ cm (tensão de compressão);
 d) $z = 27,999$ cm (tensão de tração e deformação de extensão).

Figura 15 – Pontos de interesse do pavimento para análise



(fonte: adaptado de WASHINGTON STATE, 2005)

8.1.7 Resultados

Através das análises realizadas com uso do *software* puderam-se determinar as máximas tensões e deformações para diversas estruturas, com diferentes espessuras e características, chegando-se assim aos resultados com base nos valores propostos.

Conforme já exposto, a estrutura é constituída por 8 cm de revestimento asfáltico e 20 cm de base reciclada, com base nas análises mecanísticas, as quais podem ser encontradas no Apêndice B, obtidas pelo *software* e de posse dos modelos propostas para análise de vida de fadiga, chegou-se aos valores da tabela 5.

Tabela 5 – Respostas estruturais da estrutura proposta

ϵh na fibra inferior da camada asfáltica ($\mu\epsilon$)	σv na fibra superior da camada reciclada (Mpa)	ϵh na fibra inferior da camada reciclada ($\mu\epsilon$)	Volume de tráfego estimado pelo modelo 3
-2,36	-0,46	39,63	7,45E+06

(fonte: elaborado pela autora)

De posse dos modelos de fadiga propostos, o menor volume de tráfego encontrado para estrutura proposta foi obtido através do modelo 3, o qual atende ao volume de tráfego previsto para a via.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visto o intenso desgaste e degradação que as rodovias têm sofrido devido aos excessos de carga e, muitas vezes, pela falta de manutenção, gerando-se assim cada vez mais a necessidade de intervenções, a reciclagem de pavimentos surge como um procedimento extremamente viável para a sua recuperação. Como este procedimento reduz e algumas vezes, elimina a necessidade de utilização de novos agregados acaba por assumir um importante papel no contexto do desenvolvimento sustentável e também na redução dos custos. Somado a isso, o cimento Portland utilizado como agente estabilizador, ainda têm por vantagens a facilidade de aplicação e o aumento da resistência do material, além da sua grande aceitação.

Tendo em vista estes aspectos, este trabalho procurou expor a técnica de reciclagem profunda de pavimentos visando a recuperação de um trecho da rodovia RSC-453, integrante do programa Crema Serra e propor uma estrutura para o pavimento.

Com o auxílio de modelos de vida de fadiga pôde-se verificar que a estrutura proposta atende ao tráfego previsto para a via, tendo o menor volume de tráfego encontrado pelo modelo de deformação horizontal de extensão (ϵ_h) na fibra inferior da camada reciclada.

E finalmente como proposta para estudos futuros se sugere o estudo e acompanhamento de um pavimento, o qual passou pelo processo de reciclagem profunda com adição de cimento Portland para que se possa ter uma melhor avaliação das vantagens deste método e o comportamento frente às solicitações de tráfego e intempéries.

REFERÊNCIAS

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projetos e restauração. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 1 ed. Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2007.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. **DNIT 005/2003 – TER**: defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – terminologia. Rio de Janeiro, 2003a. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT005_2003_TER.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2014.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. **DNIT 009/2003 – PRO**: avaliação subjetiva de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – procedimento. Rio de Janeiro, 2003b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT009_2003_PRO.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2014.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Geral. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **DNIT 134/2010 – ME**: pavimentação – solos – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010a. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT134_2010_ME.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2014.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Geral. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **DNIT 135/2010 – ME**: pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT134_2010_ME.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2014.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Geral. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **DNIT 167/2013 – ES**: pavimentação – reciclagem profunda de pavimentos “*in situ*” com adição de cimento Portland – especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas/DNIT135_2010_ME.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2014.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. **IPR-720**: manual de restauração de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/..%5Carquivos_internet%5Cipr%5Cipr_new%5Cmanuais%5CManual_de_Restauracao.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de Rodovias 2013:** relatório gerencial. Brasília, 2013. Disponível em:
<<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relGeral.aspx>>. Acesso em: 12 set. 2014.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de pavimento asfáltico:** comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho. 2011. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Instrução de serviço 112:** estudos e projetos Crema. Porto Alegre, 2013. Disponível em:
<http://www.daer.rs.gov.br/site/normas_publicacoes.php>. Acesso em: 12 set. 2014.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland:** definição das bases para um método de dosagem. 2015. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV.** 2007. 294 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GONÇALVES, F. J. P. **Diagnóstico e manutenção de pavimentos:** ferramentas auxiliares. 1 ed. Passo Fundo: UPF, 2007.

MARODIN, E. E. **Alternativa de dimensionamento para pavimento da BR-448:** Análise mecanística com aplicação de BGTC. 2010. 73f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica dos Pavimentos.** 2 ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

OLIVEIRA, P. C. A. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis.** 2003. 177 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – UNICAMP, Campinas, 2003.

PAVESYS. **FWD Avaliação Estrutural (Deflexões).** Porto Alegre, 2015. Disponível em:
<<http://pavesys.com.br/fwdhwdavaliacao-estrutural-deflexoes/>>. Acesso em: 31 de junho de 2015.

PINTO, S; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária:** conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. 1 ed. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 2 ed. São Paulo: Pini, 2007. 1 v.

THEYSE, H. L.; DE BEER, M.; RUST, F.C. **Overview of South African Mechanistic Pavement Design Method** In.: TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 1539, 1996.

WASHINGTON STATE, Department of Transportation: **Everseries User's Guide:** Pavement Analysis Computer Software and Case Studies, 2005. Disponível em: <<http://www.wsdot.wa.gov/Business/MaterialsLab/PavementGuide>. Acesso em 7 maio 2015.

WIRTGEN. **Reciclagem a frio:** Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen. 1 ed. Windhagen, Alemanha, 2012.

APÊNDICE A – Projeção do Tráfego e Número N



**CENTRO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS
EQUIPE DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO**

Projeção do Tráfego e do número N para contagens de 16h/3dias

RODOVIA:	BRS 453
TRECHO:	0250- ENT.BRS/116(P/SÃO MARCOS) - ENT.ERS/476(LAJEADO GRANDE)
SUB-TRECHO:	KM 152, Posto Guerra
LOCAL:	CAXIAS DO SUL

CONTAGEM									
Dia de Contagem	Dia da Semana	Data	Passeio	Coletivo	Carga				TOTAL
					Leve	Média	Pesada	Ultra Pes	
1º DIA	Quinta	22/07/2010	4.389	46	223	171	298	205	5.331
		VDM	4389	46	223	171	298	205	5331
		VDM	4389	46	223	171	298	205	5332

TRÁFEGO E NÚMERO N									
Ano	Passeio	Tx Cresc	Coletivo	Tx Cresc	Carga	Tx Cresc	TOTAL	Nº N (10 E 6)	N Acum (10 E 6)
2010	4389	3%	46	3%	897	3%	5332	0,74	0,74
2011	4521	3%	47	3%	924	3%	5492	0,76	1,50
2012	4658	3%	49	3%	952	3%	5657	0,78	2,28
2013	4796	3%	50	3%	980	3%	5826	0,81	3,09
2014	4940	3%	52	3%	1010	3%	6001	0,83	3,92
2015	5088	3%	53	3%	1040	3%	6181	0,86	4,78
2016	5241	3%	55	3%	1071	3%	6367	0,88	5,66
2017	5398	3%	57	3%	1103	3%	6558	0,91	6,57
2018	5560	3%	58	3%	1136	3%	6754	0,94	7,50
2019	5727	3%	60	3%	1170	3%	6957	0,96	8,47
2020	5898	3%	62	3%	1205	3%	7166	0,99	9,46
2021	6075	3%	64	3%	1242	3%	7381	1,02	10,48
2022	6258	3%	66	3%	1279	3%	7602	1,05	11,54

Período:	12 anos	Fatores de Veículo	Coletivo:	0,3450
Fator Regional:	1,00		Carga Leve:	0,0630
Fator de expansão:	1,13		Carga Média:	1,3710
			Carga Pesada:	4,9860
			Carga Ultra Pesada:	11,2050

APÊNDICE B – Planilha de resultado da análise mecânica

Clayered Elastic Analysis by EverStress for Windows

Line

Title: carol

No of Layer: No of Load: No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)
1	0.3	8	5000
2	0.35	20	10000
3	0.35	20	300
4	0.45 *		200

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	0	0	20500	560	10.795
2	30	0	20500	560	10.795

Line

Line

Location N: X-Position | Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
0	1	-540.98	-581.59	-560	0	0	0
7.999	1	-245.55	-256.91	-461.56	0	26.78	0
8.001	2	-352.58	-374.45	-461.5	0	26.77	0
27.999	2	437.01	516.2	-29.28	0	4.45	0

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer	E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
0	1	-39.7	-50.26	-44.65	4.79	0	124.977
7.999	1	-6	-8.96	-62.16	2.172	0	119.967
8.001	2	-6	-8.95	-20.7	2.171	0	119.966
27.999	2	26.66	37.35	-36.29	-4.058	0	115.217

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
0	1	-581.59	-560	-540.98	-50.26	-44.65	-39.7
7.999	1	-464.83	-256.91	-242.28	-63.02	-8.96	-5.15

8.001	2	-467.73	-374.45	-346.36	-21.54	-8.95	-5.16
27.999	2	-29.32	437.06	516.2	-36.3	26.67	37.35

Line

Line

Location N: X-Position | Y-Position (cm): .000

Line

cNormal Stresses

Z-Position (cm)	Layer *	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
0	1	-103.8	-286.05	0	0	0	0
7.999	1	-217.3	-163.5	-126.04	0	0	0
8.001	2	-413.26	-309.73	-126.1	0	0	0
27.999	2	443.51	540.87	-30.4	0	0	0

Line

cNormal Strains and Deflections

Z-Position (cm)	Layer *	E _{xx} (10 ⁻⁶)	E _{yy} (10 ⁻⁶)	E _{zz} (10 ⁻⁶)	U _x (microns)	U _y (microns)	U _z (microns)
0	1	-3.6	-50.98	23.39	0	0	119.329
7.999	1	-26.09	-12.1	-2.36	0	0	120.761
8.001	2	-26.07	-12.1	12.69	0	0	120.762
27.999	2	26.48	39.63	-37.49	0	0	118.056

Line

cPrincipal Stresses and Strains

Z-Position (cm)	Layer *	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
0	1	-286.05	-103.8	0	-50.98	-3.6	23.39
7.999	1	-217.3	-163.5	-126.04	-26.09	-12.1	-2.36
8.001	2	-413.26	-309.73	-126.1	-26.07	-12.1	12.69
27.999	2	-30.4	443.51	540.87	-37.49	26.48	39.63

7.999	1	-26.09	-12.1	-2.36	0	0	120.761
-------	---	--------	-------	-------	---	---	---------