

# ***DNIT***

**Publicação IPR - 720**

## **MANUAL DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

**2006**

**MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES  
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES  
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA  
COORDENAÇÃO-GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA  
INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS**

# **MANUAL DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

## 2ª EDIÇÃO – Rio de Janeiro, 2006

### EQUIPE TÉCNICA (ENGESUR Ltda)

Eng° Albino Pereira Martins  
(Responsável Técnico)

Eng° Francisco José Robalinho de Barros  
(Responsável Técnico)

Eng° José Luis Mattos de Britto Pereira  
(Coordenador)

Eng° Zomar Antonio Trinta  
(Supervisor)

Eng° João Menescal Fabrício  
(Consultor)

Tec° Felipe de Oliveira Martins  
(Técnico em Informática)

Tec° Alexandre Martins Ramos  
(Técnico em Informática)

Tec° Célia de Lima Moraes Rosa  
(Técnica em Informática)

### COMISSÃO DE SUPERVISÃO:

Eng° Gabriel de Lucena Stuckert  
(DNIT / DPP / IPR)

Eng° Mirandir Dias da Silva  
(DNIT / DPP / IPR)

Eng° José Carlos Martins Barbosa  
(DNIT / DPP / IPR)

Eng° Elias Salomão Nigri  
(DNIT / DPP / IPR)

### COLABORADOR

Eng° Salomão Pinto  
(DNIT / DPP / IPR)

Eng° Eng° Alayr Malta Falcão  
(Engesur)

Bibl. Tânia Bral Mendes  
(DNIT / DPP / IPR)

Bibl. Heloisa Maria Moreira Monnerat  
(DNIT / DPP / IPR)

## 1ª EDIÇÃO – Rio de Janeiro, 1998

### CONSULTOR RESPONSÁVEL

Eng° Mário Henrique Furtado de Andrade

### COLABORADORES

Eng° Argus Thá Heyn  
(Consultor)

Eng° Celito Manuel Brugnara  
(Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)

Eng° Euler Merlin  
(Consultor)

Eng° Fernando Medeiros Vieira  
(Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)

Eng° Gervásio Rateke  
(Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)

Eng° Salomão Pinto  
(Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)

Eng° José Thomaz Mendes Filho  
(Consultor)

Eng° Mirandir Dias da Silva  
(Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)

Eng° Paulo Roberto Ramos  
(Consultor)

Eng° Rubens Brazetti  
(Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)

Eng° Sílvio Figueiredo Mourão  
(Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)

### SUPERVISÃO TÉCNICA

Eng° Henrique Wainer  
(Associação Brasileira de Normas Técnicas)

Eng° Guioberto Vieira de Rezende  
(Associação Brasileira de Normas Técnicas)

Eng° Gabriel de Lucena Stuckert  
(Departamento Nacional de Estradas de Rodagem)

### COMISSÃO DE REVISÃO TÉCNICA

Eng° Paulo José Guedes Pereira  
(Associação Brasileira de Normas Técnicas)

Econ. Nilza Mizutani  
(Associação Brasileira de Normas Técnicas)

Brasil. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Restauração de pavimentos asfálticos - 2. ed. - Rio de Janeiro, 2005. 310p. (IPR. Publ. 720.).  
1. Rodovias – Manutenção e reparos – Manuais.  
2. Pavimento betuminoso. I. Série. II. Título.  
CDD 625.760202

**MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES  
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES  
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA  
COORDENAÇÃO GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA  
INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS**

**Publicação IPR 720**

**MANUAL DE RESTAURAÇÃO DE  
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

2ª Edição

Rio de Janeiro  
2006

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES  
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES  
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA  
INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS

Rodovia Presidente Dutra, Km 163 – Vigário Geral  
Cep.: 21240-000 – Rio de Janeiro – RJ  
Tel.: (0XX21) 3371-5888  
Fax.: (0XX21) 3371-8133  
e-mail.: dnitipnormas@ig.com.br

TÍTULO: MANUAL DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Primeira Edição: 1998

Revisão: DNIT / Engesur

Contrato: DNIT / Engesur PG – 157/2001-00

Aprovado Pela Diretoria Colegiada do DNIT em 25 / 04 / 2006

## APRESENTAÇÃO

Em prosseguimento ao Programa de Revisão e Atualização de Normas e Manuais Técnicos, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT, apresenta à comunidade rodoviária o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, produto da revisão do Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos, editado pelo DNER em 1998.

O Manual tem como objetivo principal auxiliar no diagnóstico das patologias dos pavimentos, na compreensão dos enfoques do projeto de restauração e na adoção de procedimentos adequados ao controle da qualidade das ações de manutenção de pavimentos flexíveis. Sua importância reside no fato de que, nos últimos anos, em função da crise do petróleo, da extinção do FRN (Fundo Rodoviário Nacional) e dos progressivos cortes de investimentos na área da expansão rodoviária, a ênfase foi gradualmente deslocada da construção para as atividades de recuperação e restauração, que seriam mais auto-sustentáveis.

Passada quase uma década, a presente edição incorpora os avanços tecnológicos ocorridos no tocante a materiais, a técnicas construtivas e a equipamentos empregados, tendo ainda o processo de revisão e atualização procurado ajustar o Manual à nova terminologia dos defeitos dos pavimentos asfálticos e aos novos procedimentos de avaliação das condições de superfície do pavimento, estabelecidos nas normas a seguir:

- a) DNIT 005/2003 – TER: Defeitos nos pavimentos asfálticos – Terminologia
- b) DNIT 006/2003 – PRO: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos – Procedimento
- c) DNIT 007/2003 – PRO: Levantamento para avaliação da condição de superfície de sub-trecho homogêneo de rodovias de pavimento flexível e semi-rígido para gerência de pavimentos e estudos e projetos – Procedimento
- d) DNIT 008/2003 – PRO: Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos asfálticos – Procedimento
- e) DNIT 009/2003 – PRO: Levantamento para avaliação subjetiva da superfície do pavimento – Procedimento

Em linhas gerais, a recente revisão e atualização promoveu uma reordenação e um remanejamento de diversos temas, reajustes nos textos, quadros e figuras, e substituição ou eliminação de capítulos. Houve também inserção de matéria original, sendo digno de nota a mudança no próprio título do manual, tendo sido o termo Reabilitação substituído por Restauração. Por fim, atendeu-se à resolução contida na Portaria n.o 166 – DG/DNIT, de 03/02/2002, que impõe a adoção do chamado Padrão DNIT, configurado pelas Normas DNIT 001/2002 – PRO: Elaboração e apresentação de normas do DNIT e DNIT 002/2002 – PRO: Elaboração e apresentação de manuais do DNIT.

O IPR se dispõe a considerar comentários, sugestões e críticas no tocante a este manual, desde que o leitor encaminhe o material de forma inequívoca e no intuito de aperfeiçoar ainda mais a forma e o conteúdo do manual.

**Eng° Chequer Jabour Chequer**  
**Coordenador do Instituto de Pesquisas Rodoviárias**

Endereço para correspondência:

Instituto de Pesquisas Rodoviárias  
A/c Divisão de Capacitação Tecnológica  
Rodovia Presidente Dutra, km 163  
Centro Rodoviário, Vigário Geral, Rio de Janeiro, 21240-000, RJ  
Tel (fax): (21) 3371-5888  
E-mail: [ipr@dnit.gov.br](mailto:ipr@dnit.gov.br)

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Curva de Degradação do Pavimento.....	27
Figura 2 -	Fluxograma Geral da Manutenção Rodoviária .....	33
Figura 3 -	Etapas do Processo de Restauração .....	37
Figura 4 -	Comparação entre as curvas de projeto da Shell e do Instituto do Asfalto (NCHRP - 10B) para fadiga de misturas betuminosas .....	44
Figura 5 -	Tipos de curvas de afundamento nas trilhas de roda considerando os efeitos de umidade e conservação.....	47
Figura 6 -	Principais tipos de defeitos e suas relações .....	52
Figura 7 -	Interações entre os defeitos em rodovias pavimentadas.....	54
Figura 8 -	Evolução da deterioração em rodovias pavimentadas .....	55
Figura 9 -	Fendas: Trincas longitudinais .....	62
Figura 10 -	Fendas: Trincas transversais.....	63
Figura 11 -	Fendas: Diversos tipos de trincas interligadas.....	63
Figura 12 -	Fendas: Trincamento tipo bloco.....	63
Figura 13 -	Afundamento por consolidação nas trilhas de roda .....	64
Figura 14 -	Afundamento plástico nas trilhas de roda.....	64
Figura 15 -	Ilustração do escorregamento .....	66
Figura 16 -	Ilustração de painéis.....	68
Figura 17 -	Ilustração de remendos. ....	69
Figura 18 -	Esquema da bacia de deformação e da deformada .....	81
Figura 19 -	Deformada e raio de curvatura .....	82
Figura 20 -	Deformações no pavimento.....	84
Figura 21 -	Posicionamento da viga Benkelman e da prova de carga .....	84
Figura 22 -	Representação dos defletômetros de impacto .....	87
Figura 23 -	Correlações Obtidas por várias Pesquisas (Tipo $D_{FWD} = aD_{VB} + b$ ).....	89
Figura 24 -	Transformação Teórica do Pavimento Real em Pavimento Equivalente ...	93
Figura 25 -	Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis por meio do Produto $Rd_0$ .	96
Figura 26 -	Esquema do simulador de quarto-de-carro .....	102
Figura 27 -	Esquema do sensor de deslocamentos verticais.....	102
Figura 28 -	Diagrama em blocos do quantificador de irregularidade.....	103
Figura 29 -	Valores acumulados das diferenças .....	124
Figura 30 -	Modelo de gráfico para divisão em segmentos homogêneos.....	125

Figura 31 - Fluxograma da análise deflectométrica .....	131
Figura 32 - Fluxograma da análise da deficiência estrutural e/ou funcional .....	132
Figura 33 - Fluxograma do enfoque mecanístico-empírico.....	134
Figura 34 - Fases da vida de um pavimento (número N).....	142
Figura 35 - Estrutura de referência do TECNAPAV.....	158
Figura 36 - Deformações horizontais no pavimento antigo devido às variações de temperatura.....	163
Figura 37 - Geração de uma nova trinca na camada de reforço devido a ação das tensões térmicas na camada.....	163
Figura 38 - Arqueamento térmico da camada de reforço causado pela diferença de temperatura da camada subjacente.....	164
Figura 39 - Concentração de tensões devido a deflexão diferencial vertical causada pelo tráfego .....	164
Figura 40 - Geotêxtil diretamente sobre o pavimento antigo.....	167
Figura 41 - Geotêxtil afastado das trincas do pavimento antigo.....	167
Figura 42 - Esquema de uma camada de alívio de tensões.....	169
Figura 43 - Esquema de posicionamento de uma manta de fibra de vidro.....	169
Figura 44 - Esquema de uma camada de interrupção do trincamento.....	170
Figura 45 - Ilustração da solução geotêxtil-geogrelha como camada inibidora da propagação de trincas.....	171
Figura 46 - Esquema do equipamento de reciclagem a quente no local .....	183
Figura 47 - Operação de usina intermitente na reciclagem a quente .....	187
Figura 48 - Operação de usina “drum mixer” na reciclagem a quente.....	188
Figura 49 - Processo de escolha do tipo de estabilização.....	195
Figura 50 - Dispositivo de reciclagem a frio no local.....	200
Figura 51 - Formação de painéis em pavimentos asfálticos.....	208
Figura 52 Ilustração de custos de longo prazo para duas diferentes estratégias de Restauração em seções de pavimento idênticas (taxa de desconto = 4% ao ano) .....	229
Figura 53 Alternativa de Restauração – Alternativa A .....	241
Figura 54 Alternativa de Restauração – Alternativa B .....	242
Figura 55- Alternativa de Restauração – Alternativa C.....	242
Figura 56- Seção transversal - tipo de pavimento existente .....	255
Figura 57- Interpretação analítica de deflectogramas retroanálise.....	281
Figura 58- interpretação analítica de deflectogramas retroanálise .....	282
Figura 59- Verificação de tensões - cálculo de vida de fadiga.....	291

Tabela 1 -	Condições de Superfície do Pavimento.....	25
Tabela 2 -	Fatores que afetam o módulo de elasticidade e a vida de fadiga das misturas asfálticas.....	43
Tabela 3 -	Resumo das causas e tipos de deformação permanente.....	46
Tabela 4 -	Quadro resumo dos defeitos – Codificação e Classificação (Norma DNIT 005/2003 – TER) .....	61
Tabela 5 -	Condição do pavimento em função do IGG.....	69
Tabela 6 -	Conceitos do ICPF.....	75
Tabela 7 -	Avaliação da IES .....	75
Tabela 8 -	Correlações entre FWD e Viga Benkelman .....	88
Tabela 9-	Avaliação das Condições de Aderência Pneu Pavimento, ou Resistência à Derrapagem.....	107
Tabela 10-	Avaliação da Resistência à Derrapagem.....	108
Tabela 11	Valores do IFI .....	109
Tabela 12	Classificação de Veículos adotada pelo DNER .....	112
Tabela 13	Fatores de Equivalência de Carga do USACE .....	114
Tabela 14-	Fatores de Equivalência de Carga da AASHTO .....	114
Tabela 15-	Cálculo FV - ESS.....	115
Tabela 16-	Cálculo FV - ESD.....	115
Tabela 17-	Cálculo FV - ETT .....	115
Tabela 18-	Estimativa de percentual de veículos na faixa de projeto.....	117
Tabela 19-	Etapas recomendadas para a coleta e avaliação dos dados do pavimento.....	119
Tabela 20-	Lista de verificação do processo de avaliação.....	120
Tabela 21	Métodos das diferenças acumuladas .....	124
Tabela 22	Critério para o estabelecimento das diretrizes de projeto.....	144
Tabela 23	Critério para o estabelecimento das diretrizes de projeto.....	150
Tabela 24-	Classificação dos solos .....	157
Tabela 25-	Comparação entre consumo de energia.....	191
Tabela 26-	Obtenção de k .....	220
Tabela 27-	Limites de teor emulsão ótimo.....	221
Tabela 28-	Granulometria.....	222
Tabela 29-	Método do VPL.....	236
Tabela 30-	Método relação benefício custo.....	238
Tabela 31	VPL e taxa de desconto.....	239

Tabela 32	Análise de sensibilidade .....	240
Tabela 33	Cálculo do VPL para a alternativa A.....	244
Tabela 34	Cálculo do VPL para a alternativa B.....	245
Tabela 35-	Cálculo do VPL para a alternativa C .....	246
Tabela 36-	Deflectometria .....	253
Tabela 37-	Constituição da base e sub-base .....	254
Tabela 38-	Valor de serventia .....	255
Tabela 39-	Resumo da avaliação funcional do pavimento – Agrupamento A .....	256
Tabela 40-	Resumo da avaliação funcional do pavimento – Agrupamento B .....	257
Tabela 41	Resumo da avaliação estrutural do pavimento – Agrupamento A.....	258
Tabela 42	Resumo da avaliação estrutural do pavimento – Agrupamento B.....	259
Tabela 43	Resumo das características do pavimento existente .....	260
Tabela 44-	Resumo dos números “N” de projeto .....	261
Tabela 45-	Avaliação do pavimento existente/soluções para restauração Agrupamento A .....	266
Tabela 46-	Avaliação do pavimento existente/soluções para restauração Agrupamento B .....	267
Tabela 47-	Dimensionamento de reforço de pavimento – TECNAPAV Agrupamento A .....	268
Tabela 48-	Dimensionamento de reforço de pavimento – TECNAPAV Agrupamento B .....	269
Tabela 49-	Avaliação do pavimento existente e dimensionamento de reforço - critério de resistência – método DNER (Eng <sup>o</sup> Murilo) .....	270
Tabela 50-	Coeficientes de Poisson .....	272
Tabela 51	Dados de tráfego.....	278
Tabela 52	Deformações .....	279
Tabela 53	Características de materiais alternativos para reforços (Valores Aproximados) .....	283
Tabela 54-	Estimativa de módulos de rigidez de camadas betuminosas (Shell).....	284
Tabela 55-	Estimativa de módulos de rigidez de camadas betuminosas (Shell).....	285
Tabela 56-	Estimativa de módulos de rigidez de camadas betuminosas (The Asphalt Institute) .....	286
Tabela 57-	Estimativa de módulos de rigidez de camadas betuminosas (Método de Francken) .....	287
Tabela 58-	Esforços limites - 1 <sup>o</sup> critério: fadiga das camadas betuminosas.....	288
Tabela 59-	Esforços limites - 1 <sup>o</sup> critério: fadiga das camadas betuminosas.....	289

Tabela 60-	Esforços limites - 2º critério: acúmulo de deformações permanentes .....	290
Tabela 61	Alternativas estudadas para reforço do pavimento.....	292
Tabela 62	Agrupamento B.....	292
Tabela 63	Coeficientes estruturais .....	293
Tabela 64-	Módulos .....	294
Tabela 65-	Situação adotada.....	295
Tabela 66-	Dados de tráfego .....	298
Tabela 67-	Comparação entre as opções de reforço.....	299
Tabela 68-	Métodos utilizados .....	300
Tabela 69-	Cálculo dos quantitativos.....	301
Tabela 70-	Comparação de espessuras de reforço estrutural .....	302
Tabela 71	Espessuras de reforço em termos de CBUQ (cm) .....	302
Planilha 1 -	Formulário de Inventário do estado da superfície do pavimento .....	72
Planilha 2 -	Cálculo do IGG .....	73
Planilha 3 -	Ficha de Avaliação de Serventia .....	77



## SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO .....	03
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	05
1. INTRODUÇÃO .....	15
2. CONCEITUAÇÃO DO MANUAL .....	19
2.1. Objetivos e Estrutura do Manual .....	21
2.2. Conceitos e Terminologia.....	22
2.3. Fatores Intervenientes no Projeto .....	33
2.4. O Processo de Restauração .....	35
3. DETERIORAÇÃO DOS PAVIMENTOS.....	39
3.1. Desempenho Funcional.....	41
3.2. Desempenho Estrutural.....	42
3.3. Desempenho quanto à Segurança.....	49
3.4. Gatilhos para a Restauração.....	50
3.5. Interações entre os Defeitos.....	53
3.6. Evolução da Deterioração .....	54
4. AVALIAÇÃO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	57
4.1. Avaliação das Condições de Superfície .....	59
4.2. Avaliação das Condições Estruturais .....	78
4.3. Avaliação das Condições da Irregularidade longitudinal .....	99
4.4. Condições de Aderência Pneu/Pavimento .....	104
4.5. Avaliação das Solicitações de Tráfego.....	109
4.6. Avaliação Global .....	117
5. REFORÇO DOS PAVIMENTOS .....	127
5.1. Abordagens do Projeto.....	129
5.2. Análise Defletométrica.....	130

5.3.	Análise da Deficiência Estrutural.....	131
5.4.	Abordagem Mecanístico-empírica.....	133
5.5.	Métodos de Reforço.....	141
5.6.	Trabalhos Preparatórios para Restauração .....	160
5.7.	Propagação de Trincas .....	162
6.	RECICLAGEM DOS PAVIMENTOS .....	173
6.1.	Objetivos da Reciclagem .....	175
6.2.	Orientações para a Seleção da Reciclagem .....	176
6.3.	Reciclagem a Quente.....	177
6.4.	Reciclagem a Frio .....	191
7.	CONSERVAÇÃO DOS PAVIMENTOS .....	203
7.1.	Definição e Finalidade.....	205
7.2.	Conservação Rotineira.....	205
7.3.	Conservação Periódica .....	215
8.	AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	225
8.1.	Preâmbulo.....	227
8.2.	Custos de Ciclo de Vida.....	228
8.3.	Princípios Básicos.....	229
8.4.	Componentes Fundamentais .....	230
8.5.	Métodos de Avaliação de Alternativas .....	234
8.6.	Análise de Sensibilidade .....	239
8.7.	Comparação entre Alternativas.....	240
9.	EXEMPLO ILUSTRATIVO .....	247
9.1.	Avaliação das Características do Pavimento .....	249
9.2.	Dados do Tráfego e Número “N” .....	260
9.3.	Avaliação Estrutural do Pavimento Existente e Dimensionamento de Reforço por Procedimentos Empíricos .....	262

9.4.	Avaliação Estrutural do Pavimento Existente e Dimensionamento de Reforço pela Teoria da Mecânica dos Pavimentos.....	271
9.5.	Dimensionamento de Pavimentos Novos.....	292
9.6.	Soluções Adotadas no Projeto .....	299
	BIBLIOGRAFIA.....	303



## **1 - INTRODUÇÃO**



## **1 INTRODUÇÃO**

As obras de pavimentação rodoviária tiveram um grande incremento nos anos 50, quando, fruto do intenso intercâmbio de técnicos do extinto DNER, produziu-se uma grande transferência de tecnologia oriunda dos Estados Unidos da América do Norte.

O modelo de financiamento do setor rodoviário, baseado no Fundo Rodoviário Nacional - FRN, foi responsável pela construção de um patrimônio representado por cerca de 68.000 km de rodovias federais, dos quais 51.000 km pavimentados.

O advento da crise de petróleo nos anos 70, a extinção do FRN nos anos 80 e os investimentos insuficientes destinados ao setor tornaram o sistema rodoviário extremamente vulnerável.

A idade dos pavimentos e a solicitação intensa do tráfego compõem o problema, especialmente nas rodovias federais, onde grande parte da malha já superou a vida útil dos projetos originais.

Nos últimos anos, porém, a ênfase na construção rodoviária vem sendo gradualmente transferida para as atividades de recuperação e restauração.

Com a finalidade de apresentar e disseminar os conceitos e as informações técnicas necessárias ao projeto e à execução de obras para a restauração dos pavimentos asfálticos, foi elaborado, em 1998, por técnicos do DNER e da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, sob a Coordenação do IPR.

Assim, o Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos foi entregue à comunidade rodoviária do País, com o propósito de atender a mudança de ênfase da construção rodoviária para a restauração rodoviária, desenvolvendo orientações para a escolha da alternativa de restauração mais adequada e descrevendo procedimentos específicos, a fim de implantar condições seguras e compatíveis do trânsito nas rodovias brasileiras.

O Manual se apresentava e ainda se apresenta como um elemento de auxílio no diagnóstico da patologia dos pavimentos, na compreensão dos enfoques do projeto de restauração, e na adoção de procedimentos adequados no controle da qualidade das ações de manutenção de pavimentos flexíveis.

Nele conceituam-se as principais expressões relativas à restauração de pavimentos asfálticos de rodovias e comentam-se também os principais parâmetros técnicos intervenientes na seleção e dimensionamento da alternativa de Restauração e as diversas etapas intermediárias.

O antigo Manual foi amplamente utilizado em face de intensivos programas de pavimentação lançados em seguidos exercícios, propiciando, inclusive, a instalação de um parque industrial com empresas de construção altamente eficientes.

Ocorre que o progresso tecnológico ao longo dos anos, não só quanto aos materiais e técnicas de construção, mas também quanto aos equipamentos em uso, levou à necessidade de revisão e atualização da 1ª Edição do Manual.

Dessa forma, o DNIT julgou ser apropriado que se procedesse a um processo de revisão e atualização do Manual que, ainda sob a Coordenação do IPR, dá origem a esta 2ª Edição do Manual, agora com o termo Restauração em substituição a Reabilitação.

Entre o Manual do DNER de 1998 e o presente Manual do DNIT, observam-se as seguintes alterações principais, das mais gerais para as mais particulares:

- a) Re-ordenamento e remanejamento de diversos temas;
- b) Reajustes na redação dos textos;
- c) Reajustes na montagem de figuras e tabelas;
- d) Substituição do Apêndice 1 do Manual do DNER, pelo Capítulo 9 – Exemplo Ilustrativo;
- e) Eliminação do Prefácio e do Apêndice 2 do Manual do DNER, por desnecessários;
- f) Adequação aos novos procedimentos para avaliação das condições de superfície de pavimentos asfálticos estabelecidos nas Normas DNIT 005/2003 – TER, DNIT 006/2003 – PRO, DNIT 007/2003 – PRO, DNIT 008/2003 – PRO e DNIT 009/2003 – PRO;
- g) Incorporação ao item 4.2.4.3 – Avaliação de Módulos por Retroanálise, do Modelo de Hogg, para resolução de problemas de retroanálise de bacias de deflexão;
- h) Adequação à terminologia das intervenções passíveis de serem realizadas em pavimentos asfálticos, buscando-se promover a compatibilização com os instrumentos normativos e orientadores vigentes, particularmente em relação às Normas DNER TER-02/79 e DNIT 005/2003 - TER, ao Manual de Conservação Rodoviária – DNIT/IPR 2005 e ao Manual de Pavimentação – DNIT/IPR 2006, resultando inclusive na mudança do título do Manual anterior do DNER de 1998.

## **2 – CONCEITUAÇÃO DO MANUAL**



## **2 CONCEITUAÇÃO DO MANUAL**

### **2.1 OBJETIVOS DO MANUAL**

O principal objetivo deste Manual é apresentar e discutir os elementos técnicos necessários à identificação, quantificação e análise das deteriorações existentes nos pavimentos asfálticos e ainda descrever as principais técnicas de restauração disponíveis. São discutidas as técnicas para avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos asfálticos, os métodos de determinação da sua habilidade de proporcionar conforto ao rolamento e segurança, os enfoques e os métodos para o dimensionamento de reforço de pavimentos e as medidas de controle da qualidade na execução dos serviços de restauração.

Outro objetivo do Manual é apresentar um processo para a seleção da melhor alternativa ou estratégia de restauração de pavimentos flexíveis. Nesse processo são definidos períodos de análise, estimados os prováveis custos de ciclo de vida e efetuada a avaliação econômica entre as alternativas tecnicamente viáveis.

Embora não seja o principal componente deste Manual, os sistemas gerenciais de pavimentos são reconhecidamente eficientes no controle dos gastos em conservação e restauração de pavimentos. As técnicas de avaliação e de projeto apresentadas neste Manual são entradas (input) nos sistemas gerenciais de pavimentos. Mesmo nos locais onde não foram implantados tais sistemas, as informações contidas neste Manual são igualmente aplicáveis no sentido de fornecer subsídios para julgamentos e decisões em projetos individuais.

Além da Introdução, o presente trabalho é constituído por mais oito capítulos. De maneira resumida, podem ser listados os seguintes itens como os principais objetivos do Manual:

- a) descrever os fatores que intervêm no desempenho e na deterioração dos pavimentos;
- b) apresentar os principais tipos de defeitos de superfície em pavimentos asfálticos e suas causas, os processos de avaliação estrutural e funcional de pavimentos, e da avaliação da solicitação do tráfego;
- c) divulgar os princípios da reciclagem dos pavimentos ;
- d) discutir os principais enfoques de dimensionamento e apresentar vários métodos de reforço de pavimentos;
- e) apresentar as técnicas para a seleção de alternativas de restauração mais vantajosas sob o ponto de vista econômico;
- f) expor uma metodologia para o projeto de restauração de pavimentos por meio de um exemplo de aplicação;
- g) fornecer os modelos de formulário de ensaios e de acompanhamento dos serviços necessários para o controle de qualidade da restauração em concreto betuminoso usinado a quente.

## 2.2 CONCEITOS E TERMINOLOGIA

A definição das expressões relativas a Manutenção Rodoviária, tais como Restauração do Pavimento e Reabilitação do Pavimento, entre outras, não é uma tarefa simples. De fato, em diversos países e órgãos rodoviários verifica-se uma grande quantidade de diferentes definições e/ou classificações para as diversas intervenções realizadas no pavimento, após sua construção inicial.

Releva observar que tal diversidade de definições insere relativa complexidade para o tratamento do assunto, na medida em que, no desenvolvimento de trabalhos técnicos em nosso país, recorre-se freqüentemente à literatura técnica internacional - a partir do que passam a ser “importados” termos e expressões calcados por vezes em modelos conceituais distintos, não necessariamente consolidados e/ou compatíveis, de país para país.

No âmbito do DNIT, as atividades de Manutenção Rodoviária foram objeto da Norma TER-02/79, a qual, conceituando os termos empregados na área de Manutenção Rodoviária enfoca as intervenções componentes, a saber:

- A Conservação Rodoviária (em suas 3 modalidades: Corretiva Rotineira, Preventiva Periódica e de Emergência),
- A Restauração,
- O Melhoramento (desdobrado em 2 grupos: Complementação e Modificação)

Não obstante a existência/vigência do instrumento normativo, a Terminologia adotada na documentação pertinente à Manutenção Rodoviária, por circunstâncias várias, não se reveste da uniformidade ou unidade que seria desejável e, com freqüência, não atende aos dispositivos normativos vigentes e/ou ignoram premissas técnicas, instituídas relativamente ao tema.

Com a finalidade de promover a desejável unificação e o disciplinamento do tema, veio a ser estabelecida e aplicada competente sistemática – a qual, buscando resguardar o processo histórico, no qual se insere a mencionada Norma TER-02/79, considerou a terminologia específica que, embora não desfrutando da unanimidade, foi e é a consagrada pelo uso, ao longo de vários anos, por parte do DNER e do DNIT. Atendida essa condição, foram promovidas as necessárias adequações/atualizações envolvendo, de forma consolidada, complementações de definições e incorporações – sempre em consonância com a conceituação técnica pertinente, assumida pelo DNIT e retratando o atual estado da arte do tema.

Tendo em vista que o pleno entendimento desse tema, bem como de determinadas particularidades embutidas na mencionada sistemática é relevante para o adequado manuseio deste Manual, é efetivada a seguir, na forma do sub-item 2.2.1, abordagem sumária sobre os aspectos conceituais então evocados – aspectos estes que estão contemplados em detalhes no curso do Manual. Em seqüência e, na forma dos sub-itens

2.2.2 e 2.2.3 são sucessivamente tecidas considerações sobre a Manutenção Rodoviária e apresentada a Terminologia estabelecida.

### 2.2.1 ASPECTOS CONCEITUAIS

A Rodovia, e em especial o pavimento, em razão da importância do transporte no complexo da atividade sócio-econômica, dentro de uma perspectiva de longo prazo (de ordem de grandeza, por exemplo, secular) deve apresentar permanentemente um desempenho satisfatório.

Este desempenho satisfatório se traduz na oferta, ao usuário, de condições de tráfego seguras, confortáveis e econômicas – atendendo aos preceitos de otimização do custo total de transporte.

A capacidade que um pavimento tem de proporcionar um determinado nível de desempenho (funcional) é intitulada de “Serventia do Pavimento” – cujo respectivo processo de aferição pode ser efetivado através de “Avaliações Subjetivas” e/ou de “Avaliações Objetivas”.

A Avaliação Subjetiva da Serventia envolve a participação de grupo de indivíduos identificados com a Rodovia e que são previamente orientados / preparados – estando o assunto tratado na Norma DNIT 009/2003-PRO.

A Avaliação Objetiva da Serventia é calculada analiticamente, com base no conhecimento dos valores de vários parâmetros representativos das condições de superfície do pavimento, existindo, em correspondência com tais parâmetros, uma grande variedade de Índices – os quais, de uma maneira geral, estão correlacionados entre si.

Entre os vários índices existentes, cabe mencionar os seguintes: PSI – Present Serviciability Rating, VSA – Valor de Serventia Atual, LVC – Levantamento Visual Contínuo, IGGE – Índice de Gravidade Global Expedido, IES – Índice de Estado de Superfície, ICPF – Índice de Condição do Pavimento Flexível e IRI – International Roughness Index (Índice de Irregularidade de Superfície).

Este último Índice é o que, é mais freqüentemente, utilizado pelo DNIT.

Conceitua-se Irregularidade Longitudinal de um Pavimento ou, simplesmente, Irregularidade, como “o conjunto dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano de referência” – desvios estes que, entre vários outros inconvenientes, afetam a qualidade do rolamento e a ação dinâmica das cargas sobre a via.

A Irregularidade do Perfil Longitudinal de um Pavimento apresenta as seguintes principais particularidades:

- A partir de um valor inicial, função do processo construtivo, a Irregularidade passa a assumir valores crescentes, como decorrência da ação do tráfego, do clima e de outros fatores;

- A Irregularidade influi na interação da superfície da via com os veículos, gerando efeitos sobre os próprios veículos, sobre os passageiros e motoristas, e sobre as cargas transportadas. Tais efeitos dependem também, além da Irregularidade, de fatores vinculados à suspensão dos veículos e à sensibilidade dos passageiros e das cargas.
- A Irregularidade aumenta a ação das cargas dinâmicas dos veículos sobre a superfície do pavimento e, em decorrência, acelera a deterioração de sua estrutura. Ela provoca ainda efeitos adversos sobre a drenagem da superfície do pavimento, na medida em que contribui para a formação de poças d'água que vão afetar negativamente a segurança e o desempenho da Rodovia.
- A Irregularidade afeta a dinâmica dos veículos em movimento, aumentando o seu desgaste e acarreta, também, prejuízos à condução dos veículos. Em consequência, a Irregularidade tem grande influência sobre custo operacional dos veículos – com o qual apresenta, inclusive, satisfatória correlação estatística.

Este último aspecto, em especial, é determinante para a escolha da Irregularidade como parâmetro básico e referencial para atividades de planejamento, programação e elaboração de projetos referentes à manutenção dos pavimentos.

A Irregularidade pode ser medida em diversas escalas padronizadas e de conformidade com o equipamento de medição então usado. Os procedimentos pertinentes ao atributo Irregularidade estão devidamente normalizados pelo DNIT, que no caso, contempla especificamente o parâmetro QI – Quociente de Irregularidade, através dos seguintes Instrumentos:

- DNER – ES 173/86 – Métodos de Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade, tipo resposta.
- DNER – PRO – 164/94 – Calibração e Controle do Sistema Medidor de Irregularidade da Superfície do Pavimento.
- DNER – PRO – 182/94 – Medição da Irregularidade da Superfície de Pavimento com Sistemas Medidores.
- DNER – PRO – 229/94 – Manutenção de Sistemas Medidores de Irregularidade de Superfície de Pavimento – Integrador IPR/USP e Maysmeter.

De outra parte, com base em pesquisa internacional de medição da Irregularidade realizada em Brasília no ano de 1992, veio a ser instituída pelo DNIT a escala “*International Roughness Index*” – IRI, que é uma escala de referência, transferível para outros sistemas de medição.

O IRI é definido matematicamente a partir de um perfil levantado por nível e mira (ou equipamento similar) nas trilhas de roda, visando simular os movimentos verticais de um “Sistema Medidor de Superfície de Pavimento”.

Os conceitos de QI e IRI são bastante similares e, na prática, são altamente correlacionados.

A equação que estabelece a relação entre ambos é:  $QI = 13 IRI$ .

A Tabela 1, que se segue, apresenta os níveis de conceitos atribuíveis e relativos às condições de superfície do pavimento em função da Avaliação Subjetiva e as correspondentes faixas de valores pertinentes aos principais Índices / Parâmetros utilizados na Avaliação Objetiva.

**Tabela 1 - Condições de Superfície do Pavimento**

Conceito	Irregularidade		ICPF	IGG	TR
	QI (cont./km)	IRI (m/km)			
Excelente	13-25	1-1,9	5-4	0 – 20	0 - 2
Bom	25-35	1,9 - 2,7	4-3	20 – 40	2 - 5
Regular	35-45	2,7 - 3,5	3-2	40 – 80	5 - 10
Ruim	45-60	3,5 - 4,6	2-1	80 – 160	10 - 25
Péssimo	> 60	> 4,6	1-0	> 160	> 25

Onde:

QI = Quociente de Irregularidade

IRI = Índice Internacional de Irregularidade

ICPF = Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis

IGG = Índice de Gravidade Global

TR = Trincamento (% de FC-2 + FC-3)

Para atender aos preceitos de otimização de custo total de transporte conforme mencionado anteriormente, o pavimento deve dispor da devida Habilitação, isto é: Estar permanentemente dotado de adequados atributos de natureza estrutural e de natureza funcional - atributos estes que, para serem mantidos dentro dos níveis desejáveis/admissíveis exigem que o pavimento seja submetido a um contínuo e adequado processo de Manutenção.

Tal processo de Manutenção envolve a execução de conjuntos de intervenções diversas, cuja natureza é função da finalidade proposta.

O pavimento que, conforme se expôs, é assumido ante uma perspectiva de longo prazo, por questões de ordem técnico-econômica, é dimensionado para atender a ciclos de vida de média duração (8 a 10 anos) – ciclos de vida que se sucedem e que, a cada renovação são dimensionados com base no valor estrutural (residual) do pavimento remanescente e nos valores dos parâmetros do tráfego esperado para o novo ciclo.

Em cada ciclo de vida, o desempenho do pavimento é previsível: As ações interativas do “Tráfego + Meio Ambiente” sobre o contexto do pavimento, iniciam-se logo após a abertura do tráfego causando, de imediato, deteriorações - de início imperceptíveis, mas e que

tendem a crescer e se diversificar interativamente afetando, então, o desempenho do pavimento. Esse desempenho, assim, declinará segundo uma faixa normalmente previsível ( $1,5 \leq IRI \leq 3,5/4,0$ ) dentro de cada ciclo – faixa esta, dentro da qual estarão sempre atendidos, os preceitos de otimização do custo total de transporte (apresentando, portanto, o pavimento a devida habilitação, porque dispõe dos adequados atributos de natureza estrutural e de natureza funcional).

Para que o pavimento apresente tal desempenho previsível dentro de cada ciclo, é necessário, conforme se expôs, que o pavimento seja continuamente e de forma crescente (Níveis de Esforço crescentes), em função da evolução das deteriorações, contemplado com adequadas intervenções de caráter corretivo e preventivo. Tais intervenções constituem as atividades de Conservação (em suas 3 modalidades).

Quando se aproxima do final do Ciclo ( $IRI \cong 3,5/4,0$ ) o pavimento, embora desfrutando ainda da devida Habilitação, passa a apresentar um desempenho próximo de sua condição limite permissível, no qual o processo de deterioração tenderá a crescer de forma acentuada, vindo a tornar anti-econômica, dentro do enfoque de otimização do custo total de transporte, a operação da Rodovia.

Nessa oportunidade deve, então, ser projetado e executado o novo dimensionamento do pavimento de sorte a se atender a um novo ciclo de vida – repetindo-se então o processo, em ciclos sucessivos.

O procedimento pertinente nesse caso, é intitulado de Restauração do Pavimento e, ao longo do trecho correspondente e em função do grau de deterioração apresentado, se distribuirá em duas modalidades de intervenções básicas, a saber: o Recapeamento do Pavimento ou a Reconstrução (Total ou Parcial) do Pavimento.

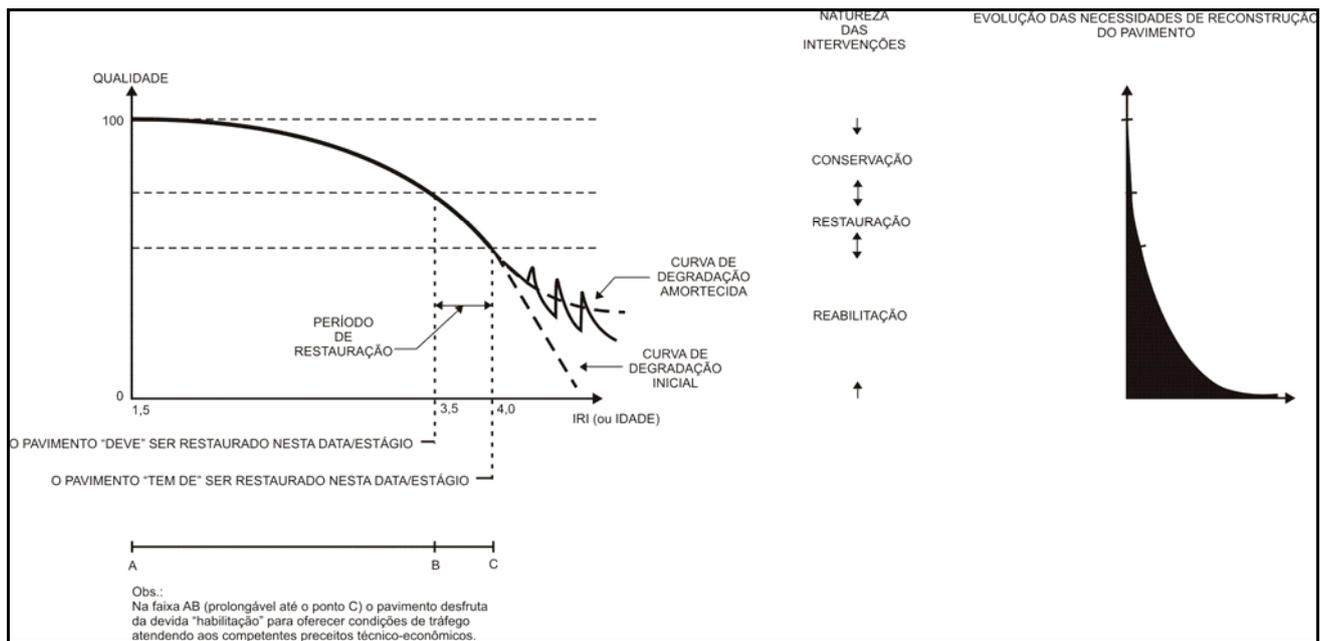
Neste estágio, normalmente deve predominar de forma absoluta a 1ª modalidade citada – ficando a 2ª para situações isoladas ou áreas localizadas.

Se o ciclo de vida do pavimento houver sido ultrapassado de forma significativa sem que as obras devidas de Restauração tenham sido executadas, passa a existir uma anomalia. As deteriorações avançam e progridem de forma inexorável, as intervenções de conservação se tornam extremamente onerosas e conferem pequena sobrevida aos segmentos então tratados. O pavimento perde, então, a sua já focalizada habilitação, conduzindo a custos operacionais elevados e incompatíveis com os preceitos de otimização técnico-econômica.

Quando vier a ser executada a adequada recuperação do pavimento, esta terá, então, custo bem mais elevado, tendendo a ocorrer, predominância dos quantitativos de Reconstrução do Pavimento sobre os quantitativos de Recapeamento do Pavimento.

O gráfico da Figura 1 a seguir, retratando o desempenho ideal (esperado) de um pavimento ao longo de um “Ciclo de Vida” ilustra as considerações anteriormente expostas neste sub-item e os aspectos da interface Conservação / Restauração / Reabilitação.

Figura 1 - Curva de Degradação do Pavimento



## 2.2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MANUTENÇÃO RODOVIÁRIA

Ante o exposto, objetivamente, para o estabelecimento final da Terminologia proposta, foram assumidos os seguintes conceitos:

Torna-se impróprio assumir-se para o termo Manutenção o mesmo significado de Conservação, na medida em que o processo de Manutenção (DNER – TER 02/79) comporta uma série de grupos de intervenções, dos quais a Conservação é, apenas, um deles.

O termo "Recuperação do Pavimento" deve ser entendido como "Recuperação dos Atributos Funcionais e Estruturais do Pavimento", não comportando qualquer conotação direta, em termos de serviços ou obras na Rodovia/Pavimento.

Nesse sentido, fica prevalecendo o entendimento de que tal processo de Recuperação se materializa através da execução de intervenções físicas na Rodovia – intituladas de Restauração do Pavimento e/ou Reabilitação do Pavimento – a seguir, brevemente enfocadas.

O termo "Restauração do Pavimento", quando referido a um trecho, deve ser entendido como a Recuperação de um Pavimento que se apresenta deteriorado, mas cujo grau de deterioração não compromete a sua habilitação (a sua recuperação ocorrendo tempestivamente, dentro ou próximo do final do seu ciclo de vida).

Cumprе ressaltar, conforme já exposto, que nesse estágio de deterioração (que ainda não é qualificado como crítico) as medidas de conservação de caráter preventivo e/ou corretivo já se tornam praticamente ineficazes e/ou anti-econômicas.

O termo “Reabilitação do Pavimento”, quando referido a um trecho, deve ser entendido como a Recuperação de um Pavimento que, como decorrência do alto grau de deterioração alcançado, perdeu a sua habilitação.

O termo “Reabilitação do Pavimento”, quando referido a um segmento homogêneo, deve guardar correspondência com as soluções que envolvem a Reconstrução do Pavimento.

O termo “Restauração do Pavimento”, quando referido a um segmento homogêneo, deve guardar correspondência com as soluções que envolvem o Recapeamento do Pavimento.

A expressão Restauração e Reabilitação do Pavimento, para a designação genérica das obras e serviços de Recuperação do Pavimento, se demonstra mais coerente com a conceituação técnica do tema na medida em que a acentuada dispersão ordinariamente existente no grau de deterioração de um trecho a ser recuperado define um perfil de soluções que conjugam a execução tanto do Recapeamento do Pavimento como da Reconstrução do Pavimento.

NOTA: Os termos Remendo, Reparo e Reparação, com freqüência utilizados na linguagem da Manutenção rodoviária, não comportam definição específica e ou mais precisa, porquanto dizem respeito a uma gama de serviços de conservação de caráter corretivo/preventivo que podem contemplar, indiferentemente, além do pavimento, os demais componentes da infra-estrutura da via.

### 2.2.3 TERMINOLOGIA ESTABELECIDADA

De forma solidária com o exposto, são propostas as seguintes definições:

#### – Manutenção de Rodovia

Compreende um processo sistemático a que, de forma contínua, deve ser submetida uma Rodovia, no sentido de que esta, de conformidade com suas funções e magnitude de tráfego, venha a oferecer ao usuário, permanentemente, um tráfego econômico, confortável e seguro, em consonância com competentes preceitos de otimização técnico-econômica do “Custo Total de Transporte”.

A manutenção se consubstancia através de ações sistemáticas e programadas que devem ter lugar diante de condicionamentos cronológicos e/ou da ocorrência de eventos supervenientes.

Tais ações, contemplando a infra-estrutura viária com todos os seus componentes podem ser enquadradas em 4 grupos básicos, a saber:

- Conservação da Rodovia
- Introdução de Melhoramentos dos sistemas de proteção da infra-estrutura e/ou drenagem e/ou dispositivos de segurança e obras complementares.
- Recuperação do Pavimento através de sua restauração

- Recuperação do Pavimento através de sua reabilitação

– Conservação Rodoviária

É o conjunto de operações rotineiras, periódicas e de emergência desenvolvido com o objetivo de preservar as características técnicas e físico-operacionais do sistema rodoviário e das instalações físicas, dentro dos padrões de serviço pré-estabelecidos e compatíveis com os preceitos de otimização técnico-econômica do “Custo Total de Transporte”.

Tais ações de Conservação Rodoviária devem ser programadas e continuamente executadas, ao longo de cada um dos ciclos de vida do pavimento e tendem a ser tornar anti-econômicas quando alcançado ou ultrapassado o final de tal ciclo – oportunidade em que deve ser procedida à recuperação de pavimento.

– Conservação Corretiva Rotineira

É o conjunto de operações de conservação que tem como objetivo reparar ou sanar um defeito e restabelecer o funcionamento dos componentes da Rodovia, proporcionando conforto e segurança aos usuários.

– Conservação Preventiva Periódica

É o conjunto de operações de conservação realizadas periodicamente com o objetivo de evitar o surgimento ou agravamento de defeitos. Trata-se de tarefas requeridas durante o ano mas cuja frequência de execução depende do tráfego, da topografia e de efeitos climáticos.

– Conservação de Emergência

É o conjunto de operações a serem eventualmente realizadas com o objetivo de recompor, reconstruir ou restaurar trechos que tenham sido seccionados, obstruídos ou danificados por um evento extraordinário ou catastrófico, colocando em flagrante risco o desenvolvimento do tráfego da Rodovia ou ocasionando a sua interrupção.

– Melhoramentos

É o conjunto de operações que, acrescentando à Rodovia características novas objetivam:

- O atendimento a demandas operacionais que contemplam especificamente a geometria da via e/ou o sistema de sinalização e de segurança do tráfego.
- A adequação ou incorporação, face à ocorrência de eventos supervenientes, de elementos ou componentes integrantes de drenagem e de proteção da infraestrutura e/ou de obras complementares

Para efeito de execução dos serviços pertinentes, quando detectada a necessidade da execução dos serviços, deverá ser considerado o seguinte:

- No caso dos melhoramentos decorrentes de demandas operacionais de cunho isolado ou localizado – bem como no caso dos melhoramentos decorrentes de

demandas de outras naturezas, os serviços pertinentes quando evidenciada a urgência de sua execução, deverão ser incluídos na programação corrente da Conservação Periódica para execução imediata ou, então, assumidos na Conservação de Emergência. Para tanto, deverá ser devidamente elaborado o Projeto de Engenharia – que, sempre que possível deverá ser expedito.

- No caso dos melhoramentos decorrentes de demandas operacionais de cunho isolado ou localizado – bem como no caso dos melhoramentos decorrentes das demandas de outra natureza, os serviços pertinentes, quando não evidenciada a sua urgência, deverão ser registrados e listados para execução oportuna – sendo então incorporados ao objeto global das futuras obras de “Restauração e Reabilitação do Pavimento da Rodovia”
- No caso de melhoramentos decorrentes de demandas operacionais que não sejam de cunho isolado ou localizado e que acusem tendência, face à magnitude do tráfego, de se expandir e/ou diversificar ao longo do trecho correspondente, tais melhoramentos deverão ser devidamente definidos e executados a partir dos competentes estudos de capacidade e segurança.

Os serviços pertinentes, a serem então executados, oportunamente e em função de particularidades de cada caso, deverão estar incluídos no objeto global de uma das seguintes modalidades de obras:

- Adequação da Capacidade e Segurança de Tráfego da Rodovia.
- Restauração e Reabilitação do Pavimento da Rodovia, incluindo Melhoramentos Físicos e Operacionais decorrentes de Intervenções de Baixo Custo.
- Restauração e Reabilitação do Pavimento da Rodovia, incluindo os melhoramentos objetivando, de forma plena, a Adequação da Capacidade e Segurança do Tráfego.
- Duplicação da Rodovia

#### – Recuperação do Pavimento

É um processo a ser ordinariamente aplicado a um pavimento desgastado, com o objetivo de restabelecer as suas adequadas características técnicas.

As intervenções físicas pertinentes compreenderão a Restauração e/ou a Reabilitação do Pavimento – a seguir, devidamente conceituadas, em conjunto com outros termos correlacionados.

#### – Recuperação do Pavimento através de sua Restauração

É um processo a ser ordinariamente aplicado a um pavimento que, desfrutando ainda da devida habilitação, e apresentando desempenho compatível com os competentes modelos de previsão, se encontra próximo de alcançar, conforme aferido por parâmetros temporais e/ou índices de desempenho, o estágio final do ciclo de vida correspondente.

Tal restauração vai-se materializar com base em Projeto de Engenharia específico, elaborado conforme as “Diretrizes Básicas, para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários”, no qual, a partir do valor residual do pavimento existente, considerando os parâmetros do tráfego esperado para o novo ciclo, é definida a solução a ser adotada. No caso essa solução em geral, deverá recair, na execução de recapeamento do pavimento existente e havendo ainda a opção de executar a modalidade reconstrução do pavimento, para situações isoladas ou áreas localizadas.

– Recuperação do Pavimento através de sua Reabilitação

É um processo a ser adotado para um pavimento que, conforme aferido por parâmetros temporais e/ou índices de desempenho já ultrapassou, de forma significativa, o estágio final do ciclo de vida correspondente e apresenta anomalias com tendências irreversíveis, em termos de desempenho funcional e estrutural – não desfrutando mais, portanto, da devida habilitação.

A sua execução se fundamenta em Projeto de Engenharia específico, elaborado conforme o disposto nos instrumentos pertinentes integrantes das “Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários”, no qual, a partir do valor residual do pavimento existente, considerando os parâmetros do tráfego esperado para o novo ciclo, é definido a solução a ser adotada. No caso essa solução em geral, deverá recair, na execução de recapeamento do pavimento existente e havendo ainda a opção, para extensões significativas, da execução da modalidade “reconstrução do pavimento” – modalidade esta que tenderá a ser predominante, na medida em que se amplie a defasagem entre o final do ciclo de vida do pavimento e a efetiva execução das obras de recuperação.

– Recapeamento do Pavimento

Modalidade de intervenção, definida em Projeto de Engenharia específico relativamente à Restauração do Pavimento e/ou à Reabilitação do Pavimento, que consiste na adequada sobreposição ao pavimento existente de uma ou mais camada(s) constituída(s) de mistura betuminosa e/ou concreto de cimento Portland. Tal sobreposição conferirá ao pavimento existente adequado aporte estrutural, mantendo-o assim apto a exercer, em continuidade, um novo ciclo de vida, de conformidade com as premissas técnico-econômicas.

– Reconstrução do Pavimento

Modalidade de intervenção, definida em um Projeto de Engenharia específico relativamente à Restauração do Pavimento e/ou à Reabilitação do Pavimento, que consiste na remoção parcial ou total da espessura do pavimento podendo eventualmente atingir o sub-leito, e na posterior execução adequada de novas camadas estruturais, cujas naturezas, constituições e especificações devem guardar consonância com os atributos correspondentes das áreas adjacentes do pavimento remanescente. O novo revestimento então executado sobre as camadas estruturais inferiores reconstruídas dispendo de necessário suporte, formará assim o pavimento

apto a exercer um novo ciclo de vida, de conformidade com premissas técnico-econômicas.

– **Reconstrução Parcial do Pavimento**

É a modalidade de reconstrução em que a espessura total a ser removida e substituída se limita a uma profundidade tal que não atinge a espessura total do pavimento.

– **Reconstrução Total do Pavimento**

É a modalidade de reconstrução em que a espessura total a ser removida e substituída atinge toda a espessura do pavimento podendo, eventualmente, inclusive atingir o subleito.

– **Reforço do Pavimento**

É o aporte estrutural, constituído de uma ou mais camadas betuminosas, a ser(em) sobreposta(s) a um pavimento existente, após devidamente executadas as correções superficiais necessárias, com a finalidade de torná-lo apto a cumprir um novo ciclo de vida.

Eventualmente, referida(s) camada(s) betuminosa(s) pode(m) ser precedida(s) da execução de camada(s) granular(es).

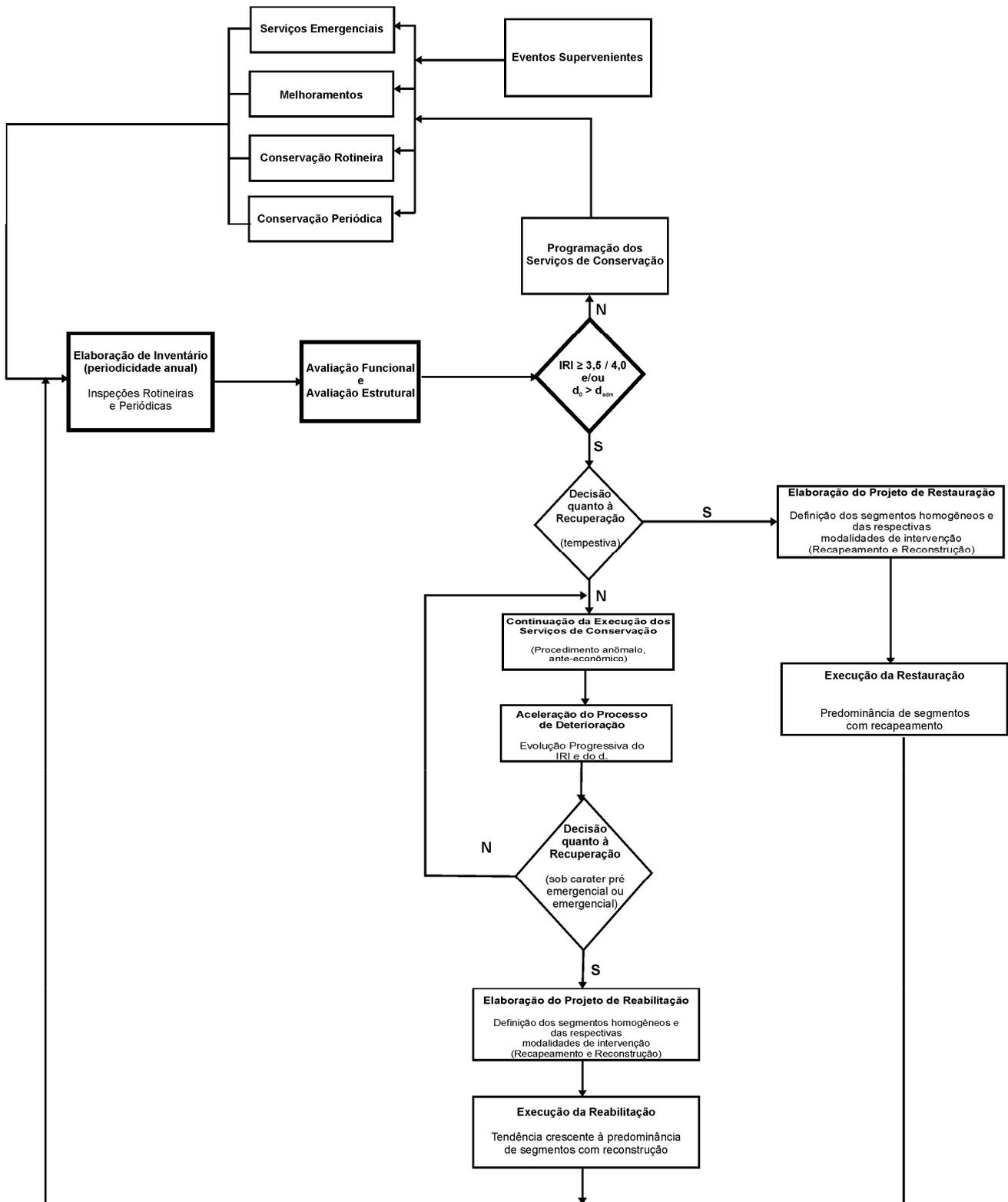
Em termos práticos, o Reforço do Pavimento corresponde à solução definida em projeto de Restauração do Pavimento – para cuja consecução, de uma forma ordinária, devem ser adotados os procedimentos definidos em capítulo específico deste Manual. Entre tais procedimentos, cumpre destacar os estabelecidos nas seguintes Normas:

- PRO-10/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento “A”
- PRO-11/79 - Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento “B”
- PRO-159/85 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos
- PRO-269/94 – Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis – TECNAPAV

#### **2.2.4 FLUXOGRAMA GERAL DA MANUTENÇÃO RODOVIÁRIA**

A Figura 2 a seguir apresenta o Fluxograma em foco, cujo objetivo é fornecer uma visão panorâmica das intervenções e interações pertinentes. Referido Fluxograma pode ser cotejado com a Figura 1 – Curva da Degradação do Pavimento, constante ao final do subitem 2.2.1.

Figura 2 - Fluxograma Geral da Manutenção Rodoviária



### 2.3 FATORES INTERVENIENTES NO PROJETO

A serventia é a habilidade do pavimento em proporcionar ao usuário conforto, segurança e economia. A recomposição da serventia de um pavimento pode ser necessária por uma ou mais das seguintes razões:

- a) qualidade de rolamento inadequada;
- b) excesso de defeitos de superfície;
- c) redução do coeficiente de atrito entre pneu e pavimento;
- d) necessidade excessiva de serviços de conservação;
- e) custos elevados para o usuário;
- f) capacidade estrutural inadequada para a solicitação de tráfego prevista.

A aplicação de uma camada asfáltica pode ser uma solução eficiente e relativamente durável para a correção da maioria das deficiências enumeradas anteriormente. As intervenções de resselagem da superfície e reciclagem podem promover melhorias funcionais e até mesmo estruturais, porém exigem cuidados especiais no projeto e construção.

Na seleção da alternativa de Restauração mais apropriada, anterior ao dimensionamento propriamente dito, deverão ser considerados fatores como:

- a) condição atual do pavimento quanto à qualidade de rolamento e aos defeitos de superfície;
- b) características do tráfego no passado e no futuro, em termos de volume de tráfego, número de eixos e peso por eixo;
- c) avaliação estrutural do pavimento existente;
- d) condições ambientais, geralmente representadas pelo índice de precipitação pluviométrica e temperatura;
- e) condições de drenagem superficial e subterrânea;
- f) topografia do terreno (plana, montanhosa, ondulada ou suave);
- g) restrições impostas pelas estruturas contíguas (pontes, meio-fio, sarjetas ou mesmo acostamentos);
- h) vida útil requerida para a intervenção;
- i) materiais utilizados na construção original e aqueles disponíveis para a futura intervenção;
- j) idade do pavimento;
- k) histórico da conservação (os tipos e frequência das intervenções anteriores e seus respectivos custos);
- l) característica demográfica da região (urbana, suburbana ou rural).

Nem todos os fatores listados anteriormente são considerados nas rotinas para escolha da alternativa adequada. Os fatores de projeto mais comumente utilizados são:

- a) condição atual do pavimento com relação aos defeitos de superfície;

- b) solicitação de tráfego, em termos de número de repetições de carga por eixo padrão durante o período de projeto;
- c) capacidade estrutural do pavimento existente.

O tipo, intensidade e severidade dos defeitos na superfície do pavimento existente são considerações importantes na escolha da provável medida de Restauração.

As características ambientais são consideradas principalmente quando são adotados métodos de dimensionamento desenvolvidos empiricamente. Alguns desses métodos incluem considerações ambientais na avaliação das propriedades dos materiais e da capacidade estrutural.

Os métodos de dimensionamento presumem que será promovida uma drenagem adequada. O projetista, porém, deve avaliar os requisitos de drenagem como um projeto à parte e, posteriormente, analisá-lo em conjunto com as intervenções de restauração. As considerações referentes à topografia da região, ou as restrições impostas pelas estruturas contíguas também devem ser analisadas da mesma maneira.

A previsão da vida de projeto é inerente ao método de dimensionamento ou pode, ainda, ser especificada pelo órgão rodoviário. Os recapeamentos asfálticos são geralmente projetados e analisados economicamente para um período que pode variar de 3 a 10 anos. Alguns órgãos rodoviários e projetistas acreditam que períodos de análise mais longos, embora possam requerer múltiplos recapeamentos, são mais adequados para a avaliação econômica.

A escolha da vida do projeto pode também ser afetada pelas restrições financeiras. As informações disponíveis quanto ao desempenho das intervenções anteriores também devem ser consideradas.

As recomendações de projeto podem ser influenciadas por aspectos tais como: o estágio de deterioração do pavimento original, a disponibilidade dos materiais de construção e os procedimentos utilizados na execução da intervenção. Por exemplo, o tipo de deterioração do pavimento existente pode influenciar a recomendação final do projeto e a utilização de uma camada de “binder” entre o antigo pavimento e a nova camada asfáltica ou algum tratamento especial que incorpore camadas de absorção de tensões.

## **2.4 O PROCESSO DE RESTAURAÇÃO**

A Restauração é mais uma arte do que uma ciência. Com a exceção de alguns métodos para reforço de pavimentos, onde há equações ou modelos que definem as espessuras de recapeamento, deve ser utilizada, em cada projeto de Restauração, uma série de procedimentos analíticos e critérios de engenharia para a definição da medida adequada de Restauração.

Esta seção apresenta orientações gerais para seleção de alternativas ou estratégias de Restauração de pavimentos. Devido às poucas informações disponíveis relativas ao

processo global de Restauração, os órgãos rodoviários deveriam acompanhar o desempenho das várias medidas de Restauração e continuamente realimentar o processo.

Entretanto, sempre existirá uma solução mais adequada, que embora tenha características diferentes da solução ótima, é eficiente técnica e economicamente e atende às restrições existentes. O projetista deve, portanto, determinar a medida mais adequada de Restauração, dadas as condições e limitações particulares.

Embora a seleção da solução adequada seja um problema complexo de engenharia, o processo analítico é facilitado pela utilização de um enfoque lógico e seqüencial, cujos fundamentos são baseados na necessidade de:

- a) determinar as causas dos defeitos dos pavimentos;
- b) desenvolver uma lista de soluções possíveis que apropriadamente atendam o problema;
- c) selecionar a medida de Restauração adequada, dada as restrições econômicas ou outras de projeto.

As principais etapas nesse processo de seleção são ilustradas na Figura 3 e são descritas a seguir.

#### **2.4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA**

A primeira fase do processo de seleção da Restauração do pavimento é a definição do problema. Deve ser coletada e avaliada suficiente informação sobre o pavimento para apropriadamente compreender a situação e impedir que o problema seja definido de maneira imprecisa. Em resumo, a primeira etapa é identificar e estabelecer a condição do pavimento, por meio das seguintes medidas:

##### **a) Coleta de dados**

A avaliação do pavimento requer coleta substancial de informações do tipo: condição do pavimento (pista e acostamento), estrutura do pavimento, características geométricas da rodovia, propriedades dos solos e dos materiais de construção, solicitação do tráfego (volumes e carregamento), condição climática, de drenagem e de segurança;

##### **b) Avaliação dos dados**

Durante o processo de coleta e avaliação, deve ser obtida informação adequada para minuciosamente definir o problema. Uma avaliação geral dos dados coletados determinará as causas e a extensão da deterioração. Esse aspecto não pode ser subestimado, pois o sucesso da Restauração do pavimento depende muito mais das condições existentes do que da construção propriamente dita. Para que se possa entender as origens da deterioração do pavimento, é necessário o conhecimento das causas prováveis e dos mecanismos de ocorrência e de progressão dos defeitos.

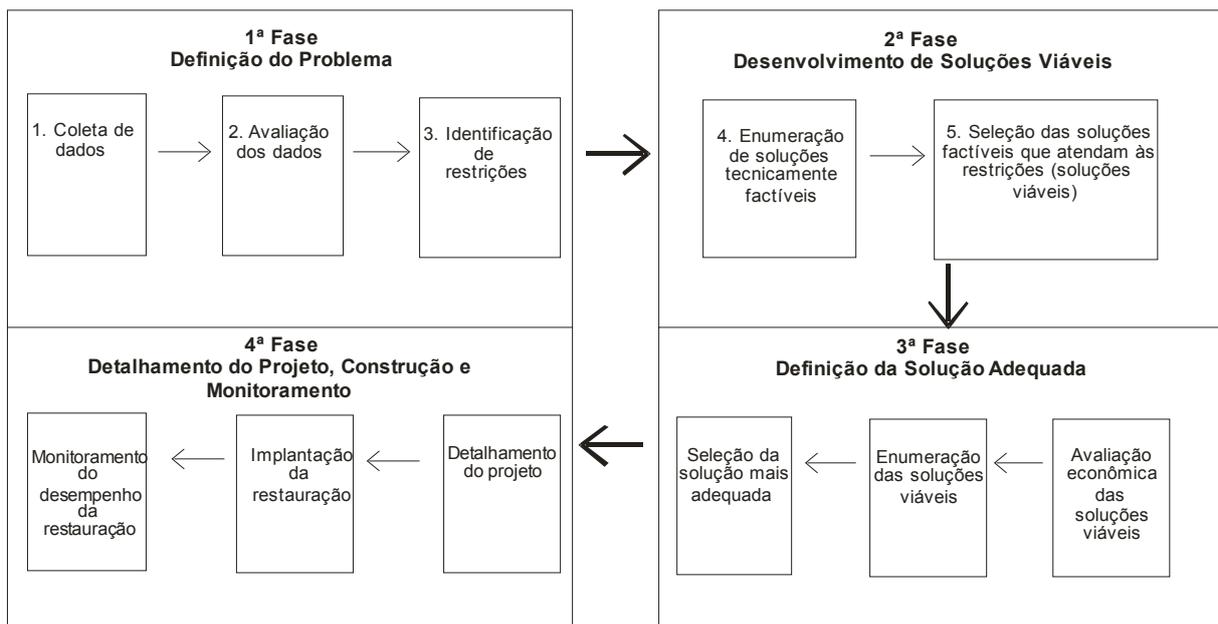
### c) Identificação de restrições

As restrições existentes em um projeto de Restauração devem ser identificadas durante a fase de definição do problema, visto que eles freqüentemente afetam a escolha da alternativa de Restauração. Alguns itens que podem restringir a seleção das alternativas são: recursos financeiros limitados, dificuldades de controle de tráfego, vida útil de projeto, problemas na geometria da rodovia, gabarito mínimo nas obras-de-arte especiais, materiais e equipamentos disponíveis, mão-de-obra e especialização do empreiteiro e o programa do órgão rodoviário para a rede.

#### 2.4.2 DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES

A segunda fase do processo de seleção da medida adequada de Restauração do pavimento, como ilustrado na Figura 3, é a identificação das soluções para o problema. A primeira etapa nesta fase é a enumeração das soluções que são tecnicamente factíveis na resolução do problema de deterioração dos pavimentos. A seguir, as soluções possíveis são sujeitas às restrições do projeto e aquelas que atendem as restrições são consideradas soluções viáveis para a restauração.

**Figura 3 - Etapas do Processo de Restauração**



Devem ser examinadas diversas soluções possíveis que atendam as causas da deterioração e que sejam eficientes no reparo dos defeitos existentes e, tanto quanto possível, na prevenção do reaparecimento dos defeitos.

Depois de todas as alternativas viáveis terem sido selecionadas, devem ser desenvolvidos estudos de pré-dimensionamento. A partir das espessuras aproximadas de recapeamento ou de quantitativos de serviços, podem ser feitas estimativas de custo. Como se vê, os projetos de Restauração requerem mais especialização técnica do que os projetos de pavimentos novos.

### **2.4.3 DEFINIÇÃO DA SOLUÇÃO ADEQUADA**

A terceira fase do processo de seleção da Restauração do pavimento, é a seleção da solução mais adequada. Não há método seguro ou exato para a seleção da mais adequada alternativa de Restauração para um determinado projeto. O processo de seleção requer julgamentos importantes de engenharia, criatividade e flexibilidade. Cada órgão rodoviário deveria desenvolver um procedimento para selecionar soluções adequadas para seus projetos, utilizando considerações monetárias e não monetárias. Essa fase é constituída de três etapas:

#### **a) Avaliação econômica**

É considerado o mais importante critério de decisão quando da escolha da solução mais adequada entre várias alternativas de Restauração. Os vários tipos de custos, para o órgão rodoviário e o usuário, que ocorrem durante o ciclo de vida de uma rodovia serão discutidos no capítulo 7 deste trabalho.

Na avaliação econômica são necessárias informações sobre custos ao longo do ciclo de vida do pavimento. Existe um grande grau de incerteza quanto às relações entre custos e deterioração dos pavimentos. Mesmo o engenheiro familiarizado com o desempenho de várias medidas de Restauração em sua área de atuação pode encontrar dificuldades na alimentação dos dados na análise de custo de ciclo de vida. Para eliminar tanto quanto possível a incerteza, é essencial coletar dados de desempenho de Restauração e armazená-los em um banco de dados, preferencialmente no Sistema de Gerência de Pavimentos do órgão rodoviário.

Muitos fatores não monetários devem ser considerados na determinação da medida adequada de Restauração. Alguns desses fatores são: vida de serviço, duração da construção, problemas de controle de tráfego, confiabilidade, facilidade de construção ou conservação.

#### **b) Seleção da alternativa mais adequada**

Deverá ser selecionada utilizando-se primeiramente fatores monetários e, posteriormente, os não monetários. Se a avaliação econômica não indicar uma vantagem clara por uma das alternativas exequíveis, os fatores não monetários podem ser utilizados para auxiliar no processo de seleção.

### **2.4.4 PROJETO, CONSTRUÇÃO E MONITORAMENTO**

Uma vez que o método de Restauração tenha sido selecionado, planos detalhados de projeto, especificações e orçamentos são preparados. Se uma significativa diferença no projeto ou custo ocorrer durante essa fase, pode ser necessário reinvestigar se essa alternativa é ainda a solução mais eficiente em custo.

A última e, não menos importante, etapa indica a necessidade de acompanhamento e revisão contínua do desempenho dos pavimentos. Isto é essencial para que deficiências possam ser corrigidas nos próximos projetos.

### **3 – DETERIORAÇÃO DOS PAVIMENTES ASFÁLTICOS**



### 3 DETERIORAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Os pavimentos são concebidos para durarem um determinado período. Durante cada um destes períodos ou “ciclos de vida”, o pavimento inicia numa 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.

O entendimento dos mecanismos que regem o processo de deterioração de um pavimento é condição essencial para a identificação das causas que o levaram a sua condição atual, bem como para a escolha e programação da técnica mais adequada para sua Restauração.

Este capítulo aborda os aspectos relativos ao desempenho dos pavimentos e os mecanismos que regem o fenômeno de sua deterioração, comentando-se como este se apresenta na superfície dos pavimentos por meio de ocorrências de defeitos e o que deve ser observado para a tomada de decisão quanto à necessidade ou não da restauração do pavimento.

#### 3.1 DESEMPENHO FUNCIONAL

O desempenho funcional refere-se à capacidade do pavimento de satisfazer sua função principal, que é a de fornecer uma superfície com serventia adequada em termos de qualidade de rolamento.

A serventia pode ser avaliada subjetivamente ou por medidas físicas correlacionáveis com avaliações subjetivas. No “AASHO Road Test”, concluiu-se que a característica do pavimento que mais afetava a avaliação dos usuários era a irregularidade longitudinal.

A irregularidade longitudinal é definida pela Norma DNER - PRO 164/94 como “o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade ao rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via”. Ela é a grandeza física mensurável, direta ou indiretamente, na superfície do pavimento, que melhor se correlaciona com o custo operacional dos veículos, o conforto, a segurança, a velocidade e a economia das viagens.

No passado, a necessidade de restauração de um pavimento devido a sua condição funcional era definida por avaliações subjetivas. Atualmente, existem medidores de irregularidade longitudinal disponíveis a qualquer órgão rodoviário que facilitam este trabalho e que efetuam medidas diretas do perfil em várias unidades (QI, IRI, BI). Os pavimentos devem, pois, ser reabilitados quando atingirem valores limites de serventia ou irregularidade, que podem ser relacionadas com equações de desempenho que reproduzem a opinião dos usuários.

### **3.2 DESEMPENHO ESTRUTURAL**

O desempenho estrutural refere-se à capacidade de um pavimento em manter sua integridade estrutural, sem apresentar falhas significativas. Deve-se associar o desempenho estrutural com a preservação dos investimentos e considerar como o melhor momento para reabilitar o pavimento, aquele que conduza a um menor custo do ciclo de vida.

As falhas ou defeitos nos pavimentos foram codificadas e classificadas de acordo com as Normas DNIT 005/2003-TER - Defeitos nos pavimentos asfálticos – Terminologia.

O conhecimento dos tipos, severidade e intensidade dos vários defeitos pode influenciar na necessidade de tratamentos especiais associados aos serviços convencionais de restauração. Por exemplo, como função do desempenho estrutural poderá ser necessário a utilização de camadas de alívio de tensão, no intuito de minimizar as trincas de propagação na camada de recapeamento. Também pode ser necessária a realização de ensaios especiais visando auxiliar o processo de identificação da técnica de Restauração mais adequada.

Os ensaios defletométricos são os mais apropriados para a interpretação do comportamento estrutural do pavimento. Se o pavimento exibir deformações, será necessário coletar amostras e ensaiar as diversas camadas que constituem a estrutura do pavimento, antes de decidir sobre a execução de uma intervenção (por exemplo, um recapeamento).

Pode ser necessária a remoção e substituição de alguma camada do pavimento para evitar deformações excessivas. Mesmo um acréscimo na espessura do recapeamento pode ser previsto para reduzir as tensões solicitantes na camada crítica e, conseqüentemente, evitar as deformações excessivas.

Os pavimentos devem ser restaurados quando atingirem determinados níveis de trincamento, deformação ou desagregação.

#### **3.2.1 MECANISMOS DO TRINCAMENTO**

Os revestimentos betuminosos tendem a trincar em algum estágio de suas vidas sob as ações combinadas do tráfego e das condições ambientais, por meio de um ou mais mecanismos.

A trinca é um defeito na superfície que enfraquece o revestimento e permite a entrada da água, provocando um enfraquecimento adicional da estrutura. Uma vez iniciado, o trincamento tende a aumentar sua extensão e severidade conduzindo eventualmente a desintegração do revestimento.

Por meio desses efeitos, a velocidade de restauração de um pavimento aumenta após o aparecimento do trincamento, com impacto significativo na evolução das deformações nas trilhas de roda e da irregularidade longitudinal. Esse é o motivo pelo qual o trincamento tem

vido, ao longo do tempo, um critério importante para a deflagração de intervenções de restauração de pavimentos.

A seguir são descritos os principais tipos de trincamento.

### 3.2.1.1 TRINCAS POR FADIGA

O trincamento dos materiais devido à fadiga resulta dos efeitos cumulativos do carregamento sucessivo. Este tipo de trincamento é caracterizado em sua fase final pelas trincas “couro de jacaré”, usualmente confinadas nas trilhas de roda.

Diversas pesquisas a respeito foram conduzidas nas últimas décadas e que estabeleceram relações bem definidas para o trincamento de misturas betuminosas, do tipo:

$$N = k \cdot (\varepsilon_t)^{-n}$$

em que:

N = número de repetições devidas ao carregamento até o início do trincamento por fadiga

$\varepsilon$  = deformação específica máxima de tração ocorrente na mistura betuminosa sob a ação do carregamento

k, n = constantes que dependem principalmente da rigidez e do teor de asfalto da mistura betuminosa

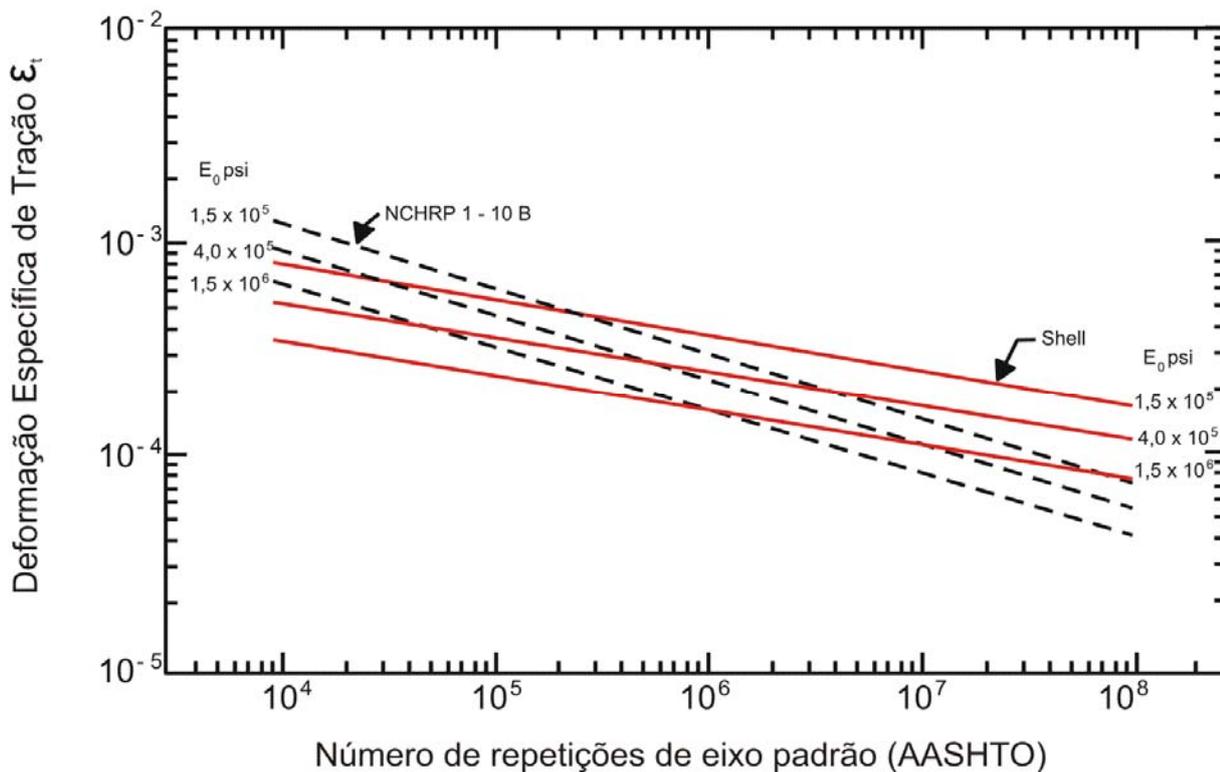
Os valores de k e n, obtidos em laboratório, variam de acordo com as características dos materiais e das condições de carregamento. A influência das principais características da mistura betuminosa em função das condições de carregamento pode ser visualizada na Tabela 2. O acréscimo do teor de asfalto da mistura resulta no aumento da vida de fadiga (exceto para níveis acima do teor ótimo), devido ao acréscimo da espessura do filme asfáltico.

**Tabela 2 - Fatores que afetam o módulo de elasticidade e a vida de fadiga das misturas asfálticas**

Característica	Efeito da mudança na característica da mistura	Efeito no módulo de elasticidade	Efeito na vida de fadiga	
			Ensaio de tensão controlada	Ensaio de deformação controlada
Viscosidade do asfalto	Acrécimo	Acrécimo	Acrécimo	Decréscimo
Teor de asfalto	Acrécimo	Acrécimo	Acrécimo	Acrécimo
Graduação do agregado	Mais fechadas	Acrécimo	Acrécimo	Decréscimo
Teor de vazios	Decréscimo	Acrécimo	Acrécimo	Acrécimo
Temperatura	Decréscimo	Acrécimo	Acrécimo	Acrécimo

As curvas de projeto da Shell e do Instituto do Asfalto são mostradas na Figura 4, a título de ilustração, demonstrando a relação inversa existente entre o número de repetições e as deformações.

**Figura 4 - Comparação entre as curvas de projeto da Shell e do Instituto do Asfalto (NCHRP - 10B) para fadiga de misturas betuminosas**



### 3.2.1.2 TRINCAS POR ENVELHECIMENTO

O ligante betuminoso perde seus elementos mais leves com a exposição ao ar, e vai ao longo do tempo tornando-se cada vez mais suscetível a rompimentos. O trincamento ocorre quando o ligante betuminoso torna-se tão suscetível a rompimentos que não pode mais suportar as deformações provenientes das mudanças de temperatura que ocorrem ao longo do dia.

A velocidade do processo de endurecimento do asfalto depende da resistência à oxidação do ligante (que varia com sua composição química e a origem do petróleo), da temperatura ambiente e da espessura do filme de ligante.

O processo de endurecimento do asfalto depende, portanto, do tipo e qualidade do ligante, das condições climáticas e do projeto da camada de revestimento. Teores mais elevados de asfalto e baixa quantidade de vazios tem efeitos benéficos sobre a vida de uma mistura betuminosa, pois dificultam o processo de oxidação e promovem maior durabilidade.

A forma das trincas por envelhecimento, usualmente, é do tipo irregular com espaçamento maior que 0,5 m e, uma vez iniciado o trincamento, tende a propagar-se em toda a área coberta pelo revestimento.

### **3.2.1.3 TRINCAS POR REFLEXÃO**

As trincas por reflexão ocorrem quando o trincamento existente em uma camada inferior propaga-se em direção à superfície, atingindo o revestimento asfáltico. Assim sendo, elas podem apresentar-se sob a forma de qualquer tipo de trinca (longitudinal, irregular ou mesmo interligada).

A reflexão ocorre como consequência da concentração das tensões no entorno da região ocupada pela trinca existente, fazendo com que a vida de fadiga do revestimento seja extremamente reduzida. Como uma regra prática, estima-se que a velocidade de propagação de uma trinca oscila entre 20 mm e 50 mm por ano.

### **3.2.1.4 OUTROS TIPOS DE TRINCAMENTO**

O trincamento devido a variação da temperatura é resultante da combinação da retração térmica e da alta rigidez do ligante betuminoso, que ocorre quando a temperatura é reduzida significativamente.

Em essência, é um fenômeno de fadiga devido à solicitação provocada pelo gradiente térmico, em muitos aspectos semelhante à fadiga gerada pelo fenômeno do envelhecimento.

O trincamento se apresenta na forma de trincas transversais ou longitudinais, com espaçamentos definidos pelas propriedades dos materiais constituintes da mistura betuminosa e pelo regime de temperaturas.

Os trincamentos longitudinal e transversal também se desenvolvem devido ao fenômeno da retração em bases cimentadas. As trincas ocorrem com espaçamento médio de 3,0 m, porém podem apresentar variações de 1,5 m a 12,0 m, dependendo da resistência à tração e das variações térmicas diárias e sazonais prevaletes na região.

As trincas longitudinais próximas à borda do pavimento usualmente são provocadas pela umidade no acostamento. O recalque do terreno de fundação ou a ruptura de aterros também podem causar trincas longas, longitudinais ou parabólicas.

## **3.2.2 MECANISMOS DAS DEFORMAÇÕES**

Entre as deformações permanentes em pavimentos, incluem-se os afundamentos nas trilhas de roda, deformações plásticas no revestimento e depressões. Esses defeitos causam acréscimos na irregularidade longitudinal afetando a dinâmica das cargas, a qualidade de rolamento, o custo operacional dos veículos e, devido ao acúmulo de água,

riscos à segurança dos usuários. As causas das deformações permanentes podem estar associadas ao tráfego ou não, como é resumido na Tabela 3.

Os carregamentos do tráfego causam deformação em três situações, a saber:

- 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, freqüentemente, 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.

**Tabela 3 - Resumo das causas e tipos de deformação permanente**

<b>Causa Geral</b>	<b>Causa específica</b>	<b>Exemplo de defeito</b>
<b>Associada com o carregamento</b>	Carregamento concentrado ou em excesso	Fluência plástica (ruptura por cisalhamento)
	Carregamento de longa duração ou estático	Deformações ao longo do tempo (creep)
	Grande número de repetições de carga	Afundamento nas trilhas de roda
<b>Não associada com o carregamento</b>	Subleito constituído de solo expansivo	Inchamento ou empolamento
	Solos compressíveis na fundação do pavimento	Recalque diferencial

A densificação e a fluência plástica são dois mecanismos associados às deformações que são causados pela ação do tráfego.

A densificação envolve uma diminuição de volume no material, implicando numa maior aproximação ou eventual restauração das partículas constituintes do material.

A densificação em pavimentos pode usualmente ser controlada pela compactação adequada no momento da construção do pavimento. Quanto mais compactado estiver um material, maior será sua resistência ao cisalhamento e menor será sua susceptibilidade ao ingresso da água.

A fluência plástica é outro mecanismo, que pressupõe a constância de volume e dá origem a movimentos cisalhantes geradores de depressões e solevamentos. Isso ocorre quando

os esforços induzidos pelo carregamento excedem a resistência ao cisalhamento dos materiais ou são suficientes para induzir ao recalque.

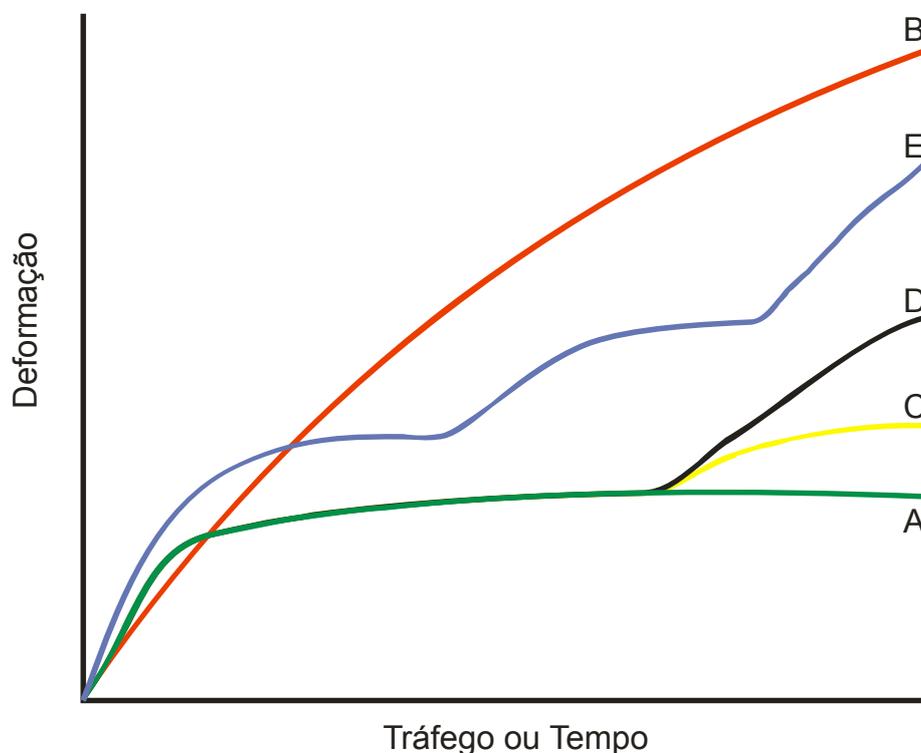
A fluência plástica nos pavimentos pode ser controlada na fase de projeto pela seleção de materiais, de acordo com sua resistência ao cisalhamento. Por exemplo, o ISC – Índice de Suporte Califórnia para solos e a estabilidade Marshall para misturas betuminosas.

As curvas típicas de deformação são apresentadas na Figura 5. A curva A representa um pavimento adequado em termos de espessuras e tipos de materiais utilizados.

Observa-se que a deformação ocorre principalmente devido a densificação. O formato côncavo da curva e a assíntota apresentada sugerem uma pós-compactação até atingir-se o grau de densificação que deveria ter sido atingido durante o processo construtivo.

Quando um pavimento não é adequado em termos de espessuras ou qualidade dos materiais, a deformação tende a apresentar o comportamento representado pela curva B, em que a fluência plástica domina. Esta curva poderia ser típica de um pavimento subdimensionado ou da utilização de asfaltos de baixa viscosidade em camada asfáltica muito espessa.

**Figura 5 - Tipos de curvas de afundamento nas trilhas de roda considerando os efeitos de umidade e conservação**



Condição do pavimento: A - sadio; B - debilitado; C e D - trincado com pouca conservação; e E - debilitado periodicamente

Quando aparecem as trincas e a água ingressa em um pavimento do tipo A, sem a conservação adequada, verifica-se que a velocidade com que a deformação cresce tende a apresentar um comportamento similar ao da curva C ou D. Pavimentos com problemas sazonais de temperatura e umidade podem apresentar curvas de deformação semelhantes ao tipo E.

### 3.2.3 MECANISMOS DA DESAGREGAÇÃO

A desagregação pode ser definida como a perda do agregado superficial devido a fratura mecânica do filme do ligante ou pela perda de adesão entre o ligante e o agregado (o que na presença de água é também chamado de arrancamento).

A fratura mecânica do filme de ligante que envolve o agregado ocorre quando o ligante torna-se muito endurecido ou o filme muito esbelto, para fazer frente aos esforços gerados na área de contato pneu - pavimento.

O desgaste começa a acontecer quando a viscosidade do ligante cai significativamente devido à evaporação dos óleos mais leves do cimento asfáltico. Isto ocorre devido ao aquecimento exagerado na usinagem ou a oxidação durante longa exposição às temperaturas ambientais.

Os pneus dos veículos que utilizam a rodovia geram as forças que podem causar a fratura do filme da ligante. Eles atraem ou retiram o agregado para fora da matriz pela combinação de esforços horizontais e de sucção na área de contato dos pneus. Características como a pressão de contato, o tamanho e o tipo do pneu afetam a velocidade da desintegração de modo mais significativo que o peso por eixo dos veículos.

A perda de adesão entre o filme de ligante e a partícula de agregado deve-se geralmente pela presença de água ou contaminação do agregado. A adesão entre o agregado e o ligante se efetua por meio de uma ligação molecular. Como a maioria dos agregados apresentam superfície com cargas levemente negativas, eles preferencialmente atraem a água e não o betume que é neutro.

Os agregados hidrofílicos (altamente silicosos), são particularmente susceptíveis ao deslocamento da película asfáltica na presença de água. O uso de melhoradores de adesividade, como o cal hidratada e os sais de amina, tem se mostrado capazes de melhorar a adesividade em alguns casos.

A perda de adesão pode ocorrer também se o pó existente na superfície do agregado evitar que o filme de ligante desenvolva uma ligação plena com o agregado. O uso de pedras limpas é vital para um bom serviço, principalmente nos tratamentos superficiais.

A perda da adesividade é portanto controlável por meio de especificações construtivas relativas ao tipo de pedra a ser utilizada, ao processo de limpeza e aos eventuais melhoradores de adesividade necessários.

### 3.2.4 ADEQUAÇÃO ESTRUTURAL

Mesmo quando um pavimento não apresenta falhas estruturais significativas, é usual a adoção de algum reforço com o objetivo de readequar um pavimento (mesmo em estado aceitável) para uma nova demanda de tráfego.

A capacidade estrutural do pavimento existente pode ser avaliada em termos das características de resistência das camadas do pavimento, ou ainda, por meio de ensaios não destrutivos, como os ensaios defletométricos.

Em função do tráfego futuro estimado e da capacidade estrutural do pavimento existente, é possível definir a natureza e as características das medidas destinadas a suportar a nova demanda de tráfego.

### 3.3 DESEMPENHO QUANTO À SEGURANÇA

As características de um pavimento que podem conduzir a recomendação de ações corretivas devido a segurança são: a resistência à derrapagem e o potencial de hidroplanagem.

O potencial de hidroplanagem existe sempre que o filme de água sobre o revestimento do pavimento exibir uma espessura maior que 5 mm e a velocidade do veículo for igual ou maior que a determinada pela expressão abaixo:

$$v = 10\sqrt{p}$$

sendo

v = velocidade do veículo e

p = pressão dos pneus

O afundamento nas trilhas de roda pode contribuir para o fenômeno de hidroplanagem. Em pavimentos com seção transversal exibindo pequena declividade e quando a profundidade nas trilhas de roda atingir cerca de 13 mm, criam-se condições para que o armazenamento de água seja suficiente para uma situação potencial de hidroplanagem.

A resistência à derrapagem é a força de atrito desenvolvida pelo bloqueio de um pneu em movimento sobre a superfície de um pavimento. Ela é usualmente expressa em termos de números obtidos por medições em condições padronizadas e por diversos equipamentos, conforme a “Norma ASTM 1960-98 (ASTM 2001-b) Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface”.

A Norma DNIT 031/2004-ES – Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificações de Serviço, estabelece no Capítulo 7 – Inspeções as condições de segurança a serem observadas medidas com aparelhagem portátil.

### 3.4 GATILHOS PARA A RESTAURAÇÃO

Os itens anteriores abordaram os fatores relacionados ao desempenho dos pavimentos, que devem ser levados em consideração no processo de estabelecimento da necessidade ou não de restaurá-lo.

A fixação de umbrais de qualidade ou dos gatilhos para a deflagração de atividades objetivando a Recuperação da Serventia de um pavimento, é um assunto bastante complexo e que permite diversas abordagens.

Nos EUA, já na década de 60, tinha-se reconhecido a influência da importância da serventia na fixação do gatilho a ser utilizado, recomendando-se o valor de PSI (Present Serviceability Index) = 2,5 para rodovias interestaduais e de alto volume de tráfego e PSI = 2 para as demais rodovias.

No Brasil, as Normas pertinentes recomendam que seja ordinariamente adotado, em especial para Rodovias com acentuado volume de tráfego, o valor IRI  $\leq 3,5$ , como gatilho para a deflagração da Restauração do pavimento.

Os tipos mais importantes de defeitos que são levados em consideração visando à deflagração de intervenções de restauração, são os seguintes:

- a) trincamento (principalmente por fadiga);
- b) desgaste;
- c) panela;
- d) afundamento nas trilhas de roda;
- e) irregularidade longitudinal;
- f) resistência à derrapagem.

O trincamento, o desgaste e a panela são freqüentemente denominados defeitos de superfície porque se originam e se desenvolvem dentro ou próximo da camada do revestimento (isto não quer dizer que os outros componentes da estrutura não tenham influência no seu desenvolvimento).

Eles são caracterizados por duas fases de desenvolvimento. Uma fase inicial em que o defeito ainda não pode ser visualizado na superfície do pavimento e uma fase de evolução durante a qual os defeitos progressivamente se desenvolvem em termos de extensão e severidade conforme pode ser visto na Figura 6.

Na Figura 6, o início dos defeitos é definido pela época em que é possível identificá-los visualmente nos levantamentos de campo. A intensidade dos defeitos é geralmente expressa em percentual de área do pavimento afetada pela deficiência.

O desgaste e as panelas se desenvolvem pelo arrancamento do material da camada de revestimento, e a severidade é uma função da profundidade atingida pela deficiência.

O afundamento nas trilhas de roda e a irregularidade longitudinal normalmente se desenvolvem através da deformação permanente de materiais constituintes das camadas inferiores dos pavimentos. Ambas se desenvolvem progressivamente a partir do início da ação do tráfego, e sua progressão pode ser acelerada pelo enfraquecimento do pavimento devido ao trincamento, conforme pode ser visto na Figura 6, nos itens (c) e (d).

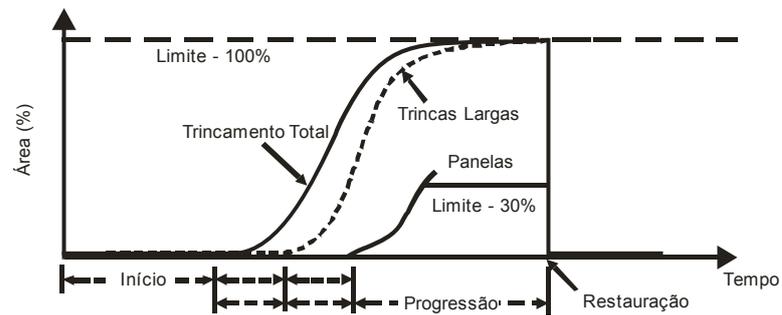
A desagregação e a resistência à derrapagem são função da textura do revestimento e progridem devido à ação abrasiva do tráfego.

Modernamente, com a implementação dos Sistemas de Gerência de Pavimento e dos modelos de análise técnico-econômica, como o HDM-IV do Banco Mundial, pode-se abordar o problema da definição de gatilhos para a deflagração de intervenções de restauração através da minimização do custo total de transporte ou dos custos de conservação.

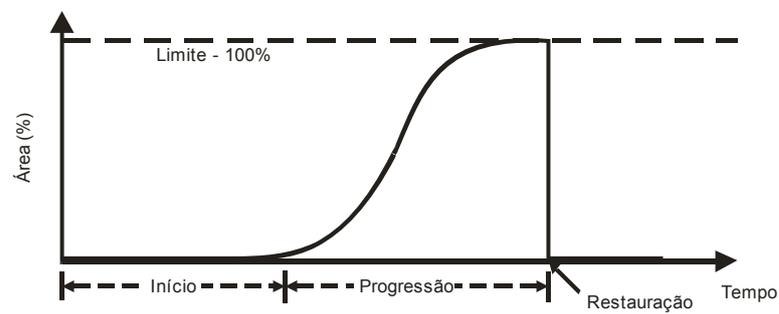
A abordagem do custo total leva em consideração também o custo dos usuários e pode ser considerada a mais interessante do ponto de vista da sociedade como um todo. A minimização dos custos de conservação é o tipo de abordagem relacionada com a ótica dos órgãos rodoviários. Em ambos os casos, os gatilhos obtidos são extremamente dependentes do volume de tráfego, do nível de restauração do pavimento existente e dos recursos disponíveis.

**Figura 6 - Principais tipos de defeitos e suas relações**

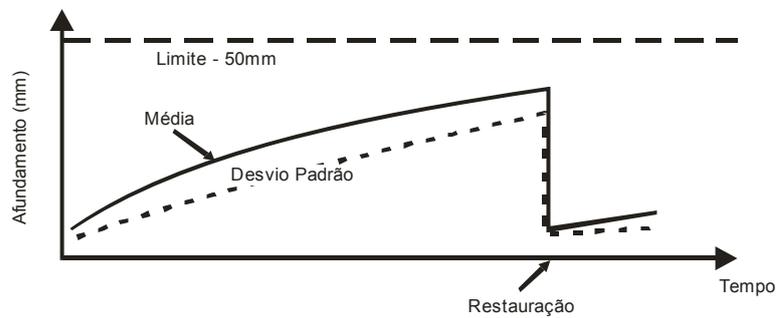
(a) Trincamento e Panelas



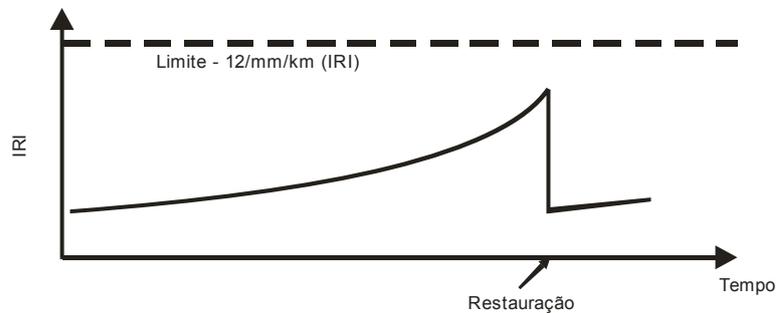
(b) Desgaste



(c) Afundamento de Trilha



(d) Irregularidade



### 3.5 INTERAÇÕES ENTRE OS DEFEITOS

Os mecanismos de deterioração das rodovias pavimentadas são influenciados pelas características do revestimento, que é consideravelmente mais resistente ao desgaste e ação da água, do que os materiais granulares utilizados para construção das demais camadas do pavimento.

O processo de deterioração apresentado por um pavimento pode ser sentido pela variação das condições de sua superfície ao longo do tempo e os mecanismos que regem o processo esquematizados na Figura 7.

As cargas de tráfego induzem tensões e deformações no interior da estrutura do pavimento. Essas tensões e deformações são função da magnitude do carregamento, dos módulos e espessuras das camadas constituintes do pavimento e da capacidade de suporte do subleito.

A ação do carregamento repetido propicia o desenvolvimento do fenômeno de fadiga nas camadas tratadas (com asfalto ou estabilizantes químicos) e a deformação de qualquer das camadas constituintes do pavimento, e também do subleito.

Nos revestimentos betuminosos assentes sobre camadas granulares, o processo de deterioração é controlado pelo nível das deformações específicas de tração ocorrentes na face inferior da camada do revestimento e/ou pelas deformações específicas de compressão no topo do subleito.

Nos revestimentos betuminosos assentes sobre camadas tratadas com aglomerantes (cimento, cal), o processo de deterioração é inicialmente controlado pelo nível das deformações específicas de tração na face inferior da camada tratada e, posteriormente, pelas deformações específicas de compressão ocorrentes no topo do subleito.

A ação dos agentes das intempéries (chuva e variação da temperatura) fazem com que a mistura asfáltica, que constitui a camada de revestimento, torne-se progressivamente mais quebradiça e susceptível ao trincamento e à desagregação.

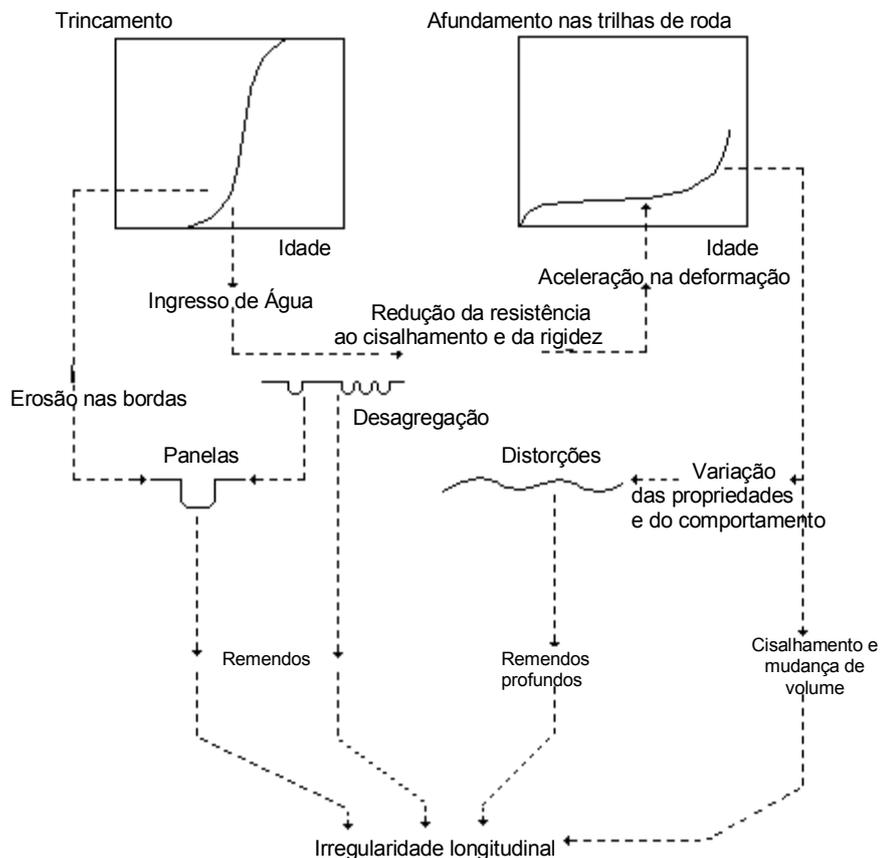
Uma vez iniciado, o trincamento progride em área afetada e severidade, até o ponto da desintegração das bordas das trincas e, posteriormente, provoca o arrancamento das placas e formação de painéis.

As trincas abertas na superfície, permitem a entrada de água no interior do pavimento e, desta forma, aceleram o processo de deterioração, reduzem a resistência ao cisalhamento dos materiais não tratados e aumentam a velocidade da deformação gerada pelas tensões provenientes dos carregamentos induzidos pelo tráfego.

O somatório das deformações ocorrentes em toda a estrutura do pavimento manifesta-se pelos afundamentos nas trilhas de roda e pelas distorções do perfil longitudinal do pavimento. Estes defeitos no pavimento promovem a irregularidade longitudinal.

Portanto, o aumento da irregularidade longitudinal é o resultado de uma cadeia de mecanismos de restauração e combina os efeitos de vários tipos de defeitos e, como tal, não pode ser considerada como um efeito isolado.

**Figura 7 - Interações entre os defeitos em rodovias pavimentadas**

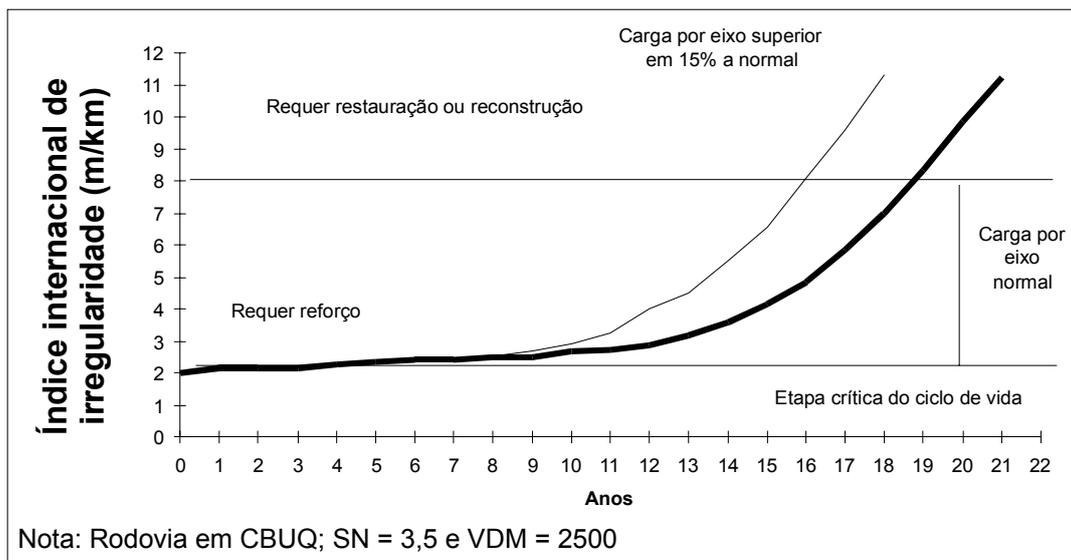


### 3.6 EVOLUÇÃO DA DETERIORAÇÃO

A velocidade da deterioração pode variar enormemente, em função de diversos fatores, tais como: as condições ambientais, a capacidade de suporte do pavimento e do subleito, a qualidade dos materiais utilizados e do processo construtivo, o volume de tráfego, a carga por eixo.

A progressão da deterioração segue uma trajetória não linear, que permite um maior número de opções na escolha e programação da conservação (Figura 8). Durante um certo período inicial, que pode durar até a terça parte do ciclo de vida, as rodovias pavimentadas bem projetadas sofrem uma deterioração muito pouco visível.

Depois desse período inicial, a deterioração da rodovia é crescente, lenta a princípio, mas acelerando rapidamente quando atinge o estado regular. Se nessa fase não forem realizadas medidas importantes de conservação, isto resultará, em poucos anos, numa falha estrutural extrema ao atingir o mau estado.

**Figura 8 - Evolução da deterioração em rodovias pavimentadas**

Durante a primeira etapa descrita anteriormente, uma rodovia pavimentada pode ser mantida em bom estado mediante conservação rotineira, a um custo bastante baixo. Na etapa seguinte, com o aumento da deterioração, o pavimento deve ser recuperado de maneira a permanecer em bom estado, por meio de selagem, recapeamento ou reforço do revestimento. O reforço restabelece a qualidade de rolamento da rodovia e a capacidade estrutural necessária para suportar o tráfego durante vários anos, começando assim um novo ciclo do pavimento.

Com a conservação rotineira adequada, mais a conservação periódica oportuna do pavimento, uma rodovia pavimentada nunca se degradará até chegar ao mau estado, quando é necessária a restauração ou mesmo a reconstrução do pavimento.

Desta forma, a evolução não linear da deterioração, influi decididamente na escolha da política de conservação ótima e, quando os tomadores de decisão não estão conscientes sobre tal evolução, verifica-se que, geralmente, são menosprezadas as necessidades de conservação das redes relativamente novas.



## **4 – AVALIAÇÃO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**



## 4 AVALIAÇÃO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A condição de um pavimento representa o nível de degradação resultante dos processos associados ao meio ambiente e ao seu uso continuado pelo tráfego. A avaliação desta condição é possível por meio do conhecimento de diversos parâmetros de referência, já normalizados, que permitem a determinação das:

- a) condições de superfície;
- b) condições estruturais
- c) condições de rugosidade longitudinais;
- d) avaliação das solicitações do tráfego;
- e) condições de aderência pneu/pavimento;

### 4.1 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE

As condições de superfície dos pavimentos asfálticos são avaliadas pelas seguintes Normas descritas a seguir:

- a) **DNIT 005/2003 – TER** - Defeitos nos pavimentos asfálticos - Terminologia.
- b) **DNIT 006/2003 – PRO** - Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos - Procedimento.
- c) **DNIT 007/2003 – PRO** - Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimento flexível e semi-rígido para gerência de pavimentos e estudos e projetos - Procedimento.
- d) **DNIT 008/2003 – PRO** - Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos asfálticos - Procedimento.
- e) **DNIT 009/2003 – PRO** - Levantamento para avaliação subjetiva da superfície do pavimento - Procedimento.

As quais são utilizadas nos métodos atuais de projeto para avaliação estrutural e Restauração de pavimentos asfálticos.

#### 4.1.1 DNIT 005/2003 – TER - DEFEITOS NOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS – TERMINOLOGIA

O objetivo desta Norma foi a de definir os termos empregados em defeitos que ocorrem na superfície dos pavimentos asfálticos de acordo com uma codificação assumida e uma classificação adotada conforme a gravidade de ocorrência no caso das trincas isoladas e interligadas.

A Tabela 3 apresenta o resumo dos defeitos juntamente com a codificação e classificação respectiva a qual apresenta um bom nível de padronização e similaridades com varias com dados de outras classificações nacionais e estrangeiras.

Deve ser observado que os defeitos foram codificados em dois grandes blocos.

a) Fendas

- Trincas isoladas; e
- Trincas interligadas

b) Outros Defeitos

- Afundamentos;
- Ondulação/Corrugação;
- Escorregamento;
- Exsudação;
- Desgaste;
- Panelas (ou Buracos); e
- Remendos

**Tabela 4 - Quadro resumo dos defeitos – Codificação e Classificação  
(Norma DNIT 005/2003 – TER)**

FENDAS				CODIFICAÇÃO	CLASSE DAS FENDAS		
Fissuras				FI	-	-	-
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Transversais	Curtas	TTC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TTL	FC-1	FC-2	FC-3
		Longitudinais	Curtas	TLC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TLL	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	“Jacaré”	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	J	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	JE	-	-	FC-3
Trincas no revestimento não atribuídas ao fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Devido à retração térmica ou dissecação da base (solo-cimento) ou do revestimento		TRR	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	“Bloco”	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	TB	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	TBE	-	-	FC-3
OUTROS DEFEITOS					CODIFICAÇÃO		
Afundamento	Plástico	Local	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito		ALP		
		da Trilha	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito		ATP		
	De Consolidação	Local	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito		ALC		
		da Trilha	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito		ATC		
Ondulação/Corrugação - Ondulações transversais causadas por instabilidade da mistura betuminosa constituinte do revestimento ou da base					O		
Escorregamento (do revestimento betuminoso)					E		
Exsudação do ligante betuminoso no revestimento					EX		
Desgaste acentuado na superfície do revestimento					D		
“Painéis” ou buracos decorrentes da desagregação do revestimento e às vezes de camadas inferiores					P		
Remendos			Remendo Superficial		RS		
			Remendo Profundo		RP		

NOTA 1: Classe das trincas isoladas

FC-1: são trincas com abertura superior à das fissuras e menores que 1,0mm.

FC-2: são trincas com abertura superior a 1,0mm e sem erosão nas bordas.

FC-3: são trincas com abertura superior a 1,0mm e com erosão nas bordas.

**NOTA 2:** Classe das trincas interligadas

As trincas interligadas são classificadas como FC-3 e FC-2 caso apresentem ou não erosão nas bordas.

**a) Fendas**

São chamadas de fendas quaisquer descontinuidade na superfície do pavimento podendo assumir a feição de fissuras, trincas isoladas longitudinais ou transversais e trincas interligadas tipo couro de jacaré ou tipo bloco.

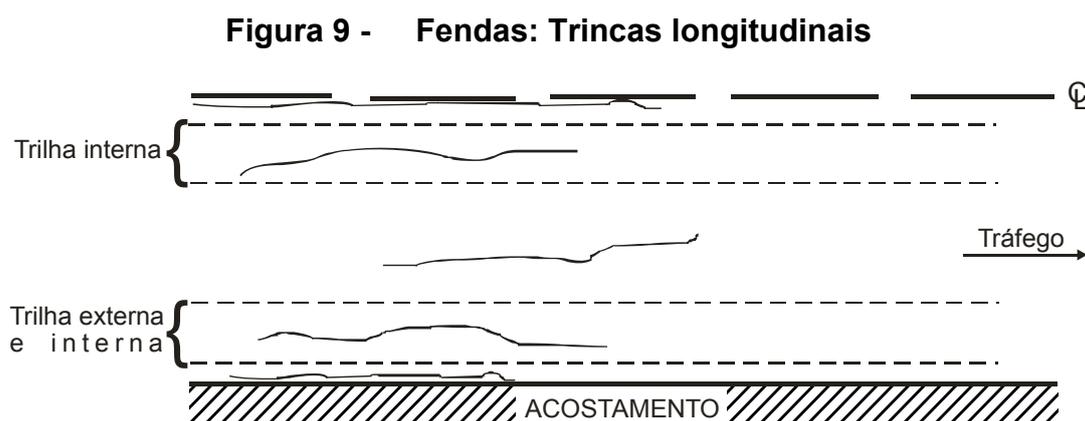
Conforme a abertura das fendas as mesmas podem ser classificadas em FC-1, FC-2 e FC-3.

Nota-se que as fendas FC-3 apresentam além disto, erosão nas bordas (vide tabela 3).

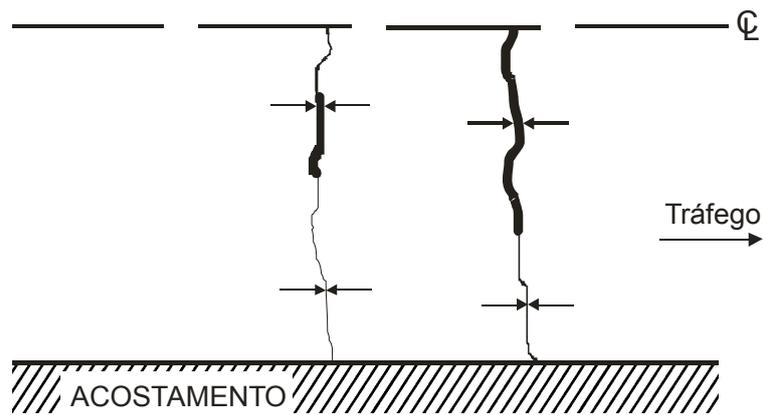
A fendas são causadas genericamente pelas seguintes ocorrências que atuam em conjunto

- Tráfego atuante que pelo ciclo do carregamento e alívio promovem tensões de tração na fibra interior do revestimento;
- Alternância da mudança diária de temperatura que acusam contrações de revestimento existente;
- Reflexão no revestimento de trincas existentes em bases cimentadas (base de solo cimento);

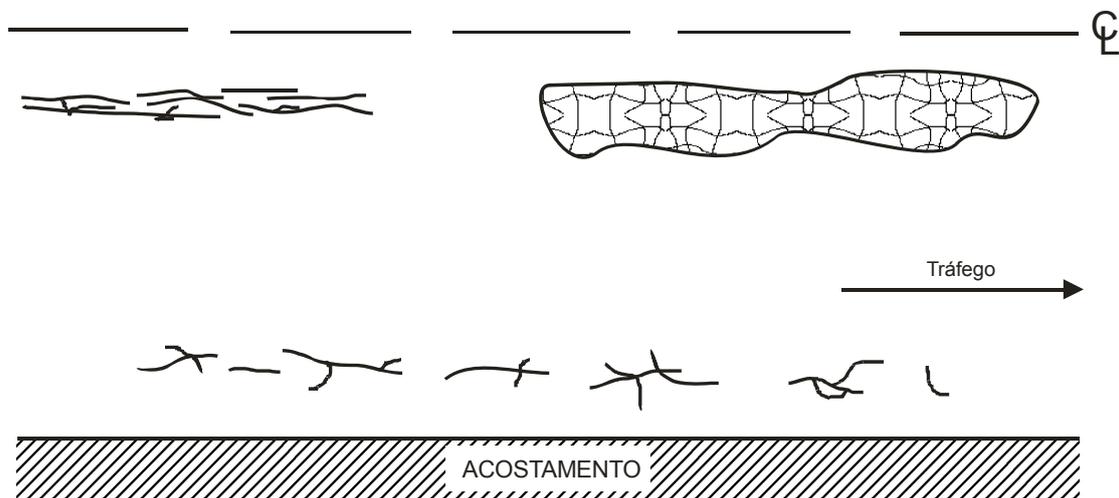
As Figuras 9, 10, 11 e 12 ilustram de uma maneira esquemática as ocorrências de trincas na superfície dos pavimentos flexíveis.



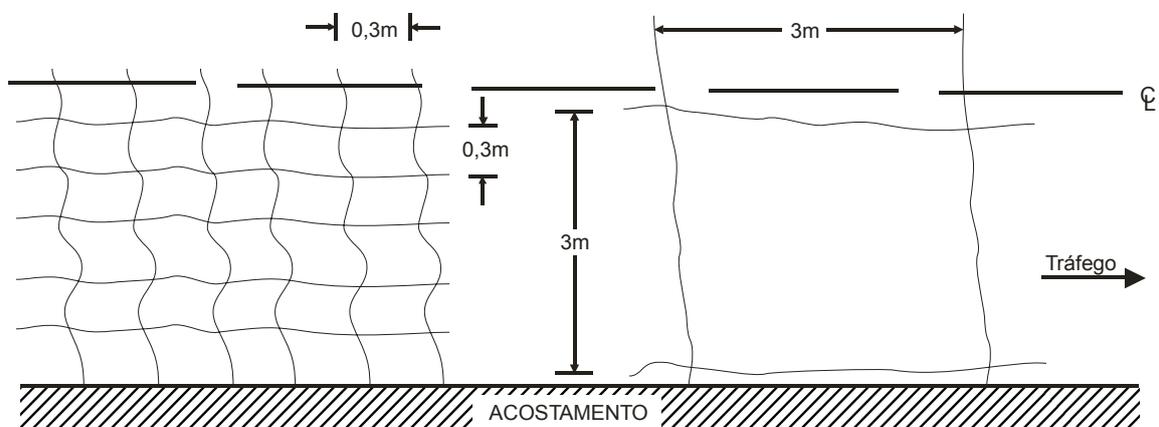
**Figura 10 - Fendas: Trincas transversais**



**Figura 11 - Fendas: Diversos tipos de trincas interligadas**



**Figura 12 - Fendas: Trincamento tipo bloco**



**b) Outros Defeitos****• Afundamento**

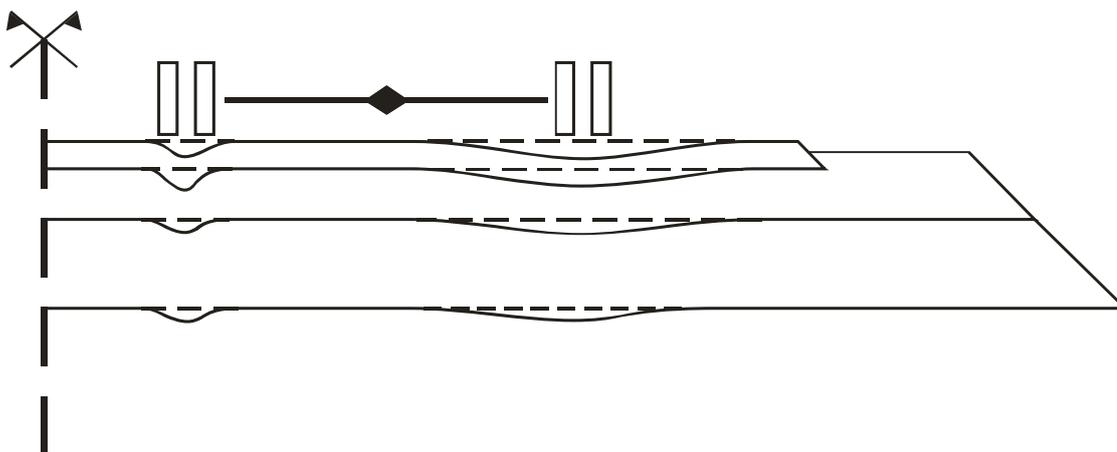
Afundamento é uma deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada, ou não, de solevamento, podendo apresentar-se sob a forma de:

- afundamento plástico causado pela influência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou de subleito; e
- afundamento de consolidação causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas de pavimento ou de subleito.

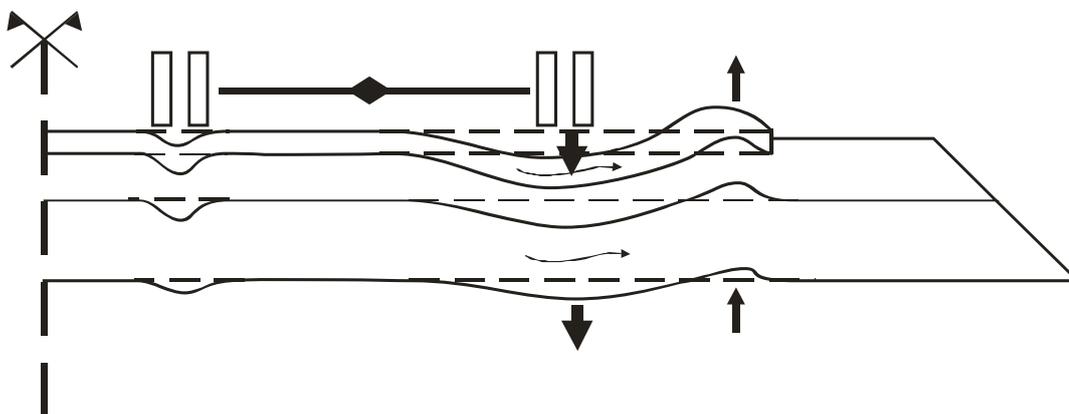
Quando os afundamentos ocorrem com extensões até 6 m são chamados de “afundamentos locais”. Quando ocorrem com extensões contínuas maiores são chamados de “afundamentos de trilhas de roda”.

As Figuras 13 e 14 ilustram de uma maneira esquemática os “afundamentos de trilha de rodas”.

**Figura 13 - Afundamento por consolidação nas trilhas de roda**



**Figura 14 - Afundamento plástico nas trilhas de roda**



- **Ondulação/Corrugação**

A ondulação/corrugação é uma falha caracterizada por ondulações transversais, de caráter plástico e permanente, no revestimento asfáltico.

A ondulação/corrugação pode ser causada por:

- instabilidade da mistura betuminosa da camada de revestimento e/ou a base de um pavimento;
- excesso de umidade das camadas subjacentes;
- contaminação da mistura asfáltica por materiais estranhos;
- retenção de água na misturas asfáltica.

É uma ocorrência ocasionada pela ruptura por cisalhamento no revestimento ou na interface entre o revestimento e o material de base, ocasionado pelas cargas de tráfego.

Normalmente apresentam-se nas regiões de aceleração ou de frenagem dos veículos. Podem ocorrer em qualquer região da superfície, porém, com maior gravidade nas proximidades das trilhas de rodas.

- **Escorregamento (do revestimento)**

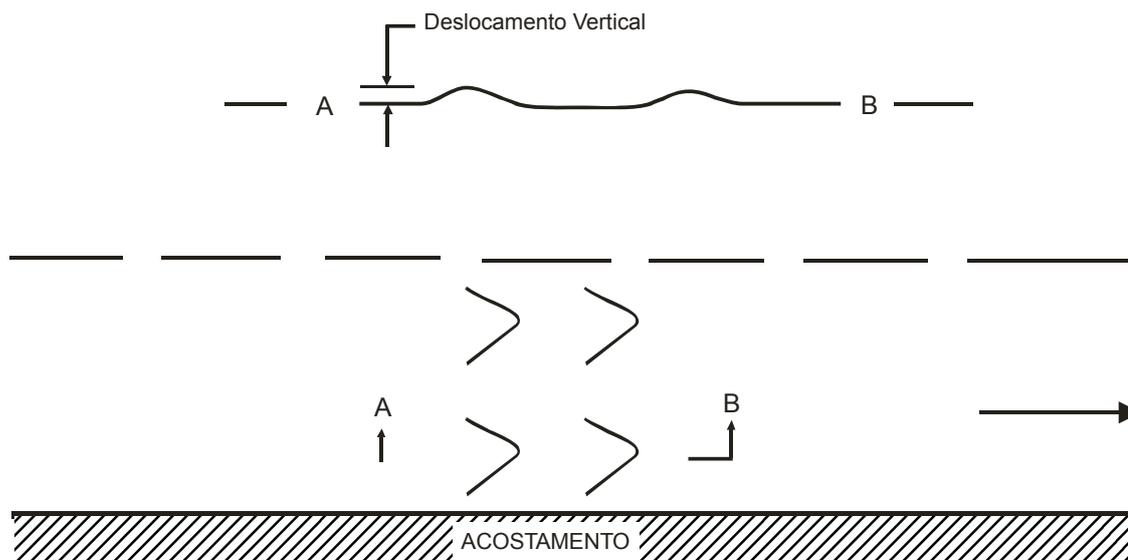
O escorregamento é um movimento horizontal do revestimento ocasionado pelos esforços tangenciais transmitidos pelos eixos dos veículos (frenagem e aceleração) e que produzem uma ondulação curta e abrupta na superfície do pavimento em forma de meia lua (Figura 15).

O escorregamento pode ser ocasionado por:

- ligação inadequada entre o revestimento e a camada sobre a qual este se apoia (deficiências na imprimação ou pintura de ligação);
- inércia limitada do revestimento asfáltico em virtude de sua reduzida espessura;
- compactação deficiente das misturas asfálticas ou da porção superior da camada de base;
- fluência plástica do revestimento na ocorrência de temperaturas elevadas.

O escorregamento é caracterizado inicialmente pela presença de trincas em forma de meia-lua (trincamento parabólico) ocorrentes nos locais de aplicação dos esforços de tração das cargas de roda. Com o tempo surge escorregamento do revestimento ou da capa asfáltica, promovendo a exposição das camadas inferiores do pavimento.

Este defeito poderá ser encontrado nas regiões de aceleração e de desaceleração, como: rampas acentuadas (aclives ou declives), curvas horizontais de raio pequeno, interseções e próximo a paradas de ônibus ou obstáculos (lombadas ou sonorizadores).

**Figura 15 - Ilustração do escorregamento**

- **Exsudação**

A exsudação é uma ocorrência ocasionada pela formação de uma película ou filme de material betuminoso 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, caracterizando um sério problema funcional.

A exsudação poderá ocorrer por duas razões:

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

Com a ação do tráfego e de altas temperaturas, o cimento asfáltico da mistura irá expandir preenchendo os vazios não preenchidos. Desta forma, ocorre a migração e concentração do ligante na superfície do revestimento. A passagem das cargas poderá causar um aumento da densificação da mistura nas trilhas de roda (redução do volume de vazios) e aumentar a exsudação.

A exsudação poderá se manifestar em qualquer região da superfície do pavimento, sendo mais severa nas trilhas de roda.

- **Desgaste**

Desgaste é a perda de agregados e/ou argamassa fina do revestimento asfáltico. Caracteriza-se pela aspereza superficial anormal, com perda do envolvimento betuminoso e arrancamento progressivo dos agregados.

O desgaste pode ser provocado pelos seguintes motivos:

- redução da ligação existente entre o agregado e o ligante devido à oxidação do ligante e pela ação combinada do tráfego e dos agentes intempéricos;
- perda de coesão entre agregado e ligante devido à presença de poeira ou sujeira no momento da construção;
- execução da obra em condições meteorológicas desfavoráveis;
- presença de água no interior do revestimento que originam sobrepressões hidrostáticas capazes de provocar o descolamento da película betuminosa;
- deficiência localizada de ligante asfáltico nos serviços por penetração decorrente de entupimento dos bicos ou má regulagem da barra espargidora.

Como resultado das causas prováveis acima enumeradas o ligante asfáltico fica impossibilitado de promover a retenção dos agregados que se soltam progressivamente sob a ação das cargas de tráfego.

Pode ocorrer em toda a área da superfície do pavimento.

- **Panelas (buracos)**

As panelas são cavidades formadas inicialmente no revestimento do pavimento e que possuem dimensões e profundidades variadas. O defeito é muito grave pois afeta estruturalmente o pavimento, permitindo o acesso das águas superficiais ao interior da estrutura. Também é grave do ponto de vista funcional, já que afeta a irregularidade longitudinal e, como consequência, a segurança do tráfego, e o custo do transporte.

As principais causas deste defeito podem estar relacionadas a:

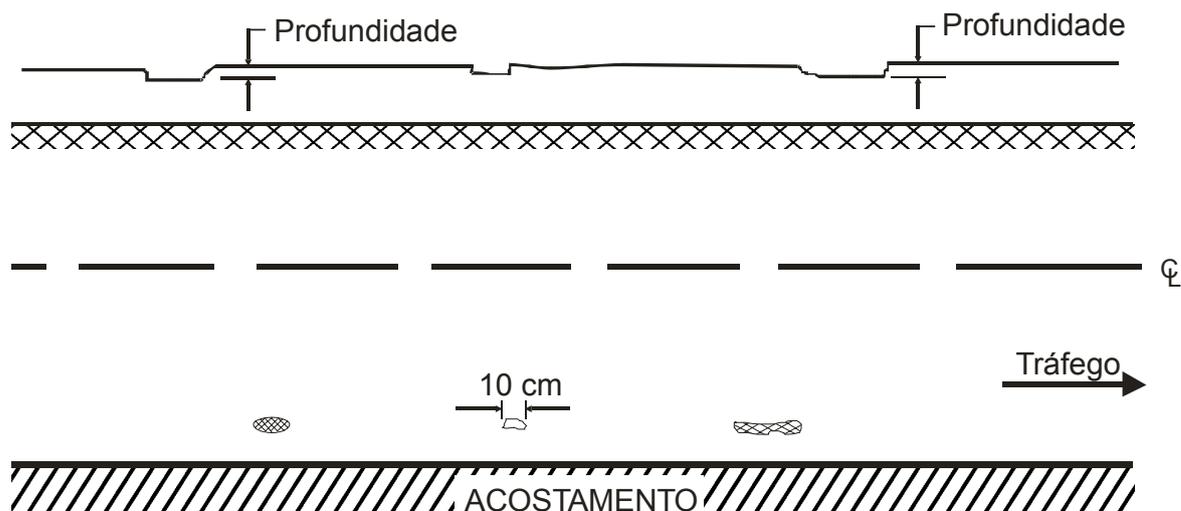
- trincamento por fadiga (estágio terminal);
- desintegração localizada na superfície do pavimento (desgastes de severidade alta).

Vale a pena lembrar que tanto o início desta falha quanto a sua evolução são aceleradas pela ação do tráfego e de fatores climáticos.

As trincas de fadiga na medida que evoluem sofrem um processo de interligação, formando pequenas placas sem vínculo e com bordas erodidas. Com a passagem das cargas de tráfego estas placas vão sendo arrancadas, formando buracos no revestimento, os quais podem evoluir ao ponto de atingir a base do pavimento. A água superficial, que já possuía acesso até a base através das trincas, terá ainda maior facilidade de alcançar essa camada. A água sob pressão irá carrear o material mais fino da base e agravar o problema. No caso de desintegração, o processo é semelhante.

Podem ocorrer em qualquer área do revestimento, principalmente nas trilhas de roda.

A Figura 16 ilustra de maneira esquemática a ocorrência de panelas (buracos).

**Figura 16 - Ilustração de painéis.**

- **Remendos**

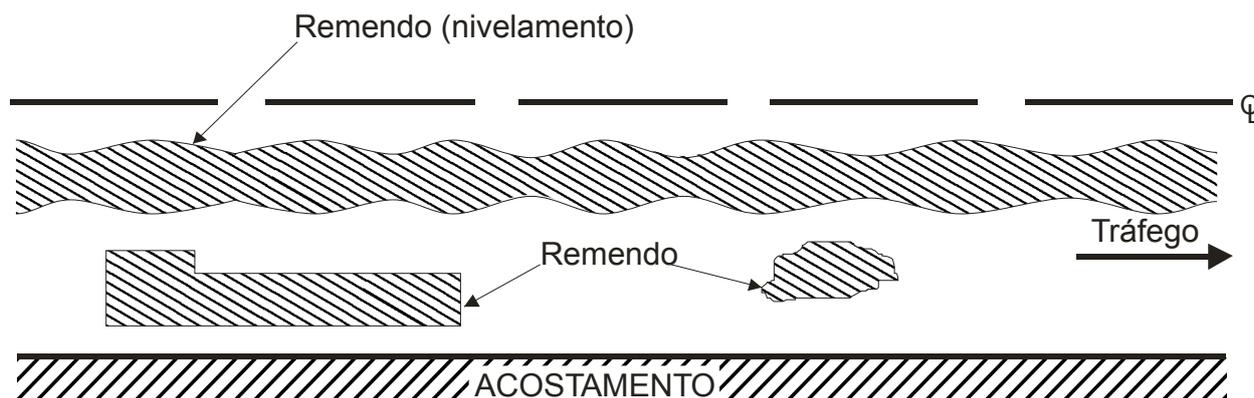
O remendo é uma porção do revestimento onde o material original foi removido e substituído por outro material (similar ou diferente). Remendos existentes são em geral consideradas falhas, já que refletem o mau comportamento da estrutura original, gerando normalmente incremento na irregularidade longitudinal. Deverá ser avaliada também a deterioração da área remendada (Figura 17).

Os remendos são considerados defeitos quando provocam desconforto devido às seguintes causas:

- solicitação intensa do tráfego;
- emprego de material de má qualidade;
- agressividade das condições ambientais; e
- problemas construtivos.

Os remendos, assim como os pavimentos, deterioram-se por diversos mecanismos, ou seja, a ação combinada do tráfego e das condições ambientais.

A deterioração dos remendos ocorrem obviamente nas áreas remendadas, que se localizam em regiões isoladas do pavimento.

**Figura 17 - Ilustração de remendos.**

#### 4.1.2 DNIT 006/2003–PRO - AVALIAÇÃO OBJETIVA DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS – PROCEDIMENTO

O objetivo básico da Norma DNIT 006/2003-PRO é o de apresentar a sistemática de cálculo de um índice combinado de falhas, o Índice de Gravidade Global (IGG), derivado do "Severity Index" utilizado no Canadá pelo "Saskatchewan Department of Highways and Transportation", e adaptado pelo Engenheiro Armando Martins Pereira, para as condições de pavimentos brasileiros.

O cálculo do IGG inclui também a medida das profundidades dos afundamentos nas trilhas de roda, avaliadas a partir das medidas das flechas com treliça de base igual a 1,20 m. Além de todas as ocorrências constantes da Tabela 4 Codificação e Classificação dos defeitos.

O efeito da irregularidade longitudinal, por sua vez, é avaliado de forma indireta pela dispersão das flechas medidas nas trilhas de roda, expressa através da variância determinada em uma análise estatística sobre os valores individuais obtidos em um determinado segmento.

O IGG permite classificar o estado geral de um determinado trecho homogêneo de pavimento, em função da incidência de defeitos de superfície. Ele é um indicador das condições do pavimento, muito útil para a tomada de decisões quanto às intervenções de Restauração necessárias, atribuindo-lhe conceitos variáveis segundo a Tabela 5, a seguir apresentada:

**Tabela 5 - Condição do pavimento em função do IGG.**

CONCEITO	LIMITES
Ótimo	$0 < \text{IGG} \leq 20$
Bom	$20 < \text{IGG} \leq 40$
Regular	$40 < \text{IGG} \leq 80$
Ruim	$80 < \text{IGG} \leq 160$
Péssimo	$\text{IGG} > 160$

A sistemática de cálculo do IGG é baseada na atribuição de pesos ou fatores de ponderação aplicáveis a cada evento mensurado (frequência relativa de estações com ocorrência de cada tipo de defeito e parâmetros ligados à análise estatística das flechas nas trilhas de roda), pesos esses que buscam caracterizar sua influência sobre a serventia do pavimento.

Nesse método, devem ser implantadas estações de ensaio afastadas de 20 m, alternando as faixas de tráfego direita e esquerda, para o caso de pista simples. Para o caso de pista dupla, as estações devem estar afastadas de 20 m, na mesma faixa de tráfego, que geralmente é a externa por ser a mais crítica.

A superfície de avaliação será delimitada por uma seção transversal situada 3 m à ré da estação, por outra situada 3 m avante, e pelo eixo da pista de rolamento, para pista simples, ou eixo de separação de faixa para pista dupla. Com isto, cada estação corresponde a uma área de 21 m<sup>2</sup> (6,0m x 3,5m). Portanto, é fácil depreender que o processo implica em analisar aproximadamente 15% da área total do pavimento analisado.

Em cada estação de ensaio, um técnico perfeitamente treinado para identificar os diferentes tipos de defeitos deverá anotar em uma ficha de campo a configuração de terraplenagem e a presença ou não de cada um dos tipos de falha. Observe-se que não será indicada a quantidade de cada tipo de defeito em cada estação, mas apenas será identificada a sua presença.

Adicionalmente, com a utilização de uma treliza de alumínio com base de 1,2 m, munida de uma régua graduada (a qual desloca-se verticalmente na sua região central), o técnico deverá medir a flecha nas trilhas de roda externa e interna, expressa em mm.

Os dados coletados no inventário serão processados em escritório, devendo-se inicialmente separar os segmentos com características homogêneas, como por exemplo aqueles que apresentam o mesmo tipo de constituição de estrutura (mesmo tipo de revestimento, base, sub-base e subleito), o mesmo tipo de materiais constituintes das camadas e espessuras, a mesma incidência de tráfego e a mesma situação climática. Em seguida, deve-se determinar a frequência absoluta e relativa das falhas anotadas, bem como a média aritmética e a variância (o quadrado do desvio padrão) das flechas nas trilhas de roda.

Para os eventos detectados (defeito ou parâmetro estatístico das flechas) deve-se atribuir um peso ou fator de ponderação, que exprima sua maior ou menor importância no que diz respeito à serventia. Por exemplo, as trincas de classe 1 possuem pequena influência na serventia, recebendo portanto um fator de ponderação menor (0,2), enquanto para painéis e corrugações, as quais exercem forte influência na serventia, atribui-se um fator de ponderação maior (1,0).

O produto da frequência relativa de cada defeito (e também da média e variância das flechas) pelo seu fator de ponderação resulta no Índice de Gravidade Individual (IGi) correspondente ao evento, ou seja: a fração do IGG afetado pelo evento. A somatória de

todos os valores de  $IG_i$  representa, finalmente, o valor do IGG a ser atribuído ao segmento homogêneo.

A sistemática do DNIT 006/2003-PRO permite não só uma análise das condições do pavimento à luz do IGG, como também uma interpretação detalhada do perfil de falhas ocorrentes em cada segmento homogêneo.

O boletim do Inventário do Estado de Suporte de Superfície do Pavimento e a planilha de Cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG) para cada segmento homogêneo escolhido estão apresentados nas páginas seguintes (Planilhas 1 e 2).



## Planilha 2 - Cálculo do IGG

RODOVIA:		PLANILHA DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE GLOBAL (IGG)						Data:		Folha:	
TRECHO:		REVESTIMENTO TIPO:						Estaca ou Quilômetro		Estaca ou Quilômetro	
SUB-TRECHO:		REVESTIMENTO TIPO:									
Item	Natureza do defeito	Frequência absoluta	Frequência absoluta considerada	Frequência relativa	Fator de ponderação	Índice de gravidade individual	Observações				
1	Trincas isoladas FI, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR				0,2						
2	(FC - 2) J, TB				0,5						
3	(FC - 3) JE, TBE				0,8						
4	ALP, ATP				0,9						
5	O e P				1,0						
6	EX				0,5						
7	D				0,3						
8	R				0,6						
9	Média aritmética dos valores médios das flechas medidas em mm nas TRI e TRE	TRE =	TRI =	F =	1 A ( ) 1 B ( )						
10	Média aritmética das variâncias das flechas medidas em ambas as trilhas	TREv =	TRIV =	FV =	2 A ( ) 2 B ( )						
Nº TOTAL DE ESTAÇÕES INVENTARIADAS		n =	Σ IND. GRAVID. IND. = IGG				Conceito				
1A) IGI = $\bar{F} \times 4/3$ quando $\bar{F} \leq 30$		2A) IGI = $\bar{FV}$ quando $\bar{FV} \leq 50$		Operator							
1B) IGI = 40 quando $\bar{F} > 30$		2B) IGI = 50 quando $\bar{FV} > 50$		Cálculo							
				Visto							

#### **4.1.3 DNIT 007/2003–PRO - LEVANTAMENTO PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE SUPERFÍCIE DE SUBTRECHO HOMOGÊNEO DE RODOVIAS DE PAVIMENTO FLEXÍVEL E SEMI-RÍGIDO PARA GERÊNCIA DE PAVIMENTOS E ESTUDOS E PROJETOS - PROCEDIMENTO**

A concepção original deste procedimento esteve voltada para fins de gerência de pavimentos, embora seu uso venha sendo estendido a projeto de reforços. Neste caso, as superfícies de avaliação são dispostas de forma análoga àquela empregada na Norma DNIT 006/2003-PRO.

As trincas longitudinais e transversais ocorrentes no âmbito de cada superfície de avaliação (estação de ensaio) são classificadas em função da sua abertura e medidas pela determinação de seu comprimento. Sua área é calculada arbitrando-se uma largura ou faixa de influência de 15 cm.

Todos os demais defeitos, como trincas interligadas tipo couro de crocodilo ou em bloco, trincas irregulares, panelas, remendos, exsudações, desgaste, afundamentos plásticos e corrugações, são medidos em cada estação pela área do retângulo que os circunscribe, demarcada a giz sobre a pista e desenhada em planilha de campo específica.

Com a Norma antiga DNER-ES 128/83, por meio de amostragem, é possível calcular para um certo segmento homogêneo, a percentagem de sua área afetada por cada tipo de defeito inventariado. Observamos que esta metodologia é diferente daquela adotada na norma DNER-PRO 08/94, em que as percentagens obtidas representam a freqüência de estações de ensaio que exibiram um determinado defeito.

#### **4.1.4 DNIT 008/2003 – PRO - LEVANTAMENTO VISUAL CONTÍNUO PARA AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS – PROCEDIMENTO**

Este procedimento de levantamento visual contínuo se constitui em um processo que é uma síntese dos outros procedimentos de avaliações objetivas e subjetivas da superfície dos pavimentos asfálticos isto é DNIT-007/2003-PRO e DNIT-009/2003-PRO.

Com efeito através desta Norma é possível a determinação dos seguintes parâmetros:

- a) ICPF – Índice da Condição do Pavimento Flexível
- b) IGGE – Índice de Gravidade Global Exedito
- c) Porcentagem de área com trincamento (área trincada)
- d) Nº de Panelas e Remendos
- e) Porcentagem de área com outros defeitos
- f) IES – Índice do Estado de Superfície do Pavimento

O processo de avaliação consiste no preenchimento do formulário mostrado na página seguinte realizado no mínimo por dois técnicos experientes além do motorista do veículo. A Rodovia é percorrida a uma velocidade de aproximadamente 40km/h no sentido crescente da quilometragem do PNV nas rodovias de pista com 2 faixas de tráfego. Nas rodovias

com pista dupla o sentido do à ser percorrido na pista esquerda é o contrário ao do sentido crescente Da quilometragem. Os dados do formulário são anotados geralmente para cada km de rodovia percorrida respeitando-se as divisões necessárias que caracterizam os seguimentos homogêneos como interseções, O.A.E., ortografia das regiões etc. o ICPF é calculado como a média das notas atribuídas mediante o seguinte critério mostrado na Tabela 6 de conceitos do ICPF.

**Tabela 6 - Conceitos do ICPF**

CONCEITO	DESCRIÇÃO	ICPF
Ótimo	NECESSITA APENAS DE CONSERVAÇÃO ROTINEIRA	5 - 4
Bom	APLICAÇÃO DE LAMA ASFÁLTICA - Desgaste superficial, trincas não muito severas em áreas não muito extensas	4 - 3
Regular	CORREÇÃO DE PONTOS LOCALIZADOS OU RECAPEAMENTO - pavimento trincado, com "panelas" e remendos pouco freqüentes e com irregularidade longitudinal ou transversal.	3 - 2
Ruim	RECAPEAMENTO COM CORREÇÕES PRÉVIAS - defeitos generalizados com correções prévias em áreas localizadas - remendos superficiais ou profundos.	2 - 1
Péssimo	RECONSTRUÇÃO - defeitos generalizados com correções prévias em toda a extensão. Restauração do revestimento e das demais camadas - infiltração de água e descompactação da base	1 - 0

O IGGE – Índice da Gravidade Global Expedita é calculado também por intermédio dos dados colhidos no formulário do campo e no formulário de cálculo mostrado.

O IES é avaliado pelo ICPF e IGGE para cada seguimento de acordo com a Tabela 7 a seguir:

**Tabela 7 - Avaliação da IES**

DESCRIÇÃO	IES	CÓDIGO	CONCEITO
$IGGE \leq 20$ e $ICPF > 3,5$	0	A	ÓTIMO
$IGGE \leq 20$ e $ICPF \leq 3,5$	1	B	BOM
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF > 3,5$	2		
$20 \leq IGGE \leq 40$ e $ICPF \leq 3,5$	3	C	REGULAR
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF > 2,5$	4		
$40 \leq IGGE \leq 60$ e $ICPF \leq 2,5$	5	D	RUIM
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF > 2,5$	7		RUIM
$60 \leq IGGE \leq 90$ e $ICPF \leq 2,5$	8	E	PÉSSIMO
$IGGE > 90$	10		

#### 4.1.5 DNIT 009/2003 – PRO – AVALIAÇÃO SUBJETIVA DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS - PROCEDIMENTO

Procedimento para a avaliação subjetiva de pavimentos asfálticos foi calculado na metodologia desenvolvida na experiência da AASHTO para da determinação do V.S.A. –

Valor da Serventia Atual que afere subjetivamente as qualidades de suavidade e conforto d rolamento proporcionado pelo pavimento existente.

Esta avaliação é calculada pela média de notas atribuídas por uma equipe de número mínimo 5 avaliadores que percorrem o segmento rodoviária em exame à uma velocidade próxima e abaixo da velocidade máxima permitida. O comprimento máximo dos segmentos homogêneos percorridos e avaliados em uma única direção é de 2km.

O valor do V.S.A. é calculado para cada trecho de acordo com a média das notas de todos os avaliadores pela seguinte fórmula

$$V.S.A. = \frac{\sum x}{n}$$

onde :

V.S.A. – valor da Serventia Atual

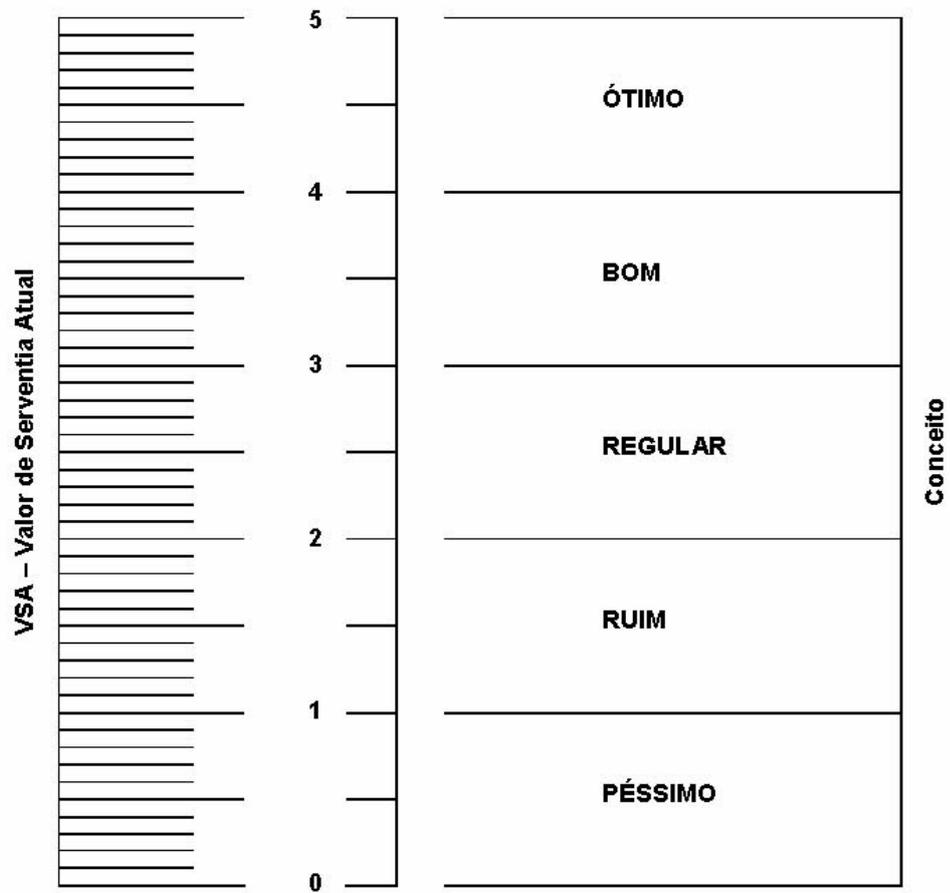
$x$  - valores da Serventia Atual individuais atribuídos por cada membro de grupo

$n$  - número de membros do grupo de avaliação

Na página seguinte está mostrado o modelo (Planilha 3) da ficha de avaliação subjetiva deste procedimento.

Note-se que a nota deve ser assinalada sem a preocupação de se assinalar um número exato.

**Planilha 3 - Ficha de Avaliação de Serventia**



Rodovia: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Observações: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Nº do Avaliador: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

## 4.2 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES ESTRUTURAIS

O levantamento da condição estrutural do pavimento fornece informações valiosas ao projetista quanto a sua adequação estrutural, o grau de restauração e permite a seleção e dimensionamento da mais adequada alternativa de Restauração.

Nesta seção serão introduzidos os conceitos e procedimentos utilizados para a condução dos levantamentos e a avaliação da condição estrutural do pavimento. São apresentadas noções básicas sobre deformabilidade de pavimentos, conceituando deformações permanentes e recuperáveis e comentando-se sobre os parâmetros defletométricos de interesse.

Quanto à aplicação dos parâmetros defletométricos à avaliação estrutural, analisa-se o emprego da deflexão máxima, do raio de curvatura e da avaliação de módulos por retroanálise. Ênfase especial é dirigida aos equipamentos utilizados nos ensaios não-destrutivos e suas características operacionais.

Ao final desta seção são abordados dois parâmetros de resistência importantes para caracterizar a capacidade estrutural do pavimento e suas respectivas camadas, que são: módulo resiliente e número estrutural modificado.

### 4.2.1 PREÂMBULO

A avaliação estrutural do pavimento pode ser efetuada por meio dos elementos obtidos nos levantamentos dos defeitos de superfície, nos ensaios destrutivos e ensaios não-destrutivos.

Os defeitos existentes no pavimento causados principalmente pelas cargas de tráfego, fornecem informações importantes sobre o efeito do tráfego na estrutura do pavimento. Os indicativos de comprometimento estrutural podem ser valores como:

- a) trincamento por fadiga > 20% da área; ou
- b) afundamento nas trilhas de roda > 1,2 cm

A execução do reforço deve ter lugar quando os níveis de defeitos excederem os limites exemplificados anteriormente.

Os tipos e a intensidade de defeitos podem ser melhor visualizados em um mapa ou planilha que identifique os defeitos estruturais ao longo da rodovia. A ocorrência de locais com quantidade significativa de defeitos estruturais indica a existência de deficiências estruturais. Assim sendo, nesses locais é desejável a realização de ensaios não-destrutivos e/ou destrutivos para melhor conhecimento da condição estrutural.

Os ensaios destrutivos (coleta de amostras deformadas ou indeformadas para ensaios de laboratório) podem ser realizados para obtenção das seguintes informações de cada camada da estrutura do pavimento:

- a) limites de Atterberg - índice (LL, LP, LC);
- b) teor de umidade;
- c) espessuras;
- d) uniformidade do material na camada;
- e) tipo de material;
- f) intrusão do material de subleito nas camadas de sub-base ou base;
- g) permeabilidade;
- h) capacidade de suporte (CBR);
- i) módulo resiliente;
- j) características tensão-deformação (resistência à tração ou compressão, comportamento à fadiga, deformações permanentes sob cargas repetidas);
- k) teor de asfalto;
- l) granulometria.

Algumas informações podem ser utilizadas para determinar o coeficiente estrutural de cada camada como descrito no Método da AASHTO. Os coeficientes estruturais podem ser utilizados para determinar a vida remanescente do pavimento, em termos de número de solicitações de carga padronizada por eixo.

A realização de ensaios de laboratório em amostras indeformadas além dos inconvenientes da retirada de amostras de pavimentos em serviço, é trabalhosa e não se consegue no laboratório simular exatamente os estados de tensões existentes no campo. As propriedades medidas no laboratório, portanto, não refletem o desempenho do material no campo. O nível de compactação e o índice de vazios das amostras de laboratório são geralmente diferentes daqueles no campo.

Por serem bastante difundidos e fornecerem dados históricos de inventário das rodovias, os ensaios de laboratório nos moldes atuais ainda manterão larga aplicabilidade nos estudos de caracterização e classificação dos materiais constituintes das camadas dos pavimentos.

Se os materiais do pavimento não estiverem demasiadamente deteriorados, os resultados desses ensaios em conjunto com o inventário dos defeitos de superfície

podem ser utilizados para avaliar a adequação estrutural do pavimento.

As principais desvantagens dos ensaios destrutivos podem ser assim descritas:

- a) necessidade de interromper o tráfego da rodovia por um período de tempo significativo;
- b) natureza destrutiva dos ensaios e a introdução de defeito nas seções do pavimento;

- c) ensaios são caros, consomem muito tempo e requerem muita mão-de-obra. Assim sendo, não podem ser realizados extensivamente;
- d) resultados dos ensaios são representativos das condições do material em um ponto específico.

Os ensaios não-destrutivos, utilizados em conjunto com o inventário de defeitos, constituem-se na maneira mais apropriada para determinar a adequação estrutural do pavimento. Eles serão melhor abordados na continuidade deste capítulo em uma seção específica.

Os ensaios não-destrutivos podem ser utilizados 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.

#### **4.2.2 NOÇÕES DE DEFORMABILIDADE DE PAVIMENTOS**

A ação das cargas de tráfego sobre os pavimentos asfálticos provoca deformações de dois tipos: permanentes e recuperáveis. As deformações permanentes são aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação da carga, ou seja, têm caráter residual. São exemplos de deformações permanentes aquelas geradas nas trilhas de roda pela consolidação adicional pelo tráfego, bem como as rupturas de natureza plástica.

Já as deformações ou deflexões recuperáveis representam um indicativo de comportamento elástico da estrutura, deixando de existir alguns momentos após a retirada da carga. As deflexões recuperáveis provocam o arqueamento das camadas do pavimento, e a sua repetição é a responsável pelo fenômeno de fadiga das camadas betuminosas e cimentadas.

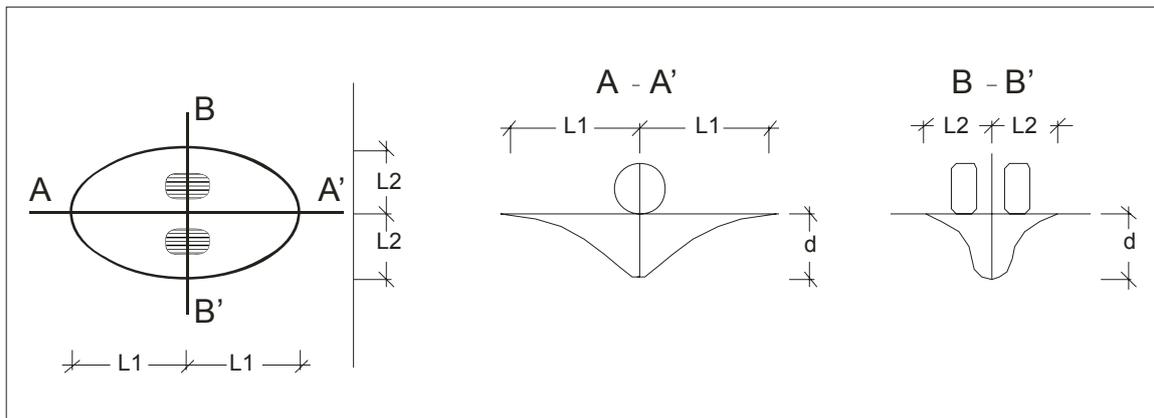
O estudo das deflexões ou das condições de deformabilidade dos pavimentos asfálticos é fundamental à compreensão de seu comportamento, já que estas refletem, em última análise, as condições estruturais das diversas camadas e do próprio subleito.

A atuação de uma carga de tráfego produz em um pavimento, como foi comentado anteriormente, deformações de caráter transitório. A magnitude destas deformações é variável e dependente não só da geometria do carregamento, do valor da carga e da

pressão de inflação do pneu, como também da posição do ponto de medida em relação à posição da carga.

Considerando-se a aplicação de uma carga de roda dupla estática, a área anexa à carga que sofrerá deformação recuperável assume a forma aproximada de uma elipse, cujo eixo maior coincide com a direção de deslocamento do tráfego. À superfície assim formada dá-se o nome de bacia de deformação. (Figura 18).

**Figura 18 - Esquema da bacia de deformação e da deformada**



Uma seção longitudinal da bacia de deformação mostra que a máxima deflexão ocorre sobre o centro de carga, e que seus raios horizontais são iguais. À linha correspondente a esta seção longitudinal dá-se o nome de deformada.

Já uma seção transversal à bacia de deformação permite verificar que seus raios horizontais são também simétricos, porém de valor inferior ao dos raios horizontais verificados na seção longitudinal. Observa-se ainda que a severidade do arqueamento transversal é maior, o que explica o fato de que as trincas de fadiga têm inicialmente sentido longitudinal.

No caso de uma carga transiente, a bacia de deformação é assimétrica, com o menor raio horizontal longitudinal posicionado à frente da carga.

A prática rodoviária e os equipamentos de medição desenvolvidos subentendem a determinação da deformada segundo o sentido longitudinal, ou seja, no sentido de atuação do tráfego.

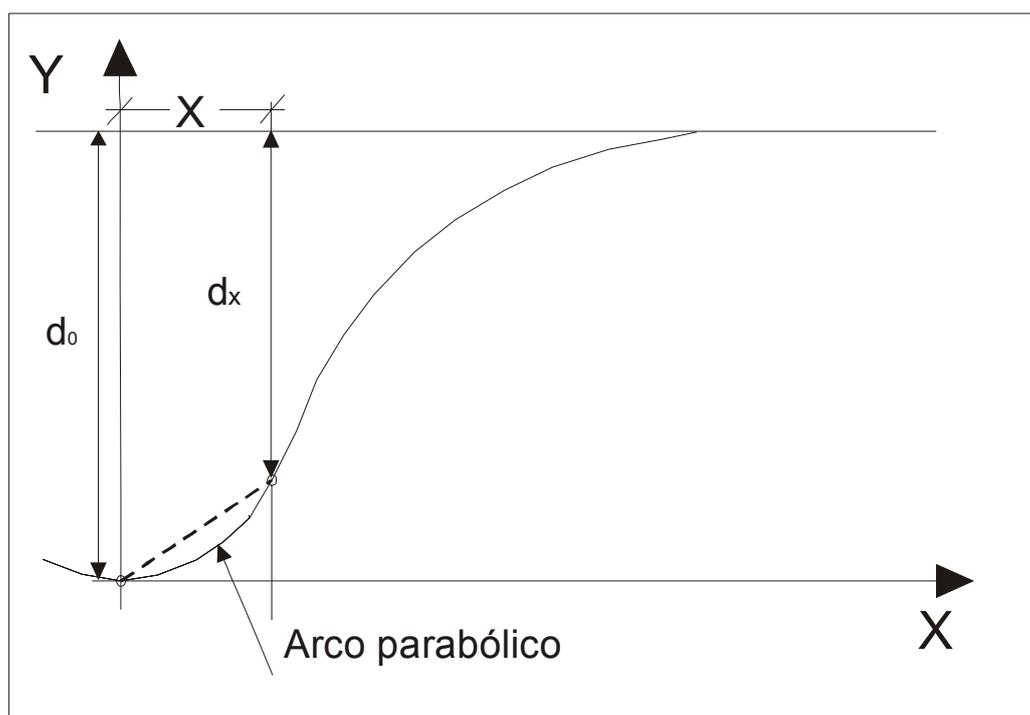
A deflexão recuperável máxima ( $d$ ) é um parâmetro importante para a compreensão do comportamento da estrutura. Quanto maior o seu valor, mais elástica ou resiliente é a estrutura, e maior o seu comprometimento estrutural.

No entanto, a análise isolada de seu valor pode não esclarecer completamente a questão, já que estruturas de pavimentos distintas podem apresentar a mesma deflexão máxima,

porém com arqueamentos diferenciados na deformada. Conclui-se que a forma da deformada é um fator a ser levado em consideração na avaliação estrutural.

Diversas tentativas foram efetuadas no sentido de identificar parâmetros ligados à forma das deformadas que auxiliassem na avaliação estrutural. Entre eles talvez o mais difundido seja o chamado raio de curvatura (R), parâmetro indicativo do arqueamento da deformada na sua porção mais crítica, em geral considerada a 25 cm do centro da carga (Figura 19).

**Figura 19 - Deformada e raio de curvatura**



Uma das expressões de cálculo mais utilizadas é a que corresponde ao ajuste de um arco parabólico que passa pelo ponto considerado, afastado genericamente do centro da carga de um valor  $x$ , e que depende da deflexão máxima e da deflexão no ponto considerado ( $d_x$ ):

$$R = \frac{10 \times x^2}{2(d_0 - d_x)}$$

Sendo R em m;  $d_0$  e  $d_x$  em 0,01mm

No caso de se considerar o raio de curvatura a 25 cm, a expressão passa a ter a seguinte forma:

$$R = \frac{6250}{2(d_0 - d_{25})}$$

Um raio de curvatura baixo é indicativo de um severo arqueamento da deformada, denotando uma condição estrutural crítica.

A análise conjunta de deflexão máxima e raio de curvatura já permite uma melhor compreensão do complexo comportamento das estruturas de pavimentos. É possível tentar uma associação entre os referidos parâmetros, o que pode ser feito pelo chamado produto  $R \times d$ .

### 4.2.3 MEDIÇÃO DE DEFLEXÕES

A deflexão de um pavimento representa a resposta das camadas estruturais e do subleito à aplicação do carregamento. Quando uma carga é aplicada em um ponto (ou uma área) da superfície do pavimento, todas as camadas fletem devido às tensões e às deformações geradas pelo carregamento. Como mostrado na Figura 20, o valor da deflexão em cada camada geralmente diminui com a profundidade e com o distanciamento do ponto de aplicação da carga e depende ainda do módulo de elasticidade das camadas. A partir de certas distâncias e profundidades as deflexões tornam-se negligenciáveis.

Os pavimentos mais sadios estruturalmente fletem menos do que outros pavimentos mais debilitados. A significativa diferença na “resposta” entre os pavimentos sadios e debilitados indica os efeitos no desempenho estrutural. Assim sendo, pavimentos com deflexões mais baixas suportam maior número de solicitações de tráfego.

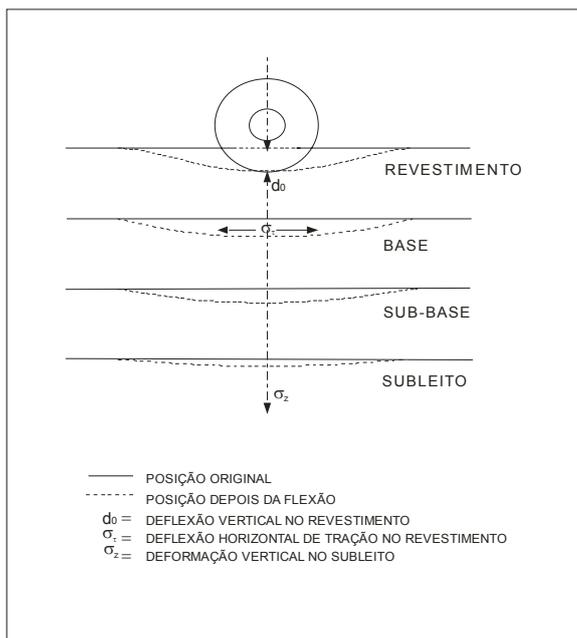
Os ensaios não destrutivos avaliam a deflexão recuperável máxima na superfície do revestimento ( $d_0$ ) e são bastante apropriados para avaliação da capacidade estrutural. Os equipamentos mais utilizados podem ser divididos em:

- a) vigas de deflexão;
- b) equipamentos dinâmicos de vibração;
- c) equipamentos dinâmicos de impacto.

#### 4.2.3.1 VIGAS DE MEDIÇÃO DE DEFLEXÃO

As vigas de deflexão medem a resposta do pavimento submetido a um carregamento estático ou a aplicação de uma carga em movimento vagaroso. Os equipamentos mais utilizados são a viga Benkelman e as vigas de deflexão automatizadas.

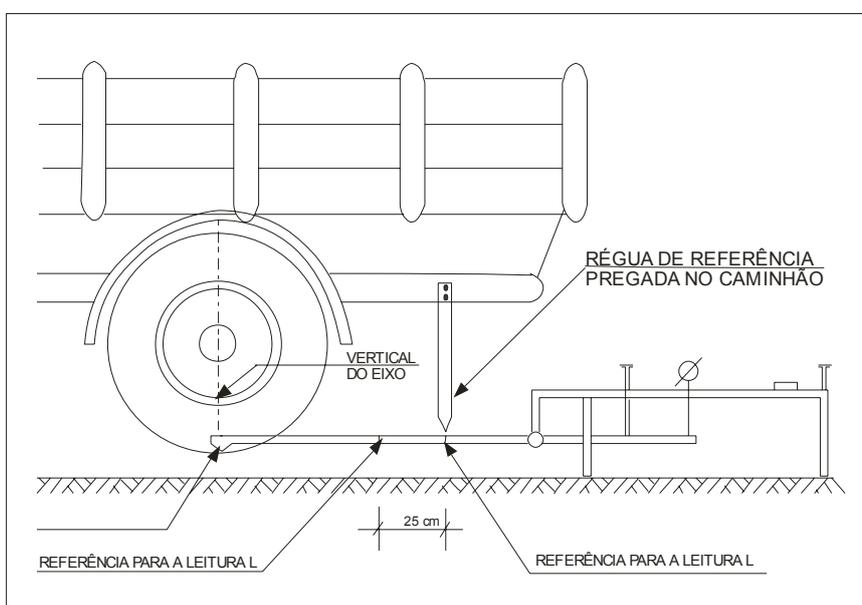
Figura 20 - Deformações no pavimento



Idealizada por Benkelman, por ocasião dos estudos levados a efeito na pista experimental da WASHO, a chamada viga Benkelman é o dispositivo mais simples e difundido para o levantamento de deflexões em pavimentos.

Sua constituição básica compreende uma viga horizontal apoiada sobre três pés, sendo um traseiro e dois dianteiros. Um braço de prova é rotulado na parte frontal da viga de referência, tendo a sua porção maior posicionada adiante da viga, e a menor sob ela. A ponta do braço de prova deve tocar o pavimento no ponto a ser ensaiado, enquanto na outra extremidade aciona um extensômetro, solidário à viga, sensível a 0,01mm (Figura 21).

Figura 21 - Posicionamento da viga Benkelman e da prova de carga



A carga de prova utilizada é a roda dupla traseira direita de um caminhão basculante. No Brasil, as deflexões Benkelman são tomadas sob carga de eixo de 8,2 tf, ou carga de roda de 4,1 tf.

Instalada a ponta de prova no centro de carga da roda dupla, faz-se uma leitura inicial  $L_0$  no extensômetro. Quando o caminhão se afasta a mais de 5 m do ponto de ensaio e é decorrido espaço de tempo suficiente para o pavimento recuperar a sua condição original, faz-se a segunda leitura  $L_f$ .

A deflexão máxima  $d$  é obtida pela expressão:

$$d = (L_i - L_f) \times F$$

sendo  $F$  a constante da viga, definida como a relação entre a parte maior e a menor do braço de prova.

Para determinar uma deformada completa, há necessidade de afastar o caminhão de prova a pequenos intervalos, fazendo uma série de leituras intermediárias a cada parada do veículo, até o limite de 3 m. Cada deflexão intermediária será calculada à semelhança da deflexão máxima, em função da leitura no ponto considerado ( $L_i$ ), da leitura final ( $L_f$ ) e da constante da viga:

$$d_i = (L_i - L_f) \times F$$

Calculadas todas as deflexões é possível proceder ao traçado e à análise das deformadas levantadas.

Os procedimentos aqui mencionados resumidamente para utilização da viga Benkelman são descritos nas seguintes normas do DNER:

- a) DNER-ME 24/94 - Pavimento - Determinação das deflexões no pela viga Benkelman;
- b) DNER-PRO 175/94 - Aferição de viga Benkelman;
- c) DNER-ME 061/94 - Pavimento - Delineamento da linha de influência longitudinal da bacia de deformação por intermédio da viga Benkelman.

As vigas de deflexão automatizadas, que operaram nos mesmos princípios da viga Benkelman, foram criadas para aumentar a velocidade das medidas de deflexão. As vigas de deflexão são montadas sob o veículo de teste e uma vez posicionadas são medidas as deflexões e gravadas automaticamente em cada ponto de teste, enquanto o caminhão está em movimento.

O Defletógrafo La Croix é um dispositivo largamente utilizado na Europa e consiste em um veículo de teste carregado (5.442 kg a 11.791 kg), que se move a uma velocidade constante de 3 km/h, quando as deflexões são medidas por vigas móveis. A operação é totalmente automática e as medidas de deflexão são gravadas numa fita magnética para posterior análise.

#### 4.2.3.2 EQUIPAMENTOS DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO

Os equipamentos dinâmicos de vibração medem a resposta do pavimento quando submetido a uma carga vibratória ou cíclica.

O Dynaflect é um equipamento de uso muito difundido nos Estados Unidos. Consiste basicamente de um gerador de cargas cíclicas montado em um trailer de duas rodas, uma unidade de controle, um sensor e uma unidade de calibração do sensor (geofone). O sistema proporciona medições rápidas e precisas das deflexões nas faixas de rolamento em cinco pontos da superfície do pavimento, utilizando uma força cíclica de magnitude e frequência conhecidas que é aplicada no pavimento por duas rodas de aço.

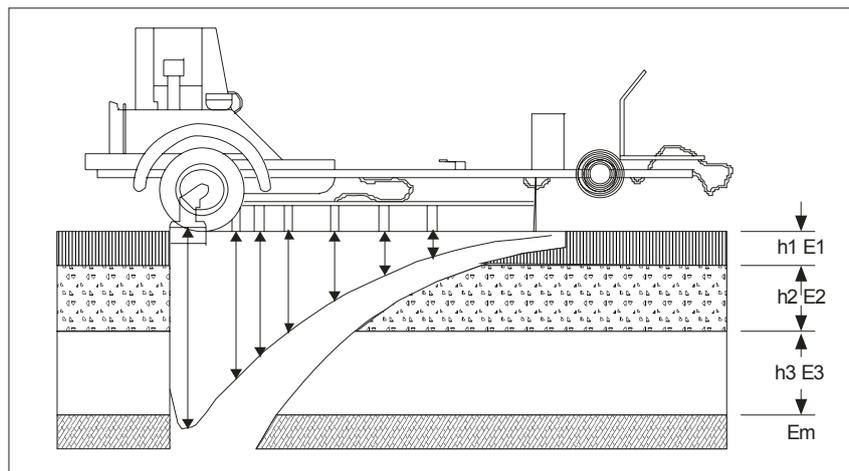
#### 4.2.3.3 EQUIPAMENTOS DINÂMICOS DE IMPACTO

Todos os equipamentos que transferem ao pavimento uma carga dinâmica de impacto estão incluídos nesta classificação e são chamados de FWD - "Falling Weight Deflectometer" ou defletômetros de impacto. Os equipamentos mais conhecidos no Brasil são o Dynatest FWD e o KUAB FWD.

Estes equipamentos 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 de queda (Figura 22).

A resposta do pavimento ao impacto é registrada por um conjunto de sensores posicionado longitudinalmente a partir do centro da placa. O equipamento é montado em um reboque e comandado automaticamente por meio de um microcomputador instalado em um veículo de apoio.

A maior vantagem dos equipamentos de impacto é a sua capacidade de simular, aproximadamente, as características de uma carga de tráfego transiente em termos de magnitude e frequência, o que não ocorre no ensaio estático com viga Benkelman. As deflexões resultantes se aproximam, portanto, daquelas que seriam causadas por uma carga real dinâmica. Além disso o equipamento permite a determinação precisa e rápida de deformadas completas, com aquisição automática de dados.

**Figura 22 - Representação dos defletômetros de impacto**

Embora já se tenha equipamentos do tipo FWD operando no Brasil há alguns anos, o seu alto custo de aquisição/utilização não permitiu que levantamentos defletométricos com eles tenham se tornado generalizados.

Assim é que a viga Benkelman, que pode ser facilmente calibrada e é fabricada atualmente em uma versão automática e eletrônica que melhorou suas condições técnicas e operacionais, continua a ser o equipamento ao qual a maior parte dos órgãos rodoviários e projetistas têm acesso. Para o futuro a tendência de maior uso dos FWD é no entanto, inevitável. Neste sentido, o DNER normalizou o levantamento das deflexões pelo FWD com o DNER PRO 273/96, faltando no entanto “normalizar a calibragem destes equipamentos em instalações especiais como as existentes nos E.U.A. (Report SHRP-P – 661 – Manual for FWD Testing in the Long-Term Pavement Performance Study. ASTM 4695-96 – Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements e ASTM – 0 – 4694 – 96 – Standard Test Method for Deflexion With Falling Weight Type Impulse Load Device)”.

Um trabalho efetuado por FABRÍCIO et al (30º RAPv) estabelece algumas correlações entre as deflexões características medidas com a Viga Benkelman e com o FWD - “Falling Weight Deflectometer”.

O objetivo de tais correlações, é de propiciar o emprego das deflexões obtidas com o FWD nos métodos atuais do DNER (de projeto de reforço de pavimento flexíveis e Sistema de Gerência de Pavimento) e no Modelo HDM adotado pelo Banco Mundial.

Os dados utilizados nos estudos foram aqueles provenientes das seguintes fontes:

- a) projetos em desenvolvimento na DEP-DNER;
- b) determinações do Sistema de Gerência do Pavimento do IPR-DNER;
- c) determinações obtidas na BR-101/RS, trecho Torres - Osório, executadas pela Dynatest e pela ECL para o DNER;
- d) tese de Doutorado do Eng.º Salomão Pinto - UFRJ.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

a) para deflexões características  $D_{FWD} < 85 \times 10^{-2}$  mm -

$$D_B = 20,645(D_{FWD} - 19)^{0,351} \quad \text{Coef. de determinação } R^2 = 0,952$$

b) para deflexões características  $D_{FWD} > 85 \times 10^{-2}$  mm -

$$D_B = 8,964(D_{FWD} - 60)^{0,715} \quad \text{Coef. de determinação } R^2 = 0,933$$

em que:

-  $D_B$  = deflexão característica obtida por viga Benkelman

-  $D_{FWD}$  = deflexão característica obtida por viga FWD

As correlações entre deflexões características obtidas por viga Benkelman e FWD são dependentes de diversos fatores e, principalmente, da resposta elástica da estrutura de pavimento que está sendo avaliada. Portanto, não existem correlações de aplicação generalizada, porém, constata-se que geralmente as deflexões características Benkelman e os respectivos desvios padrões possuem valores superiores aos obtidos pelo FWD.

Os projetistas que utilizarem o FWD devem estabelecer suas próprias correlações com base em pesquisas locais.

Neste sentido a Tese de Doutorado do Eng<sup>o</sup> Salomão Pinto (COPPE / UFRJ – 1991) intitulada “Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural do Pavimento”, apresentou a seguinte correlação entre as medidas de deflexão obtidas com a Viga Benkelman, de acordo com a metodologia do DNIT, e o FWD, aplicando uma carga equivalente ao do método DNER – ME 024 / 94:

$$D_{VB} = -5,73 + 1,396 D_{FWD}, \text{ onde}$$

$D_{VB}$  = Deflexão Benkelman

$D_{FWD}$  = Deflexão FWD

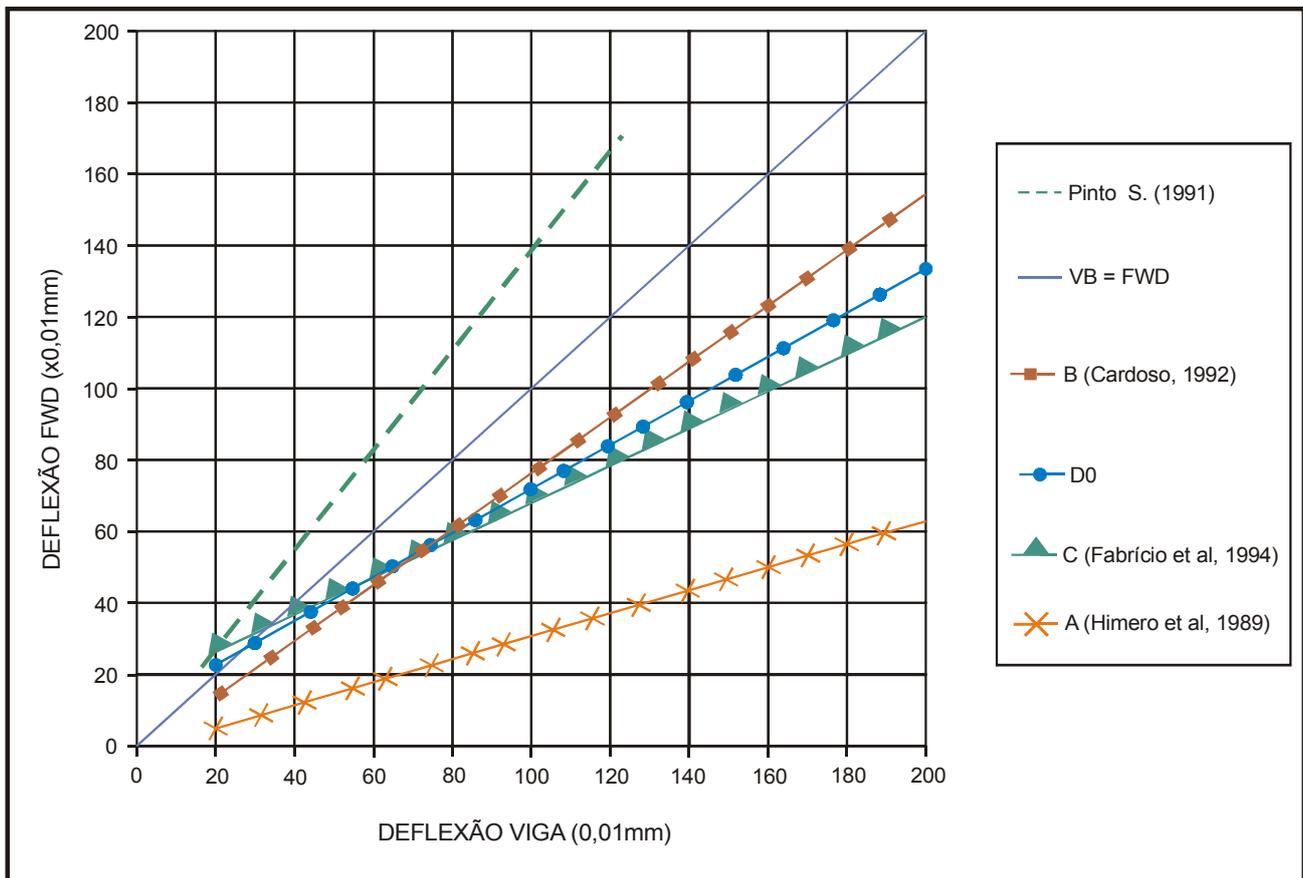
Neste sentido a Dissertação de Mestrado apresentada em dezembro de 2001 pela Eng<sup>a</sup> Clarisa Beatriz Sandoval Borges, na Universidade Federal de Santa Catarina, intitulada “Estudo Comparativo entre Medidas de Deflexão com a Viga Benkelman e FWD em Pavimentos da Malha Rodoviária Estadual de Santa Catarina”, estudou vários modelos de correlação que são apresentados a seguir (Tabela 8 e Figura 23).

**Tabela 8 - Correlações entre FWD e Viga Benkelman**

CORRELAÇÕES OBTIDAS POR MEIO DOS VALORES DE:	MODELOS DE CORRELAÇÃO	
	$Y = aX + b$	$Y = \alpha X$
Deflexões características de cada segmento	$D_{VB} = 1,343 D_{FWD} - 5,814$ $R^2 = 0,84$	$D_{VB} = 1,248 D_{FWD}$ $R^2 = 0,83$

CORRELAÇÕES OBTIDAS POR MEIO DOS VALORES DE:	MODELOS DE CORRELAÇÃO	
	$Y = aX + b$	$Y = \alpha X$
Deflexões de todos os segmentos	$D_{VB} = 1,251 D_{FWD} - 2,412$ $R^2 = 0,75$	$D_{VB} = 1,205 D_{FWD}$ $R^2 = 0,74$
Deflexões médias de cada segmento	$D_{VB} = 1,339 D_{FWD} - 6,243$ $R^2 = 0,80$	$D_{VB} = 1,210 D_{FWD}$ $R^2 = 0,79$
Deflexões – espessura de 5,0cm de revestimento	$D_{VB} = 1,180 D_{FWD} - 0,710$ $R^2 = 0,73$	$D_{VB} = 1,193 D_{FWD}$ $R^2 = 0,73$
Deflexões – espessura de 10,0cm de revestimento	$D_{VB} = 1,486 D_{FWD} - 11,144$ $R^2 = 0,77$	$D_{VB} = 1,237 D_{FWD}$ $R^2 = 0,74$

**Figura 23 - Correlações obtidas por vários pesquisadores (tipo  $D_{FWD} = aD_{VB} + b$ )**



#### 4.2.4 APLICAÇÕES DE PARÂMETROS DEFLETOMÉTRICOS

Para a compreensão adequada da condição estrutural do pavimento podem ser considerados vários parâmetros defletométricos. Nesta seção serão comentadas as aplicações destes parâmetros nos métodos de dimensionamento empíricos e mecanísticos.

#### **4.2.4.1 DEFLEXÃO RECUPERÁVEL MÁXIMA**

A deflexão recuperável máxima é um indicativo do comportamento global da estrutura, sendo afetada pelo subleito e pelas camadas constituintes do pavimento.

A representação gráfica das deflexões tomadas de uma determinada extensão permite uma visualização geral do desempenho da estrutura, com a conseqüente definição de segmentos de comportamento homogêneo. Locais criticamente comprometidos poderão ser identificados com facilidade, a partir da análise do perfil defletométrico.

A questão da definição da "deflexão admissível", para um determinado pavimento está intimamente ligada à sua concepção estrutural e às características elásticas de suas diversas camadas. Pode-se dizer que a deflexão admissível de um pavimento semi-rígido é sem dúvida menor do que aquela de uma estrutura flexível.

Um pavimento com revestimento em tratamento superficial pode, por outro lado, suportar maiores deflexões do que um outro que tenha revestimento em concreto asfáltico, o que se justifica pela maior flexibilidade dos tratamentos superficiais.

Diversos métodos de projeto de reforços buscam estabelecer formas para a definição racional da deflexão admissível. O "Asphalt Institute", por exemplo, estabelece uma correlação direta entre o número de aplicações do eixo padrão de 8,2 tf previsto (baseado em fatores de equivalência AASHTO) e a deflexão admissível. Já a CALTRANS (antiga CDH), definiu a vinculação entre deflexão admissível e dois parâmetros: o índice de Tráfego (IT) e a espessura da camada crítica, representada normalmente pelo revestimento em concreto asfáltico.

A deflexão representativa de um determinado segmento homogêneo é considerada em diversos métodos de dimensionamento de reforços como o principal fator a afetar o cálculo da espessura do reforço necessário. Isto ocorre nos métodos PRO 10/79, PRO 11/79, PRO 159/85 e PRO 269/94, normalizados pelo DNER.

#### **4.2.4.2 RAIOS DE CURVATURA**

O raio de curvatura é um parâmetro afetado essencialmente pelas características elásticas dos componentes da porção superior da estrutura, ou seja, o próprio revestimento e a base. Assim, um baixo raio de curvatura é normalmente um indicativo de que os módulos elásticos das camadas superiores do pavimento apresentam valores aquém dos desejáveis.

Definir um valor crítico para o raio de curvatura é uma tarefa difícil, de vez que cada estrutura apresenta características particulares. No entanto, parece importante uma análise mais aprofundada de estruturas flexíveis com revestimento em concreto asfáltico que exibem raios de curvatura inferiores a 100 m, considerados críticos.

O procedimento PRO 11/79 do DNER leva em conta em seus critérios para avaliação estrutural, entre outros parâmetros, o raio de curvatura.

#### 4.2.4.3 AVALIAÇÃO DE MÓDULOS POR RETROANÁLISE

Talvez a mais importante utilização de parâmetros defletométricos na atualidade seja a avaliação dos valores modulares das camadas dos pavimentos, para as suas condições "in situ", mediante técnicas de retroanálise.

O procedimento consiste inicialmente em se levantar deformadas (bacias de deformação) representativas de um certo segmento homogêneo, com o uso da Viga Benkelman ou do FWD, devidamente aferidas e calibradas. Buscam-se adicionalmente informações a respeito das espessuras das camadas integrantes da estrutura, por meio de pesquisa histórico-cadastral ou, preferencialmente, sondagens diretas.

A seguir busca-se determinar por tentativas sucessivas, com o auxílio de um programa computacional que permita o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos em pavimentos, o conjunto de valores de módulos das camadas do pavimento que reproduza a deformada levantada em campo. Os valores encontrados são assumidos como os módulos para as condições de campo de cada camada, podendo ser utilizados em análises mecanísticas da estrutura existente.

É possível resolver o problema de retroanálise usando-se um programa como o ELSYM5 ou FEPAVE, trabalhando por tentativas, porém o processo é extremamente laborioso. A melhor solução é o emprego de programas específicos, alguns dos quais são derivados do próprio ELSYM5, que executam as tarefas iterativas por meio de rotinas apropriadas.

Um destes programas é o que está contido no trabalho apresentado na "34ª RAP<sub>v</sub> /ABP<sub>v</sub>, 2003 – Utilização do Produto  $R_d$  na Retroanálise Simplificada das Medidas de Deflexão em Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos, de autoria dos Eng<sup>os</sup> J.M. Fabrício e J.V. Falabella Fabrício, ambos da ECL".

O trabalho utiliza um Modelo Elástico de 2 Camadas (Modelo de Hogg) para resolução de problemas de retroanálise de Bacias de Deflexão, desenvolvendo uma metodologia simplificada que apresenta a vantagem de exigir apenas duas medidas de deflexão no campo realizadas de acordo com o método DNER-ME-024/94, quais sejam:

$d_0$  - deflexão medida entre as rodas duplas do caminhão de prova na vertical do eixo traseiro.

$d_{25}$  - deflexão medida a 25cm de " $d_0$ " no sentido do deslocamento do caminhão de prova,

ao invés da determinação da Bacia de Deformação completa, para a obtenção dos seguintes elementos de um sistema de duas camadas de um pavimento equivalente ao pavimento real em cada estação de medida, conforme a Hipótese II da Figura 22 apresentada adiante.

São considerados:

a)  $H_{EQ}$  = Espessura do pavimento equivalente em, cm;

- b)  $E_{EQ}$  = Módulo de deformação do pavimento equivalente, em  $Kgf/cm^2$ ;
- c)  $E_{SL}$  - Módulo de deformação do subleito, em  $Kgf/cm^2$ ;
- d)  $\mu = 0,4$ , Coeficiente de Poisson igual para as duas camadas;
- e)  $H_{EQ} \times 10$  = Espessura do Subleito acima da camada rígida.

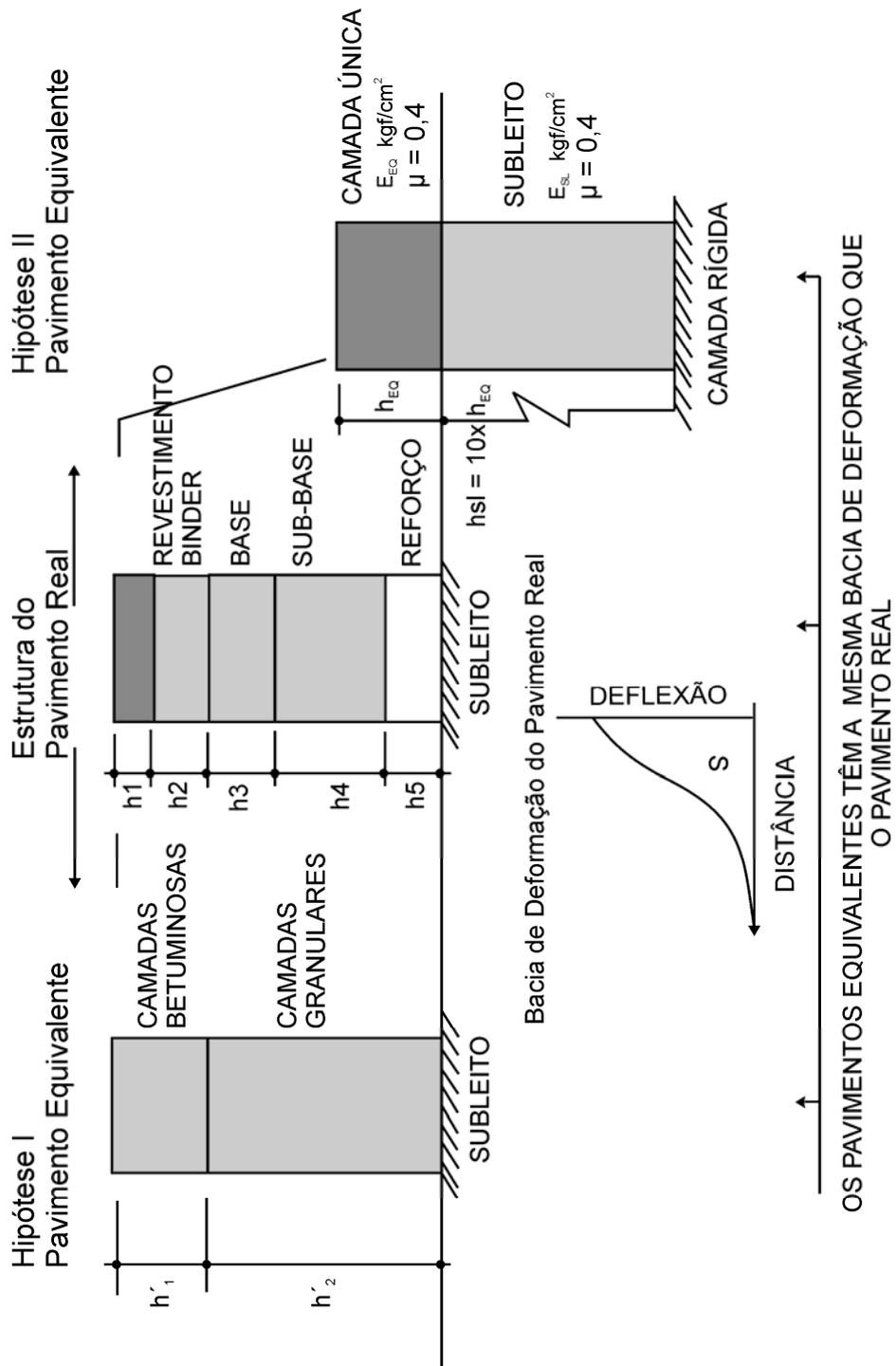
Com referência aos esquemas mostrados na Figura 24, cumpre esclarecer que de acordo com a prática atual adotada por vários projetistas, a avaliação estrutural de pavimentos flexíveis multi-camadas por intermédios da retroanálise das bacias de deformação, já é feita por meio da transformação do pavimento real em um pavimento equivalente de 3 camadas, assim constituído (Hipótese I da Figura 24):

- a) Camada Betuminosa Única com a mesma espessura das camadas betuminosas existentes.
- b) Camada Granular Única com a mesma espessura das camadas granulares existentes;
- c) Subleito;

As principais razões para a adoção do conceito de análise de pavimentos equivalentes com as mesmas características de deformabilidade do pavimento real (Bacia de Deformação) são as seguintes:

- a) Vários Engenheiros admitem que a avaliação estrutural de um pavimento com mais de 3 camadas (incluindo o subleito) por meio da retroanálise das bacias de deformação é imprecisa, pois as próprias teorias clássicas de camadas elásticas empregadas pelos programas computacionais para este fim foram elaboradas seguindo pressupostos teóricos ideais, que necessariamente não correspondem à realidade do campo;
- b) A avaliação estrutural por meio da retroanálise das bacias de deformação de camadas pouco espessas (como geralmente é o caso do revestimento betuminoso) é bastante imprecisa, pois qualquer pequeno erro nas medidas de deflexão, e/ou na determinação das espessuras, acarreta um grande erro na avaliação dos módulos;
- c) As espessuras das camadas do pavimento real são geralmente avaliadas por intermédio de informações históricas ou por meio de sondagens. Mesmo neste último caso, as informações são imprecisas. Não é cabível sondar-se um pavimento para obtenção das medidas exatas de espessuras em cada local de medição de bacias, pois o método não destrutivo utilizado passaria a ser destrutivo. No caso da transformação mostrada na Hipótese II da Figura 24 em que a espessura é teoricamente calculada, não acontece este inconveniente.

**Figura 24 - Transformação Teórica do Pavimento Real em Pavimento Equivalente**



Pela utilização do Modelo de Hogg devidamente informatizado, foi possível se examinar um grande número de bacias de deformação calculadas e retroanalisadas em inúmeras rodovias, possibilitando o estabelecimento das seguintes funções:

$$\text{Log } E_{SL} = f(\text{log } Rd_0, \text{log } d_0)$$

$$H_{EQ} = f(Rd_0)$$

As relações entre  $E_{SL}$  e  $E_{EQ}$  e  $E_{SL}$  e o ISC – Índice Suporte Califórnia, já haviam sido fixadas em trabalhos anteriores.

A formulação estabelecida mostrada a seguir e no ábaco da Figura 25, apresentada adiante, permite o cálculo dos parâmetros de pavimento equivalente ao pavimento real em todos os locais em que forem medidas as deflexões  $d_0$  e  $d_{25}$ :

$$\text{Log } E_{SL} = \frac{16.280 - (\text{log } Rd_0 + 2.639 \text{log } d_0)}{2,708}$$

$$H_{EQ} = \frac{(Rd_0 + 5.163)}{685}$$

$$E_{EQ} = 6,18 E_{SL}$$

$$\text{ISC} = \frac{E_{SL}}{70},$$

onde:

$E_{SL}$  = Módulo de deformação do subleito, em  $\text{Kgf/cm}^2$

$H_{EQ}$  = Espessura do pavimento equivalente, em cm

ISC = Índice Suporte Califórnia

$d_0$  = Deflexão medida em  $\text{mm} \times 10^{-2}$

R = Raio de Curvatura em m.

O método de retroanálise simplificado apoiado na determinação do Raio de Curvatura R e no Produto  $Rd_0$ , tem sido usado na resolução de problemas correntes de avaliação estrutural e projetos de pavimentos flexíveis e semi-rígidos com bons resultados. Foi verificado pelo programa ELSYM5 mostrando sua coerência com o mesmo.

As determinações dos parâmetros do pavimento equivalente ao pavimento real são extremamente simples e têm sido usados na determinação do “SN – Número estrutural e do SNC – Número estrutural corrigido” do pavimento equivalente ao pavimento real para o emprego das equações de desempenho do Método DNER-PRO-159/85, de acordo com as seguintes equações:

$$SN = H_{EQ} \left[ 0,181 \left( 1 - e^{-8,40 \times 10^{-5} E_{EQ}} \right) \right]$$

$$SNC = SN + 3,51 \log ISC - 0,85(\log ISC)^2 - 1,43,$$

onde:

SN = nº estrutural do pavimento equivalente

$H_{EQ}$  = Espessura do pavimento equivalente, em cm

e = nº Neperiano

$E_{EQ}$  = Módulo de Deformação do pavimento equivalente em Kgf/cm<sup>2</sup>

SNC = Nº Estrutural Corrigido

ISC = Índice Suporte Califórnia

O processo de retroanálise dispensa medidas trabalhosas e demoradas “in loco” bem como a coleta de amostras e ensaios de laboratório para esta finalidade.

Com referência ao exemplo chave mostrado na Figura 25, em que  $H_{EQ}=20$  cm,  $E_{EQ}=3.788$  Kgf/cm<sup>2</sup>,  $ISC = 622 \div 70 = 9$ , podemos calcular:

$$SN = 20 \left[ 0,181 \left( 1 - e^{-8,4 \times 10^{-5} 3785} \right) \right] \approx 1,0$$

$$SNC = 1 + 3,51 \log 9 - 0,85 (\log 9)^2 - 1,43 \approx 2,2$$

Os parâmetros obtidos pela retroanálise simplificada são usados para o cálculo do Esforço de Compressão  $\tau_z$  em Kgf/cm<sup>2</sup> no topo do subleito do pavimento flexível ou semi-rígido existente, ocasionado pela carga padrão de  $\approx 4,2$  toneladas de roda da dupla do caminhão de prova aplicada nas medidas de deflexão, bem como a Deformação Específica  $\varepsilon_z$  correspondente. As fórmulas usadas válidas para a relação  $E_{EQ}/E_{SL}=6,18$  do método são :

$$\tau_z = 2,138 - 8,307 \times 10^{-2} H_{EQ} + 1,277 \times 10^{-3} H_{EQ}^2 - 7,079 \times 10^{-6} H_{EQ}^3$$

$$\varepsilon_z E_{SL} = 1,059 - 6,656 \times 10^{-3} H_{EQ} - 5,299 \times 10^{-4} H_{EQ}^2 + 6,741 \times 10^{-6} H_{EQ}^3$$

Utilizando os parâmetros já calculados no exemplo chave da FIGURA 25 teremos:

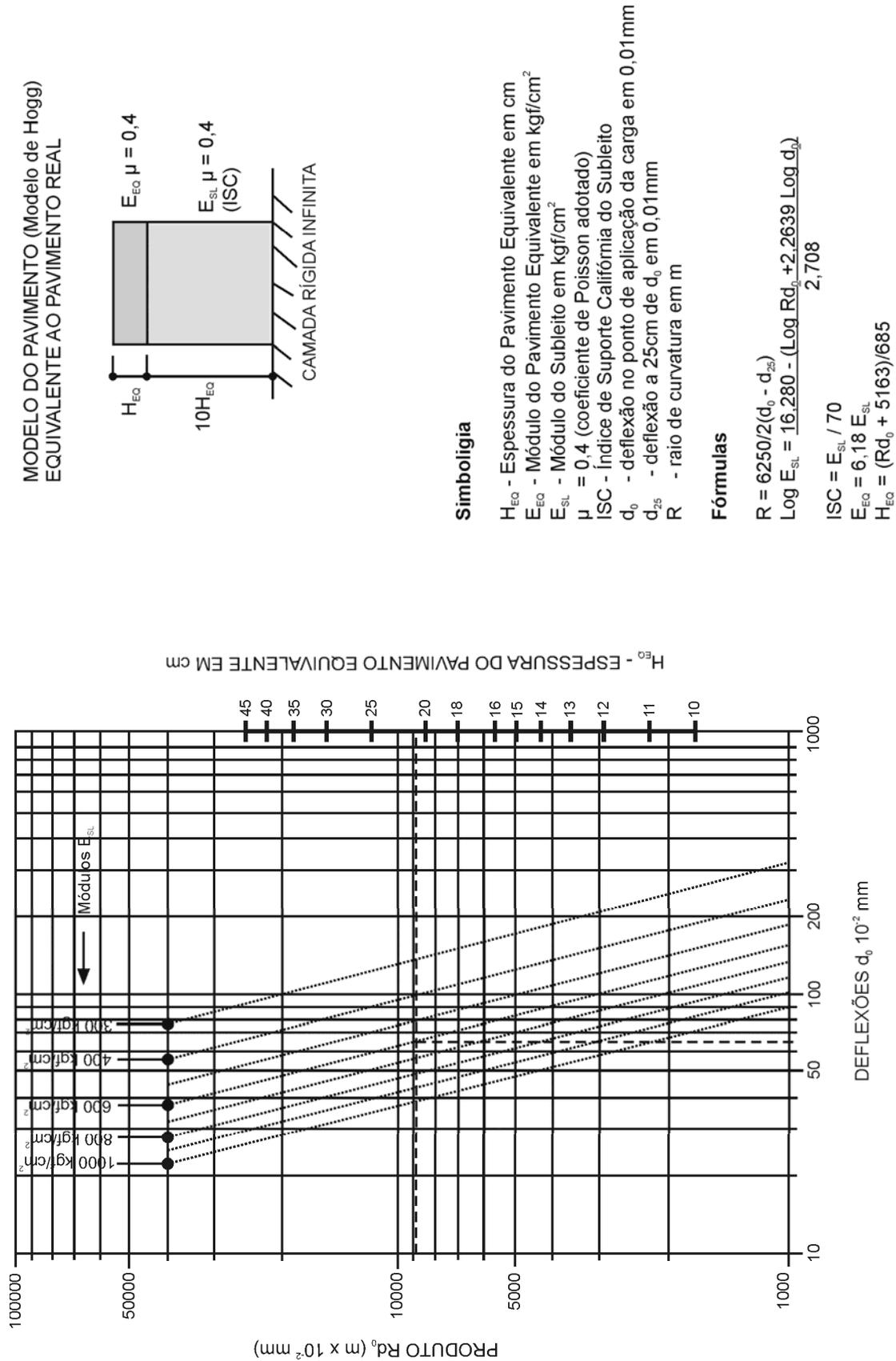
$$\tau_z = 2,138 - 8,307 \times 10^{-2} \times 20 + 1,277 \times 10^{-3} \times 20^2 - 7,079 \times 10^{-6} \times 20^3 = 0,921 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$\varepsilon_z E_{SL} = 1,059 - 6,656 \times 10^{-3} \times 20 - 5,299 \times 10^{-4} \times 20^2 + 6,741 \times 10^{-6} \times 20^3 = 0,768$$

$$\varepsilon_z = 0,768 \div 613 = 0,00125$$

É apresentada a seguir a Figura 25:

**Figura 25 - Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis por meio do Produto Rd<sub>0</sub>**



#### 4.2.5 MÓDULO RESILIENTE

O fenômeno da fadiga de um revestimento asfáltico consiste na sua ruptura (fissuração) quando solicitado inúmeras vezes por cargas menores do que a sua resistência à tração.

A repetição das deformações recuperáveis é a responsável pela fadiga dos revestimentos asfálticos. Por outro lado, as deformações permanentes são as responsáveis pela formação de flechas nas trilhas de roda.

O termo deformação resiliente foi introduzido na pavimentação pelo renomado engenheiro norte-americano Francis Hveen, buscando diferenciar as deformações elásticas ocorrentes nos pavimentos flexíveis, sob cargas repetidas, de deformações típicas de outras estruturas, não caracterizadas por carregamentos aleatórios como os rodoviários. Ademais as deformações resilientes são de pequena magnitude, quando comparadas com as suportadas por outras estruturas.

Na teoria elástica clássica, define-se para um sólido elástico ideal, “módulo de elasticidade” ou “módulo de Young” (E) como a constante de proporcionalidade entre a tensão aplicada ( $\sigma$ ) e a deformação específica axial resultante ( $\varepsilon$ ):

$$M_r = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Ocorrendo proporcionalidade entre tensões e as deformações axiais resultantes o módulo de elasticidade é uma constante, e se está trabalhando no campo da elasticidade linear.

Pode-se conceituar “módulo de resiliência” ou “módulo resiliente” ( $M_r$ ) de um material como a relação entre a tensão vertical aplicada repetidamente ( $\sigma$ ) e a deformação axial recuperável que lhe corresponde ( $\varepsilon$ ), após um determinado número de aplicações da carga:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon}$$

Não se pode confundir os dois conceitos, já que no caso do módulo resiliente utiliza-se tensões repetidas e situadas bem abaixo da tensão de ruptura elástica do material, em regime elástico.

No estudo de solos e materiais granulares, a técnica laboratorial empregada é a dos ensaios triaxiais de carga repetida. Neste ensaio, a tensão vertical empregada no cálculo do módulo resiliente é a tensão-desvio ( $\sigma_d$ ), correspondente à diferença entre a tensão principal maior ( $\sigma_1$ ) e a tensão principal menor ( $\sigma_3$ ).

Já no estudo das misturas asfálticas, tem sido empregado com maior frequência no Brasil o ensaio de compressão diametral dinâmico (ou de tração indireta). Neste ensaio, a tensão a adotar no cálculo é a tensão de tração verificada no plano diametral vertical da amostra. Pode ser empregado ainda o ensaio de flexão dinâmico, que consiste em submeter a um carregamento cíclico uma vigota de mistura asfáltica biapoiada.

Os materiais empregados em pavimentação se caracterizam, usualmente, por apresentar um comportamento elástico não-linear, ou seja: seus módulos resilientes não são constantes. No caso dos solos e materiais granulares, o valor modular é dependente, para uma dada condição de moldagem, do estado de tensões a que o material é submetido. Já as misturas asfálticas apresentam valores modulares dependentes, principalmente, da temperatura e da frequência de aplicação da carga.

#### 4.2.6 NÚMERO ESTRUTURAL CORRIGIDO (SNC)

Em modelos de previsão de desempenho é necessário utilizar medidas da resistência do pavimento que resumam as interações complexas entre tipos de materiais, módulos de elasticidade, espessuras das camadas e condição da superfície.

Algumas medidas que têm demonstrado serem mais efetivas e utilizadas no passado são:

- número estrutural da AASHTO (SN) em função do valor de suporte do subleito (S) ou número estrutural modificado do TRL;
- deflexão Benkelman sob carga estática;
- deflexão e raio de curvatura sob carga cíclica dinâmica (Dynalect ou Road Rater);
- deflexão e raio de curvatura sob carga de impacto dinâmica (Falling Weight Deflectometer)

Nos estudos efetuados na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários (PICR), e como consequência no estudo HDM, o Número Estrutural Corrigido (SNC) foi reconhecido como a medida mais significativa do ponto de vista estatístico, da resistência principal nas relações de previsão. Este indicador da resistência do pavimento é utilizado no Procedimento DNER-PRO 159/85.

As deflexões máximas medidas sob a carga-padrão não são eficientes na previsão de desempenho sem outros parâmetros suplementares de resistência. Existe um grau razoável de correlação entre medidas de resistência (SNC) e deflexão (DEF) como será visto a seguir.

O Número Estrutural Corrigido, SNC, é definido como uma combinação linear de coeficientes estruturais ( $a_i$ ) e espessuras ( $H_i$ ) das camadas sobre o subleito e da contribuição do subleito (SNSG), a saber:

$$SNC = \sum_{i=1}^n a_i H_i + SNSG$$

$a_i$  = coeficiente estrutural da camada  $i$ ;

$H_i$  = espessuras das camadas  $i$ , em mm;

$n$  = número de camadas do pavimento;

$SNSG$  = numero estrutural modificado do subleito;

$$SNSG = 3,51 \log CBR - 0,85(\log CBR)^2 - 1,43$$

em que:

CBR = índice de Suporte Califórnia do subleito nas condições de umidade e densidade “in situ”, em percentual.

Os coeficientes estruturais dos revestimentos em concreto asfáltico e das camadas granulares são função de parâmetros de resistência (módulo resiliente e CBR). Porém alguns valores típicos de  $a_i$  são: 0,41 para revestimentos de concreto asfáltico; 0,12 para bases granulares e 0,10 para camadas de sub-base.

### **4.3 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL**

#### **4.3.1 CONCEITO E INFLUÊNCIA DA IRREGULARIDADE**

A irregularidade longitudinal de um pavimento, é o conjunto dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano de referência, desvios esses que afetam a qualidade do rolamento e a ação dinâmica das cargas sobre a via. É a grandeza física mensurável, direta ou indiretamente, que melhor se correlaciona com o custo operacional dos veículos, o conforto, a segurança, a velocidade de percurso e a economia das viagens o que pode ter origem congênita, ou seja, decorrer de imperfeições no processo executivo, assim como pode resultar de problemas ocorridos após a construção, como resultado da atuação do tráfego, do clima e outros fatores causadores da restauração do pavimento.

A irregularidade tem influência nos seguintes aspectos:

- a) Interação da superfície da via com os veículos, gerando efeitos sobre os próprios veículos, sobre os passageiros e o motorista e sobre a carga transportada.
- b) Custo operacional dos veículos e, sobre as viagens, afetando sua segurança, seu conforto e sua velocidade.
- c) Dinâmica dos veículos em movimento, aumentando o seu desgaste; e causando também, prejuízos à condução dos veículos.
- d) Aumento da ação das cargas dinâmicas dos veículos sobre a superfície do pavimento e, em decorrência, acelera a restauração da sua estrutura.
- e) Efeitos adversos sobre a drenagem da superfície do pavimento, na medida em que propicia a formação de poças d'água que vão afetar negativamente a segurança e o desempenho da rodovia.

#### **4.3.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DA IRREGULARIDADE**

Para realizar a medida de parâmetros ligados à irregularidade longitudinal, diversos equipamentos ou processos foram concebidos, podendo genericamente ser enquadrados em quatro grupos, a saber:

**a) sistemas de medidas diretas do perfil**

Envolvem medidas diretas ou manuais da geometria vertical do pavimento, mediante emprego de equipamentos de topografia ou instrumentos adequados. Os resultados obtidos devem ser processados para fornecer valores estatísticos indicativos de irregularidade. Como exemplos, tem-se:

- Método de Nível e Mira
- Abay Beam do TRRL

**b) sistemas de medidas indiretas do perfil**

Executam medidas mecanizadas do perfil da via. Os dados resultantes devem ser processados para fornecer valores como amplitude de onda, coeficiente de regularidade, etc.. Como exemplos, tem-se:

- Perfilômetro Dinâmico de superfície - GMR
- Perfilômetro AASHTO
- Analisador de perfil longitudinal - APL
- Perfilômetro CHLOE
- MERLIN do TRRL

**c) sistemas baseados na reação do veículo (Sistemas medidores tipo resposta)**

Também conhecidos como sistemas medidores tipo-resposta, baseiam-se em instrumentos que determinam acumulativamente os movimentos relativos entre o eixo traseiro do veículo e sua carroceria, a partir do que, estatisticamente, pode-se caracterizar a irregularidade. Os sistemas tipo-resposta mais conhecidos são:

- Rugosímetro BPR
- Maysmeter
- Bump Integrator
- Integrador de deslocamentos lineares sul-africano (LDI)
- PCA roadmeter
- Sistema integrador IPR/USP

**d) sistemas de medida com sonda sem contato**

Baseiam-se na reflexão de uma onda sonora ou raio laser emitido por um dispositivo situado sob o veículo. São exemplos destes sistemas:

- Perfilômetro “laser” do TRRL
- Perfilômetro “acústico” da Universidade FELT

O sistema mais difundido internacionalmente e também em nosso país é o dos integradores do tipo-resposta, que se baseiam na reação da suspensão do veículo às irregularidades existentes.

O funcionamento dos sistemas medidores de irregularidade tipo-resposta (SMITR) baseia-se, na reação do veículo às condições de superfície da via, sob uma determinada velocidade de operação.

Os sistemas do tipo-resposta são montados em veículos de passeio convencionais ou em pequenos reboques. Seu funcionamento é estritamente dependente das características da suspensão e dos pneumáticos do veículo ou reboque utilizado, o que requer um procedimento de calibração para que os resultados obtidos por vários sistemas sejam reprodutíveis e comparáveis entre si. Além disso, qualquer alteração no sistema de rodagem ou na suspensão do veículo pode provocar alterações nas leituras fornecidas, o que leva à necessidade de calibrações periódicas.

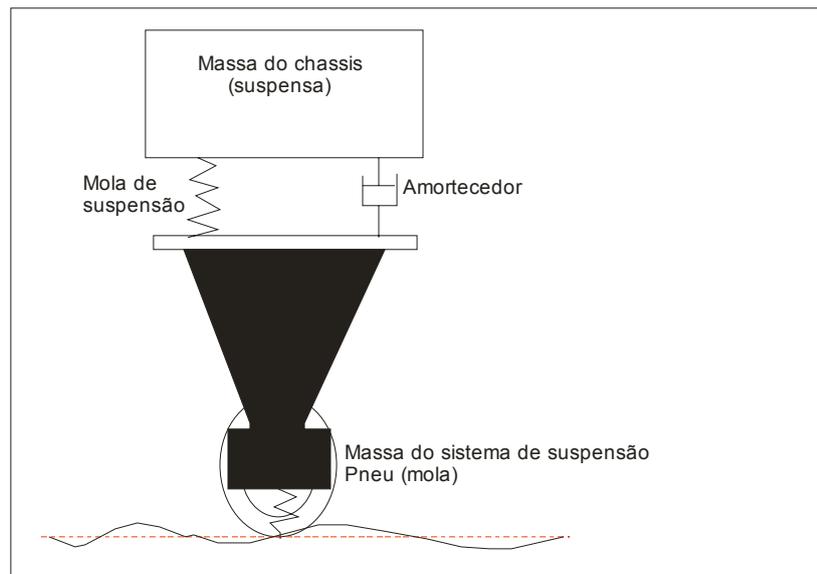
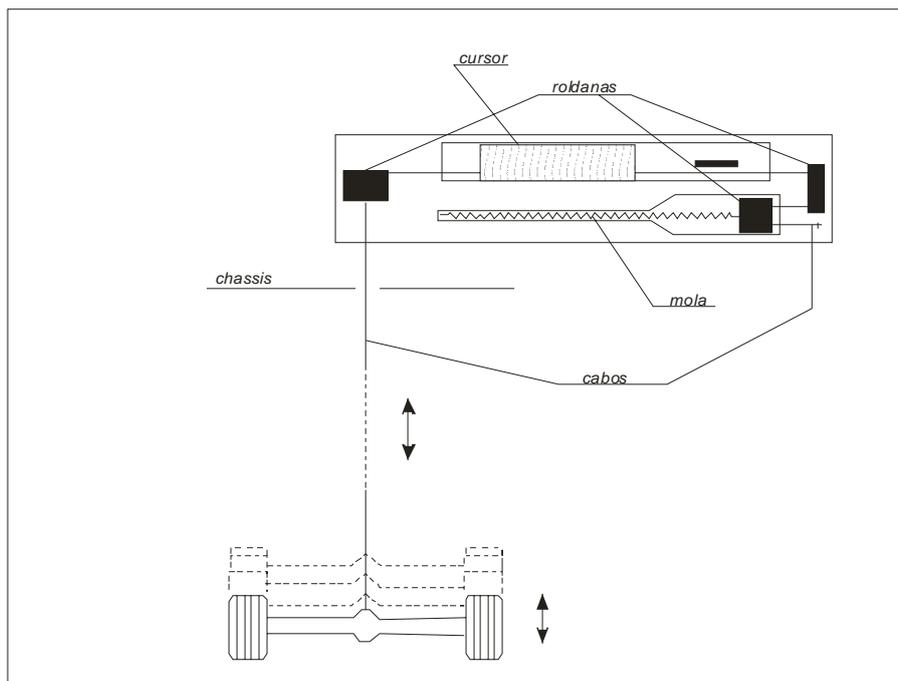
#### 4.3.3 MEDIÇÃO DA IRREGULARIDADE NO BRASIL

Como resultado de uma pesquisa internacional de medição de irregularidade, realizada em Brasília no ano de 1982, foi estabelecida a escala "International Roughness Index"- IRI, que é uma escala de referência transferível para todos os sistemas de medição, e cuja unidade de medida é m/km.

No Brasil, a escala padrão de medição adotada é o "Quociente de Irregularidade" - Q.I. ou "Índice de Quarto de Carro", reconhecido internacionalmente. O modelo de quarto-de-carro consiste em um sistema formado por uma massa, uma roda, um amortecedor e uma mola (Figuras 26, 27 e 28). A resposta à irregularidade, obtida pela simulação de movimentos no quarto-de-carro, é aceita como uma medida padrão de irregularidade e é expressa em contagens por quilômetro (cont./km).

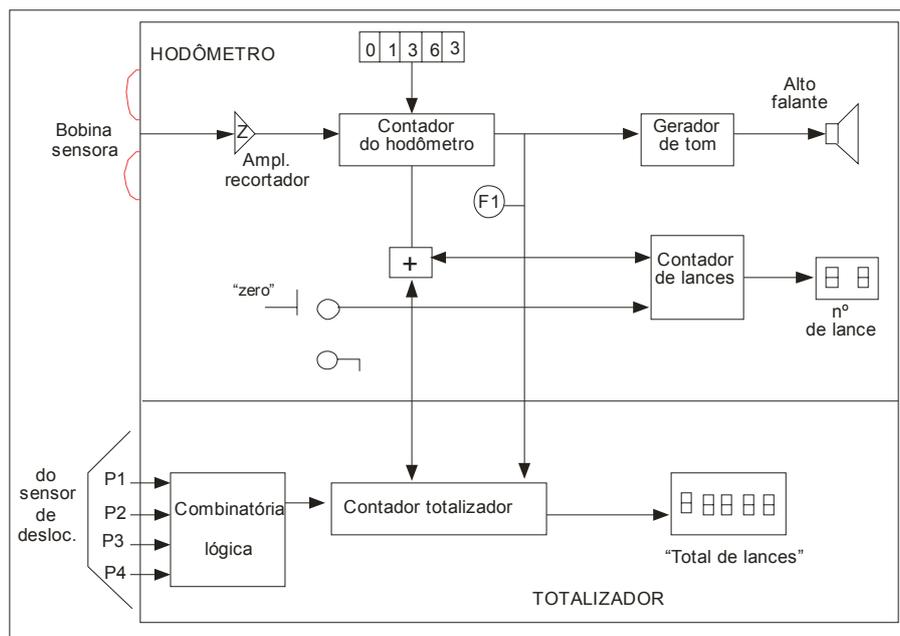
Os dados de Q.I. utilizados na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários - PICR, realizada de 1975 a 1981, foram obtidos por um equipamento do tipo-resposta (Maysmeter), que baseia-se na reação do veículo às condições de superfície da rodovia.

Os conceitos de QI e IRI são bastante similares e, na prática, eles são altamente correlacionados. Uma relação aproximada entre QI e IRI é dada por: **QI = 13 IRI**

**Figura 26 - Esquema do simulador de quarto-de-carro****Figura 27 - Esquema do sensor de deslocamentos verticais.**

Como qualquer equipamento do tipo-resposta, o Integrador necessita de calibração e para esse fim utiliza-se o método de nível e mira, desenvolvido por QUEIROZ e que deu origem à Norma DNER-PRO 164/94. O Integrador é um equipamento embarcado, isto é, o sistema medidor funciona como um conjunto formado pelo equipamento e pelo sistema de suspensão do veículo que o abriga.

Posteriormente, foi desenvolvido o equipamento Mirr, que sendo rebocado, pode ser tracionado por qualquer veículo com potência adequada e que independe da suspensão do veículo trator.

**Figura 28 - Diagrama em blocos do quantificador de irregularidade**

#### 4.3.4 MEDIÇÃO DA IRREGULARIDADE E CALIBRAÇÃO DOS SMITR SISTEMA DE MEDIDA DE IRREGULARIDADE TIPO RESPOSTA.

Os métodos para a medição de irregularidade e a calibração dos sistemas tipo resposta são:

- DNER-PRO 182/94 – Medição da Irregularidade da Superfície de pavimento com Sistemas Integradores IPR/USP Maysmeter
- DNER-PRO 229/89 – Restauração de sistemas medidores de irregularidade de pavimento (Sistemas Integradores IPR/USP Maysmeter)
- DNER-PRO 164/94 – Calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade de superfície de pavimentos (Sistemas Integradores IPR/USP Maysmeter)
- DNER-ES 173/94 – Método de nível e mira para calibração de sistemas medidores de irregularidade.

Para efeito de calibração pelos métodos padronizados as leituras fornecidas pelo SMITR, para um determinado segmento, representam a somatória acumulada dos movimentos relativos observados entre a carroceria do veículo e o eixo traseiro deste, devendo ser correlacionados, por uma equação de calibração, a escala padrão adotada. Via de regra, o quociente de irregularidade  $QI$ , expresso em contagens/km, é uma função linear da leitura  $L$  do sistema integrador, ou seja:

$$QI = a + b L \text{ ou } QI = a + b L + c L^2$$

em que  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes passíveis de determinação, pela aplicação do método dos mínimos quadrados a um conjunto de pares  $(QI)_i$  e  $(L)_i$ , definidos para diversos segmentos de distintas irregularidades.

Basicamente, o processo de calibração consiste das seguintes etapas:

- a) Seleção de 20 bases de calibração, com extensão de 320 m cada, apresentando irregularidade variável, desde um valor baixo até um valor elevado;
- b) Nivelamento geométrico de pontos das trilhas de roda espaçados de 50 cm ou 25 cm, em cada base de calibração;
- c) Estimativa para cada base de calibração do valor do "quociente de irregularidade" (QI), a partir dos resultados do levantamento a nível e mira e das equações de correlação propostas por Queiroz. Estas correlações foram desenvolvidas a partir do experimento internacional de medição de irregularidade levado a efeito no Brasil em 1982, e permitem estimar o valor do QI que seria resultante da utilização do perfilômetro dinâmico de superfície - GMR, expresso em contagens/km.
- d) Determinação das leituras L do integrador em cada base de calibração, para velocidades de 30 km/h, 50 km/h e 80 km/h;
- e) Aplicação de método dos mínimos quadrados para determinação dos coeficientes  $a$  e  $b$  da equação citada anteriormente, gerando-se uma equação para cada velocidade estabelecida, determinação das equações de correlação que permitem a estimativa do QI, a partir das leituras do integrador, para cada velocidade.

Levando-se em conta o fato de que as características do veículo em que está instalado o integrador e elementos do próprio integrador alteram-se com o tempo (desgaste dos pneus, fadiga da suspensão, etc.), evidencia-se que o sistema utilizado deverá ser periodicamente recalibrado ou aferido. Estas medidas também poderão ser necessárias em caso de acidente com o veículo ou de troca de um de seus componentes.

Estando calibrado o sistema medidor de irregularidade do tipo-resposta, a medição na rede ou no trecho de interesse pode ser efetuada com grande rapidez, sendo necessária uma equipe composta apenas por um motorista e um anotador.

Selecionada a velocidade da medição, a qual deve ser compatível com o volume de tráfego e as características geométricas da via, o veículo deve percorrer a estrada com velocidade constante, devendo ser repetida a medição nos segmentos que houver variação de velocidade.

A cada lance, usualmente de 320 m, o aparelho emite um sinal sonoro e por meio de um display informa a leitura L, representativa da irregularidade acumulada no lance em questão.

O valor do QI é posteriormente calculado em escritório, empregando-se a equação de correlação correspondente.

#### **4.4 CONDIÇÕES DA ADERÊNCIA PNEU/PAVIMENTO**

A principal propriedade do pavimento no que diz respeito à segurança, independentemente de fatores relacionados com as condições em planta, perfil e seção transversal da rodovia,

é a sua capacidade de proporcionar a adequada aderência e atrito entre a sua superfície e os pneus dos veículos.

Os segmentos com baixo valor de aderência e/ou altos índices de acidentes devem ser identificados. Tais identificações permitem ao órgão rodoviário realizar uma análise mais profunda, caso a caso, e com isso avaliar as necessidades e programar medidas corretivas.

Nas especificações atuais do DNIT sobre misturas betuminosas foram incluídos dois Métodos simples para avaliação das condições de aderência Pneu/Pavimento, a saber:

- a) Association Française de Normalisation – AFNBR NF-P.98-216-7 – Método da Mancha de areia.
- b) ASTM E.303 – Surface Fictional Properties Using the British Pendulum Tester – Método de Pendulo Britânico.

Os equipamentos portáteis dos métodos citados pelo DNIT em sua especificações são bastante econômicos e, podem fornecer informações importantes sobre o coeficiente de atrito e a macro-textura dos revestimentos.

O pêndulo britânico determina por uma medida escalar o grau de escorregamento (ou derrapagem) presente na superfície de um pavimento. Esse dita escorregamento pode ser tratado também como o grau de aderência entre o pneu e o pavimento, ou, também chamado como coeficiente de atrito cinemático.

O equipamento consiste de uma placa de borracha simulando a superfície de um pneumático de veículo automotor montada no extremo de um pêndulo que, liberado em queda livre, descreve um arco circular que tangencia e fricciona a superfície do pavimento onde se coloca o aparelho para o ensaio. A diferença de altura entre o centro de gravidade da placa de borracha tomada antes e depois que ela desliza sobre a superfície do revestimento é utilizada para avaliar a perda de energia devido à fricção. As condições do ensaio foram definidas de tal forma que os valores apresentados no mostrador do equipamento corresponderam ao Valor de Resistência à Derrapagem - VRD de um pneumático padrão derrapando sobre o pavimento a 48 km/h.

Valores limites da VRD – Valores da Resistência a Derrapagem Longitudinal, proposta pelo “Marshall Committee”, correlacionados aos tipos de segmentos possíveis quanto a probabilidade de ocorrer eventos de insegurança são resumidos Tabela 8 a seguir na página seguinte.

O ensaio da mancha de areia avalia a macro-textura e caracteriza a superfície do pavimento quanto a sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu e o pavimento, e quantifica a densidade, ou seja, a distância média entre grânulos individuais de agregados aflorados na superfície do pavimento.

O ensaio consiste em preencher os vazios da textura superficial do pavimento com um volume conhecido de uma areia padrão, espalhando-a com movimentos circulares de

modo que o diâmetro final da mancha seja função da altura média e, conseqüentemente, do volume consumido. O equipamento consiste de um recipiente de volume conhecido preenchido com uma areia de granulometria padrão, um dispositivo próprio para o espalhamento da areia e uma régua graduada para relacionar o diâmetro da mancha com o volume de areia e a macro-textura do pavimento. O resultado é expresso em altura da areia (HS), em mm.

Os conceitos de resistência à derrapagem, em função da macrotextura e das classes de resistência à derrapagem, são apresentadas na Tabela 9 a seguir, juntamente com o formulário de campo, Tabela 10, para as medidas com os dois métodos em unidades de amostragem que devem ficar marcadas para acompanhamento (Vide ABPv - Boletim Técnico nº 18/1999 – Informativo Técnico sobre Avaliação da Resistência a Derrapagem Através de Aparelhagem Portátil).

**Tabela 9 - Avaliação das Condições de Aderência Pneu Pavimento ou Resistência à Derrapagem**

<b>CLASSES DE RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM / MÉTODO DO PÊNDULO BRITÂNICO</b>	
<b>CLASSES</b>	<b>VRD - VALOR DE RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM</b>
1 - PERIGOSA	< 25
2 - MUITO LISA	25 - 31
3 - LISA	32 - 39
4 - INSUFICIENTEMENTE RUGOSA	40 - 46
5 - MEDIANAMENTE RUGOSA	47 - 54
6 - RUGOSA	55 - 75
7 - MUITO RUGOSA	> 75

LIMITE SUGERIDO: VRD - Valor de Resistência à Derrapagem **VRD ≥ 55**  
SUPERFÍCIE MEDIANAMENTE RUGOSA A RUGOSA

<b>AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA / MÉTODO DA ALTURA DE AREIA</b>	
<b>PROFUNDIDADE MÉDIA EM (mm)</b>	<b>TEXTURA SUPERFICIAL</b>
HS < 0,20 mm	MUITO FINA OU MUITO FECHADA
0,20 mm < 0,40 mm	FINA OU FECHADA
0,40 mm < HS < 0,80 mm	MÉDIA
0,50 mm < HS < 1,20 mm	GROSSEIRA OU ABERTA
HS > 1,20 mm	MUITO GROSSEIRA OU ABERTA

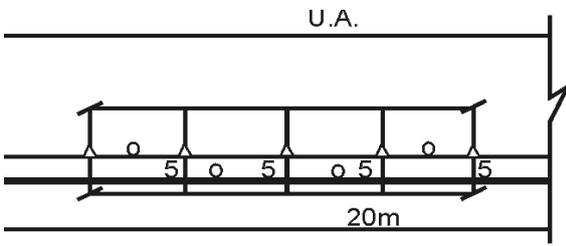
LIMITES SUGERIDOS: HS Profundidade Média **0,6 mm < HS < 1,2 mm**  
TEXTURA SUPERFICIAL MÉDIA A GROSSEIRA

**Tabela 10 - Avaliação da Resistência à Derrapagem**

RODOVIA _____	TRECHO _____	REVESTIMENTO _____
SEGMENTO Km _____	ao Km ____ Km ____	Lado _____

**ESQUEMA DA UA - UNIDADE DE AMOSTRAGEM**



Eixo

Trilha de Rota

Acostamento

Δ - Locais de Determinação de Pêndulo Britânico  
 O - Locais de Determinação da Altura de Areia

**MEDIÇÕES COM PÊNDULO BRITÂNICO**

CORREÇÃO DO ZERO											MÉDIA	ADOTADO	
Antes do Ensaio													
Depois do Ensaio													

**Observação:** Efetuar a correção do Zero a cada série de ensaio

CORREÇÃO DE TEMPERATURA DA ÁGUA												ENSAIO
Temperatura °C	0°	2°	5°	8°	10°	13°	15°	20°	25°	30°	40°	IG
Correção	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	

Local	Leitura do Pêndulo					Média	Resultado
1							
2							Média Geral =
3							Corr. do Zero =
4							Corr. Temperatura =
5							
Média Geral das Leituras X							Resist. à Derrapagem =

**MEDIÇÕES DA ALTURA DE AREIA**

Local	Medidas Obtidas - Diâmetro (cm)					Média	Resultado
1							
2							Altura de Areia HS = mm
Média Geral dos Diâmetros cm							Textura

**Observação:**

<b>OPERADORES</b>	<b>VISTO</b>	<b>DATA</b>
-------------------	--------------	-------------

Existem vários equipamentos para o processamento das medidas de resistência à derrapagem - os quais apresentam grande rendimento nos procedimentos pertinentes e que são efetuados, em conjunto, com as medidas da macroestrutura do revestimento.

Todos estes dispositivos, inclusive aqueles citados pelo DNIT foram objeto de uma pesquisa internacional conduzida pelo "PIARC – Permanent International Association of Road Congress" chamada de "International Experiment to Compare and Harmonizing Texture and Skid Residence Measurement" que deu origem ao parâmetro chamado de IFI – International Friction Index (Índice Internacional de Atrito / Derrapagem) em função da macro e da micro-textura do pavimento (que nos métodos citados pelo DNIT são medidos pela mancha de areia e pelo pendulo britânico).

O IFI é calculado pela Norma "ASTM – E – 1968/98 (2001-b) – Standar Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface".

De acordo com pesquisa em desenvolvimento no Brasil e apresentada no 17º Encontro de Asfalto em Dezembro/2004 com o título de "Determinação do IFI – International Friction Index", foi proposta a seguinte classificação deste parâmetro, indicada na Tabela 11, para orientação dos estudos destas condições no Brasil.

**Tabela 11 - Valores do IFI**

VALORES DO IFI	MÍNIMO	MÁXIMO
Péssimo	< 0,06	
Ruim	0,06	0,12
Regular	0,13	0,16
Bom	0,20	0,30
Ótimo	> 30	

Desta maneira, qualquer que seja o dispositivo que venha a ser usado no país será sempre possível calibrá-lo pela norma citada para avaliação das condições de Atrito / Derrapagem de nossas rodovias.

#### **4.5 AVALIAÇÃO DAS SOLICITAÇÕES DE TRÁFEGO**

A avaliação das solicitações que o pavimento já sofreu pelo tráfego é fundamental para a definição de um diagnóstico preciso do pavimento existente. Para o dimensionamento do reforço ou a definição de outras intervenções é necessária a determinação do tráfego futuro. Em qualquer caso, o desejável é que sejam definidos os seguintes elementos relativos ao tráfego:

- Projeção do VDM – Volume Médio Diário do trafego (Anual)
- Carregamento da frota;
- Calculo do número N (Parâmetros do Tráfego)

#### **4.5.1 PROJEÇÃO DO VMD – VOLUME MÉDIO DIÁRIO DO TRAFEGO (ANUAL), CLASSIFICAÇÃO DA FROTA E TAXAS DE CRESCIMENTO.**

A avaliação dos volumes de tráfego deve ser baseada em séries históricas existentes e em contagens volumétricas classificatórias levadas a efeito no trecho em análise. Desvios de tráfego significativos devem ser levados em conta, para a definição de subtrechos homogêneos em termos de tráfego.

É conveniente definir o tráfego que atuou sobre o pavimento mediante as contagens efetuadas no passado, e em estudos e projetos anteriormente elaborados.

A definição do tráfego futuro terá como ponto de partida a avaliação do tráfego atual, por meio de pesquisas de campo. A sua projeção ao longo do período de projeto basear-se-á em taxas de crescimento do tráfego e no conhecimento de eventuais alterações previstas para o sistema de transportes regional.

As taxas de crescimento do tráfego poderão ser avaliadas por intermédio das séries históricas existentes ou na associação a dados sócio-econômicos regionais. Assim, por exemplo, a evolução da renda percapita tem íntima vinculação com o crescimento da frota de automóveis, enquanto a produção agropecuária e industrial e a venda de óleo diesel podem ser associadas ao crescimento da frota de veículos comerciais.

É importante notar que o comportamento do tráfego é normalmente influenciado por variações sazonais. Assim, resultados de uma pesquisa de curta duração efetuada, por exemplo, ao longo de uma determinada semana de um determinado mês, não representam bem a média anual de um certo trecho que se presta ao escoamento de safra agrícola pois, o período de colheita pode se estender, neste caso, de abril a junho parte expressiva da atuação da frota de carga poderia não estar sendo detectada na contagem.

A grande diversidade de efeitos gerados sobre os pavimentos pelos diversos tipos de veículos rodoviários leva à necessidade da contagem classificatória, da frota circulante.

A classificação mínima capaz de ser útil à avaliação do tráfego compreende as seguintes subclasses de veículos.

Veículos leves – Automóvel, utilitário.

Veículos comerciais – Ônibus tipo 2c e 3c, caminhão – 2c, caminhão 3c, reboque e semi-reboque.

No entanto, é preferível que a classificação seja mais detalhada, pois podem ocorrer expressivas variações na capacidade de carga entre os caminhões de uma determinada subclasse, em função do tipo de veículo conforme a classificação de veículos adotada pelo DNIT nas contagens volumétricas classificatórias apresentada na Tabela 12, a seguir.

Na classificação adotada, o primeiro algarismo representa o número de eixos do cavalo mecânico, o segundo, o número de eixos do semi-reboque.

Os dados de tráfego podem ser pesquisados junto ao DNIT e através de publicações existentes ou projetos já realizados na Rodovia e também os dados do Sistema de Gerência de Pavimentos disponíveis.

A análise dos dados colhidos pode ser realizada mediante a organização dos mesmos em tabelas com as séries históricas obtidas na qual devem ser anotadas:

- O ano da coleta
- O km de localização dos Postos
- O VMD – isto é, o Volume Médio Diário Anual de Tráfego
- A composição média anual de frota circulante

A evolução do VMD – corresponde ao tráfego passado, presente e futuro da rodovia e a taxa de crescimento correspondente ao período da análise pode ser inferida através do ajustamento de uma equação (pelo método dos mínimos quadrados) aos dados existentes de modo a permitir não só o cálculo deste parâmetro ano a ano, durante todo o período do projeto, como também em anos anteriores, desde a entrada em serviço do pavimento original.

A equação utilizada na regressão linear é do tipo:

$$\text{VMD} = b e^{aA} \quad \therefore \quad \log \text{VMD} = \log b + aA$$

$$t = (e^a - 1) \times 100$$

Na qual:

VMD = Tráfego Médio Diário

e = N° Neperiano

a = Coeficiente

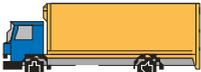
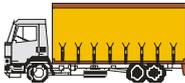
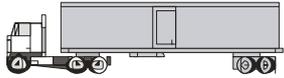
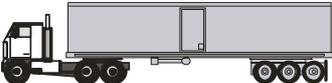
b = Coeficiente

A = Ano desejado

t = Taxa de crescimento do VMD no período

As características médias da composição percentual por tipo de veículo da frota também são estimadas através da pesquisa de dados de tráfego existentes.

Tabela 12 - Classificação de Veículos adotada pelo DNER

SÍMBOLO	CONFIGURAÇÃO	DESCRIÇÃO
		Automóvel
		Utilitário
2c		Ônibus
2c		Caminhão
3c		Caminhão
4c		Caminhão
2s1		Semi-reboque
2s2		Semi-reboque
2s3		Semi-reboque
3s2		Semi-reboque
3s3		Semi-reboque
2c2		Reboque
2c3		Reboque

#### 4.5.2 CARREGAMENTO DA FROTA

Para a avaliação do efeito do tráfego sobre o pavimento é preciso conhecer as cargas de eixo com as quais os veículos de carga solicitam a estrutura. Isto pode ser feito preferencialmente por meio de campanhas de passagens levadas a efeito no próprio trecho, ou em trecho com comportamento de tráfego similar capazes de estimar o perfil de carregamento dos tipos de veículos componentes da frota.

Os procedimentos de pesagem existentes são variados, podendo-se citar as balanças permanentes do DNIT, balanças portáteis e sistemas automáticos de pesagem, os últimos permitem pesagem contínua através de longos períodos.

Nos últimos anos foram desenvolvidos equipamentos para pesar dinamicamente os veículos e classificá-los automaticamente. Em qualquer caso é necessário que os dados de pesagem sejam compatíveis com a classificação adotada para a frota.

A distribuição das cargas por eixo pode ser estimada por meio de dados obtidos em diversos postos de pesagem. A Divisão de Estudos e Projetos do DNER publicou em 1988 o volume "Tabelas de Fatores de Veículos", originada de uma pesquisa em 28 postos permanentes distribuídos nas regiões norte, centro-oeste, sudeste e sul e 12 postos temporários nas regiões norte, nordeste, sudeste e sul do Brasil. Nesse volume, são calculados para cada trecho, os fatores de veículos pelo método da AASHTO e pelo método do Corpo dos Engenheiros (USACE).

Deve-se estar consciente das limitações da utilização generalizada dos fatores de veículos tabelados. Primeiro, o número de postos de pesagem pode ser reduzido e mal distribuído. Segundo, muitas vezes os postos não operam continuamente, e numerosos estudos demonstram que a distribuição dos veículos varia significativamente durante a semana, assim como durante o dia. Recomenda-se a utilização de dados de tráfego coletados para o trecho em análise, pois proporcionarão uma avaliação mais precisa.

A conversão do tráfego misto em um equivalente de operações de um eixo considerado padrão é efetuada aplicando-se os chamados fatores de equivalência de cargas. Estes fatores permitem converter uma aplicação de um eixo solicitado por uma determinada carga em um número de aplicações do eixo-padrão que deverá produzir um efeito equivalente.

Os conceitos adotados nos diversos métodos para a definição da equivalência de cargas não dependem exclusivamente do eixo-padrão considerado. Assim, por exemplo, o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER e o TECNAPAV (PRO 269/94) adotam um eixo-padrão de 8,2 tf, sendo os fatores de equivalência de cargas aqueles desenvolvidos pelo Corpo de Engenheiros do Exército Norte-americano. Já na PRO 159/85, o eixo-padrão também é o de 8,2 tf, porém os fatores de equivalência considerados são os da AASHTO.

Os fatores de equivalência da AASHTO baseiam-se na perda de serventia (PSI) e variam com o tipo do pavimento (flexível e rígido), índice de serventia terminal e resistência do pavimento (número estrutural - SN). Eles são diferentes dos obtidos pelo USACE, que

avaliaram os efeitos do carregamento na deformação permanente (afundamento nas trilhas de roda). As expressões para cálculo dos fatores de equivalência de carga são apresentadas nas Tabelas 3 e 14.

**Tabela 13 - Fatores de Equivalência de Carga do USACE**

TIPO DE EIXO	FAIXA DE CARGAS (t)	EQUAÇÕES (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 - 8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	$\geq 8$	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 - 11	$FC = 1,592 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	$\geq 11$	$FC = 1,528 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem triplo	0 - 18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	$\geq 18$	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$
$P$ = Peso bruto total sobre o eixo		

**Tabela 14 - Fatores de Equivalência de Carga da AASHTO**

TIPO DE EIXO	EQUAÇÕES (P em tf)
Simple de rodagem Simple	$FC = (P/7,77)^{4,32}$
Simple de rodagem Dupla	$FC = (P/8,17)^{4,32}$
Tandem duplo (rodagem dupla)	$FC = (P/15,08)^{4,14}$
Tandem triplo (rodagem dupla)	$FC = (P/22,95)^{4,22}$
$P$ = Peso bruto total sobre o eixo	

A aplicação destas expressões para cada faixa de carga de eixo característico de um certo tipo de veículo de carga obtidos por amostragem da frota possibilita o cálculo do FV – fator de Veículo para este tipo.

As Tabelas 15, 16 e 17 a seguir mostram o cálculo do FV pelos fatores de equivalência de carga da AASHTO do tipo 253 correspondentes a passagens de uma amostragem realizada na BR-101/SC.

Cálculo de Fatores de veículos – AASHTO, tipo:253, BR-101/SC, trecho: Joinville, local: km 26 e data: abril/88

**Tabela 15 - Cálculo FV - ESS**

<b>PESO 1</b>	<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>EQUIVALENCIA</b>
2	2	0,01
3	4	0,07
4	26	1,48
5	67	9,98
6	4	1,31
0	0	0,00
		12,83

**Tabela 16 - Cálculo FV - ESD**

<b>PESO 2</b>	<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>EQUIVALENCIA</b>
0	0	0,00
4	2	0,09
5	5	0,60
6	1	0,26
7	1	0,51
8	11	10,04
9	32	48,60
10	43	102,96
11	7	25,30
12	1	5,26
0	0	0,00
0	0	0,00
0	0	0,00
0	0	0,00
		193,64

**Tabela 17 - Cálculo FV - ETT**

<b>PESO 3</b>	<b>FREQUÊNCIA</b>	<b>EQUIVALENCIA</b>
10	1	0,03
11	4	0,18
12	2	0,13
13	1	0,9
15	2	0,33
16	3	0,65
17	7	1,97
18	5	1,79
19	13	5,86
20	7	3,92
21	11	7,56

PESO 3	FREQUÊNCIA	EQUIVALENCIA
22	16	13,39
23	21	21,19
24	4	4,83
25	5	7,17
26	1	1,69
0	0	0,00
0	0	0,00
0	0	0,00
0	0	0,00
0	0	0,00
0	0	0,00
0	0	0,00
0	0	0,00
		70,80

Total de equivalência = 277,27

Total de veículos = 103

FV = 2,69

#### 4.5.3 CÁLCULO DO NÚMERO N

O cálculo do número N – Número de repetições de carga do eixo padrão é efetuado de acordo com as cargas por eixo da AASHTO e do Método do Corpo de Engenheiros, separadamente ano a ano, mediante a seguinte expressão:

$$N = 365 \text{ VMD} \times \text{FV, onde:}$$

N = nº de repetições da carga do eixo padrão de 8,2 t por ano considerado equivalente aos eixos dos veículos comerciais da frota circulante

VMD = Volume Médio Diário dos Veículos Comerciais por ano em um só sentido

FV = Fator de Veículo (Veículos Comerciais)

O cálculo do VMD neste caso é feito considerando-se as projeções ano a ano do VMD nos dois sentidos e a análise da composição percentual média da frota circulante no segmento.

O cálculo do FV da frota é feito considerando-se a composição média da frota comercial circulante e os coeficientes de equivalência de carga por eixo.

O tráfego considerado para efeito de projeto é o da faixa mais solicitada. Na falta de dados mais preciosos, na Tabela 18, são fornecidas as seguintes indicações quanto as porcentagens de veículos comerciais (em relação ao tráfego comercial nos dois sentidos) na faixa de trânsito tomada para o projeto.

**Tabela 18 - Estimativa de percentual de veículos na faixa de projeto**

Número de faixas de tráfego (2sentidos)	% de veículos comerciais na faixa de projeto
2	50
4	35 a 48
6 ou mais	25 a 48

#### 4.5.4 EXEMPLO DE AVALIAÇÃO DAS SOLICITAÇÕES DE TRÁFEGO

O exemplo do capítulo 8 deste Manual ilustra um caso real de avaliação das solicitações de tráfego em uma rodovia federal no qual foram seguidas as etapas necessárias para o objeto a ser alcançado de acordo com o que foi exposto neste capítulo.

#### 4.6 AVALIAÇÃO GLOBAL

O objetivo principal do processo de seleção e projeto da Restauração é fornecer uma solução eficiente e que atenda as restrições técnicas e econômicas. Este objetivo não pode ser atingido sem a condução adequada da avaliação do pavimento e a determinação das causas e da intensidade de restauração.

Na avaliação de pavimentos, devem ser abordadas as informações referentes aos defeitos de superfície, irregularidade, segurança, condição estrutural e tráfego. As informações deve ser condensadas no intuito de auxiliar o projetista na determinação das causas da deterioração, no desenvolvimento de alternativas de restauração e na informação da condição do pavimento para a gerência de pavimentos.

O projeto de restauração de pavimentos é uma tarefa bastante complexa e requer mais cuidados do que a concepção de pavimentos novos. A dimensão da obra determina a quantia de recursos e o tempo que podem ser dispendidos na avaliação do pavimento. A ruptura prematura de diversas obras de restauração pode ser resultado de avaliações inadequadas do pavimento.

A avaliação do pavimento e o diagnóstico da situação existente requerem a coleta de uma quantidade substancial de dados sobre o pavimento. Estes dados podem ser divididos nas seguintes categorias principais:

- a) condição do pavimento da pista de rolamento;
- b) condição do acostamento;
- c) dados de projeto original do pavimento;
- d) propriedades dos materiais e do solo;
- e) volumes e cargas de tráfego;
- f) condições climáticas;

- g) condições de drenagem;
- h) fatores geométricos;
- i) aspectos de segurança (acidentes);
- j) dados históricos de conservação;
- k) outros fatores.

Os dados a serem coletados também dependem das alternativas de a serem consideradas. Por exemplo, se a reciclagem de uma camada asfáltica for adotada, é necessário obter amostras do pavimento existente e efetuar uma análise da mistura para determinar as proporções e características dos materiais a serem reaproveitados.

- **Procedimentos Sistemáticos de Avaliação**

A definição dos dados que devem ser coletados deverá seguir um processo de coleta de dados deve seguir um procedimento sistemático e seqüencial, de maneira que os custos de avaliação e o tempo despendido sejam mínimos.

A Tabela 19 apresenta uma rotina de procedimentos que pode ser seguida para a coleta e avaliação de pavimentos. Cada órgão rodoviário deve desenvolver procedimentos padronizados e manuais para avaliação de pavimentos, que sejam compatíveis com as especificidades locais e os equipamentos disponíveis.

Os dados coletados devem ser cuidadosamente avaliados e os resultados sumariados de uma maneira sistematizada. A Tabela 20 apresenta uma listagem com diversos fatores que devem ser avaliados e questões específicas que devem ser respondidas para uma adequada avaliação do pavimento.

Entre estes fatores, a avaliação estrutural é a mais importante, porque se houver uma deficiência estrutural, a única estratégia lógica de restauração é acrescentar a capacidade estrutural do pavimento, por meio de reforço com camada asfáltica (recapeamento), reciclagem ou reconstrução.

Os órgãos rodoviários podem considerar esta lista de itens e questões e adicionar ou retirar alguns itens. Os órgãos devem avaliar itens diferentes, dependendo da classe ou tráfego da rodovia.

**Tabela 19 - Etapas recomendadas para a coleta e avaliação dos dados do pavimento****ETAPA 1: COLETA DE DADOS NO ESCRITÓRIO**

Devem ser coletados os seguintes dados: localização, ano de construção, dados de projeto, propriedades dos materiais disponíveis e do subleito (relatórios e inventários anteriores), dados de tráfego, clima e dados de construção (“as built”). Devem ser obtidas informações sobre o desempenho do pavimento (Sistema de Gerência de Pavimentos).

**ETAPA 2: PRIMEIRO INVENTÁRIO DE CAMPO**

Devem ser coletados os seguintes dados: defeitos de superfície, condições de drenagem, conforto ao rolamento, opções de controle de tráfego e aspectos de segurança.

**ETAPA 3: PRIMEIRA AVALIAÇÃO DOS DADOS COLETADOS**

Devem ser avaliados os seguintes dados: estimativa da solicitação do tráfego (número N); análise dos tipos, severidades e causas dos defeitos e a necessidade de coleta adicional de dados. Neste estágio deve ser desenvolvida uma lista de alternativas de Restauração possíveis para auxiliar na avaliação da necessidade de dados adicionais.

**ETAPA 4: SEGUNDO INVENTÁRIO DE CAMPO**

Devem ser coletados os seguintes dados: sondagem e amostragem de materiais, ensaios de deflexão, irregularidade longitudinal e resistência à derrapagem.

**ETAPA 5: ENSAIOS EM LABORATÓRIO**

Devem ser ensaiados os materiais quanto a: resistência, índice de vazios, densidade, granulometria e outras características.

**ETAPA 6: SEGUNDA AVALIAÇÃO DOS DADOS COLETADOS**

Deve ser verificado se dados adicionais são necessários para completar o processo de avaliação.

**ETAPA 7: COLETA FINAL DOS DADOS NO CAMPO E NO ESCRITÓRIO****ETAPA 8: AVALIAÇÃO FINAL DO PAVIMENTO**

**Tabela 20 - Lista de verificação do processo de avaliação**

<p><b>1 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL</b></p> <p>Incidência de defeitos relacionados ao carregamento: Baixa ou alta O pavimento atual tem capacidade estrutural de suportar a solicitação de tráfego prevista no projeto ? Sim ou não</p>
<p><b>2 AVALIAÇÃO FUNCIONAL</b></p> <p>Valor de Serventia Atual (VSA) ou Irregularidade: Muito bom, Bom, Razoável, Ruim ou Muito ruim Valor da irregularidade: _____ Valor de serventia atual: _____ Resistência à derrapagem: Satisfatório, Questionável ou Não satisfatório Severidade dos afundamentos nas trilhas de roda: Baixa, Média ou Alta</p>
<p><b>3 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA CONDIÇÃO</b></p> <p>A condição do pavimento varia sistematicamente ao longo da rodovia ? Sim ou não A condição do pavimento varia entre faixas de rolamento ? Sim ou não Existem regiões pontos localizados em condição muito ruim ? Sim ou não</p>
<p><b>4 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS CLIMÁTICOS</b></p> <p>Quanto à umidade: I - Úmido durante todo o ano II - Úmido em certas estações III - Muito pouco úmido Quanto à temperatura:   A - Frio B - Temperado C - Quente D - Muito quente Severidade dos defeitos provocados ou acelerados pela umidade: Baixa, Média ou Alta Descreva ( arrancamentos, bombeamentos, trincas de retração): _____</p> <p>Qualidade da drenagem da base: Muito bom, Bom, Razoável, Ruim ou Muito ruim Qualidade da drenagem do subleito: Muito bom, Bom, Razoável, Ruim ou Muito ruim Capacidade de drenagem do revestimento: Aceitável ou necessita melhoramentos Descreva: _____</p>

**Tabela 20- Lista de verificação do processo de avaliação  
(continuação)**

<p><b>5 AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS DO PAVIMENTO</b></p> <p>Revestimento: Bom estado ou degradado Descreva: _____</p> <p>Base: Bom estado ou degradada Descreva: _____</p> <p>Sub-base: Bom estado ou degradada Descreva: _____</p>
<p><b>6 AVALIAÇÃO DO SOLO DE FUNDAÇÃO</b></p> <p>Capacidade estrutural: Baixo, Médio ou Alto</p> <p>Suscetibilidade à saturação pela umidade (variação de volume): Baixo, Médio ou Alto</p>
<p><b>7 AVALIAÇÃO DO HISTÓRICO DE CONSERVAÇÃO</b></p> <p>Demanda histórica por conservação Baixa, Normal ou Elevada</p> <p>A falta de conservação contribuiu para a deterioração? Sim ou não Descreva: _____</p>
<p><b>8 AVALIAÇÃO DA TAXA DE DETERIORAÇÃO</b></p> <p>Estimativa após um período longo da abertura ao tráfego Baixa, Média ou Alta</p> <p>Estimativa após um prazo curto (2 a 3 anos) da abertura do tráfego Baixa, Média ou Alta</p>
<p><b>9 CONTROLE DO TRÁFEGO DURANTE A OBRA</b></p> <p>Existem desvios disponíveis para a interrupção da estrada? Sim ou não</p> <p>A obra deve ser realizada sob tráfego? Sim ou não</p> <p>A obra deve ser construída fora de horários de pico? Descreva: _____</p>

**Tabela 20 - Lista de verificação do processo de avaliação  
(conclusão)**

<p><b>10 FATORES GEOMÉTRICOS E DE SEGURANÇA</b></p> <p>Capacidade atual da rodovia: Adequada ou inadequada</p> <p>Capacidade futura da rodovia: Adequada ou inadequada</p> <p>Necessidade de novas faixas de tráfego no período do projeto: Sim ou não</p> <p>Necessidade atual de alargamento das faixas de tráfego: Sim ou não</p> <p>Liste os locais com alta incidência de acidentes: _____</p> <p>Problemas de sinalização ou visibilidade: _____</p> <p>Problemas de altura disponível: _____</p> <p><b>11 CARREGAMENTO DO TRÁFEGO</b></p> <p>Tráfego médio diário anual: _____</p> <p>Percentual de caminhões: _____</p> <p>Número de repetições de carga padrão no período de projeto: _____</p> <p>Número atual de repetições: _____</p> <p><b>12 ACOSTAMENTOS</b></p> <p>Condição geral: Boa, razoável ou ruim</p> <p>Deterioração em áreas localizadas: Sim ou não</p>
---

Os dados coletados são fundamentais para a avaliação e o projeto da Restauração devido aos seguintes fatores:

- a) fornecem informações qualitativas para determinação das causas da deterioração e para o desenvolvimento de alternativas apropriadas no reparo do defeito e na prevenção da sua recorrência;
- b) fornecem informações quantitativas para estimativa de quantidades dos serviços de Restauração (mão-de-obra, materiais, etc.), dimensionamento da alternativa de Restauração (espessura de reforço), avaliação do estágio de deterioração e das conseqüências de postergar a Restauração e ainda executar avaliação econômica de alternativas de Restauração.

Na avaliação do pavimento, assim como no projeto de Restauração, o objetivo do projetista é a economia. Portanto, os recursos para coleta de dados devem ser utilizados de maneira eficiente para que as informações sejam suficientes para o projeto de alternativas de Restauração viáveis técnica e economicamente.

- **Interpretação dos Resultados**

De posse de todos os elementos angariados durante a avaliação do pavimento, deve-se procurar fazer uma análise global, com vistas à definição de segmentos que apresentem um comportamento homogêneo, cálculo dos valores característicos e diagnóstico da situação existente.

- **Definição de Segmentos Homogêneos**

A análise poderá ser efetivada de forma mais consistente se for desenvolvida sobre um gráfico que contenha o maior número possível de informações e capaz de permitir o vislumbre espectral e a integração sintética de todos os elementos obtidos.

Os parâmetros que serão considerados para a divisão em termos de homogeneidade, serão aqueles que mais interessam para o desempenho do pavimento existente e para a eficácia de medidas de Restauração (e/ou Reabilitação), entre as quais: estaqueamento ou quilometragem, perfil de deflexões e raios de curvatura, flechas nas trilhas de roda, módulos elásticos, constituição do pavimento existente, defeitos ocorrentes, irregularidade longitudinal e tráfego solicitante.

A título ilustrativo e lembrando que cada obra demanda um gráfico particular, capaz de atender suas particularidades, apresenta-se na Figura 30 um modelo utilizado na norma DNER- PRO 269/94.

A definição dos segmentos homogêneos pode ser feita normalmente em bases subjetivas, valendo muito a experiência e o bom senso do projetista. Os valores individuais dos parâmetros de avaliação são plotados nos gráficos e, a partir de suas integrações gráficas, se estabelece o desenvolvimento longitudinal de cada parâmetro. Dada as limitações de ordem construtiva, pouco recomendável se torna promover o parcelamento excessivo, traduzido por segmentos de curtas extensões. Por outro lado, é aconselhável que não sejam tomados segmentos homogêneos com extensão superior a 5 km.

O seguinte processo de diferenças acumuladas da AASHTO a ser aplicado aos resultados dos diversos parâmetros selecionados.

O método das diferenças acumuladas consiste na seguinte seqüência de cálculo:

- Calcula-se o valor médio para toda a rodovia do parâmetro a ser analisado (a deflexão Benkelman é um dos parâmetros mais usados);
- Calcula-se a diferença entre o valor pontual e o valor médio;
- Calcula-se os valores acumulados das diferenças;
- Plota-se um gráfico onde as abcissas são as distâncias e as ordenadas, os valores acumulados das diferenças.

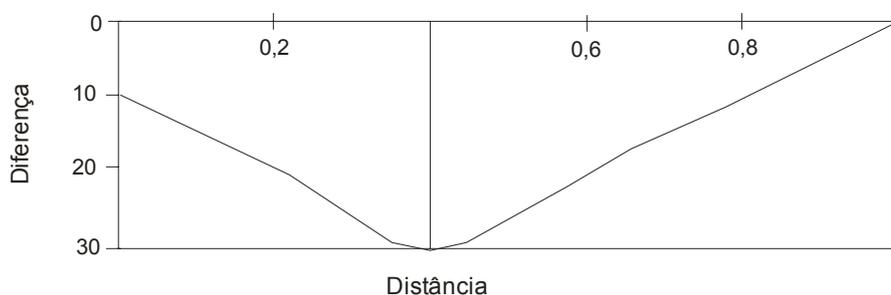
A variação do coeficiente angular da curva assim obtida indica uma mudança do comportamento médio de um determinado segmento para outro, caracterizando matematicamente, as extremidades dos segmentos homogêneos.

O exemplo a seguir organizado para um parâmetro médio de  $\bar{X} = 80$  ilustra o processo e está focado nas Tabela 21 e Figura 29:

**Tabela 21 - Métodos das diferenças acumuladas**

DISTÂNCIA	PARÂMETRO	VALOR MÉDIO	DIF. ACUMULADA
0	70	-10	-10
0,2	7	-10	-20
0,4	70	-10	-30
0,6	90	10	-20
0,8	90	10	-10
1	90	10	0

**Figura 29 - Valores acumulados das diferenças**



Verifica-se, pelo gráfico acima, que o ponto de distância 0,4 é um limite de dois segmentos de comportamento distinto. Verifica-se, também, que os segmentos entre os pontos de distância 0 ao 0,4 e 0,4 ao 0,8 possuem comportamento semelhante do ponto de vista do parâmetro analisado.

Cabe ressaltar que as características do tráfego, estrutura e idade das últimas restaurações são fatores significativos e relevantes para a definição dos segmentos homogêneos.

#### • Cálculo de Valores Característicos

Definidos os segmentos homogêneos, deverão ser calculados todos os valores característicos que os representam e que são utilizados na definição das soluções.

Nota: a Figura 30, apresentada a seguir contém o modelo de gráfico utilizado para a divisão de um trecho em segmentos homogêneos, conforme o constante nas Normas PRO-10/79 – Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento “A” e PRO-11/79 - Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento “B”.



- **Diagnóstico da Situação Existente**

O diagnóstico da situação existente constitui o fechamento da avaliação do pavimento, sendo uma etapa que requer extrema atenção do projetista, que deverá fazer uso de toda a sua percepção, experiência e bom senso. Muitas vezes os elementos angariados na avaliação são consistentes, porém, uma interpretação inadequada pode levar a um erro de diagnóstico.

Não há uma receita ou regra fixa para a elaboração de um correto diagnóstico. Como na medicina, o paciente (pavimento) deve ser cuidadosamente examinado pelo médico (projetista), o qual interpreta todos os resultados de exames (ensaios, levantamentos) e de sua análise tátil-visual (inventário de superfície, auscultação defletométrica), para poder diagnosticar as causas da doença existente (falhas estruturais e/ou funcionais).

Devem fazer parte do diagnóstico indicações claras sobre as causas das falhas existentes e orientações para a concepção das soluções de e/ou Reabilitação. Por exemplo:

"A estrutura existente sofre notoriamente um avançado estágio do fenômeno de fadiga, atestado pela expressiva área afetada por trincas interligadas de classe 2 e 3. As elevadas deflexões existentes são compatíveis com o padrão de trincas observado e com os baixos valores modulares avaliados para a base granular. A solução de restauração poderá envolver a reciclagem do revestimento existente, associada à recompactação ou substituição da base granular excessivamente resiliente."

## **5 - REFORÇO DOS PAVIMENTOS**



## 5 REFORÇO DOS PAVIMENTOS

### 5.1 ABORDAGENS DO PROJETO

Uma grande variedade de métodos e procedimentos para dimensionamento de reforços de pavimentos asfálticos foram desenvolvidos e são utilizados por vários órgãos rodoviários. Porém, ainda não existe até o momento um consenso sobre a metodologia mais adequada. De maneira geral, o procedimento para o projeto de um reforço é similar ao do projeto de um novo pavimento, exceto que considera a condição atual ou a vida remanescente do pavimento existente.

Seja qual for o método utilizado, é importante avaliar as condições do pavimento existente e subdividi-lo em um ou mais segmentos homogêneos para análise, baseadas na idade, tráfego, condições do pavimento e sua estrutura.

Historicamente, até 1940, a abordagem para dimensionamento do reforço de um pavimento baseava-se na experiência regional e no critério da resistência (deformações permanentes). A maioria dos órgãos utilizava-se da sensibilidade de engenheiros experientes para determinar o tipo e espessura do reforço de um pavimento. A partir da década de 40, os métodos baseados em ensaios defletométricos (não destrutivos) obtiveram aceitação generalizada e foram gradualmente disseminados.

Em meados dos anos 70, com o desenvolvimento de equipamentos e programas capazes de fornecer informações sobre as características elásticas dos materiais constituintes dos pavimentos, começaram a ser introduzidos os métodos mecânicos ou analíticos, que fundamentam-se na análise de tensões e deformações das camadas dos pavimentos.

Já a partir dos anos 80, com o desenvolvimento dos sistemas de gerência de pavimentos, começaram a surgir metodologias de reforço de pavimentos que se fundamentam em modelos de previsão de desempenho e que procuram analisar diversas estratégias de intervenção com vistas a minimizar o custo de ciclo de vida do pavimento.

Alguns autores classificam os métodos de dimensionamento de reforço de pavimentos rodoviários na chamada “divisão clássica”, que tem perdido importância devido a dificuldade de enquadramento dos métodos desenvolvidos mais recentemente. Por essa classificação, os métodos são divididos nos seguintes cinco grupos:

- a) extensão dos métodos utilizados no dimensionamento de pavimentos novos;
- b) métodos empíricos baseados em avaliação do comprometimento estrutural, geralmente avaliada em termos de deflexão recuperável máxima medida na superfície do pavimento;
- c) métodos fundamentados na medição da deflexão recuperável máxima e que utilizam procedimentos analíticos ou mecânicos como parte do cálculo;
- d) métodos baseados numa abordagem estrutural analítica mais completa, que permite levar em conta as tensões e deformações nas diversas camadas do pavimento; e

e) métodos apoiados em modelos de previsão de desempenho.

Como, porém, um método de dimensionamento pode ser simultaneamente incluído em mais de uma dessas cinco categorias, simultaneamente, é de se suspeitar que esta divisão não seja a mais adequada para fins práticos, visto não ser por si própria muito esclarecedora.

Assim sendo, a tendência mais recente tem sido a de se classificar os enfoques de dimensionamento de reforço nas seguintes formas:

**a) Abordagem empírica**

- Análise defletométrica.
- Análise da deficiência estrutural

**b) Abordagem mecanístico-empírica**

A seguir serão comentadas com mais detalhes cada uma das formas de abordagem de dimensionamento de pavimentos.

## **5.2 ANÁLISE DEFLETOMÉTRICA**

Os procedimentos da análise defletométrica baseiam-se no estabelecimento de uma relação entre a duração da vida do pavimento (ou número de solicitações do tráfego) e os valores de deflexão máxima que usualmente são obtidos sob carregamento. A espessura do reforço deve ser necessária para reduzir a deflexão recuperável a um valor admissível, que corresponde a um comportamento comprovadamente satisfatório, considerando o tráfego previsto.

O conceito básico deste enfoque é que, quanto maior for o valor de deflexão recuperável, maior é o comprometimento elástico das camadas do pavimento e/ou do subleito. Desta maneira, uma camada asfáltica adicional deve ser utilizada para reforçar a estrutura do pavimento e obter uma adequada redução da deflexão.

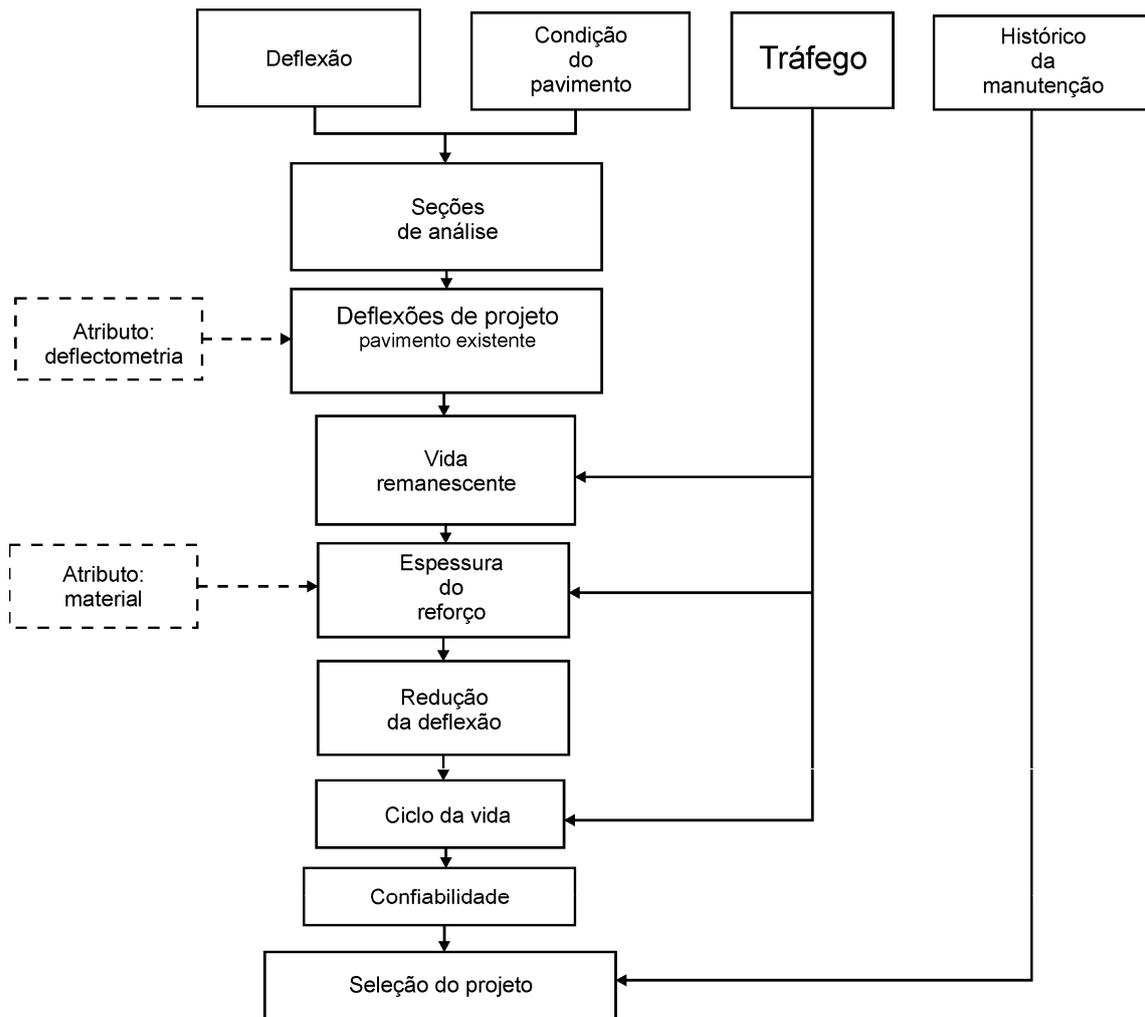
O procedimento não deve ser confundido com a estimativa das propriedades dos materiais "in situ" através de medidas defletométricas, utilizadas tanto na análise da deficiência estrutural ou na abordagem mecanístico-empírica.

Na análise defletométrica também deve ser efetuado o diagnóstico das condições do pavimento para o estabelecimento das necessidades de restauração, da identificação dos segmentos homogêneos e do conhecimento de outras considerações especiais que poderão influenciar no projeto do reforço.

A Figura 31 mostra esquematicamente os parâmetros considerados na análise defletométrica. Os parâmetros fundamentais para o dimensionamento são as medidas de deflexão (ensaios não destrutivos) e o conhecimento da condição do pavimento e do tráfego.

A grande vantagem deste enfoque é que a deflexão na superfície do pavimento é facilmente determinada e as relações entre espessura de reforço e redução da deflexão são bastante conhecidas devido a diversos estudos efetuados por organismos como: Asphalt Institute, California Department of Transportation, U.S. Army Corps of Engineers Laboratoire Central de Ponts et Chaussée e Transportation Research Laboratory. Cada um destes órgãos tem seus próprios procedimentos, porém os principais componentes são muito similares.

**Figura 31 - Fluxograma da análise defletométrica**

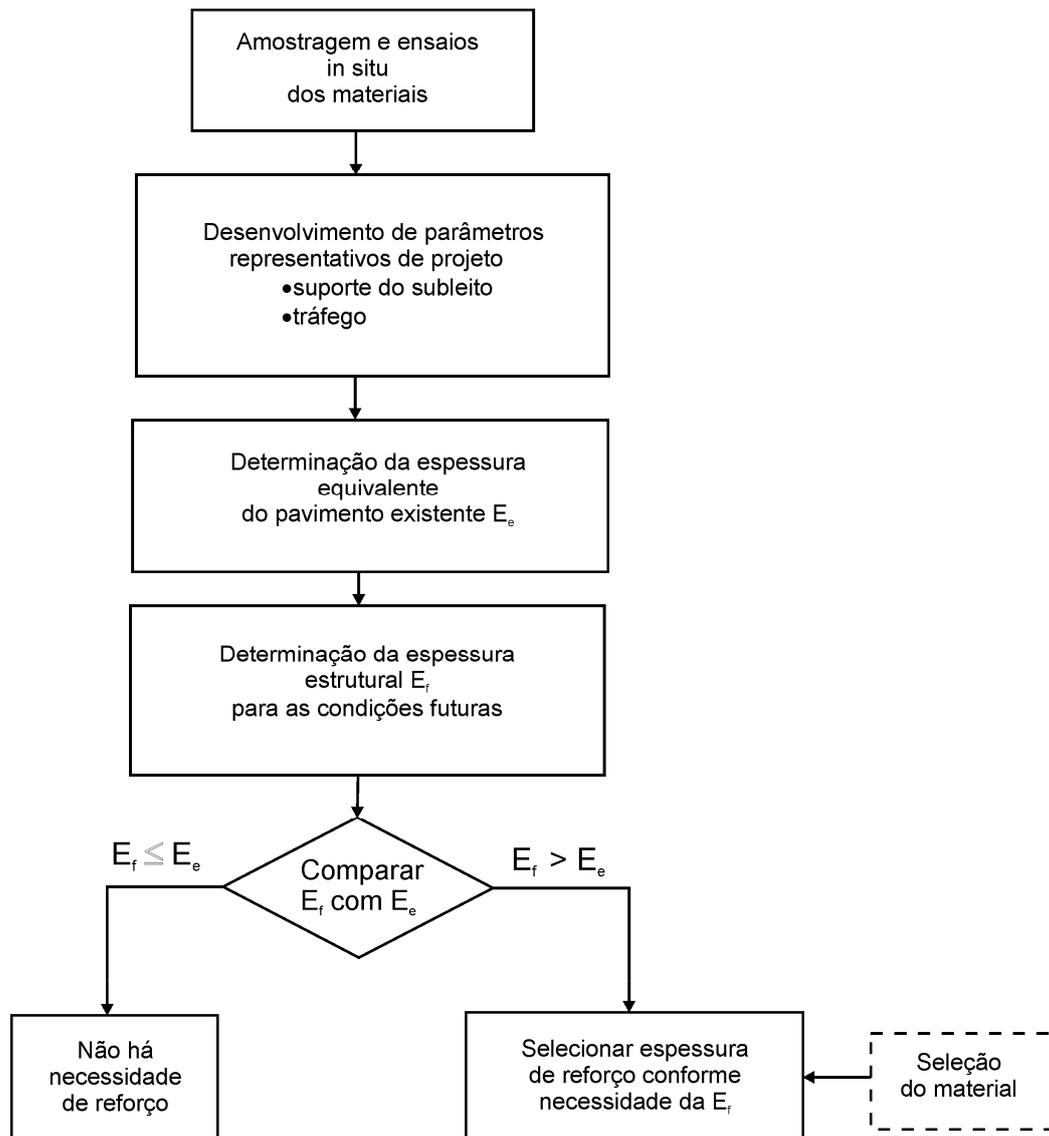


### 5.3 ANÁLISE DA DEFICIÊNCIA ESTRUTURAL

A análise da deficiência estrutural, também conhecida como metodologia da espessura equivalente, tem seu conceito básico fundamentado na consideração de que a espessura do reforço deve ser a diferença entre a espessura total requerida para o pavimento e a “espessura equivalente ou efetiva” determinada para o pavimento existente. Essa espessura equivalente ou efetiva do pavimento existente é determinada por meio dos fatores de equivalência estrutural adotados em função do tipo e qualidade dos materiais utilizados na estrutura do pavimento.

O procedimento considera que a degradação do pavimento provoca a redução da vida de serviço, ou seja, que sua espessura efetiva vai diminuindo a medida que sua vida de serviço avança. Como a espessura efetiva ou equivalente baseia-se no tipo, condição e espessura de cada camada componente do pavimento, a metodologia é também denominada como a da análise das camadas. As etapas que compõem a análise estrutural são apresentadas na Figura 32.

**Figura 32 - Fluxograma da análise da deficiência estrutural e/ou funcional**



Convém salientar que alguns métodos também consideram a redução da funcionalidade do pavimento ao longo da vida de serviço (DNER PRO-159/85). Nestes casos, são considerados parâmetros como a perda de serventia ( $\Delta$ PSI) ou acréscimo da irregularidade ( $\Delta$ QI ou  $\Delta$ IRI), avaliado pelos Métodos DNIT 009/2003 PRO e DNER PRO 182/94.

Vários organismos internacionais como o Asphalt Institute, U.S. Army Corps of Engineers e AASHTO possuem métodos de dimensionamento que baseiam-se no enfoque de deficiência estrutural e/ou funcional.

Este enfoque pode ser representado pela seguinte equação do Método da AASHTO:

$$SN_{OL} = SN_y - F_{RL} ( SN_{XEFF} )$$

onde:

$SN_{OL}$  = número estrutural ou espessura do reforço necessário para o período de projeto

$SN_y$  = número estrutural ou espessura total para suportar o tráfego projetado para determinadas condições do subleito

$F_{RL}$  = fator de vida remanescente, que considera o nível de deterioração do pavimento existente

$SN_{XEFF}$  = número estrutural efetivo ou espessura equivalente do pavimento existente

A vantagem da análise da deficiência estrutural é que o procedimento de cálculo é bastante similar ao do dimensionamento de pavimentos novos. A maior desvantagem deste enfoque é sem dúvida a definição dos coeficientes estruturais das camadas, pois, como a condição do pavimento é bastante variável, presume-se que os coeficientes estruturais das camadas também devam variar enormemente e baseiam-se quase que exclusivamente em critérios empíricos.

## 5.4 ABORDAGEM MECANÍSTICO-EMPÍRICA

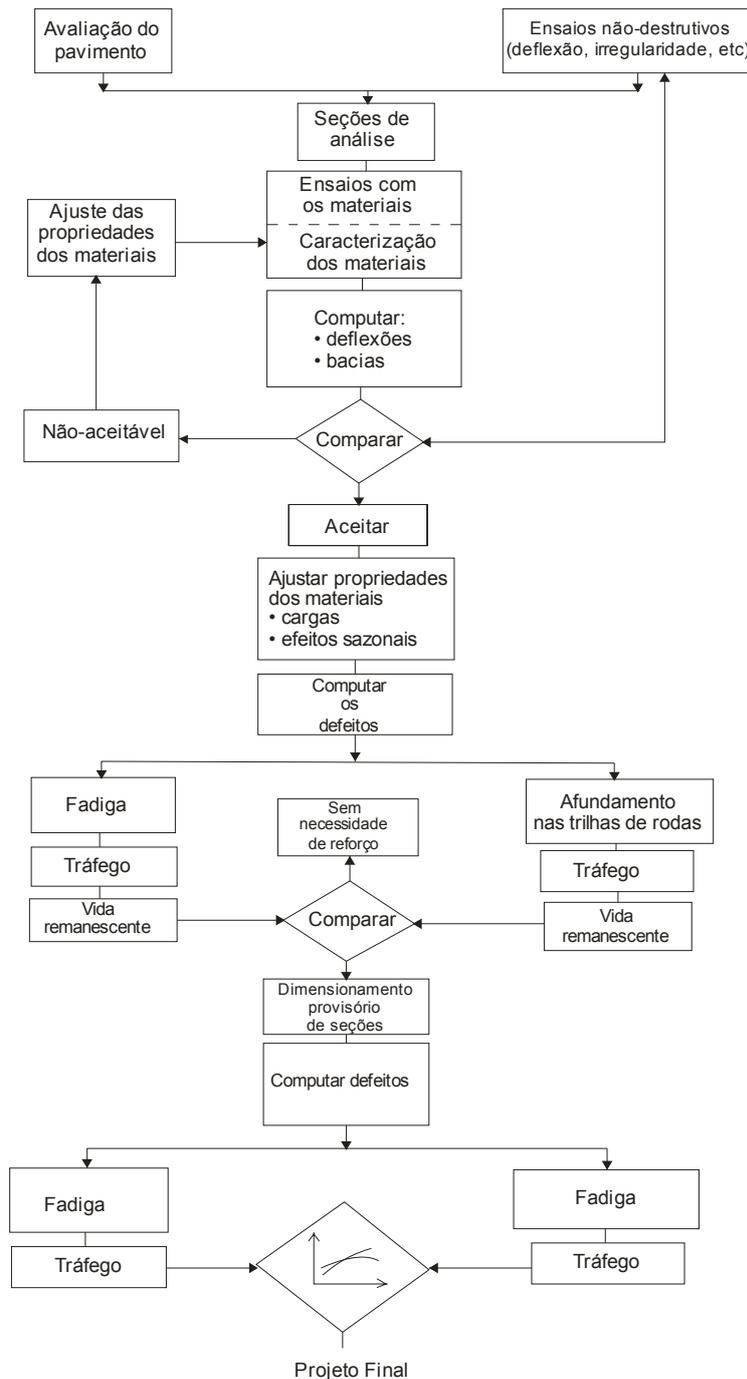
Como resultado de intensas pesquisas conduzidas na década de 80 e do desenvolvimento da Mecânica dos Pavimentos, os métodos de dimensionamento de reforços de pavimentos baseados em critérios mecanísticos ou racionais vêm sendo crescentemente utilizados. Contribuíram para isto os avanços alcançados na compreensão e operacionalização dos ensaios dinâmicos, na avaliação dos módulos de elasticidade “in situ” dos materiais por retroanálise de deformadas e nas análises das tensões com o emprego de programas computacionais.

### 5.4.1 FINALIDADES

O emprego de análises mecanísticas no projeto de reforços apresenta a vantagem de proporcionar ao projetista condições de trabalhar com parâmetros específicos da estrutura em estudo, apresentando maior flexibilidade em relação aos métodos empíricos. Permite ainda a interpretação racional do comportamento elástico dos pavimentos, com as mais variadas composições de materiais de reforço e quando sujeitos a ação dos diversos tipos de carregamentos.

A análise mecanística é um poderoso ferramental para se efetuar um dimensionamento adequado, apesar de se enfrentar dificuldades que a colocam em risco, como a confiabilidade de dados, principalmente quanto às características elásticas dos materiais das camadas, e quanto a previsão da deterioração por alguns critérios empíricos de fadiga, além da interpretação correta dos resultados obtidos. Seu procedimento abrange as etapas apresentadas na Figura 33.

Figura 33 - Fluxograma do enfoque mecanístico-empírico



Esses métodos devem ser completados, contudo, por análises que permitam considerar-se, no dimensionamento, o problema do trincamento por fadiga das camadas asfálticas, nos pavimentos flexíveis, e das camadas cimentadas, nos pavimentos semi-rígidos. Para esse objetivo, o procedimento mais eficaz é a aplicação de modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico, em vista de seu maior campo de aplicação e por estarem embasados em propriedades mecânicas fundamentais dos solos e materiais de pavimentação.

Uma outra vantagem desses modelos, em relação àqueles puramente empíricos, é a possibilidade de se otimizar o dimensionamento da estrutura, tomando-se partido da capacidade de cada camada em resistir aos processos de deterioração provocados pelas

cargas do tráfego. Também no caso de projetos de reforço, o dimensionamento de recapeamentos asfálticos contra a reflexão de trincas e a consideração dos efeitos de camadas especiais intermediárias podem ser efetuados de forma confiável apenas por meio de modelos mecanístico-empíricos.

#### 5.4.2 CONCEITOS

Um modelo de previsão de desempenho é uma função que permite quantificar a redução do nível de serventia ou a geração de defeitos ao longo da vida de serviço do pavimento. Tal modelo é denominado “mecanístico-empírico” quando é constituído por três partes:

- a) um modelo estrutural para cálculo das respostas induzidas pelas cargas de roda em movimento nas camadas do pavimento, na forma de tensões, deformações ou deflexões elásticas que estejam relacionadas ao surgimento ou à propagação de defeitos na estrutura;
- b) funções de transferência, capazes de relacionar as respostas da estrutura às cargas do tráfego, à geração e propagação de defeitos. Além de atenderem a determinadas condições de contorno, exigidas pelo problema, essas funções deverão basear-se em teorias, empiricamente validadas, que descrevam o mecanismo com que a deterioração se processa;
- c) fatores ou funções de calibração, que ajustam as previsões das Funções de Transferência de modo a se produzir dados de uma determinada base empírica. São responsáveis, portanto, pela consideração de parâmetros que não puderam ser explicitados, seja no modelo estrutural ou nas Funções de Transferência, tais como: clima, características específicas do tráfego atuante, particularidades dos materiais e de sua variabilidade.

Um aspecto que assume especial relevância quando da aplicação de modelos mecanístico-empíricos, tanto no projeto de pavimentos novos como no de restauração, é a caracterização adequada do comportamento tensão-deformação dos materiais sob as cargas transientes dos veículos. O módulo de elasticidade ou Young se reveste de duas definições nesse contexto, a saber:

- a) Módulo de Deformação Resiliente ( $M_R$ ) - determinado em laboratório por meio de ensaios de cargas repetidas, com duração de carga da ordem de 0,10 s e tempo de repouso de 0,9 s. Utiliza toda a deformação recuperável no seu cálculo, embutindo, portanto, as parcelas elástica instantânea e viscolástica, geradas pelo pulso de carga de 0,1 s de duração;
- b) Módulo de Elasticidade Efetivo “in situ” ( $E_{ef}$ ) - é o módulo determinado por retroanálise das bacias de deflexões lidas através de equipamentos para ensaios não destrutivos.

Enquanto  $M_R$  se refere às condições de compactação e de solicitação do ensaio de laboratório,  $E_{ef}$  reflete ou sintetiza o estado de tensões, a compactação e o modo de solicitação a que a camada é submetida pelas cargas dos veículos em movimento. Não existem, portanto, correlações universais entre esses dois parâmetros, embora possa

estabelecer-se comparações em casos particulares. Tais comparações são importantes, visto que, no projeto de pavimentos novos, pode-se dispor apenas de  $M_R$ , enquanto nos projetos de restauração, apenas  $E_{ef}$  pode estar disponível, de modo geral.

### 5.4.3 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

A “condição estrutural” de um pavimento pode ser definida como um “retrato” composto pelos seguintes elementos:

- a) a capacidade apresentada pelas camadas de solos e de materiais granulares de resistir às deformações elásticas e plásticas induzidas pelas cargas do tráfego; e
- b) a integridade estrutural das camadas asfálticas e cimentadas, relacionadas ao grau e extensão do fissuramento existente.

Para se avaliar essa condição, os seguintes procedimentos alternativos são recomendáveis.

- a) Procedimento I - Levantamentos defletométricos com viga Benkelman

O pavimento é avaliado continuamente por meio de levantamentos defletométricos com a viga Benkelman, medindo-se a deflexão máxima ( $D_o$ ) e o raio de curvatura ( $R$ ). Esses são os únicos parâmetros confiáveis que podem ser medidos com a viga. Como eles são insuficientes para se determinar os módulos de elasticidade das camadas, ainda mais levando-se em conta o fato de se estar diante de um carregamento quase-estático, devem ser coletadas amostras de alguns ou de todos os materiais, em alguns subtrechos homogêneos, para determinação de  $M_R$  em laboratório. Uma análise conjunta de todos esses parâmetros possibilitará efetuar-se análises de fadiga, já que a deformação máxima de tração sob um revestimento asfáltico ( $\varepsilon_t$ ) é função de:

$$\varepsilon_t = f(D_o, R, h_r, M_R)$$

onde  $h_r$ , é a espessura do revestimento e  $M_R$  é o módulo de resiliência do subleito;

- b) Procedimento II - Levantamentos com defletômetros dinâmicos

O pavimento é avaliado por meio de defletômetros dinâmicos, medindo-se os módulos de elasticidade efetivos ( $E_{ef}$ ) de cada camada. A retirada de amostras para determinação de  $M_R$  em laboratório ficaria restrita a poucos locais, com a finalidade única de ser um teste de verificação dos valores calculados para  $E_{ef}$ , a fim de se evitar erros grosseiros no processo de retroanálise das barras de deflexões, como é recomendada no Guia da AASHTO.

A determinação dos módulos de elasticidade das camadas é feita por um processo de “retroanálise”, onde se utiliza um modelo estrutural para o pavimento, como a teoria de Camadas Elásticas ou o Método dos Elementos Finitos, e se encontra a combinação de módulos que faz com que o modelo reproduza, da melhor forma possível, a bacia de deflexões lida pelo FWD no campo.

Para tanto, devem ser conhecidas: a carga aplicada e as espessuras das camadas. Os coeficientes do Poisson são fixados em valores típicos para cada material, já que interferem pouco com a bacia de deflexões. Como não se dispõe de uma solução analítica “fechada” para o problema, a retroanálise deve ser feita por meio de ajustes iterativos, enquanto se tenta minimizar uma função erro, definida como a distância entre as bacias medidas e teórica.

Por mais bem executada que seja a retroanálise, raramente se ajustará a bacia teórica à bacia medida de forma perfeita, ou seja, com erro nulo em todos os geofones, pelas seguintes razões:

- a) existe um erro experimental. A precisão dos geofones é de 2 micra ( $0,2 \times 10^{-2}$  mm);
- b) existe uma certa distância entre modelo teórico e o pavimento real, e sempre haverá, por mais bem elaborado e complexo que seja o modelo.

Uma regra prática deve ser imposta, portanto, para se indicar o momento de interromper as iterações. Pode-se dizer que os resultados obtidos tendem a ser consistentes e estáveis quando o erro em cada um dos geofones for inferior a 1,5%.

Outro aspecto, também de natureza prática, diz respeito ao número máximo de parâmetros que podem ser determinados por meio de uma bacia com sete geofones, como é usual. Dificilmente determinar, confiavelmente, mais do que cinco parâmetros independentes, já levando-se em conta que, no caso de retroanálises não lineares, uma só bacia é insuficiente, devendo-se dispor de pelo menos duas, referentes a níveis de carga distintos.

#### **5.4.4 CÁLCULO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES**

Dentre os programas computacionais que permitem o cálculo de tensões, deformações e deslocamentos em estruturas de pavimentos destacam-se, pela sua maior utilização no Brasil, os seguintes:

- a) Programa FEPAVE - desenvolvido na Universidade da Califórnia (Berkeley), é baseado em técnicas de elementos finitos. A carga é aplicada através de uma área de contacto circular que simula uma roda simples equivalente. Permite análises com elasticidade não-linear, devendo o usuário, neste caso, fornecer as equações de resiliência dos materiais constituintes da estrutura.
- b) Programa ELSYM5: também desenvolvido na Universidade da Califórnia, o programa baseia-se na teoria da elasticidade, estendendo a teoria de Burmister ao caso de cinco camadas. Não permite análises não-lineares, obrigando o projetista a selecionar seu conjunto de valores modulares com critério, de forma a procurar contornar a questão da não-linearidade sem a introdução de erros na análise. No ELSYM5 trabalha-se até com 10 ( dez ) cargas de mesmo valor e mesma pressão de inflação, tornando o programa bastante apropriado para a análise do efeito de eixos compostos por roda múltiplas.

Uma série de modelos e programas de computador estão disponíveis para se calcular as tensões e deformações provocadas pelas cargas de roda em uma estrutura de pavimento. No que diz respeito à sua escolha e modo de utilização, as seguintes observações devem ser feitas:

- a) a teoria de camadas elásticas, onde cada camada é simulada por um meio elástico linear, homogêneo e isotrópico, é o modelo estrutural mais simples capaz de reproduzir as tensões e deformações tidas em pavimentos instrumentados. Modelos que incorporem a dependência dos módulos de elasticidade de solos e de materiais granulares em função do estado de tensões tem representado um aperfeiçoamento útil na prática. Outros modelos mais complexos, que incluem os efeitos de : anisotropia, trajetória de tensões efetivas no ensaio triaxial e viscoelasticidade têm encontrado aplicação prática em problemas específicos e ainda não puderam ser incorporados aos projetos rotineiros;
- b) os modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico estão calibrados para um determinado modelo estrutural, o qual compreende:
  - um processo para cálculo de tensões e deformações; e
  - uma forma de se considerar as propriedades elásticas dos materiais (módulos de resiliência, por exemplo).

Assim, esses modelos de previsão de desempenho são dependentes do modelo estrutural associado, não se podendo aplicá-los com outros modelos estruturais.

Finalmente, embora o aperfeiçoamento progressivo dos modelos estruturais seja importante para se elevar a confiabilidade dos modelos de previsão de desempenho mecanístico-empíricos, a situação atual é a de que as maiores incertezas se encontram na calibração experimental dos modelos. Assim, antes de se aplicar modelos deste tipo, é fundamental reavaliar-se os fatores de calibração utilizando-se os dados de desempenho locais ou regionais disponíveis.

#### **5.4.5 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO**

Um modelo de previsão de desempenho é chamado “empírico” quando se constitui de uma correlação direta entre alguns parâmetros relacionados ao desempenho do pavimento e a evolução dos defeitos ou queda da serventia. Os modelos do tipo “mecanístico-empírico” já foram comentados no item 5.4.

Em outra classificação, os modelos podem ser “determinísticos”, quando prevêm um único valor para a condição futura do pavimento, ou “probabilísticos”, quando fornecem as possibilidades de diversas condições. Em projetos, os modelos mais adequados são os determinísticos do tipo mecanístico-empírico, enquanto que, em Sistemas de Gerência de Pavimentos em nível de rede, os modelos probabilísticos do tipo empírico são preferíveis.

No caso de estruturas de pavimentos flexíveis, as respostas elásticas de maior interesse para a análise mecanística são, respectivamente:

- a) a deformação específica horizontal de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico ( $\varepsilon_t$ ), parâmetro este vinculado à vida da estrutura quanto à fadiga, e
- b) a deformação específica vertical de compressão no topo de subleito ( $\varepsilon_z$ ), associável ao acúmulo de deformações permanentes e à conseqüente de formação nas trilhas de roda.

A vinculação destas respostas elásticas ao número terminal de solicitações do eixo-padrão (critério de falha) pode ser obtida através de ensaios laboratoriais ou a partir da observação em serviço de pavimentos. No caso do uso de resultados derivados de ensaios laboratoriais é freqüente a introdução de um fator de ajuste às condições de campo, denominado “fator laboratório-campo”.

No caso específico de projetos de reforço em que o revestimento do pavimento existente esteja severamente trincado, deve-se considerar a reflexão de trincas para as camadas asfálticas de recapeamento.

Em termos de proteção contra fadiga dos revestimentos asfálticos, os modelos a serem aplicados deveriam ser capazes de identificar duas fases no processo de trincamento:

- a) o início do trincamento, quando o revestimento se encontra íntegro. Ao final desta fase, surgem as primeiras trincas de fadiga na superfície;
- b) a programação das trincas do revestimento, quando as trincas, originalmente isoladas, aumentam de comprimento e se interligam.

A previsão da duração da primeira fase pode ser feita por meio de modelos, segundo Pinto (1991), do tipo:

$$N_0 = k (1 / \varepsilon_t)^n \times f = N_{flab} \times f$$

onde:

$N_0$  = número de repetições da carga que produz a deformação máxima de tração  $\varepsilon_t$ , requerido para o surgimento das primeiras trincas de fadiga na superfície;

$f$  = fator laboratório-campo “shift factor”, responsável pelo ajuste das previsões da equação de fadiga de laboratório ( $N_{flab}$ ) para se reproduzir o que se observa no campo;

$k, n$  = constantes da equação de fadiga de laboratório.

A deformação de tração ( $\varepsilon_t$ ) pode ser calculada pela teoria de camadas elásticas. O fator de calibração  $f$  é responsável pela inclusão dos parâmetros que não puderam ser explicados pelo modelo, tais como as condições climáticas e características específicas do tráfego atuante.

Para segunda fase, deve-se estimar o número adicional de repetições de carga necessário ( $N$ ), para que seja atingida uma certa extensão do trincamento de superfície - TR (por exemplo, 30%).

O número total de repetições de carga, referente à percentagem de área trincada TR, é dado, portanto, por:

$$N (TR) = N_0 + \Delta N (TR)$$

A consideração das duas fases do trincamento é essencial para se evitar conclusões errôneas quando se compara o desempenho de seções de projeto alternativas. Assim, se duas seções com espessuras de revestimento asfáltico diferentes mas a deformação de tração ( $E_t$ ) na sua fibra interior é idêntica, a formação das primeiras trincas de fadiga será simultânea em ambas as seções, mas a seção mais espessa levará mais tempo para apresentar uma certa percentagem de área trincada, por ser a programação de trincas mais lenta no revestimento mais espesso.

#### 5.4.6 ANÁLISE TENSIONAL

A definição da estrutura de pavimento mais apropriada, a partir de uma análise mecanística, envolve a necessidade do estudo de um conjunto de estruturas, buscando-se por tentativas aquela que proporcione um melhor equilíbrio.

O problema pode ser melhor equacionado concebendo-se inicialmente um plano fatorial do estudo, no qual estabelecem-se variações entre os parâmetros de interesse para a análise ( valores modulares, no caso de se poder contar com materiais distintos ou formulações diferenciadas para misturas, e espessuras ).

No caso específico da aplicação de uma análise mecanística ao dimensionamento do reforço de um pavimento, a definição dos módulos da estrutura existente deve ser feita por técnicas de retroanálise sobre deformadas, conhecidas previamente as espessuras das camadas existentes superpõe-se o reforço, compondo-se o plano fatorial a partir de variações impostas às suas espessuras ou mesmo a valores modulares.

Cada uma das estruturas integrantes da matriz fatorial é submetida à análise tensional através do programa selecionado, determinando-se as respostas elásticas de interesse.

A seguir, calculam-se os números terminais de solicitações do eixo-padrão ( $N_f$ ), aplicando-se os critérios de falha admitidos como válidos. É usual para a análise de pavimentos flexíveis verificar a questão da fadiga do revestimento asfáltico, com base na deformação específica horizontal de tração na fibra inferior do revestimento, e o acúmulo de deformações permanentes ao nível do subleito.

Considerando-se as características das estruturas do plano fatorial, traçam-se curvas de variação do número terminal de solicitações ( $N_f$ ) em função das espessuras e/ou módulos resilientes.

A partir do parâmetro de tráfego expectável para a vida de projeto pré-definida, atua-se nas curvas de dimensionamento estabelecidas, por interpolação, buscando-se selecionar o conjunto de valores ( espessuras e/ou módulos ) que atende, simultaneamente, aos critérios de fadiga do revestimento e acúmulo de deformações permanentes.

## 5.5 MÉTODOS DE REFORÇO

Na descrição de metodologias mostradas a seguir, não se pretende aprofundar, nem ensinar passo a passo, como dimensionar uma estrutura de reforço de um pavimento. A forma de exposição dos métodos apenas pretende proporcionar ao técnico a compreensão geral do procedimento de dimensionamento. Aqueles que desejarem se dedicar como projetistas deverão sempre procurar as normas e as publicações especializadas dos diversos organismos rodoviários e, estudá-las, para obter completo domínio sobre o assunto.

Os Métodos normalizados pelo DNER são os seguintes:

- a) DNER-PRO 10/79 - Método A
- b) DNER-PRO 11/79 - Método B
- c) Método do Instituto do Asfalto
- d) DNER-PRO 249/94 -Método da Resiliência (TECNAPAV)

### 5.5.1 DNER-PRO 10/79 - MÉTODO A

O PRO-10/79 é um dos procedimentos normalizados pelo DNER para o dimensionamento de reforços. Seus princípios básicos derivaram do trabalho: “Análise das Condições de Deformabilidade de Reforços com Base na Experiência Californiana” (PEREIRA, A.M. - 1975). Neste trabalho o autor procede à adaptação do método de dimensionamento então adotado pela California Division of Highways (antiga CDH, atual CALTRANS), propondo entre outras inovações, soluções nomográficas que eliminavam a interatividade inerente ao método.

#### 5.5.1.1 PROCEDIMENTOS PRELIMINARES

Esta norma tem como principal objetivo estabelecer os procedimentos necessários para a avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis existentes, apontar as causas de suas deficiências e fornecer elementos para o cálculo do reforço necessário para um pavimento suportar por mais algum tempo a aplicação de cargas.

O método baseia-se na relação entre a grandeza das deflexões recuperáveis e o desempenho de pavimentos flexíveis. Segundo este método, a evolução das deflexões recuperáveis ao longo da vida de um pavimento pode se dar em três fases, como demonstrado na Figura 32, a saber:

- a) Fase de consolidação - a deflexão decresce devido a consolidação adicional provocada pela ação do tráfego;
- b) Fase elástica - a deflexão permanece com valores praticamente constantes;
- c) Fase de fadiga - caracteriza-se por um acelerado crescimento do valor da deflexão devido a perda de capacidade estrutural das camadas do pavimento

O estudo para a avaliação estrutural do pavimento existente e suas deficiências fornece uma idéia geral de sua constituição, das solicitações já suportadas, bem como as que irá suportar. Compreende os seguintes procedimentos preliminares:

**a) Levantamento histórico -**

- Data da entrega ao tráfego.
- Número N de projeto, tráfego atual e futuro do pavimento.
- Informações sobre o projeto.
- Características do subleito, e das camadas constituídas do pavimento.

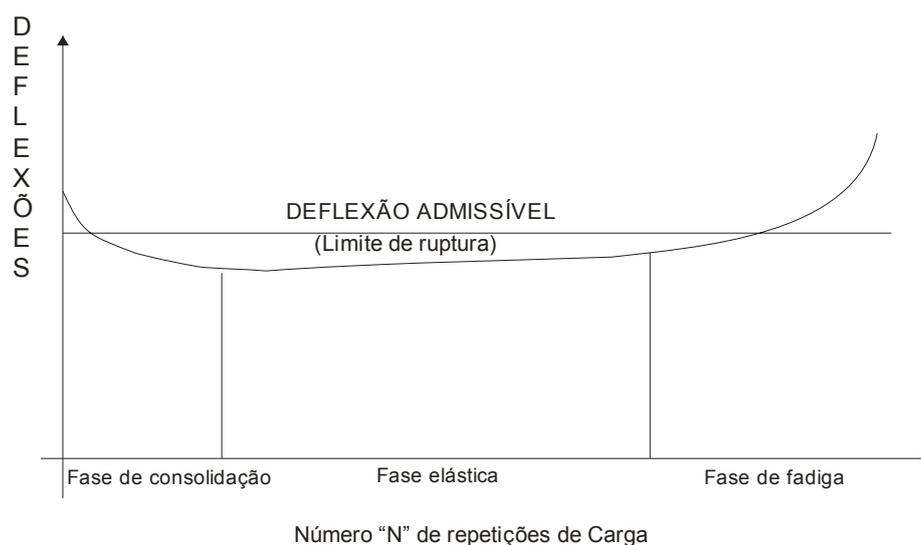
**b) Prospecção preliminar - poços de sondagem identificando:**

- Espessura das camadas do pavimento.
- Caracterização, umidades, densidades, compactação e CBR dos materiais granulares.
- Caracterização dos misturas betuminosas.

**c) Prospecção definitiva -**

- determinação das deflexões recuperáveis;
- inventários de superfície;
- sondagens de revestimento;
- sondagens complementares

**Figura 34 - Fases da vida de um pavimento (número N)**



Os resultados dos estudos defletométricos de superfície e das prospecções realizadas são representados graficamente objetivando facilitar a divisão do trecho em segmentos homogêneos.

Após definidos os segmentos homogêneos calcula-se para cada um destes segmentos, a deflexão média ( $\bar{x}$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ), procedendo a eliminação dos valores fora do intervalo,  $\bar{x} + z\sigma$ , onde  $z$  é estimado em função de "n", mediante o critério constante em tabela apresentada na norma.

Após esse procedimento, define-se então a chamada deflexão característica  $D_c$  como a média dos valores contidos no intervalo de aceitação, somada ao desvio padrão das medidas;  $D_c = \bar{x} + \sigma$ .

O método recomenda ainda que para chegar a deflexão de projeto, deve-se ajustar a deflexão característica por um fator de ponderação sazonal ( $F_s$ ), que é função da estação na qual foram realizados os ensaios e do tipo de solo de fundação do pavimento.

Cumprе ressaltar que a norma considera deflexões que correspondam a eixos de carga de 4,8 tf, enquanto que as medições são normalmente executadas com carga de 8,2 tf. Assim sendo, deverão ser efetuadas conversões, conforme será explicado mais adiante.

#### 5.5.1.2 DIRETRIZES DE PROJETO

A norma faz também considerações sobre os critérios para fixação de diretrizes a serem consideradas no projeto, que é baseado tanto nos resultados do inventário do estado do pavimento, conforme a DNIT 006/2003-PRO, bem como nos da análise defletométrica. A Tabela 22 apresenta o critério para o estabelecimento de diretrizes de projeto.

Aos símbolos incluídos na tabela que resume os critérios para a fixação de diretrizes de projeto, correspondem os seguintes significados:

IGG = Índice de Gravidade Global (DNIT 006/2003-PRO);

F = Valor médio das flechas nas trilhas de roda;

AP% = porcentagem de afundamentos plásticos de reconhecida gravidade;

$D_0$  = deflexão de projeto, referida a carga de 4,8 tf;

$D_{adm}$  = deflexão admissível pelo pavimento existente, referida a carga de 4,8 t, em se considerando o tráfego que ele suportaria durante o período compreendido entre a data de sua colocação em serviço e a data correspondente ao final do período de projeto estabelecido para efeito de análise.

**Tabela 22 - Critério para o estabelecimento das diretrizes de projeto**

IGG	F e AP %	$d_0$ e $d_{adm}$	Decisão quanto ao aproveitamento da estrutura existente e quanto às medidas corretivas a serem levadas em conta no projeto
		$d_0 \leq d_{adm}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente.</li> <li>2. Programação de reparos locais, se necessário.</li> <li>3. Programação de tratamento de rejuvenescimento, se necessário.</li> </ol>
		$3d_{adm} \geq d_0 > d_{adm}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aproveitamento total do valor residual do pavimento existente.</li> <li>2. Programação de reparos locais, se necessário.</li> <li>3. Projeto de reforço com base no critério de deformabilidade.</li> </ol>
$IGG \leq 180$	$F \leq 30\text{mm}$ e $AP \% \leq 33\%$	$d_0 > 3d_{adm}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aproveitamento total ou parcial do valor residual do pavimento existente.</li> <li>2. Programação de reparos locais, se necessário.</li> <li>3. Projeto de reforço com base no critério de deformabilidade e projeto de reforço com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento total do valor residual do pavimento existente.</li> </ol> <p>Projeto de nova estrutura com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento parcial do valor residual do pavimento existente.</p>
	$F > 30\text{mm}$ e $AP \% > 33\%$	—	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aproveitamento total ou parcial do valor residual do pavimento existente.</li> <li>2. Programação de reparos locais.</li> <li>3. Projeto de reforço com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento total do valor residual do pavimento existente.</li> </ol> <p>Projeto de nova estrutura com base no critério de resistência, no caso de aproveitamento parcial do valor residual do pavimento existente.</p>
$IGG > 180$	—	—	Remoção parcial ou total do pavimento existente e sua substituição parcial ou total por nova estrutura projetada com base no critério de resistência.

### 5.5.1.3 FUNDAMENTOS

Basicamente a experiência da CDH em projetos de reforços, respaldada por apreciável acervo experimental, pode ser resumida em dois nomogramas, que vinculavam as seguintes variáveis:

a) Nomograma A: deflexão admissível versus parâmetro de tráfego.

Este nomograma expressa uma tendência toda particular do método, qual seja: a deflexão admissível é uma função não só do tráfego previsto como da espessura da camada crítica da estrutura em termos de deformabilidade. Assim, em igualdade das demais condições, um revestimento em concreto asfáltico com 4cm de espessura teria condições de suportar uma deflexão superior aquela tolerada por uma camada de mesma constituição, porém com espessura de 7cm. Além de focar o problema dos revestimentos em concreto asfáltico, o ábaco fornece relações aplicáveis a pavimentos com base cimentada e também para pavimentos flexíveis com revestimento em tratamento superficial. Após transformações, o Nomograma A deu origem ao Nomograma 1 da PRO - 10/79.

b) Nomograma B: redução percentual de deflexão ( $\Delta$ ) versus espessura do reforço expressa em termos de material granular.

Este nomograma permite estimar a eficácia de uma certa solução de reforço, em termos de sua potencialidade para proporcionar a redução nos níveis de deflexão vigentes sobre o pavimento existente. A redução percentual de deflexão é calculada em função da deflexão medida sobre o pavimento existente ( $d_0$ ) e da deflexão prevista sobre o reforço ( $d_h$ ), que é feita igual à deflexão admissível pela camada crítica do reforço ( $d_{adm}$ )

$$\Delta = \frac{(d_0 - d_h)}{d_0} \times 100 \quad (\%)$$

A espessura equivalente em termos de material granular é determinada mediante utilização de coeficientes estruturais específicos do método. O Nomograma B corresponde ao Nomograma 5 da PRO-10/79.

Cumpra observar as seguintes particularidades inerentes ao método californiano:

- As deflexões são referidas à carga de eixo de 6,8 tf, havendo necessidade de conversão das deflexões medidas no Brasil, onde a carga é de 8,2 tf. levando em consideração este fato e as diferenças existentes entre os dois procedimentos de ensaio, a conversão é feita pela expressão:

$$d_{6,8} = 0,7 \times d_{8,2}$$

- O parâmetro de tráfego californiano é o índice de tráfego IT, calculado pela expressão:

$$IT = 1,30 (EWL)^{0,12}$$

onde a variável EWL representa o número equivalente de operações do eixo-padrão de 10000 lb (4,4 tf), calculado pela aplicação dos fatores de equivalência de cargas específicos do método.

O material de referência considerado para as equivalências estruturais é o pedregulho californiano.

Utilizando o Nomograma 1, citado anteriormente, estima-se inicialmente a deflexão admissível pelo revestimento na situação mais crítica em termos de deformabilidade da estrutura, ou seja: a espessura do revestimento em mistura densa.

Combinando-se as variáveis acima citadas a norma permite definir a estratégia a ser adotada, sendo possíveis as seguintes alternativas:

- execução somente de reparos locais;
- aplicação de tratamento de rejuvenescimento;
- execução de reforço dimensionado por critério de deformabilidade;
- execução de reforço dimensionado por critério de resistência;

- remoção total ou parcial da estrutura e dimensionamento de nova estrutura por critério de resistência.

As estruturas existentes que trabalham em regime não elástico são consideradas incompatíveis com a aplicação de critérios deflectométricos. isto é caracterizado na PRO-10/79 pela ocorrência excessiva de afundamentos plásticos e/ou de flechas de valor elevado.

Caso a opção seja por reforço dimensionado por deformabilidade, a norma continua sendo aplicada. Faz-se uma análise prévia da viabilidade de execução de reforço exclusivamente com mistura densa (concreto asfáltico) e se for necessário, analisa-se a alternativa de reforço composto por duas ou mais camadas.

#### 5.5.1.4 VIABILIDADE DO REFORÇO COM MISTURA DENSA

A vinculação da deflexão admissível à espessura da camada crítica da estrutura leva à necessidade de se analisar o comportamento do reforço composto por mistura densa de relação ao revestimento do pavimento existente. Se ambos trabalharem solidários, a espessura a considerar para a definição de  $d_{adm}$  será a soma da espessura do reforço com a do revestimento atual. Caso não haja trabalho solidário, a espessura do próprio reforço vai governar a definição de  $d_{adm}$ .

A análise destinada a verificação da viabilidade de construção do reforço exclusivamente com concreto betuminoso envolve as seguintes etapas.

a) Definição ou cálculo dos seguintes elementos:

- Número " $N_p$ " (8,2 tf) referido ao período de projeto.
- Índice de tráfego  $IT_p$  (função de " $N_p$ ").
- Espessura da camada crítica " $h_e$ " quanto a flexibilidade.
- Nível de deflexão sobre o pavimento existente (eixo de carga 4,8 t).
- Porcentagem da área com defeito do tipo FC-1.
- Porcentagem da área com defeito do tipo FC-2.
- Porcentagem da área com defeito do tipo FC-3.
- Índice de Fissuração IF do revestimento atual, definido pela equação:

$$IF = 0,250 (FC-1) + 0,425 (FC-2) + (FC-3)$$

- Porcentagem da área com a presença de trincas interligadas,

$$[(FC-2) + (FC-3)].$$

Estabelecimento da condição de fissuração do revestimento do pavimento existente, através da análise dos valores de FC-3 e do somatório (FC-2)+(FC-3).

Para se analisar se o reforço trabalha ou não de forma solidária ao revestimento existente, levam-se em consideração as condições de fissuração levantadas por ocasião do inventário (PRO-08/94). Os estados da superfície, que definirão os caminhos a serem seguidos, são função da incidência de trincas de classe 2 e 3, a saber:

- Condição (a)  $\Rightarrow FC-3 < 20\%$  e  $(FC-2) + (FC-3) > 80\%$
- Condição (b)  $\Rightarrow FC-3 < 20\%$  e  $(FC-2) + (FC-3) < 80\%$
- Condição (c)  $\Rightarrow FC-3 > 20\%$  e  $(FC-2) + (FC-3) > 80\%$
- Condição (d)  $\Rightarrow FC-3 > 20\%$  e  $(FC-2) + (FC-3) < 80\%$

b) Determinação da espessura mínima de reforço.

As condições (a) e (c) representam pavimentos altamente comprometidos por trincas interligadas, sendo esperado que o reforço vá funcionar de forma desvinculada. Nas condições (b) e (d) ocorre a situação inversa.

A importância da % FC - 3 está ligada ao problema de reflexão de trincas, sendo críticas neste sentido as condições (c) e (d). Nestas duas situações, o reforço deverá ter uma espessura suficientemente elevada (10 cm) para prevenir a reflexão precoce de trincas. Nas condições (a) e (b), esta preocupação não ocorre.

A respeito da definição das espessuras mínimas de reforço, a norma considerada ainda a questão executiva (mínimo 4 cm) e a proteção do material subjacente ao revestimento existente, esta última através do Nomograma 3.

Definida a espessura mínima, devemos verificar se o reforço tem condições de suportar a vida de projeto em função das considerações fornecidas pela experiência da CDH. Com auxílio do Nomograma 4 é possível executar-se a análise de viabilidade, que permitirá definir:

- se é exequível o reforço exclusivamente composto por mistura densa e,
- quais os limites do campo de variação de suas espessuras que são satisfatórias em termos de deformabilidade.

A aplicação do nomograma 4 deve ser feita de forma muito cautelosa, para se evitar erros de interpretação. Esta observação é particularmente importante para análises das condições (b) e (d), onde se faz necessário o traçado de uma curva auxiliar, dependente da espessura da camada crítica existente.

O índice de tráfego a considerar na análise contempla o tráfego previsto para o novo período de projeto ( $IT_p$ ).

#### **5.5.1.5 REFORÇO COMPOSTO POR MÚLTIPLAS CAMADAS**

Caso não seja viável a execução de reforço exclusivamente composto por mistura densa, a norma prevê a interposição de uma ou mais camadas intermediárias, de maior flexibilidade

em relação ao concreto asfáltico do revestimento (pré-misturado aberto usinado a quente, por exemplo). Com esta medida, a deflexão admissível passará a ser governada pelo próprio revestimento do reforço.

Define-se inicialmente a espessura do revestimento em concreto asfáltico, no Nomograma 3, em função do material escolhido para a camada intermediária e do tráfego previsto para o novo período de projeto ( $IT_p$ ).

Com auxílio do Nomograma 1, estima-se a deflexão admissível pela camada crítica da estrutura, em função de sua espessura e de  $IT_p$ . A seguir faz-se com que a deflexão prevista sobre o reforço ( $d_h$ ) seja igual à admissível e, a partir da deflexão vigente ( $d_0$ ), calcula-se a redução percentual de deflexão necessária ( $\Delta$ ).

Com auxílio do Nomograma 5, estima-se a espessura total de reforço  $H$ , expressa em termos de pedregulho, requerida para proporcionar a redução percentual  $\Delta$ . Finalmente, aplicando-se os coeficientes estruturais previstos no método, é possível definir a (s) espessura (s) da (s) camada (s) intermediária (s).

#### 5.5.1.6 COMENTÁRIOS

A DNER-PRO-10/79 é uma norma que tem embasamento experimental bastante significativo, muito embora reconheçam-se as dificuldades decorrentes da adaptação de métodos empíricos oriundos de países de clima temperado.

Os critérios adotados para a fixação das espessuras de proteção do material subjacente ao concreto asfáltico, consubstanciados no Nomograma 3, parecem conduzir a valores algo conservadores, que levam a um dimensionamento seguro, porém com reflexos no custo inicial de construção.

É interessante notar que o aumento da espessura do revestimento em concreto asfáltico no reforço composto por duas camadas, não produz redução na espessura da camada intermediária, como poderia se imaginar em primeira análise. Isto se explica da seguinte maneira: o aumento da espessura do revestimento provoca queda na deflexão admissível pelo reforço (Nomograma 1); com isto, é necessário aumentar a espessura da camada intermediária, para obter a redução percentual de deflexão requerida.

A utilização da norma PRO-10/79 é bastante trabalhosa, envolvendo o uso de diversos ábacos e diversas etapas de cálculo. É possível, no entanto, informatizar a sua aplicação, tornando o seu uso simples e rápido.

#### 5.5.2 DNER-PRO 11/79 - MÉTODO B

O PRO-11/79 é também um dos procedimentos normalizados pelo DNER para o dimensionamento de reforços. Seus princípios básicos derivaram de trabalhos realizados pelo Eng<sup>o</sup> Bolívar Lobo Carneiro, a partir de estudos do Eng<sup>o</sup> Celestino Ruiz, da Argentina.

Este método tem sido bastante empregado no Brasil em virtude de sua grande simplicidade.

### 5.5.2.1 PROCEDIMENTOS PRELIMINARES

Os procedimentos preliminares de obtenção dos dados desse método de avaliação e dimensionamento são os mesmos da PRO 10/79, ou seja:

- a) dados do levantamento histórico;
- b) dados da prospecção preliminar; e
- c) dados da prospecção definitiva.

A partir do inventário de superfície (DNER-ES 128/83) e das deflexões recuperáveis (DNER ME 24/94), divide-se o trecho em segmentos homogêneos; para cada segmento determina-se estatisticamente a deflexão de projeto  $D_p$  como descrito na PRO 10/79.

### 5.5.2.2 DIRETRIZES DE PROJETO

Apesar da norma se referir a inexistência de critérios universalmente aceitos que possibilitem uma fácil tomada de posição com respeito a avaliação estrutural dos pavimentos, ela propõe um critério para a fixação de diretrizes a serem tomadas, para efeito da avaliação estrutural dos pavimentos, considerando os seguintes parâmetros obtidos durante os estudos de reconhecimento:

- N - Número de solicitações de eixos padrão de 8,2 tf
- $D_p$  - Deflexão de projeto
- R - Raio de curvatura
- $D_{adm}$  - Deflexão admissível
- IGG- Índice de Gravidade Global.

Em função dos diversos parâmetros ( $D_p$ ,  $D_{adm}$  e R) e baseado na Tabela 23 (Tabela III da Norma), procura-se:

- a) fixar quando serão necessários estudos complementares;
- b) definir o critério para avaliação e cálculo do reforço;
- c) fazer recomendações quanto as medidas corretivas.

### 5.5.2.3 FUNDAMENTOS

Um dos fundamentos deste método é que a deflexão máxima admissível ( $D_{adm}$ ) para um pavimento flexível é função apenas do tráfego que o solicita, não dependendo das características da estrutura do pavimento.

O critério de deflexão admissível contido na PRO - 11/79 foi extraído de vários estudos realizados no estrangeiro, e com observações no país para pavimentos flexíveis constituídos de base granular e revestidos com concreto betuminoso. A equação para determinação de  $D_{adm}$ , apresentada a seguir, corresponde a deflexões medidas com a carga padrão de 8,2 t por eixo e está vinculado ao parâmetro de tráfego calculado com base em fatores de equivalência da USACE:

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,174 \log N_{USACE}$$

**Tabela 23 - Critério para o estabelecimento das diretrizes de projeto**

Hipótese	Dados deflectométricos obtidos	Qualidade estrutural	Necessidade de estudos complementares	Critério para cálculo do reforço	Medidas corretivas
I	$D_p \leq D_{adm}$ $R \geq 100$ m	Boa	Não	—	Apenas correções de superfície
II	$D_p > D_{adm}$ $R \geq 100$ m	Se $D_p \leq 3 D_{adm}$ Regular	Não	Deflectométrico	Reforço
		Se $D_p > 3 D_{adm}$ Má	Sim	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
III	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$ m	Regular para má	Sim	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$ m	Má	Sim	Resistência	Reforço ou Reconstrução
V	—	Má O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas. (IGG > 160)	Sim	Resistência	Reconstrução

Esta expressão é também representada graficamente na norma. Se o pavimento for constituído de base granular revestida com tratamento superficial, a deflexão admissível obtida pela figura ou pela expressão deve ser multiplicada por dois, para efeito de avaliação estrutural.

Para pavimentos semi-rígidos com base de solo cimento ou de brita tratada com cimento, que não apresentem fissuração exagerada, deve ser adotada como  $D_{adm}$  a metade do valor obtido pela expressão e ábaco apresentados, independente do tipo de revestimento.

#### 5.5.2.4 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO

Definida na avaliação estrutural a necessidade de reforço e a possibilidade de aplicação de critério defletométrico, o cálculo da espessura de reforço em concreto asfáltico é feito na PRO - 11/79 de forma muito simples.

Inicialmente calcula-se a deflexão admissível, pela expressão já apresentada, em função do tráfego previsto para o novo período de projeto. A espessura de reforço em concreto asfáltico é então calculada pela expressão proposta pelo engenheiro argentino Celestino Ruiz, utilizando-se como argumentos a deflexão admissível e a deflexão Benkelman de projeto do segmento em análise, a saber:

$$h_{CB} = k \cdot \log \frac{D_p}{D_{adm}}$$

onde:

$h_{CB}$  = espessura de reforço em concreto asfáltico ;

$d_p$  = deflexão Benkelman de projeto, sob carga de 8,2 tf;

$d_{adm}$  = deflexão admissível pelo reforço.

$k$  = fator de redução da deflexão ( $k = 40$  para concreto asfáltico)

Caso haja interesse do projetista em desmembrar o reforço em duas ou mais camadas e determinar as espessuras das camadas não constituídas de concreto asfáltico, isto pode ser feito levando-se em conta os coeficientes estruturais definidos no método. Estes coeficientes são similares àqueles contidos no Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER.

#### 5.5.2.5 COMENTÁRIOS

A norma PRO - 11/79 é de aplicação bastante simples. Os resultados obtidos indicam sistematicamente espessuras de reforço inferiores àquelas que são obtidas pela aplicação da PRO - 10/79.

É equivocado utilizar na PRO - 11/79 como parâmetro de tráfego o número N da AASHTO, pois o critério de deflexões admissíveis adotado se baseia, em suas origens, em fatores de equivalência de carga do Corpo de Engenheiros do Exército dos EEUU.

#### 5.5.3 DNER- PRO 159/85

O procedimento 159/85 leva em consideração um dos principais conceitos da Gerência de Pavimentos, qual seja: a análise de várias alternativas de reforço para um pavimento, mediante estudo do desempenho funcional e estrutural de cada uma das alternativas, e seus correspondentes custos de construção e restauração ao longo da vida útil estabelecida.

Para viabilizar a aplicação deste conceito foram utilizadas as equações de previsão de desempenho desenvolvidas na Pesquisa de Interrelacionamento de Custos Rodoviários (PICR), levado a cabo pelo DNER.

### 5.5.3.1 PROCEDIMENTOS PRELIMINARES

Em termos de levantamento de dados para utilização do método, o procedimento se assemelha aos da PRO10/79 e PRO 11/79, tanto na determinação e demarcação dos segmentos homogêneos, como na mensuração das deflexões recuperáveis, sondagens, e ensaios de caracterização dos materiais coletados.

As principais diferenças no levantamento de dados e no cálculo de parâmetros representativos são as seguintes:

- a) o método para a avaliação da superfície (DNIT 007/2003-PRO) considera as áreas afetadas pelos defeitos;
- b) são recomendados ensaios para determinação do módulo de resiliência ( $M_R$ ) do revestimento existente e das camadas de base e sub-base (ME - 133/94);
- c) é necessária a medição da irregularidade longitudinal do segmento em estudo, que pode ser obtida com aparelhos tipo resposta e convertidas em QI (cont/km); e
- d) o parâmetro de tráfego é quantificado em termos de número de eixos equivalentes obtidos com os fatores de equivalência da AASHTO.
- e) o trincamento deve ser calculado através da expressão abaixo:

$$TR = 100 \frac{TR_i}{S}$$

onde: TR = porcentagem de trincamento;

$TR_i$  = total das áreas com trincamento de classe 2 e 3, bem como panelas e remendos;

S = área da superfície avaliada ( $m^2$ ).

- f) o desgaste deve ser calculado através da seguinte expressão:

$$D = 100 \frac{D_i}{S}$$

onde: D = porcentagem de desgaste

$D_i$  = total das áreas com desgaste ( $m^2$ )

S = área da superfície de avaliação ( $m^2$ )

- g) a característica de resistência do pavimento é expressa pelo número estrutural corrigido (SNC) que deve ser calculado através da expressão:

$$NC = SN + 3,51 \log CBR - 0,85 (\log CBR)^2 - 1,43$$

onde o valor de SN é o mesmo proposto pela AASHO, porém com pequeno aperfeiçoamento, pois considera o valor do  $M_R$  das camadas do pavimento para a determinação do coeficiente de equivalência estrutural. As outras parcelas da formulação referem-se a contribuição do subleito através de seu CBR.

- h) devem ser informadas as restrições construtivas, econômicas e de desempenho, assim como os custos unitários dos serviços de restauração. Todas essas informações devem ser estabelecidas pelo órgão rodoviário, porém alguns limites máximos típicos de desempenho são  $QI = 50$  a  $70$  cont./km,  $TR = 15$  a  $40\%$  e  $D = 15$  a  $40\%$ .

### 5.5.3.2 ANÁLISE DA CONDIÇÃO DO PAVIMENTO EXISTENTE

Os valores máximos admissíveis estabelecidos nas restrições de desempenho devem ser cotejados com os valores de irregularidade, trincamento e desgaste obtidos no levantamento de campo. Como consequência poderão ocorrer três situações, a saber:

- a) Situação I - não são atingidos quaisquer dos valores das restrições. Calcula-se então o trincamento e a irregularidade para o último ano do período de análise, com as equações de previsão disponíveis. Caso ambos os novos valores sejam iguais ou inferiores aos fixados pelas restrições de desempenho, não haverá necessidade de restauração do pavimento; isto não ocorrendo, prossegue-se a análise segundo a situação II.
- b) Situação II - quaisquer dos valores das restrições são alcançados ao longo do período de análise. Calcula-se ano a ano a partir do primeiro ano de análise, a evolução do trincamento e da irregularidade, utilizando-se das equações de previsão. O próximo passo é determinar o ano no qual o primeiro dos parâmetros alcança o valor da restrição respectiva. Até este ano não é necessária a restauração, e a partir deste, far-se-á o estudo das alternativas de restauração.
- c) Situação III - nesta situação quaisquer dos valores das restrições são ultrapassados no início do período de análise. É necessário neste caso, intervenção imediata de restauração, que deve ser analisada conforme descrito nos itens seguintes.

### 5.5.3.3 EQUAÇÕES DE DESEMPENHO

Mediante a análise do comportamento de trechos experimentais da PICR, foram desenvolvidos modelos de previsão de desempenho vinculados a reforços de pavimentos flexíveis. Os trechos utilizados na pesquisa e que deram origem aos modelos de previsão adotados foram observados por períodos variáveis de 2 a 8 anos. Os modelos definidos permitem estabelecer:

- a) a evolução de trincamento de um pavimento existente com revestimento em concreto betuminoso (CBUQ);
- b) a evolução da irregularidade longitudinal de pavimentos com revestimento em CBUQ ou tratamento superficial (TS);

- c) a evolução do desgaste de pavimento com revestimento em TS;
- d) a estimativa da irregularidade longitudinal após restauração em CBUQ;
- e) a evolução da irregularidade longitudinal de pavimento restaurado com CBUQ;
- f) a evolução do trincamento do pavimento restaurado com CBUQ;
- g) a evolução do desgaste em pavimento restaurado com TS;
- h) a evolução do trincamento em pavimento restaurado com lama asfáltica (LA0, e
- i) a redução da deflexão após recapeamento

#### 5.5.3.4 RESTAURAÇÃO EM CONCRETO ASFÁLTICO

A restauração em concreto asfáltico deve ser analisada a partir da adoção da espessura mínima fixada, que recomenda-se seja igual a 3,0 cm. Em seguida, partindo-se do valor das irregularidades longitudinais no início da restauração e da restrição de desempenho são efetuadas diversas iterações no intuito de determinar a menor espessura de concreto asfáltico que atenda as condições impostas.

Determina-se em seguida, com as equações pertinentes, os valores de irregularidade e trincamento para o último ano de análise, podendo ocorrer os seguintes quatro casos:

a) **1º Caso**  $\Rightarrow QI_{Final} < QI_{Máximo}$  e  $TR_{Final} < TR_{Máximo}$

Para este caso, como os limites não foram atingidos, a análise é concluída adotando-se a alternativa estudada.

b) **2º Caso**  $\Rightarrow QI_{Final} > QI_{Máximo}$  e  $TR_{Final} < TR_{Máximo}$

Retorna-se a análise da irregularidade ano a ano, determinando o ano limite da vida do pavimento. Desde que sejam atendidas as restrições de construção, a alternativa pode ser adotada, fixando-se o ano seguinte para a restauração. Se a duração for insuficiente, descarta-se a alternativa e aumenta-se a espessura do recapeamento até atingir um valor que atenda as restrições do desempenho.

c) **3º Caso**  $\Rightarrow QI_{Final} < QI_{Máximo}$  e  $TR_{Final} > TR_{Máximo}$

Realiza-se o mesmo procedimento do 2º caso, porém analisando o trincamento, até que seja encontrada uma alternativa que atenda as restrições do desempenho.

d) **4º Caso**  $\Rightarrow QI_{Final} > QI_{Máximo}$  e  $TR_{Final} > TR_{Máximo}$

A análise agora é feita com as duas equações de desempenho, ano a ano, até que algum parâmetro (QI ou TR) atinja a restrição. Ocorrendo com o QI, efetua-se a análise conforme o 2º caso. No caso do trincamento alcançar a restrição de desempenho primeiro, desenvolve-se a análise segundo o indicado pelo 3º caso, porém verificando-se a evolução da irregularidade.

Cada uma das alternativas tecnicamente viáveis deve ser objeto alvo da análise da viabilidade econômica, através da adoção qualquer método de comparação entre alternativas de investimento, que são apresentadas no Capítulo 8 deste Manual.

Se for utilizado o método preconizado pela norma, os custos unitário de restauração referidos ao ano inicial da análise devem ser cotejados com aqueles fornecidos pelas restrições econômicas, devendo ser consideradas viáveis todas as alternativas que apresentam custos iguais ou inferiores ao limite estabelecido. As alternativas tecnicamente viáveis devem ser relacionadas em ordem crescente de custos para a avaliação daquela julgada mais adequada.

### **5.5.3.5 PROGRAMA PAEP – PROGRAMA DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS**

Para viabilizar os exaustivos cálculos necessários à análise desejada, foi desenvolvido um programa computacional que, utilizando os modelos estabelecidos, permitisse simular o desempenho do reforço ao longo do tempo. O programa em questão foi designado por PAEP.

O programa PAEP (baseado na Pesquisa de Avaliação Estrutural de Pavimentos realizada pelo IPR) permite a simulação de alternativas de restauração em lama asfáltica, em tratamento superficial simples ou duplo e em concreto betuminoso, este último em cinco diferentes espessuras, definidas pelo usuário a partir da adoção de espessuras mínima e máxima admissíveis.

Os dados de entrada necessários à alimentação do PAEP são basicamente os seguintes:

#### **a) Dados do pavimento existente -**

- idade do pavimento
- tipo de revestimento
- deflexão Benkelman
- trincamento (%)
- desgaste (%)
- irregularidade longitudinal (QI)
- número estrutural corrigido (SNC)

#### **b) Dados do tráfego -**

- período de análise
- parâmetro de tráfego AASHTO no 1º ano
- taxa anual de crescimento de tráfego

#### **c) Restrições de construção -**

- espessuras mínima, máxima e total de CBUQ
- número limite de intervenções
- vida mínima por intervenção

**d) Restrições de desempenho -**

- irregularidade longitudinal máxima ao final da vida útil
- trincamento máximo ao final da vida útil
- desgaste máximo ao final da vida útil (para reforço em TS)

**e) Restrições econômicas -**

- recursos disponíveis para a primeira intervenção
- recursos globais disponíveis

**f) Custos unitários -**

- lama asfáltica
- tratamento superficial simples
- tratamento superficial duplo
- concreto asfáltico

O usuário deve definir, como visto, restrições de desempenho para o reforço, a serem atendidas ao cabo da vida útil estabelecida. Normalmente consideram-se para a % de trincamento final valores de 25 ou 30%, e para a irregularidade final 40 ou 45 cont./km.

Cada alternativa é analisada no que tange à evolução do trincamento (revestimentos em concreto asfáltico ou lama asfáltica), do desgaste (tratamentos superficiais simples ou duplos) e da irregularidade longitudinal (todos os tipos de restauração). As alternativas viáveis, ou seja, que satisfazem a condição de vida útil mínima, tem seus custos de construção estimados, a partir dos custos unitários fornecidos. As alternativas que atendem às restrições orçamentárias são arquivadas e posteriormente ordenadas em função do seu custo atualizado.

O programa PAEP ordena pelo custo total as alternativas viáveis, ou seja: aqueles que satisfazem às restrições de vida útil mínima e de recursos disponíveis definidos pelo usuário. Ao final do processamento são listadas as cinco alternativas de menor custo, bem como a evolução ano a ano dos parâmetros definidores do comportamento da restauração. É informada ainda a ocasião em que deverão ser feitas as intervenções.

#### 5.5.4 DNER-PRO 269/94 -MÉTODO DA RESILIÊNCIA (TECNAPAV)

Em junho de 1982, foi proposto pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler à comunidade rodoviária, um procedimento para projeto de reforço de pavimento flexível que permite considerar explicitamente as propriedades resilientes de solos e materiais que, rotineiramente, constituem as estruturas de pavimentos no Brasil. No decorrer dos últimos anos, foi possível validar o método proposto a partir de dados de campo referentes a trechos recapeados e enfim oficializá-lo por meio do procedimento DNER-PRO 269/94 - TECNAPAV.

O procedimento é fundamentado em modelos de fadiga de misturas betuminosas, no comportamento resiliente típico de solos finos e materiais granulares e no cálculo de tensões e deformações considerando a teoria da elasticidade não linear.

##### 5.5.4.1 PROCEDIMENTOS PRELIMINARES

Inicialmente divide-se a rodovia em segmentos homogêneos levando-se em conta as condições de tráfego, subleito, deflexão recuperável, estrutura do pavimento e condições superficiais. O parâmetro de tráfego utilizado é calculado de acordo com os fatores de equivalência do Corpo de Engenheiros do Exército Americano, como no método de dimensionamento proposto pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza.

A deflexão recuperável deve ser determinada de acordo com a DNER-PRO 024/94. O levantamento da condição do pavimento deve obedecer a DNIT 007/2003-PRO (quanto ao levantamento da área defeituosa) e a DNIT 005/2003 - TER (quanto aos tipos de defeitos). A irregularidade, considerada apenas para segmentação, é avaliada por meio de medidores tipo-resposta (IPR/USP ou Maysmeter).

Devem ser efetuadas sondagens a cada dois km, introduzindo-se mais poços de sondagem no caso de haver uma mudança na estrutura do pavimento. Em cada ponto de sondagem devem ser determinadas expeditamente características das camadas do pavimento e do subleito.

As amostras coletadas na sondagem são conduzidas ao laboratório para ensaios de caracterização, granulometria e CBR. Os solos são classificados em três grupos quanto a sua resiliência, em função de seu Índice de Suporte Califórnia CBR e de sua porcentagem de silte (S), conforme mostra a Tabela 24.

**Tabela 24 - Classificação dos solos**

CBR %	SILTE%		
	≤ 35	35 á 45	> 45
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

Para fins de análise, devem ser consideradas como camadas granulares constituintes do pavimento, as que contenham materiais com mais que 45 % retidos na peneira de abertura 0,075 mm (# 200).

#### 5.5.4.2 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO COM MISTURA NOVA

A espessura necessária para reforçar o pavimento existente deve ser determinada conforme as seguintes etapas:

- Definição para cada segmento homogêneo caracterizado da espessura de mistura betuminosa existente ( $h_e$ ), da deflexão característica ( $D_c = \bar{x} + \sigma$ ), o trincamento (TR), da espessura da camada granular ( $H_{cg}$ ) e do tipo de solo da fundação.
- Representação para cada segmento homogêneo da chamada estrutura de referência, constituída por três camadas com as respectivas espessuras, conforme indicado na Figura 30.

**Figura 35 - Estrutura de referência do TECNPAV**



- Cálculo da espessura efetiva ( $h_{ef}$ ) do revestimento betuminoso através da fórmula:

$$h_{ef} = -5,737 + \frac{807,961}{D_c} + 0,972 I_1 + 4,101 I_2$$

onde:  $h_{ef}$  = espessura efetiva (cm);

$D_c$  = a deflexão característica (0,01 mm);

As constantes  $I_1$  e  $I_2$  estão relacionadas com as características resilientes da 3ª camada da estrutura de referência e de acordo com os seguintes casos:

- Caso 1 – espessura da camada granular inferior ou igual a 45cm
  - Quando a 3ª camada for do tipo I  $\Rightarrow I_1 = 0$  e  $I_2 = 0$
  - Quando a 3ª camada for do tipo II  $\Rightarrow I_1 = 1$  e  $I_2 = 0$
  - Quando a 3ª camada for do tipo III  $\Rightarrow I_1 = 0$  e  $I_2 = 1$
- Caso 2 – espessura da camada granular é maior que 45 cm
  - Adotar  $\Rightarrow I_1 = 0$  e  $I_2 = 1$
- Caso 3 – espessura efetiva compreendida entre  $0 \leq h_{ef} \leq h_e$

- se:  $h_{ef} < 0$  , adotar  $\Rightarrow h_{ef} = 0$
- se:  $h_{ef} > h_e$  , adotar  $\Rightarrow h_{ef} = h_e$

- Caso 4 – se o grau de trincamento do revestimento existente for superior a 50% ou (FC-2 + FC-3 > 80%) ou (FC-3 > 30%), então é conveniente adotar  $h_{ef} = 0$  e considerar a solução de recapeamento em camadas integradas de CBUQ e PMF.

d) Cálculo da deflexão máxima permissível através da fórmula:

$$\log \bar{D} = 3,148 - 0,188 \log N_p$$

onde:  $\bar{D}$  = deflexão máxima permissível (0,01mm).

$N_p$  = número de solicitações de eixo padrão de 8,2 t, durante a vida do projeto.

e) Cálculo da espessura do reforço em concreto asfáltico (HR):

$$HR = - 19,015 + \frac{238,14}{D^{1/2}} - 1,357 h_{ef} + 1,014 I_1 + 3,893 I_2$$

f) Soluções de recapeamento:

- Caso 1 - se  $3 < HR \leq 12,5$  cm, utiliza-se camada única de CBUQ ou camadas integradas de CBUQ e pré-misturado caso a superfície do pavimento estiver muito fissurada, procurando-se assim evitar a propagação das trincas.
- Caso 2 - se  $12,5 < HR \leq 25$  cm é recomendada a adoção de camadas integradas do tipo CBUQ ( $H_{ca}$ ) e pré-misturado ( $H_{pm}$ ) com as seguintes relações entre as espessuras:
  - $H_{pm} = 0,40 HR$
  - $H_{ca} = HR - H_{pm}$
- Caso 3 - se  $HR > 25$  cm, as camadas integradas não devem ser constituídas exclusivamente de misturas betuminosas; nesta situação deve-se verificar também a conveniência da reconstrução parcial ou total do pavimento existente.
- Caso 4 - se  $HR \leq 3$ cm, pode-se, a partir da análise das condições do pavimento existente, verificar a viabilidade de intervenção com soluções do tipo tratamento superficial ou lama asfáltica.
- Caso 5 - o método contempla também a possibilidade de, face a restrições orçamentárias, utilizar-se de uma solução de reforço por etapas. Neste caso, a Norma apresenta modelos para mais duas soluções sucessivas dentro do período de análise.

#### 5.5.4.3 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO COM MISTURA RECICLADA

A espessura do revestimento existente a ser reciclada e a de reforço complementar devem ser determinadas de acordo com as etapas a seguir descritas:

**a) Cálculo da relação modular ( $\mu$ ):**

$$\mu = \frac{MR_c}{M_{ef}}$$

onde:

$MR_c$  = módulo de resiliência da mistura betuminosa reciclada ( $\text{kgf/cm}^2$ ), determinada em laboratório.

$M_{ef}$  = módulo de resiliência efetivo do revestimento existente ( $\text{kgf/cm}^2$ ), obtida pela seguinte expressão

$$\log M_{ef} = 11,19 - 2,753 \log D_c - 1,714 \log h_e - 0,0053 I_1 + 0,2744 I_2$$

**b) Cálculo da deflexão de projeto característica, após reciclagem:**

$$\bar{D}_c = D_c \left[ \frac{h_c}{h_e} (\mu^{1/3} - 1) + 1 \right]^{-1,324}$$

onde:

$D_c$  = deflexão de projeto (0,01 mm);

$h_e$  = espessura da camada betuminosa existente (cm);

$h_c$  = espessura da camada betuminosa remanescente, não considerando a espessura de corte (cm), que deve atender as seguintes condições:  $h_c \geq 3,0$  cm e  $h_c \leq h_e - 2$

$\bar{D}_c$  = deflexão de projeto característica do pavimento reciclado correspondente à espessura  $h_c$  (0,01 mm)

**c) Solução de recapeamento**

- Caso 1: para  $\mu \leq 1,0$  a solução de restauração não deve utilizar mistura reciclada. Contudo, pode ser avaliada a reciclagem com espessura mínima de corte no caso em que  $D_c \leq D$  ou  $HR \leq 3$  cm.
- Caso 2: Para  $\mu > 1,0$  adotar o seguinte procedimento:
  - calcular  $\bar{D}_c$  para diferentes valores de  $h_c$
  - para  $\bar{D}_c \leq \bar{D}$  pode ser utilizada mistura reciclada com a respectiva espessura de corte  $h_c$ ;
  - para  $\bar{D}_c > \bar{D}$  dimensionar a camada de reforço considerando

$D_c = \bar{D}_c$ . Esta solução constitui uma alternativa de restauração mista, ou seja, reciclagem com corte de espessura  $h_c$  e recapeamento com espessura HR.

**5.6 TRABALHOS PREPARATÓRIOS PARA RESTAURAÇÃO**

A condição do pavimento antes da aplicação da camada de reforço afeta significativamente o desempenho da atividade de restauração. Por esta razão, todos os enfoques de projeto de reforço consideram de alguma maneira a condição do pavimento existente.

Se um determinado trecho apresenta trincamentos por fadiga de alta severidade e intensidade, e no dimensionamento de reforço não for considerado este aspecto, então a intervenção estará subdimensionada e resultará em muito baixo desempenho

As camadas de reforço, tipicamente, adicionam capacidade estrutural somente na porção superior do pavimento existente e não podem corrigir todos os problemas. Se o pavimento apresenta problemas de fadiga devido ao excesso de sollicitação do tráfego para a vida de projeto, então espessuras adicionais no revestimento podem corrigir o problema e estender a vida do pavimento. Entretanto, se a causa da deterioração reside nas camadas subjacentes ao revestimento, um dos seguintes dos enfoques apresentado deverá ser adotado.

O primeiro enfoque é reparar o defeito antes do recapeamento. Por exemplo, um pavimento com altas deflexões nas áreas com trincamento por fadiga indicam ruptura das camadas inferiores (base ou sub-base) ou do subleito, Desta forma, deverá ser reparada a área atingida e caso a porção deteriorada seja muito extensa deverão ser adotadas medidas como reconstrução, reciclagem ou retrabalho do material de subleito.

O segundo enfoque é a adição de espessuras suficientes para proteger as áreas críticas devido a problemas nas camadas inferiores. O acréscimo da espessura de reforço deverá recompor a resistência da(s) camada(s) comprometida(s) e protegê-la(s) de tensões e deformações excessivas. Neste enfoque, dois aspectos devem ser enfatizados:

- a) o método de dimensionamento de reforço deve basear-se em critérios defletométricos ou mecânicos para avaliar o impacto das camadas inferiores deterioradas;
- b) as espessuras adicionais de reforço necessárias para proteger estas áreas enfraquecidas podem tornar a alternativa inviável do ponto de vista econômico.

Muitos pavimentos tem regiões de defeitos localizados, causados pela variabilidade dos materiais do pavimento e do subleito. Nos pavimentos asfálticos esta condição geralmente ocorre nas áreas com trincas do tipo couro de jacaré. As deflexões nestas regiões são geralmente muitos superiores do que nas demais.

Se as camadas de base e sub-base forem consideradas muito deterioradas, a ponto de necessitar de remoção e substituição por materiais sadios, então poderá ser reduzida a espessura de reforço.

Se estas áreas não forem previamente reparadas, o reforço deverá ser muito mais espesso no intuito de atender o desempenho desejado e isto acarretaria obviamente em superdimensionamento do reforço. Entretanto, pode não ser viável economicamente reparar todas as áreas com trincamento por fadiga. Recomenda-se, finalmente, que devam ser analisados os custos dos remendos e seu impacto no custo total da restauração, com vistas a definição da solução mais econômica para o horizonte de projeto.

Adicionalmente, para prevenir e reparar o trincamento excessivo, outros trabalhos preparatórios também devem ser considerados. Existem várias atividades para preparação

do pavimento existente antes da aplicação de camadas asfálticas adicionais e as mais comumente empregadas são:

- a) selagem de trincas
- b) lama asfáltica
- c) limpeza da pista e pintura de ligação
- d) remendos superficiais ou profundos
- e) camadas de nivelamento ou “reperfilamento”
- f) fresagem a frio
- g) medidas para retardar a propagação das trincas
- h) combinação das técnicas anteriores

Além dos trabalhos citados anteriormente cumpre ressaltar a importância da execução prévia dos melhoramentos geométricos da rodovia (adequações de capacidade e melhoria da segurança) e das medidas para assegurar uma drenagem satisfatória.

## **5.7 PROPAGAÇÃO DE TRINCAS**

Nos congressos e reuniões técnicas realizadas nos últimos anos, tem-se discutido muito sobre o problema do trincamento de novas camadas de reforço devido a propagação de trincas das camadas subjacentes. Este modo de deterioração tem preocupado bastante os técnicos responsáveis pela restauração dos pavimentos.

O reforço de um pavimento flexível trincado consiste basicamente na superposição de uma nova camada para recompor, da melhor maneira possível, sua capacidade funcional e estrutural e evitar a progressão da deterioração. O reforço é também aplicável sobre pavimentos rígidos que podem apresentar fissuras nas placas e/ou deterioração nas juntas de dilatação. Ainda, quando o pavimento é semi-rígido, uma nova camada de reforço é assentada sobre uma base estabilizada com aglomerantes hidráulicos e, desta forma, estará susceptível a propagação dos trincamentos devido às variações térmicas.

Nas três situações anteriores, a camada de reforço estará sujeita a propagação ou difusão das trincas até a superfície do pavimento, como resultado dos movimentos horizontais e verticais das trincas e/ou juntas. Este fenômeno da propagação de trincas já está claramente identificado e conhecido, porém, até o momento, não está absolutamente dominado.

Atualmente as pesquisas para a solucionar o problema estão centralizadas no sentido de se encontrar técnicas que impeçam definitivamente ou pelo menos retardem a ocorrência do fenômeno, que conseqüentemente aumentará a durabilidade dos pavimentos e reduzirá os custos de restauração.

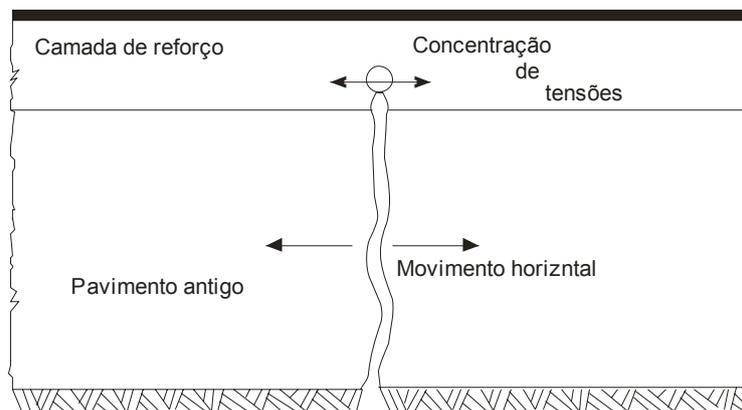
### 5.7.1 CAUSAS DA PROPAGAÇÃO

A propagação de trincas é bastante freqüente nas camadas de reforço sobre pavimentos asfálticos devido a movimentação das trincas que causam um rompimento físico no material do reforço, que se dissemina através de toda a camada. Estes movimentos podem se originados pelos seguintes motivos:

- a) baixas temperaturas;
- b) ciclos de variação diária da temperatura; e
- c) carregamento do tráfego

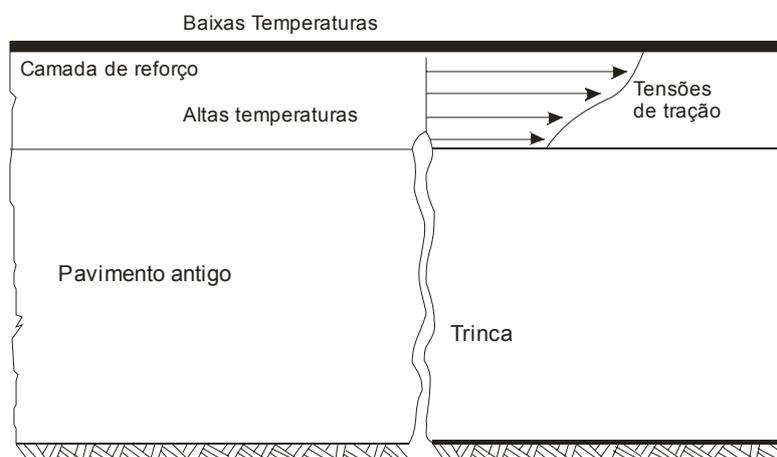
A ocorrência de temperaturas baixas provocam a contração do pavimento existente e, com isto, tendem à abertura das trincas. Este movimento horizontal devido a contração do pavimento cria tensões de tração na camada de reforço, conforme esboçado na Figura 36

**Figura 36 - Deformações horizontais no pavimento antigo devido às variações de temperatura.**



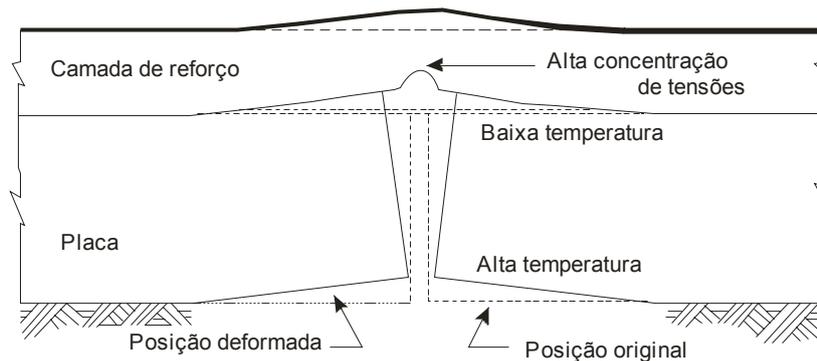
A nova camada de reforço, por sua vez, também fica sujeita a posteriores esforços de tração porque, da mesma maneira, também contrai com as baixas temperaturas como mostra a Figura 37.

**Figura 37 - Geração de uma nova trinca na camada de reforço devido a ação das tensões térmicas na camada.**



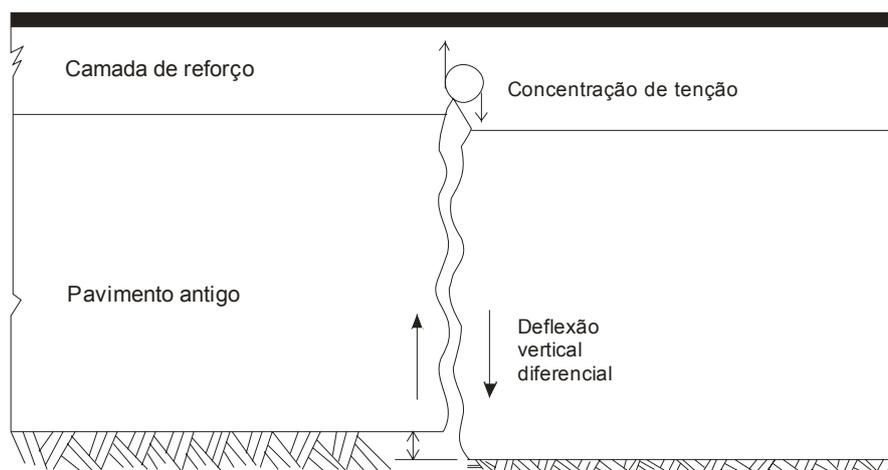
Os ciclos de variação diária da temperatura também produzem tensões térmicas de tração no reforço; principalmente nos pavimentos rígidos e semi-rígidos. Estes ciclos de variação geram gradientes de temperatura na camada, forçando suas extremidades a curvarem na região das trincas. Como nos períodos mais frios do dia (madrugadas e manhãs) a temperatura é mais baixa no topo do que na parte inferior da camada, produz-se uma abertura não tão severa quanto às devido à contração pelo frio, porém mais freqüentes, o que acarreta numa deterioração da mesma grandeza. A Figura 38 ilustra este fenômeno:

**Figura 38 - Arqueamento térmico da camada de reforço causado pela diferença de temperatura da camada subjacente.**



Quando a propagação das trincas é causada pela solicitação do tráfego, verifica-se um mecanismo de deslocamento diferente das situações anteriores (Figura 39). A deflexão vertical diferencial na região próxima às trincas promove um esforço de cisalhamento na camada de reforço e não a abertura das trincas. Embora este tipo de alteração seja de menor intensidade que o causado por variações térmicas, ele é muito mais freqüente e quanto maior for a severidade mais e rapidamente as trincas se propagarão.

**Figura 39 - Concentração de tensões devido a deflexão diferencial vertical causada pelo tráfego**



### 5.7.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A PROPAGAÇÃO

Cada ciclo de variação da temperatura e de carregamento pelo tráfego deteriora e contribui para a propagar as trincas na camada de reforço. Os diferentes tipos de deformações não propagam as trincas do mesmo modo e, portanto, não há um critério

único de previsão da taxa de sua propagação. Pesquisadores tem efetuado estudos no sentido de avaliar a influência de cada tipo de defeito gerado pela aplicação de cargas. Tem-se obtido informações necessárias para relacionar a intensidade e tipo de carregamento e a progressão da propagação das trincas.

Tem-se inferido que para eliminar a propagação de trincas é necessário suprimir as deformações e tensões produzidas na região das trincas do pavimento a ser restaurado. Como o trincamento existente muitas vezes não pode ser completamente eliminado, o que pode ser feito é reduzir sua taxa de manifestação e severidade. É neste sentido tem sido desenvolvidos várias medidas antes da execução do reforço para tentar amenizar o problema.

Os resultados destas várias medidas de inibição da progressão do trincamento tem sido relatados em inúmeros congressos e reuniões técnicas. Até o momento os resultados ainda não são plenamente conclusivos. Alguns casos de estudo individuais tem mostrado excelentes resultados, enquanto que outros não tem sido bons. A principal razão para a grande disparidade nos resultados é a impossibilidade de quantificar precisamente os mecanismos da evolução do trincamento e dos correspondentes deslocamentos antes e depois da aplicação do reforço.

Os efeitos mais comuns gerados pela propagação de trincas são o enfraquecimento da estrutura do pavimento devido ao acréscimo da umidade, o desenvolvimento de panelas, deformações plásticas e outros tipos de defeitos. A preocupação dos pesquisadores tem atualmente focado os seguintes itens:

- a) velocidade de propagação das trincas na camada de reforço;
- b) nível de severidade das trincas após a ocorrência da propagação; e
- c) quantidade de água que pode se infiltrar através das trincas

Muitas são as pesquisas objetivando obter mais informações acerca dos deslocamentos e deformações do trincamento e sua influência na taxa de propagação, como por exemplo, quanto a eficiência de vários procedimentos antes da restauração, como: selagem das trincas, reconstrução localizada para melhorar a capacidade de suporte, execução de remendos, melhoria da drenagem e outras.

Se a severidade do trincamento puder ser limitada, os danos gerados pela propagação das trincas poderá ser bastante reduzida. Assim sendo, se a propagação for um problema previsível devido a intensidade e severidade do pavimento existente, devem ser seriamente consideradas atividade prévias como a impermeabilização ou selagem das trincas.

### **5.7.3 MEDIDAS INIBIDORAS DA PROPAGAÇÃO**

Várias são as técnicas de tratamento que destinam-se a solucionar um ou mais dos problemas anteriormente comentados. De uma maneira geral, as investigações para solucionar o problema seguem duas linhas de pesquisa.

Primeiramente, tem-se testado a adoção de uma camada de reforço e efetuada a análise do efeito que a espessura da capa e as características do seu material (módulo de elasticidade, resistência a tração e flexibilidade), tem sobre a velocidade ou taxa de propagação do trincamento, determinando as características da mistura que mais influem no retardamento da propagação.

Em segundo lugar, tem-se sido analisado o efeito da execução de uma camada de alívio de tensões conhecidas como “Stress-Absorbing Membrane Interlayer - SAMI”, considerando diferentes possibilidades quanto às suas características resistentes. Compara-se a efetividade dessa solução com o emprego direto de uma camada de reforço com características especiais de maior flexibilidade.

Essas duas linhas de pesquisas abrangem uma série de soluções, dentre as quais, faremos breves comentários sobre as seguintes:

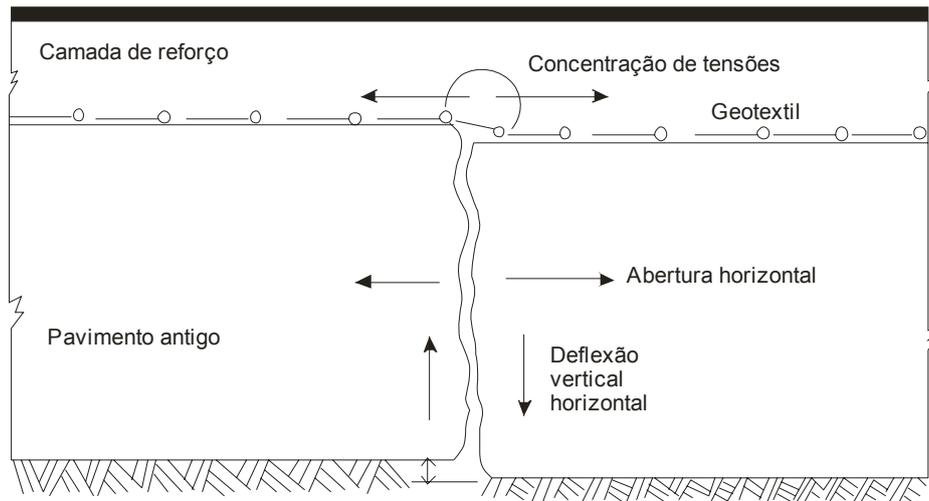
- a) geotêxteis;
- b) camadas de alívio de tensões;
- c) camadas de interrupção do trincamento; e
- d) outras soluções

#### **5.7.3.1 GEOTÊXTEIS**

Os geotêxteis são mantas sintéticas que podem ser tecidas ou não-tecidas e são fabricados com matérias primas como o polipropileno, poliéster, fibra de vidro, nylon ou suas combinações. Eles são geralmente posicionados diretamente sobre o pavimento trincado existente, antes da camada de reforço, embora essa não seja a forma preferencial de aplicação.

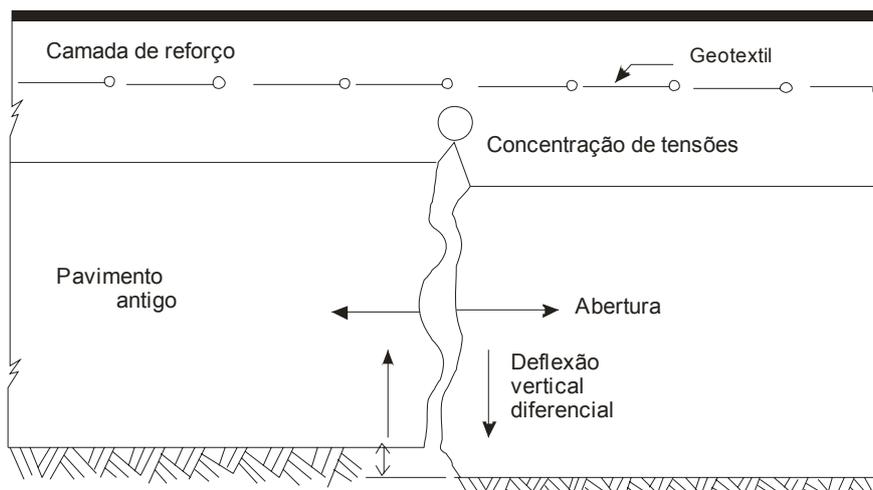
Esta solução inicia com a aplicação de uma pintura de ligação no pavimento existente. Posteriormente, sobre o pavimento pintado é estendido o geotêxtil, que é fornecido pelos fabricantes em bobinas. Nesta operação devem ser tomados cuidados especiais, como por exemplo evitar dobras ou sobreposições da manta. Em seguida, executa-se a camada de reforço sobre o pavimento antigo.

A taxa de aplicação da pintura de ligação é um fator crítico no desempenho da intercamada. Quando em excesso permite o deslizamento do reforço, quando escassa dificulta sua aderência. A Figura 40 esboça a solução de assentamento do geotêxtil diretamente sobre o pavimento antigo.

**Figura 40 - Geotêxtil diretamente sobre o pavimento antigo.**

A forma mais adequada de aplicação dos geotêxteis (segundo a experiência americana) corresponde a execução inicial uma camada de nivelamento do pavimento trincado e sobre essa camada estende-se a manta. A pintura de ligação deve ser feita tanto sobre a camada de nivelamento como sobre a manta, porém com taxas de aplicação inferiores à situação anterior. Esta operação, ilustrada na Figura 41, evita o contato direto da manta com a superfície trincada e permite uma maior inibição da propagação das trincas.

A superfície de nivelamento deverá estar bem desempenada, de modo a reduzir o potencial de ocorrência de dobras na manta. A camada de reforço deve ser colocada diretamente sobre a manta e compactada. Como o objetivo da colocação da manta é a de provocar uma restrição física ao movimento e conseqüente abertura de trincas, deve ser colocada à um terço ou no meio da camada de reforço.

**Figura 41 - Geotêxtil afastado das trincas do pavimento antigo.**

O fenômeno de retardamento da propagação de trincas parece estar ligado com a estrutura geotêxtil-asfalto, que forma uma camada de descontinuidade visco-elástica, minimizando a intensidade das tensões sobre a trinca existente, seja por sollicitação das cargas de tráfego ou por contração/retração devido as variações térmicas ambientais.

O efeito de redução das tensões é atribuído a dessolidarização entre a camada trincada e a nova camada de reforço, permitindo o livre movimento das bordas da trinca ou seu redirecionamento horizontal, o que a dissipa.

Outra ação do geotêxtil é a formação de uma membrana com boas características de impermeabilidade, que parece colaborar com a aumento da vida útil do pavimento, função da inibição da entrada de água nas camadas mais profundas de sua estrutura, mesmo que após um certo número de solicitações de tráfego venham aparecer trincas no revestimento. Alguns pesquisadores alegam também que esta solução tem um comportamento rígido quando submetido às cargas rápidas do tráfego, e dúctil quando solicitado pela lentidão das tensões térmicas.

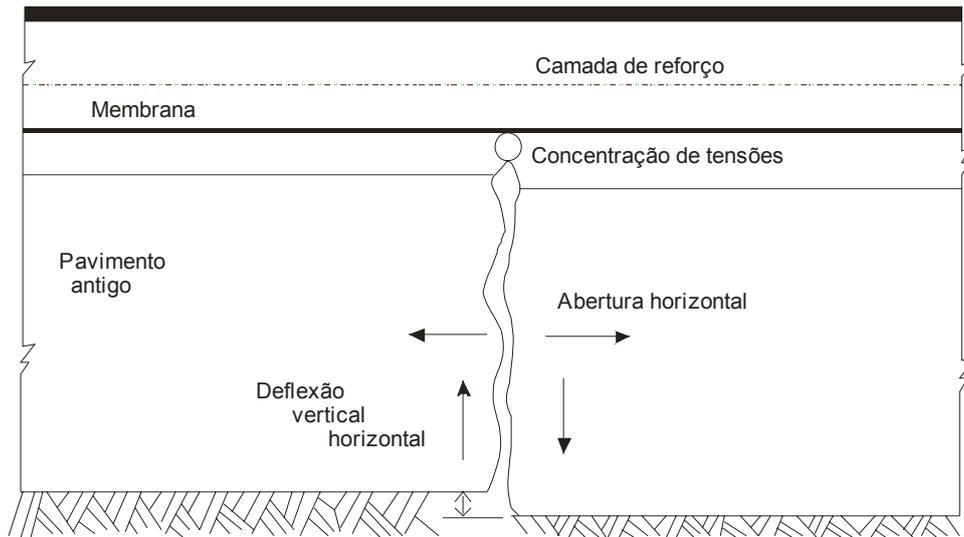
Em todo o mundo os geotêxteis tem sido utilizados apresentando um desempenho relativamente bom para ambos os pavimentos, rígidos ou flexíveis, sendo que neste último tem apresentado os melhores resultados, principalmente quando não existem trincas transversais de natureza térmica. Qualquer trinca passível de um movimento substancial tenderá a rasgar a manta eliminando sua eficiência. Os melhores resultados tem sido apresentados quando a manta é colocada interna à camada de reforço, que requer uma espessura mínima de quatro cm conforme experimentos.

#### **5.7.3.2 CAMADAS DE ALÍVIO DE TENSÕES**

Este tipo de camada atua como uma interface suavizadora, dissipando as tensões desenvolvidas pelo movimento das trincas. São soluções que geralmente incluem asfalto modificado com polímero como o agente responsável pelo alívio das tensões. Geralmente são executadas diretamente sobre a superfície do pavimento original.

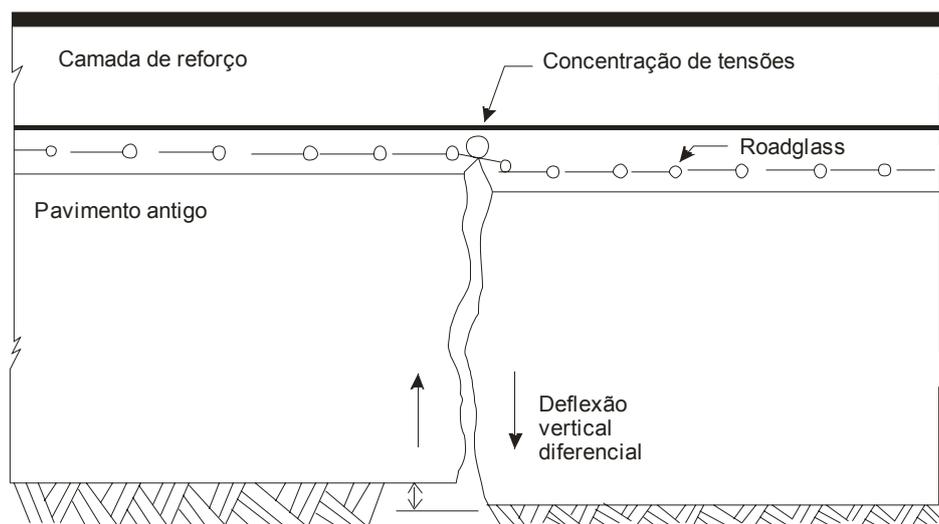
Uma camada típica de alívio de tensões ou um dos tipos de SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer) pode ser comparado a um tratamento superficial, com espessura em torno de 1,5 cm. Estas camadas ou membranas (Figura 42), são concebidas para reduzir a velocidade de propagação das trincas de fadiga em pavimentos flexíveis, sendo contudo ineficientes em trincamentos de alta severidade.

Outros exemplos de agentes minimizadores de tensões são as mantas adesivas impregnadas de material betuminoso, as quais devem ser aplicadas apenas sobre a região trincada e ainda as de fibra de vidro que são sobrepostas em toda a extensão do pavimento.

**Figura 42 - Esquema de uma camada de alívio de tensões**

Vários órgãos rodoviários estaduais americanos tem adotado estas soluções. Diferentemente das mantas adesivas, as mantas de fibra de vidro são depositadas sobre o pavimento trincado entre duas camadas de asfalto-polímero, como se fosse um tratamento superficial simples, onde manta de fibra de vidro faz o papel do agregado. Isto cria uma membrana asfáltica emborrachada.

Ambas as soluções com manta apresentam boas propriedades de impermeabilização, porém, parecem não ser muito melhores que a solução convencional de geotêxtil, conforme alguns autores. A Figura 43 esquematiza o posicionamento no pavimento de uma manta de fibra de vidro.

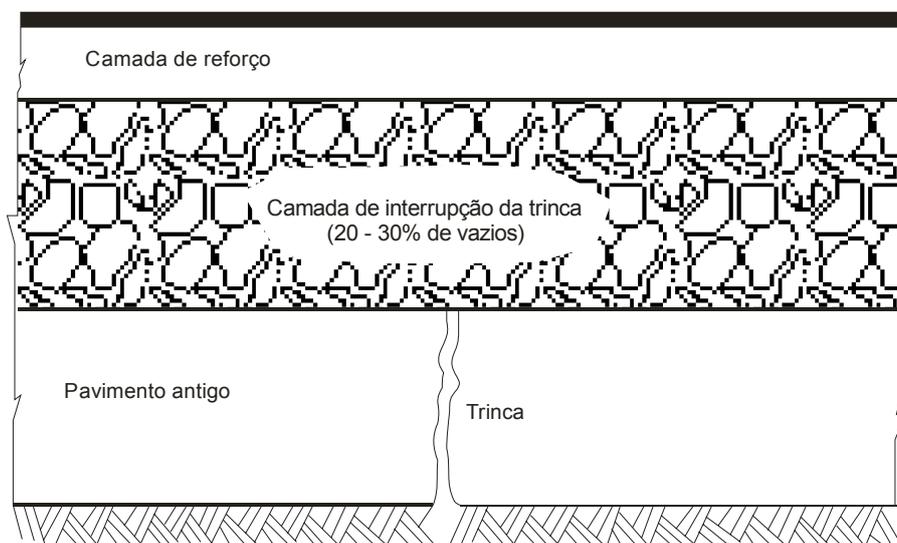
**Figura 43 - Esquema de posicionamento de uma manta de fibra de vidro.**

### 5.7.3.3 CAMADAS DE INTERRUPTÃO DO TRINCAMENTO

Estas camadas podem ser compostas por materiais granulares que interrompem o desenvolvimento do trincamento devido ao elevado índice de vazios, como mostra a Figura

44. As camadas mais utilizadas para esse propósito são formadas por materiais granulares (britas graduadas).

**Figura 44 - Esquema de uma camada de interrupção do trincamento.**



Este tipo de solução, segundo Pinto (2002), quando apropriadamente executada tem apresentado bons resultados no âmbito federal. Se a mistura não for bem compactada, poderá se tornar instável e ocasionar problemas de afundamento nas trilhas de rodas.

#### 5.7.3.4 OUTRAS SOLUÇÕES

Podem ser adotadas outras menos comuns para inibição da propagação do trincamento como: reforço mais espesso, selagem da superfície do pavimento existente antes da execução do reforço, camadas da composição geotextil-geogrelha (Figura 45), microconcreto fibra-asfalto a frio, tricamada ou bicamada otimizada e outras camadas compósitas.

No preparo da superfície do pavimento existente, antes da execução do reforço, têm-se utilizado técnicas mais avançadas para selar as trincas de pavimentos com materiais e/ou equipamentos especiais, do que o simples derrame do material betuminoso de selagem. Entre os novos materiais podem ser citados vários tipos de asfaltos modificados com polímeros, os elastômeros, os polímeros especiais a base de epóxi, e outros. Como equipamento para a aplicação temos a lança termoneumática que injeta com pressão o material selante a maiores profundidades nas trincas.

**Figura 45 - Ilustração da solução geotêxtil-geogrelha como camada inibidora da propagação de trincas**



O microconcreto fibra-asfalto a frio é uma massa asfáltica densa de espessura delgada (cerca de 2cm) contendo asfalto-polímero e agregados miúdos, com possibilidade de incorporação de fibras sintéticas como armação e executada a frio. A modalidade de misturas asfálticas armadas com fibras sintéticas pode ser utilizada tanto em revestimentos como em bases tratadas com ligantes betuminosos, onde às misturas asfálticas acrescentam-se fibras dos tipos minerais, acrílicas ou celulósicas. Essas camadas diminuem a susceptibilidade térmica e aumentam a resistência às deformações plásticas dos pavimentos, causas primárias de seu trincamento conforme visto antes.

O reforço de pavimento com tricamada ou bicamada otimizada é um sistema de camadas antifissuras. Existem já centenas de quilômetros executados na Europa e EUA. São conhecidas como complexo tricapa e complexo bicapa, sendo concebidas com a superposição de duas ou três das seguintes camadas:

- a) camada de geotextil-asfalto-polímero;
- b) camada de areia-asfalto-polímero; e
- c) revestimento também com asfalto-polímero.



## **6 - RECICLAGEM DOS PAVIMENTOS**



## 6 RECICLAGEM DOS PAVIMENTOS

### 6.1 OBJETIVOS DA RECICLAGEM

A reciclagem dos pavimentos existentes apresenta-se como uma solução para muitos problemas e oferece inúmeras vantagens em relação a utilização convencional de materiais virgens.

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.

A reutilização dos agregados do pavimento degradado para os serviços de reconstrução, restauração e conservação, propiciam uma diminuição da demanda de novos materiais e das respectivas distâncias de transporte, prolongando o tempo de exploração das ocorrências existentes. Isso é particularmente benéfico devido as restrições impostas pela legislação de proteção ao meio ambiente e pela crescente valorização dos sítios de ocorrências de jazidas.

A reutilização dos ligantes asfálticos constitui-se em outra vantagem importante proporcionada pela reciclagem de materiais. O asfalto remanescente no pavimento antigo é um recurso valioso. Devido a fatores como a oxidação e volatilização, o asfalto envelhecido perde algumas das suas propriedades originais, que podem ser restabelecidas quando é combinado com um asfalto novo ou um agente rejuvenescedor.

Com a reutilização do asfalto envelhecido pode ser reduzida a quantidade de asfalto novo para a restauração do pavimento. Por exemplo, a reutilização dos materiais de um revestimento de concreto asfáltico poderá necessitar de cerca de 1 a 3% de asfalto adicional, enquanto uma mistura de concreto asfáltico com materiais virgens requer cerca de 6% de asfalto, o que representa uma redução apreciável.

A adoção de técnicas de reciclagem permite que as condições geométricas da pista sejam mantidas ou modificadas facilmente. Nas rodovias de faixas múltiplas, as operações de reciclagem podem ser executadas somente na faixa deteriorada, evitando estender o recapeamento a toda a largura da pista de rolamento, assegurando uma drenagem adequada e evitando desníveis na pista.

Da mesma forma, podem ser evitados problemas relacionados com a altura livre em túneis e passagens inferiores devido a recapeamentos sucessivos. Nas pontes e viadutos também pode ser evitado o acréscimo da carga permanente.

Além disso, podem ser sensivelmente reduzidos os problemas de ajuste vertical dos dispositivos de drenagem, tais como profundidade de sarjetas, altura de meios-fios, bocas-de-lobo e poços de visita.

## 6.2 ORIENTAÇÕES PARA A SELEÇÃO DA RECICLAGEM

A seleção da reciclagem entre as diversas alternativas disponíveis para a restauração de um pavimento depende de diversos fatores, entre os quais podem ser citados os seguintes:

- a) observação dos defeitos do pavimento;
- b) determinação das causas prováveis dos defeitos, baseado em estudos de laboratório e de campo;
- c) informações de projeto e histórico das intervenções de conservação;
- d) custos;
- e) histórico do desempenho do pavimento;
- f) restrições quanto a geometria da rodovia (horizontal e vertical);
- g) fatores ambientais; e
- h) tráfego.

É muito importante saber, também, qual o resultado final desejado com a restauração do pavimento (reforço estrutural, maior conforto ao rolamento etc).

Desde que a reciclagem tenha sido considerada como uma alternativa viável para a restauração, a melhor modalidade (a quente ou a frio) deverá ser selecionada.

Na seleção do processo deverão ser considerados os seguintes itens:

- a) condição de superfície (trincamentos, desgastes, afundamentos nas trilhas de roda, etc);
- b) capacidade estrutural;
- c) qualidade do material;
- d) disponibilidade de 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.

Os ensaios de laboratório e de campo deverão ser realizados para determinar as “reservas” de materiais disponíveis no pavimento e os tipos de estabilizadores que podem ser usados com estes materiais. A partir dessas informações preliminares poderão ser selecionadas as modalidades de reciclagem em potencial, desenvolvido o projeto preliminar do pavimento e procedida a avaliação econômica das alternativas.

A partir destas informações deverá ser selecionada a mais promissora modalidade de reciclagem e dimensionada a nova seção do pavimento. Novos ensaios de laboratórios deverão ser efetuados para a determinação do teor necessário de estabilizante ou agente reciclador. Também deverão ser determinados os custos para as operações de reciclagem e preparadas as especificações para a execução da reciclagem.

Finalmente, após a realização dos serviços deverá ser avaliado o desempenho dos materiais reciclados ao longo do período de tempo de vida útil, mediante a execução de ensaios de laboratório e de campo para a determinação das propriedades dos materiais em serviço.

Estas informações devem ser incluídas no Sistema de Gerência de Pavimentos e os dados usados como subsídios para futuras seleções de alternativas de restauração de pavimentos.

### **6.3 RECICLAGEM A QUENTE**

A reciclagem a quente das camadas asfálticas de revestimento do pavimento, é feita atualmente por intermédio das seguintes Normas aprovadas pelo DNIT:

- a) DNIT 033/2005-ES – Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação do Serviço; e
- b) DNIT 034/2005-ES – Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de Serviço.

Estas Normas mostram o processo em que parte ou toda a estrutura do revestimento é removida e reduzida a dimensões apropriadas para depois ser misturada a quente no próprio local (in situ) ou em usina estacionária. O processo pode incluir a adição de novos agregados, cimento asfáltico e agente rejuvenescedor. O produto final deve atender as especificações de misturas asfálticas a quente destinadas às camadas de base, “binder” ou de rolamento.

Os principais fatores a serem considerados na seleção da reciclagem a quente, como alternativa de restauração de um pavimento, são os seguintes:

- a) condição do pavimento;
- b) disponibilidade de equipamentos apropriados;

- c) comparativo de custos e de energia;
- d) regulamentação ambiental; e

O inventário de defeitos, realizado durante a fase de avaliação do projeto de restauração, deve fornecer os dados para se proceder os estudos. Os mais importantes fatores a serem considerados são:

- a) irregularidade longitudinal;
- b) trincamento;
- c) afundamento na trilha de roda;
- d) aderência;
- e) desgaste;
- f) estrutura do pavimento; e
- g) capacidade de tráfego.

Deverão ser feitas comparações cuidadosas para determinar se a reciclagem é a melhor solução para resolver o conjunto de defeitos observados no trecho. A reciclagem a quente pode corrigir deficiências de misturas betuminosas e pode ser utilizada para aumentar a capacidade estrutural, podendo ser usadas antes de um recapeamento.

O método de projeto DNER-PRO 269/94 – TECNAPAV apresentado no Capítulo 5 deste Manual aborda a solução de projeto contemplando a reciclagem de camadas asfálticas existentes nos pavimentos flexíveis.

### **6.3.1 DESEMPENHO E LIMITAÇÕES**

Como a reciclagem a quente ainda é um processo relativamente novo e devido a maior variabilidade dos materiais removidos em relação aos materiais virgens, devem ser tomados cuidados adicionais no projeto e construção de camadas com misturas recicladas a quente. Devido a esta variabilidade ainda existem incertezas quanto ao desempenho das misturas e a aplicação em camadas de rolamento ainda não é extensiva.

Com o acréscimo da experiência e do nível de utilização, os problemas de controle de qualidade estão sendo sanados e encorajando os engenheiros a aplicar misturas recicladas na camada superficial. Se o projeto de dosagem e o processo executivo forem adequados, os pavimentos restaurados com misturas recicladas a quente podem ter bom desempenho.

A reciclagem a quente envolve, normalmente, um maior número de materiais que uma mistura normal. Assim, a execução de um projeto de reciclagem requer a avaliação do pavimento, a realização de ensaios de caracterização do material, controle do processo de produção e controle de qualidade mais rígidos do que um projeto convencional.

### 6.3.2 AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS

A primeira etapa na avaliação dos materiais é a coleta geral dos dados históricos sobre o projeto. Estas informações incluem a descrição das seções do pavimento, dados de tráfego, materiais utilizados, dados sobre o projeto da mistura, dados de drenagem, condição do pavimento, histórico de conservação, etc. Grande parte destas informações deve ter sido disponível na fase inicial de planejamento, quando a reciclagem foi selecionada como uma alternativa de restauração. Estas informações são necessárias para mostrar se há materiais suficientes em quantidade e qualidade.

A presença de materiais com muita variação pode acarretar a seleção de sub-projetos para análise e reciclagem diferenciada. O número excessivo de subprojetos pode tornar a reciclagem antieconômica, devido ao elevado número de ensaios para cada segmento.

Um número suficiente de amostras deve ser coletado de uma maneira aleatória, para todo o projeto ou cada subprojetos, permitindo os ensaios necessários.

As amostras de material coletado na pista e encaminhados ao laboratório, devem ser representativas da condição do material que será utilizado na produção da mistura reciclada. Se o revestimento vai ser fresado a frio, as amostras de laboratório também devem estar fresadas, pois neste caso existe uma variação da granulometria do revestimento asfáltico antigo devido ao acréscimo de finos.

### 6.3.3 PROJETO DA MISTURA

Definida a alternativa de solução por reciclagem, a etapa seguinte consiste em dosar os componentes da mistura final reciclada, ou seja, determinar as porcentagens dos materiais e misturas intervenientes de maneira a satisfazer os requisitos das especificações próprias para os serviços de reciclagem. Estes requisitos constam das citadas no item 5.2 especificações:

Em termos de mistura final reciclada as condições exigidas pelas três especificações referidas são exatamente as mesmas características de uma mistura asfáltica nova quanto aos aspectos de :

- a) granulometria;
- b) porcentagem de vazios;
- c) relação betume-vazios ou vazios do agregado mineral;
- d) estabilidade; e
- e) fluência.

A seqüência a ser realizada para a dosagem da mistura reciclada é a seguinte:

**a) 1ª Etapa : Fixação de segmentos homogêneos da camada a ser reciclada**

Para a realização da dosagem recomenda-se a fixação em torno de 2,0 km, como a extensão máxima dos segmentos homogêneos da camada a ser reciclada. Dependendo do estado da superfície, da inspeção visual dos tipos de misturas existentes no segmento, etc, tal extensão poderá ser diminuída ou aumentada.

**b) 2ª- Etapa: Retirada de amostras destes segmentos e realização de ensaios**

Em cada segmento homogêneo deverão ser retiradas, no mínimo, 9 (nove) amostras espaçadas em torno de 200 m, com dimensões apropriadas de 0,50m x 0,50m e com espessura igual àquela que a mistura será reciclada. Em cada amostra serão realizados os seguintes ensaios:

- Extração do Asfalto - determinação do teor de ligante segundo os métodos ASTM D - 2172/81 e DNER-ME 53/94, com o uso do Refluxo e do Rotorex, respectivamente;
- Granulometria da mistura de agregados após a extração do betume - determinada através do Método do DNER-ME 83/94;
- Outros Ensaios – de acordo com o projeto poderão ser realizados os seguintes ensaios complementares
  - Recuperação do Asfalto - para a recuperação e subsequente caracterização do asfalto extraído das amostras, utilizar o método ABSON da ASTM D - 1856/79. Este método consiste, basicamente, de uma destilação controlada adequando pressão com a introdução de um gás inerte (CO) para total retirada do solvente, mantendo as reais características do ligante; e
  - Com o asfalto recuperado devem ser executados os seguintes ensaios:
    - Penetração (100g, 5s, 25°C), pelo Método DNER-ME 003/94.
    - Ponto de amolecimento (°C), pelo Método ABNT MB 167/71 - NBR 6293/94
    - Ductibilidade (25°C, cm, mín.) pelo Método ABNT MB 167/71 - NBR 6293/94
    - Viscosidade Saybolt Furol a 175°C
  - Fracionamento químico - seguindo a metodologia proposta por Rostler, determinando os teores de asfaltenos e das frações maltêmicas, cujos resultados definem o grau de envelhecimento do asfalto oriundo das mudanças químicas que ocorrem ao longo do tempo.

**c) 3ª Etapa - Determinação das quantidades de materiais a serem adicionados à mistura a ser reciclada.**

Em razão da interpretação dos ensaios de extração de betume e da granulometria da mistura de agregados dos segmentos homogêneos, verificar-se-á a necessidade de adição ou não, dos seguintes materiais:

- Mistura asfáltica a quente - Procedimento A;
- Agregado graúdo - Procedimento B;
- Agregado graúdo, miúdo e material de enchimento - Concreto asfáltico reciclado em usina fixa;
- Cimento asfáltico de petróleo (CAP) - 3 (três) procedimentos; e
- Agente rejuvenescedor - 3 (três) procedimentos.

Quando for necessária uma correção granulométrica, deverá ser determinada a quantidade e qualidade dos agregados ou da mistura a ser adicionada, de maneira a satisfazer da melhor forma a faixa granulométrica específica.

Simultaneamente, deverá ser analisada a necessidade de utilização do CAP adicional e/ou agente rejuvenescedor, devidamente indicado na respectiva especificação. A finalidade da utilização destes dois materiais, isoladamente ou em conjunto, é fazer com que o ligante asfáltico da mistura reciclada possua, entre outras, características de consistência, em termos de viscosidade absoluta e penetração, de acordo com as especificações vigentes.

Os agentes regeneradores, recicladores ou rejuvenescedores são hidrocarbonetos especialmente refinados para possuir em sua composição química uma alta fração de maltenos, que é a fração que se perde no processo de envelhecimento do asfalto. O agente rejuvenescedor ocasiona um novo equilíbrio às frações maltenos, já que introduz os solventes de peptização em um alto teor, levando o asfalto a readquirir as propriedades de um novo e durável cimento asfáltico.

Para determinar as percentagens de CAP adicional e/ou agente regenerador, devem ser realizadas misturas destes materiais em diversas proporções, com o CAP obtido no ensaio de recuperação do betume, e escolhidos os valores - em tipos e quantidades - que melhor atendam aos índices de consistência mencionados.

Determinadas as proporções dos ligantes a serem misturados e, conseqüentemente, o ligante final da mistura reciclada, deverá ser realizada uma análise completa do mesmo, e a determinação da relação viscosidade x temperatura, para avaliação da sua suscetibilidade e do seu comportamento viscosimétrico.

#### **d) 4ª Etapa: Determinação das proporções finais dos componentes da mistura através do Método Marshall**

O projeto final da mistura deve ser efetuado através de procedimentos padronizados como o método Marshall. O teor total do asfalto deve ser alterado apenas pela variação da quantidade de asfalto novo.

O teor ótimo de asfalto e a dosagem da mistura são determinados de acordo com os mesmos critérios como se fosse uma mistura asfáltica convencional, de maneira a atender às exigências já comentados anteriormente.

### **6.3.4 TÉCNICAS CONSTRUTIVAS**

As técnicas de reciclagem a quente, que serão descritas a seguir, podem ser classificadas em dois grandes grupos:

- a) reciclagem a quente no local ou “in situ”.
- b) reciclagem a quente em usinas estacionárias.

#### **6.3.4.1 RECICLAGEM A QUENTE NO LOCAL**

A reciclagem a quente no local ou “in situ” é definida como um processo de correção de defeitos de superfície, através do corte e fragmentação do revestimento asfáltico antigo (geralmente por fresagem), mistura com agente rejuvenescedor, agregado virgem, material ou mistura asfáltica, e posterior distribuição da mistura reciclada sobre o pavimento, sem remover do local original o material a ser reciclado.

A reciclagem a quente no local pode ser realizada tanto como uma operação de passagem única, que associa a mistura reciclada com o material virgem, ou como uma operação de duas passagens, onde a mistura reciclada é recompactada e a aplicação de uma nova camada de desgaste é efetuada após um período de espera prescrito.

Para que a reciclagem a quente no local seja considerada como uma provável técnica de restauração do pavimento, durante a fase de avaliação deve-se verificar atentamente no pavimento existente os tipos de defeitos, a condição estrutural e de drenagem.

Esta modalidade de restauração de pavimentos poderá ser considerada no conjunto das alternativas exequíveis, desde que não haja problemas estruturais, de drenagem ou de qualidade dos materiais constituintes do pavimento.

Como as técnicas de reciclagem a quente “in situ” envolvem a reelaboração de uma camada do revestimento relativamente delgada, elas devem ser utilizadas para correção de defeitos de superfície, exclusivamente de classe funcional. Podem ser corrigidos defeitos com severidade baixa ou média tais como desagregações, corrugações, afundamentos nas trilhas de roda, locais de baixa aderência, exsudações e locais com problemas de declividade transversal.

Dois métodos de reciclagem no local já foram utilizados pelo DNER, a saber:

### a) Método Marini

Consiste na utilização da planta móvel de asfalto reciclado Marini, A.R.T. 220, onde a fresagem é realizada a frio. O equipamento processa a mistura do material a quente e o posterior espalhamento. O DNER elaborou a especificação ES-188/87, que contempla este tipo de procedimento; e

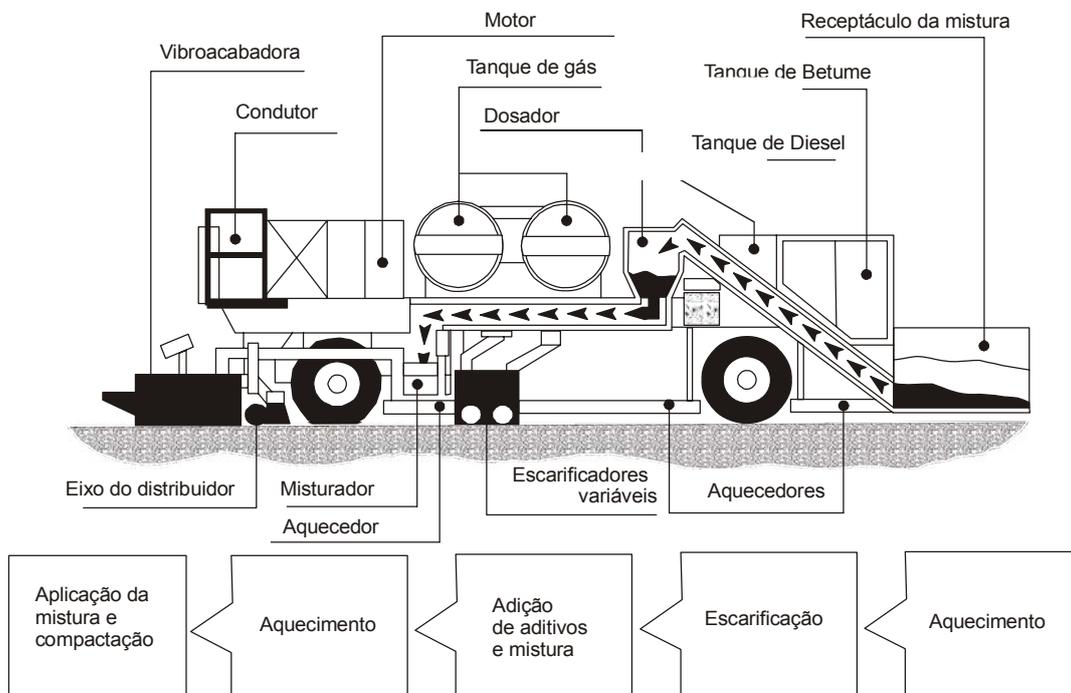
### b) Método Wirtgen

Consiste na utilização da máquina Remixer da Wirtgen, onde a fresagem é realizada a quente. Para este procedimento o DNER elaborou a especificação ES - 187/87.

O sistema Remixer de reciclagem a quente no local é ilustrado na Figura 46. Ele constitui-se de unidades fresadoras conjugadas com câmaras de aquecimento, que efetuam a fresagem a quente do pavimento existente. A aquecedora amolece o revestimento existente e a fresadora remove-o em uma única passada. Múltiplas passadas poderão ser efetuadas para remover profundidades maiores e aumentar a produção.

O material fresado é processado diretamente na rodovia em um misturador tipo “pug-mill” acoplado ao equipamento e é posteriormente lançado na pista por um sistema distribuidor. Um agente rejuvenescedor também pode ser adicionado ao revestimento antigo. Outra possibilidade é a adição de nova mistura durante a misturação ou senão sua aplicação como uma nova camada de desgaste sobre a mistura reciclada.

**Figura 46 - Esquema do equipamento de reciclagem a quente no local**



A operação de reciclagem no local requer a mesma quantidade de ensaios que a reciclagem realizada em usina central, porém, a importância da determinação do tipo e

quantidade do agente rejuvenescedor é mais crítica na reciclagem “in situ”. Este procedimento tem demonstrado uma grande economia de energia.

O desempenho dos pavimentos submetidos a reciclagem a quente no local tem sido satisfatório, mesmo quando submetidos a elevados níveis de tráfego. Para isso é necessário que o projeto seja bem executado e o controle tecnológico seja adequado. Um revestimento reciclado poderá sofrer afundamento nas trilhas de roda se o ligante possuir viscosidade muito baixa ou se for adicionado agente rejuvenescedor em excesso.

#### **6.3.4.2 RECICLAGEM A QUENTE EM USINAS ESTACIONÁRIAS**

A reciclagem a quente em usinas estacionárias é um processo no qual uma parte ou toda a estrutura do revestimento é removida e reduzida, geralmente através de fresagem à frio, e posteriormente transportada para ser misturada e recuperada em usina de asfalto.

O processo inclui a adição de novos agregados, material de enchimento, CAP e, se necessário, um agente rejuvenescedor. O tipo de usina mais empregado é a “drum-mixer” e o produto final deve atender às especificações de misturas asfálticas a serem aplicadas nas camadas de base, de “binder” ou de rolamento.

A seqüência do desenvolvimento dos trabalhos de construção de misturas recicladas a quente em usina fixa seguem, geralmente, as seguintes etapas:

##### **a) 1ª Etapa: Preparação do material**

A preparação do material inclui a remoção do pavimento asfáltico existente e posterior redução ou fragmentação até um tamanho adequado. Duas opções tem sido utilizadas para reduzir de tamanho o material, a saber:

- redução do material removido da pista e posterior transporte para a usina; e
- fragmentação do material removido nas instalações de britagem junto à usina.

A remoção e fragmentação na pista pode ser realizada com equipamentos convencionais (tratores de esteira, motoniveladoras e carregadeiras), que escarificam e carregam o pavimento a ser reciclado, ou senão, da maneira mais usual que é a utilização de fresadoras a frio.

As máquinas de fresagem foram desenvolvidas para retirada do revestimento asfáltico em espessuras controladas e para reestabelecer a declividade transversal. Neste processo, grande parte do pavimento é reduzido até um determinado tamanho máximo em uma única operação. O tamanho das partículas removidas depende da espessura de corte, da direção de rotação do cilindro fresador, da velocidade de rotação do cilindro, da quantidade e espaçamento entre dentes de fresagem e da velocidade de operação do equipamento.

A redução de tamanho do material removido também pode ser feita com equipamentos de britagem e peneiramento, fixos ou portáteis. O revestimento é normalmente rompido

e fragmentado antes do carregamento, em dimensões convenientes para ser recebido no britador primário.

Com a crescente utilização das máquinas de fresagem a frio, a quantidade do material fresado disponível para a reciclagem está aumentando, principalmente na áreas urbanas. O material fresado deve ser empilhado e armazenado pelo órgão rodoviário ou pelo empreiteiro até que possa ser utilizado na reciclagem.

Os problemas com a utilização deste material aumentam quando é desconhecida a exata origem do material ou quando materiais de fontes diferentes são empilhados juntamente. Estas duas formas de disponibilidade do material requerem considerações diferenciadas na fase de preparação do material.

#### **b) 2ª Etapa: Avaliação dos estoques**

Quando um material estocado vai ser utilizado numa mistura reciclada, as características do material empilhado devem ser conhecidas. As questões a serem respondidas são:

- O material a ser utilizado provém de uma única fonte?
- Se os materiais são de fontes diversas, são todos concretos asfálticos usinados a quente ou estão incluídas misturas com emulsão ?
- Os diferentes materiais foram separados em pilhas distintas ou foram depositados na mesma pilha sem separação?
- Se materiais diferentes foram depositados na mesma pilha há um critério para uniformemente misturar os materiais?

Os estoques de material provenientes de uma mesma origem requerem técnicas de amostragem similares àquelas utilizadas na amostragem de agregados. O manuseio do material estocado durante a produção do material reciclado a quente também pode contribuir para variação do material. Desta forma, cuidados devem ser tomados na operação dos equipamentos.

Se forem removidos materiais de fontes diferentes, deve-se tomar cuidados especiais na combinação dos materiais em uma única pilha. Isto minimizaria a variação do material e a necessidade de desenvolver projetos de mistura distintos. A combinação em uma única pilha não deve ser feita se há uma apreciável quantidade de misturas com emulsão.

#### **c) 3ª Etapa: Usinagem a quente**

A produção de uma mistura reciclada a quente exige algumas modificações no processamento das usinas convencionais. O principal objetivo dessas modificações é aquecer e secar o revestimento asfáltico removido sem expô-lo diretamente à chama do secador. A exposição direta à chama pode produzir poluição do ar, bem como um endurecimento adicional do asfalto remanescente no revestimento removido.

Para produzir uma mistura asfáltica reciclada a quente com sucesso, podem ser utilizadas tanto as usinas do tipo intermitente (gravimétrica), como as usinas do tipo tambor - misturador (drum-mixer). Cada um desses tipos de usinas tem limitações quanto à operação e misturação.

Os fabricantes de usinas de asfalto equipamentos vêm produzindo usinas especialmente projetadas para a reciclagem. As usinas mais novas, de ambos os tipos, apresentam aperfeiçoamentos que eliminam os problemas de poluição e aumentam a eficiência do processo de reciclagem.

Devido à variedade de procedimentos envolvidos, cada tipo de usina é tratado separadamente a seguir:

- **Usinas intermitentes (gravimétricas)**

Na operação de uma usina intermitente convencional, o agregado virgem é seco e aquecido num secador convencional, posteriormente peneirado em várias frações granulométricas e finalmente misturado em proporções adequadas com cimento asfáltico aquecido. Se for realizada diretamente no secador a reciclagem do concreto asfáltico removido com o agregado virgem, sem qualquer modificação, haverá a formação excessiva de fumaça e, em alguns casos, problemas no secador, no elevador quente e na torre de proteção. A única técnica que tem obtido sucesso na reciclagem com usinas intermitentes é o método de transferência de calor.

No método de transferência de calor, o fluxo do agregado virgem é idêntico ao da produção de uma mistura nova. Porém a temperatura do agregado na saída do secador deve ser mais elevada, pois o agregado superaquecido no secador é misturado com o material removido, que está à temperatura ambiente. O agregado depois de aquecido é transferido de modo convencional para a torre de peneiração. A seguir, o agregado é pesado e depositado no misturador na proporção estabelecida pelo projeto de mistura.

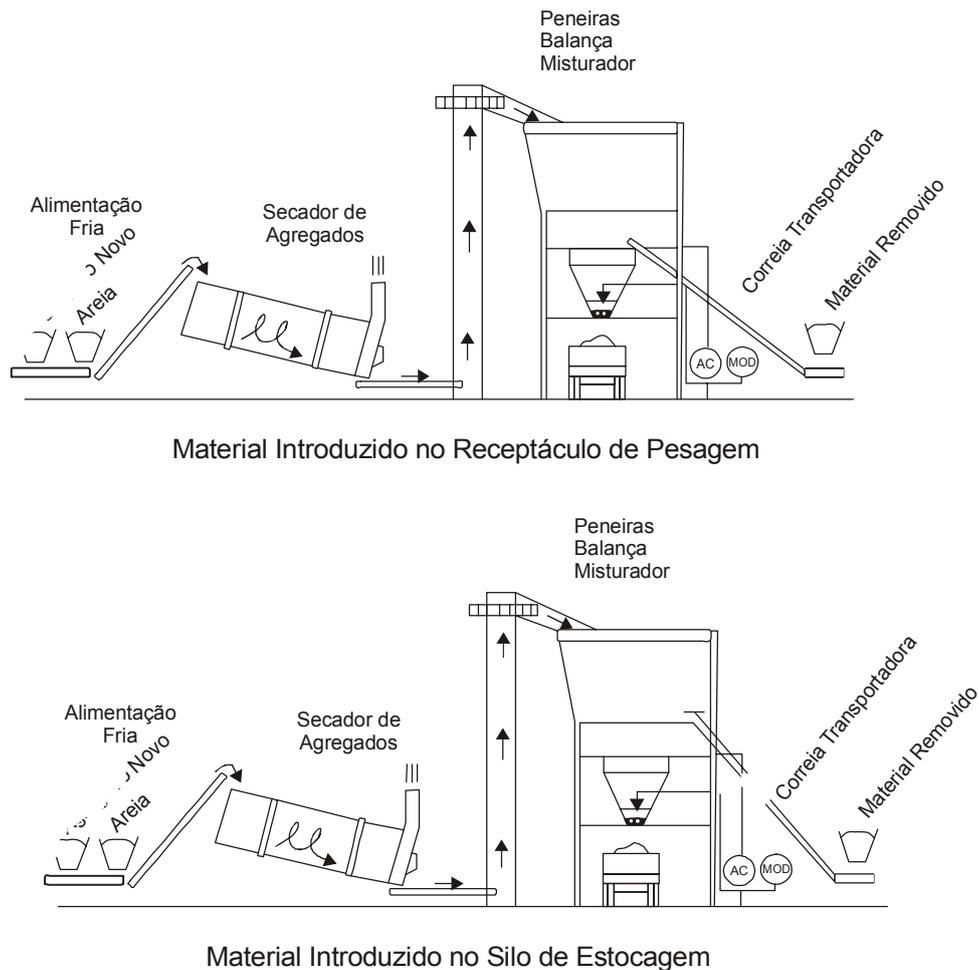
A principal diferença da reciclagem em usina intermitente está na introdução do material removido. Esse material não deve passar pelo secador e as opções para o uso da usina intermitente estão mostradas na Figura 47.

No primeiro esquema, o material removido já reduzido a dimensões apropriadas e devidamente estocado, é transferido diretamente para o receptáculo de pesagem na torre de mistura, por um sistema de correia transportadora auxiliar. O material removido é descarregado dentro do misturador junto com o agregado virgem superaquecido, ocorrendo a transferência de calor enquanto os dois materiais são misturados.

O cimento asfáltico adicional e o agente rejuvenescedor são adicionados durante a mistura, de acordo com o projeto da mistura. O material misturado é então descarregado da mesma maneira que um concreto asfáltico misturado a quente.

A segunda maneira consiste na estocagem do material removido em um determinado silo do sistema de silos quentes. O material removido é introduzido diretamente dentro do silo por meio de uma correia transportadora sem passar pela peneiração. Não deve ser permitido que o material removido permaneça no silo quente por tempo muito prolongado, pois absorverá calor dos outros silos e poderá aderir nas paredes do silo. O material removido é introduzido dentro do receptáculo de pesagem, exatamente como se fosse um agregado virgem, e é devidamente proporcionado de acordo com a fórmula de trabalho.

**Figura 47 - Operação de usina intermitente na reciclagem a quente**



O método de transferência de calor minimiza a possibilidade de problemas de poluição do ar ao evitar a passagem do material removido através do secador, do elevador quente e da torre de peneiramento. Além disso, podem ser mantidas as taxas de produção próximas do normal.

A porcentagem de material removido que pode ser utilizado na mistura reciclada, depende da temperatura que o material virgem pode ser aquecido. Quanto mais material removido for utilizado, maior será a temperatura necessária do agregado. A capacidade dos secadores convencionais para alcançar temperaturas elevadas limita a porcentagem de material removido a cerca de 30 por cento. A utilização de maior proporção de material removido exige temperaturas extremamente altas dos agregados e, geralmente, não são econômicas.

Existem ainda novos sistemas que usam o pré-aquecimento para o material removido. Trata-se de um pequeno tambor que usa os gases de exaustão provenientes do secador e um pequeno maçarico para aquecer o material removido e começar a retirada da umidade que pode estar presente.

- **Usina tipo “drum mixer”**

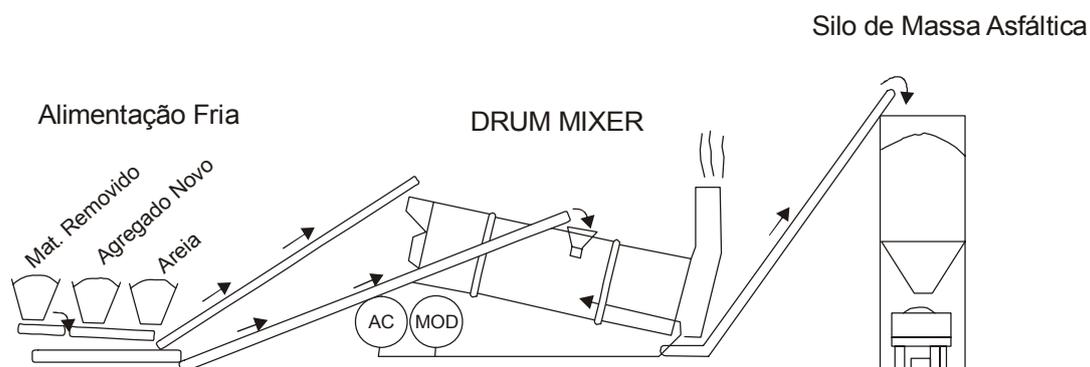
Na operação de reciclagem nas usinas do tipo “drum mixer”, o tambor secador convencional pode ser utilizado com algumas pequenas modificações. As alterações necessárias para a reciclagem são realizadas no tambor secador, basicamente, para evitar que o material removido seja exposto diretamente à chama do maçarico.

A reciclagem de misturas a quente com usinas “drum mixer” convencionais geralmente são satisfatórias, porém as usinas podem não atender as exigências mínimas de qualidade do ar. A exposição direta do material removido à chama do maçarico e os gases de combustão extremamente quentes causavam excessiva fumaça azul. Frequentemente, verifica-se o aparecimento de crostas formadas por material fino e asfalto sobre as aletas metálicas e no fundo do tambor, que contribuíam, também, para aumentar o problema da fumaça.

Para evitar estes problemas, tem-se utilizado o sistema de alimentação no centro do tambor, como mostra a Figura 48. O sistema de alimentação no centro do tambor é o mais comumente utilizado para produzir misturas asfálticas recicladas em tambor misturador. Outros sistemas utilizados não tem tido sucesso devido a problemas de poluição e a baixas taxas de produção. Alguns métodos como o do pirocone e do sistema de tambores em tandem, caíram em desuso.

O agregado novo entra no tambor pela extremidade do maçarico (zona de radiação) onde é seco e aquecido. O material removido entra num ponto mais abaixo (na porção central), longe da chama e da elevada temperatura dos gases.

**Figura 48 - Operação de usina “drum mixer” na reciclagem a quente**



A transferência de calor ocorre quando os dois materiais são combinados. Nessa fase são adicionados cimento asfáltico adicional e/ou agente rejuvenescedor, e a mistura é realizada na metade inferior do tambor (zona de convecção ou misturação). A maioria dos trabalhos de reciclagem a quente em usinas do tipo “drum-mixer” que utilizam um sistema desse tipo, tem aproveitado 50% de material

removido. A emissão de fumaça, na maioria desses trabalhos, tem estado dentro de limites aceitáveis.

As usinas de asfalto "drum mixer" modernas possuem o sistema de alimentação central. As usinas antigas necessitam diferentes modificações para reciclar pavimentos asfálticos.

Para eliminar os problemas da secagem dos materiais betuminosos fresados nas usinas "drum-mixer" convencionais, a indústria está fabricando usinas que fazem mistura num tambor duplo - a "double barrel".

A "double barrel" é uma usina em que o tempo de mistura, em decorrência do comprimento da câmara de mistura, é mais longo (75 segundos). Ela possui um tambor de menor diâmetro e de maior comprimento, semelhante ao de uma usina gravimétrica, que gira dentro de um outro tambor, concêntrico e fixo, de diâmetro bem maior, de menor comprimento e termicamente isolado. A coroa circular formada ao longo do comprimento do tambor de maior diâmetro forma a câmara de mistura, onde existem pás para a execução e homogeneização da mistura.

O agregado novo é adicionado no tambor de menor diâmetro, onde é aquecido por um maçarico cuja chama atua no contra-fluxo do material. O material é superaquecido após percorrer o comprimento do tambor menor e é introduzido na câmara de mistura. O material fresado é então introduzido diretamente na câmara e, após ser homogeneizado e aquecido pelo calor do material novo, é misturado juntamente com asfalto, agente rejuvenescedor e filler.

#### **d) 4ª Etapa: Lançamento e compactação**

A mistura pode ser lançada e compactada como um concreto asfáltico normal, usando os procedimentos e equipamentos convencionais.

### **6.3.5 CONTROLE DA QUALIDADE**

O objetivo da reciclagem é produzir uma mistura final que atenda em todos os aspectos as especificações de qualidade das misturas convencionais. Portanto, o controle de qualidade é tão importante durante a reciclagem como no processo de mistura a quente convencional.

No intuito de atingir as expectativas do projeto da mistura é necessário verificar os aspectos de qualidade do material removido. Algumas alterações ocorrem durante a estocagem e que devem ser corrigidas. No controle de qualidade da mistura reciclada deve-se dar ênfase especial a granulometria dos agregados e as características do asfalto do revestimento removido da pista.

A análise de granulometria do material recuperado pode determinar a adição de novos agregados, que adequadamente graduados, possibilitem o enquadramento da mistura numa faixa específica. A análise das propriedades do cimento asfáltico recuperado

determina a escolha da quantidade e das características do novo asfalto necessário para atender às especificações quanto à mistura final.

Na operação em usina central, a inspeção de controle de qualidade deve inicialmente ser feita na classificação e depósito do pavimento removido. Deverá ser verificado o seguinte:

- a) se o material está adequadamente fragmentado ou pulverizado;
- b) se houve a separação do material recuperado em pilhas de estoque de material mais graúdo e mais fino; e
- c) se foram coletadas e ensaiadas as pilhas durante cada dia de produção, para garantir que estão sendo atendidos os requisitos de granulometria.

A estocagem deve ser executada, se possível, com a utilização de correias transportadas para evitar o deslocamento de equipamentos sobre as pilhas. Elas devem ser devidamente secas e livres de excesso da umidade.

O principal aspecto a ser inspecionado na produção da massa reciclada é a entrada do material removido, pois ele não deve ser diretamente exposto ao aquecimento direto da chama do maçarico. Este material muitas vezes chamado de “fresado” deve ser suficientemente aquecido e seco, de maneira que seja reduzida a viscosidade do asfalto existente e permita a mistura com o novo ligante e/ou rejuvenescedor, para produzir uma mistura homogênea com a temperatura uniforme.

### **6.3.6 VANTAGENS DA RECILAGEM A QUENTE**

Do ponto de vista exclusivamente da eficiência em custos, pode-se afirmar que a reciclagem à quente do pavimento existente deve ter maior aplicação no planejamento da restauração de pavimentos.

Outro importante fator é a conservação de energia quando comparada com outros métodos de restauração ou reconstrução. Na determinação da economia de energia muitos fatores devem ser considerados: novos agregados, novo asfalto, distâncias de transporte (depósito e usina), método de remoção, método de pulverização, tipo de usina e condições das especificações.

A Tabela 25 ilustra a economia média de energia das técnicas de reciclagem a quente quando comparadas ao processo convencional de recapeamento. A economia proveniente das operações de reciclagem à quente na pista é bastante significativa quando comparada com um recapeamento com mistura nova.

**Tabela 25 - Comparação entre consumo de energia**

PROCESSO	NECESSIDADE DE ENERGIA (BTU/ton)
Recape com mistura nova (e = 4 cm)	581.980
Fresagem a frio e reciclagem a quente em usina	
- 20% reciclado / 80% mistura nova (e = 4 cm)	542.049
- 40% reciclado / 60% mistura nova (e = 4 cm)	488.401
Reciclagem a quente na pista ( e = 4 cm)	202.300

Existem diversas vantagens na execução das operações de reciclagem em usina. Poderá ser obtido um melhor controle de qualidade em termos de dimensões das partículas, de teor de agente rejuvenescedor, de porcentagens de participação do agregado novo e do reciclado na mistura e, também, de homogeneidade da mistura.

Outras vantagens das operações em usina devem-se a sua capacidade de reparar quase todos os tipos de defeitos dos pavimentos e de produzir melhoria estrutural significativa. Os problemas de resistência à derrapagem podem, também, ser corrigidos mediante adequado projeto de mistura, incluindo a adição de uma camada de agregado resistente ao polimento.

A reciclagem em usina se mostra mais vantajosa quando são necessárias substanciais melhorias estruturais, normalmente nas vias de elevado volume de tráfego. Com uma adequada programação é possível remover e recompor o mesmo segmento em um dia de serviço. Podem ser usadas misturas recicladas feitas com agregados provenientes das operações de remoção do dia anterior.

A reciclagem a quente em usina é comprovadamente um processo que permite melhorias estruturais significativas. O maior benefício é obtido na adição de asfalto ao material removido da pista e a posterior reposição na mesma espessura. Este fato permite o acréscimo de resistência da estrutura do pavimento.

#### **6.4 RECICLAGEM A FRIO**

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. A mistura final poderá ser utilizada em camada de base, que deverá ser revestida com um tratamento superficial ou uma mistura asfáltica antes de ser submetida a ação direta do tráfego.

Em função do tipo de estabilizante que é adicionado ao pavimento pulverizado, a reciclagem a frio pode ser classificada em:

- a) Reciclagem com adição de material betuminoso - consiste na mistura do revestimento e da base pulverizados no local, com a adição de material betuminoso, para produzir uma base estabilizada com betume.

- b) Reciclagem com adição de estabilizante químico - consiste na pulverização e mistura na pista da camada de revestimento, da base e do subleito ou de qualquer combinação entre essas, com a adição de estabilizantes químicos (cal, cimento ou cinzas volantes), para produzir uma base estabilizada quimicamente.

Embora estes dois processos sejam bastante similares quanto às considerações de projeto (amostragem de campo, análise de laboratório, compactação, etc.), existem muitos aspectos que os diferenciam.

A reciclagem com adição de material betuminoso envolve somente o revestimento e a base granular, embora o subleito possa ser atingido inadvertidamente durante a fase de pulverização. A reciclagem com adição de agentes químicos tais como cal, cimento e cinzas volantes, envolve geralmente o subleito do pavimento.

A reciclagem a frio não é uma técnica nova. Muitos órgãos rodoviários vem executando este tipo de restauração há vários anos. Os equipamentos convencionais de pavimentação tem sido utilizados para romper, pulverizar, adicionar e misturar os estabilizadores, e, por fim, compactar o material.

O crescente interesse em reciclagem de pavimentos tem motivado os fabricantes a produzir equipamentos especialmente projetados para reciclar e reelaborar as camadas do pavimento. Os maiores desenvolvimentos tem ocorrido na melhoria da potência dos equipamentos e na produção de peças mais resistentes.

Estes desenvolvimentos são fundamentais para que haja equipamentos capazes de operar de maneira econômica, tanto em revestimentos muito espessos, como em bases granulares e em subleitos com alta plasticidade. A adoção destes equipamentos na reciclagem na pista garante eficiência ao processo e qualidade ao material reciclado.

Atualmente, a experiência indica que essa técnica de restauração de pavimentos pode ser aplicada mais eficientemente nos seguintes casos:

- a) em rodovias de baixo volume de tráfego (vicinais);
- b) em acostamentos defeituosos de rodovias principais; e
- c) na utilização do material reciclado como base estabilizada.

#### **6.4.1 DESEMPENHO E LIMITAÇÕES**

Os dados coletados durante a fase de avaliação, referentes aos defeitos, drenagem, subleito e propriedades dos materiais, em conjunto com a avaliação estrutural do pavimento, indicarão a amplitude do problema nas camadas do pavimento.

Quando a avaliação estrutural indicar que a estrutura existente é inadequada para o tráfego atual e futuro, o recapeamento é a primeira solução a ser levada em conta. Entretanto, se o revestimento e as camadas subjacentes forem inadequadas para suportar uma camada asfáltica, a reciclagem deve ser considerada.

A mistura reciclada, quando adequadamente projetada, proporciona um material com propriedades estruturais similares a de um material estabilizado novo.

Entre as diversas razões que podem justificar o emprego da reciclagem a frio de um pavimento, podem ser relacionadas as seguintes:

- a) a melhoria da capacidade estrutural, que é o principal benefício diretamente atribuído a essa 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.

Alguns dos principais fatores limitadores que devem ser considerados antes da seleção e uso da reciclagem a frio, são os seguintes:

- a) a interrupção do tráfego devido ao processamento e cura do material pode ser ainda maior do que outros tipos de atividades de restauração. Essa interrupção pode ser bastante reduzida se for utilizada uma técnica de passada 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 de 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. Isso decorre do fato que o coeficiente estrutural para esse tipo de material não é perfeitamente conhecido. Além disso, os métodos de ensaios e de controle para determinar a dosagem ótima de asfalto, tempo de mistura e compactação, não estão bem definidos até o momento, tanto no campo como em laboratório.

#### **6.4.2 AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS**

A avaliação dos materiais nos projetos de reciclagem de pavimentos envolve as seguintes etapas:

##### **a) 1ª Etapa: Estudo do pavimento**

Cada uma das camadas do pavimento a ser reciclado deve ser amostrada para determinar as propriedades dos materiais. O inventário visual dos defeitos, efetuado durante a fase de avaliação, deverá ser analisado cuidadosamente para determinar o tipo e a severidade dos defeitos. Esta inspeção visual pode ajudar na determinação das causas e amplitude dos problemas e na seleção da técnica de restauração mais apropriada.

Os seguintes itens devem ser cuidadosamente examinados:

- Revestimento
  - teor de asfalto
  - granulometria
  - observação visual dos defeitos
- Base granular
  - granulometria
  - plasticidade
- Subleito
  - granulometria
  - plasticidade

O número de amostras retiradas deve ser representativo da variação dos materiais do pavimento. Esta variação pode ser obtida através dos registros da conservação, da inspeção visual, dos registros da construção e dos mapas pedológicos. Os dados coletados durante esta fase permitirão a divisão em segmentos homogêneos, que deverão ser analisados separadamente.

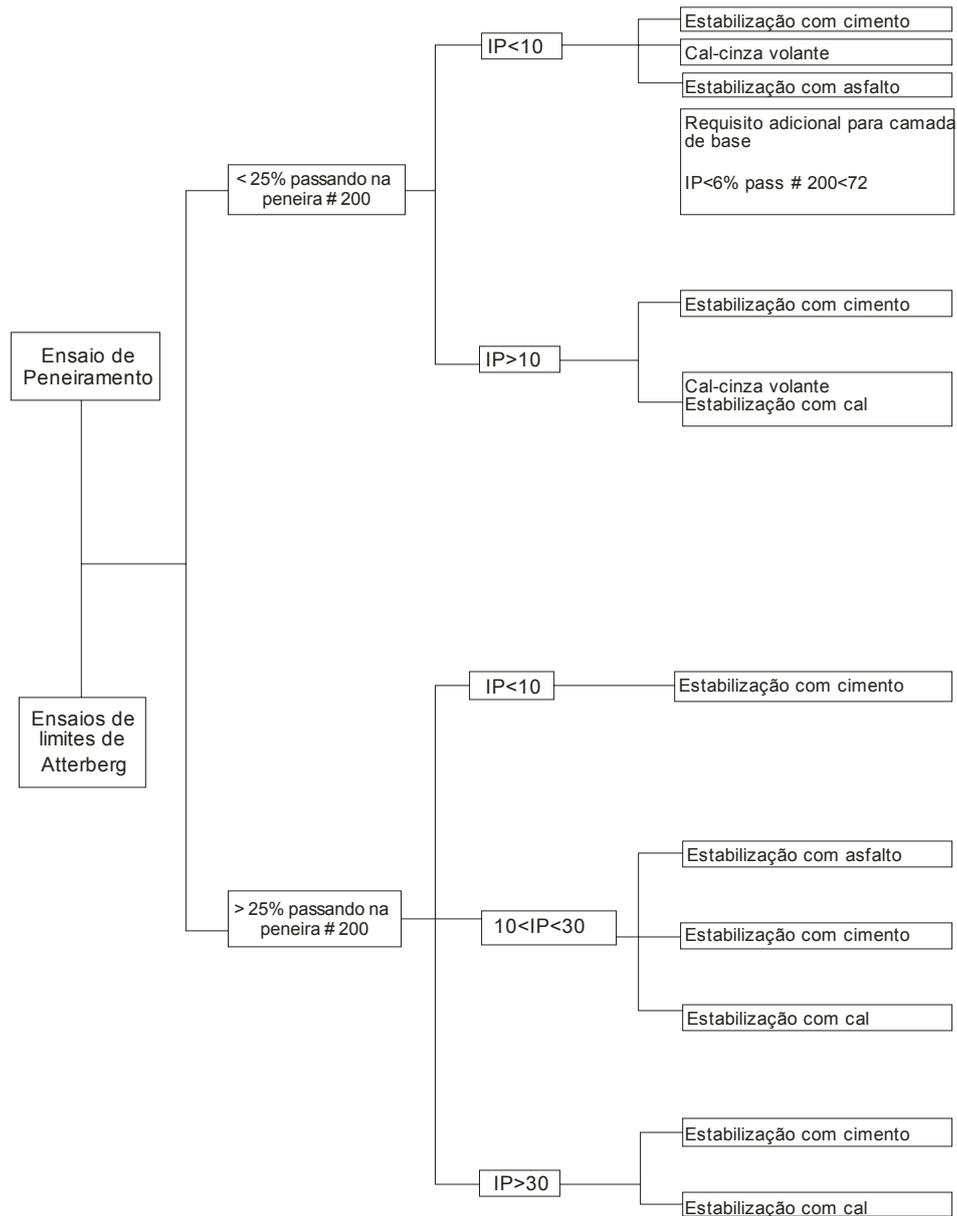
#### **b) 2ª Etapa: Ensaios de laboratório**

A análise de laboratório é crucial para a produção de uma mistura aceitável. Ela deve incluir o seguinte:

- Granulometria dos agregados removidos e ensaios de qualidade de todos os materiais;
  - Teor de asfalto e viscosidade do cimento asfáltico do revestimento existente;
  - Limites de Atterberg e teores de umidade das camadas granulares e subleito; e
  - Projeto da mistura para selecionar o tipo e qualidade do agente estabilizador.
- **Ensaios de granulometria**

A granulometria do material, e principalmente a quantidade do material que passa na peneira nº 200, são muito importantes na seleção do tipo de estabilizador que deve ser utilizado (conforme diagrama apresentado na Figura 49).

Figura 49 - Processo de escolha do tipo de estabilização



A granulometria torna-se fundamental quando um material betuminoso é selecionado. Os materiais betuminosos não podem ser misturados com solos plásticos, pois o processo é muito oneroso devido ao alto teor de finos.

Estas verificações são necessárias como dados de entrada no projeto da mistura e permitem ao engenheiro garantir a qualidade do produto final quanto a condição granulométrica.

Se a granulometria final não atender às especificações da camada de base, novos agregados devem ser adicionados. Porém, a maioria dos procedimentos a frio permite o enfaixamento da granulometria e dificilmente é necessária a inclusão de novos agregados. Algumas pequenas alterações devido a melhoria da drenagem podem ser facilmente efetuadas.

- **Teor de asfalto e viscosidade**

Quando é baixo o percentual de agregados da base e sub-base que serão combinados com o material do revestimento asfáltico (menor do que 50%), a importância do teor residual de asfalto torna-se relevante e as propriedades devem ser determinadas em laboratório através dos ensaios de extração e recuperação. Nas operações de reciclagem a frio onde a quantidade de concreto asfáltico é inferior a um terço da quantidade total de material a ser reciclado, não precisam ser determinados os parâmetros supra citados.

- **Análise de plasticidade**

Devem ser determinadas as características de plasticidade (limites de Atterberg) das camadas granulares e subleito. Esta determinação é importante na escolha do estabilizante mais adequado para o material a ser reciclado. Essas características são:

- Limite de Liquidez;
- Limite de Plasticidade; e
- Índice de Plasticidade.

Se a plasticidade e/ou granulometria dos materiais não atenderem às especificações, as propriedades dos materiais devem ser alteradas ou um adequado agente estabilizador deve ser selecionado. Se ensaios de laboratório do material de base ou sub-base revelam que houve muita infiltração de finos advindos do subleito e, portanto, a granulometria é inadequada para a adição de material betuminoso, outro tipo de estabilização deve ser realizado.

Nesse caso, existem várias soluções e duas delas são apresentadas abaixo:

- adicionar mais agregado para corrigir a granulometria do material e efetuar a reciclagem a frio com a adição de material asfáltico; ou
- estabilizar os materiais das camadas granulares com a aplicação de estabilizantes químicos (cal ou cimento) e recuperar o revestimento de maneira mais eficiente como, por exemplo, através de reciclagem a quente.

- **Seleção do agente estabilizador**

A escolha do tipo e quantidade apropriada do estabilizador é função dos objetivos do projeto de reciclagem, das propriedades dos materiais a serem reciclados e da disponibilidade dos estabilizantes na área do projeto da reciclagem.

O objetivo do processo de reciclagem deve ser conhecido antes da escolha final do aditivo. Os objetivos básicos são:

- modificação do material granular: alteração das propriedades deficientes nos materiais de cada camada;

- melhoria da resistência e durabilidade: recuperação das propriedades consideradas no projeto estrutural do pavimento; e
- modificação do subleito: alteração específica das propriedades deficientes do subleito.

Como pode ser observado na Figura 49, a cal será um estabilizante ineficiente para solos de graduação aberta. Para os piores tipos de solos, desde que não haja presença de material orgânico, geralmente o melhor estabilizante é a cal. O asfalto e cal-cinzas volantes não são recomendadas para materiais de graduação fechada pois o processo torna-se oneroso devido à alta quantidade de aditivo necessário.

### 6.4.3 PROJETO DA MISTURA

O propósito do projeto da mistura é determinar a quantidade necessária de agente estabilizador para assegurar que sejam atendidos os objetivos preconizados. Para tal, deve-se proceder a um rigoroso procedimento de laboratório onde são preparadas amostras de misturas contendo diversas porcentagens do agente estabilizador (cimento, cal ou materiais betuminosos).

As misturas são, então, ensaiadas para determinar a melhoria obtida em suas propriedades. A mistura que apresentar melhoria mais acentuada de suas propriedades é, geralmente, a escolhida.

Para reciclagem com adição de materiais betuminosos, na pista ou em usina, o objetivo principal do projeto da mistura é produzir uma mistura semelhante à produzida com novos materiais. Entretanto, para a reciclagem a frio, não existem métodos de projeto de mistura aceitos universalmente.

Em geral, ensaios de laboratório, fórmulas empíricas ou experiências anteriores com projetos similares, são utilizados para estabelecer a quantidade inicial de asfalto, que pode ser ajustada, se necessário, depois do início da construção.

O procedimento para projeto de mistura adotado pelo Instituto de Asfalto é o seguinte:

- “O agregado de um revestimento asfáltico removido da pista é misturado com agregados retirados de outras camadas e/ou com novos agregados necessários para atender aos requisitos da especificação. Uma vez que as proporções relativas do agregado são determinadas, a quantidade do novo asfalto deve ser calculada. Para tal, uma quantidade total de asfalto para a mistura é determinada e cálculos então são feitos para estimar a quantidade requerida de novo asfalto para a reciclagem. Seguindo estas determinações, os ajustes na quantidade de asfalto são feitos por tentativas através do Método Marshall”.

O projeto da mistura a frio com materiais asfálticos pode ser formulado a partir das informações obtidas na avaliação dos materiais,. A seguir estão relacionadas as etapas do procedimento para o projeto da mistura, conforme metodologia do Instituto do Asfalto:

- a) cálculo da combinação dos agregados da mistura reciclada;
- b) seleção do tipo e categoria do novo asfalto;
- c) determinação da quantidade total de asfalto para a combinação dos agregados;
- d) estimativa do percentual de novo asfalto necessário à mistura; e
- e) ajuste do teor de asfalto através de tentativas pelo Método Marshall.

#### 6.4.4 TÉCNICAS CONSTRUTIVAS

As técnicas de reciclagem a frio podem ser classificadas como se segue:

- a) reciclagem a frio no local; e
- b) reciclagem a frio em usinas estacionárias.

As etapas básicas de construção necessárias para a reciclagem a frio são descritas seguir:

##### a) **Etapas 1 - Rompimento do revestimento**

A primeira etapa consiste no rompimento do revestimento e, eventualmente, da base até a profundidade necessária. A escarificação e a fresagem a frio são os métodos usualmente empregados para realizar esse trabalho e serão descritas brevemente a seguir:

- **Escarificação**

Motoniveladoras com escarificadores posicionados na parte frontal podem ser usados em revestimentos asfálticos delgados de até 5 cm de espessura. Para revestimentos asfálticos com espessura entre 5 cm e 10 cm são necessárias motoniveladoras mais potentes, equipadas com escarificadores posicionados na parte trazeira. Os revestimentos com mais de 10 cm de espessura exigem, normalmente, tratores de esteiras com escarificadores solidários ou rebocáveis.

A vantagem da escarificação é que o rompimento é realizado por um custo mais reduzido. Uma desvantagem é o precário controle da profundidade de escarificação, que pode causar a contaminação das camadas a serem recicladas com as camadas subjacentes. Além disso, os fragmentos de pavimento devem ser posteriormente britados para produzir a granulometria final desejada.

- **Fresagem a frio**

Assim como a escarificação, a fresagem a frio destrói a integridade estrutural do revestimento, porém ela pode reduzir o revestimento e eventualmente a base em partículas de dimensões apropriadas. As dimensões finais das partículas são determinadas pela profundidade do corte, velocidade de avanço da máquina, sentido de rotação do cilindro fresador, qualidade do material, condições do revestimento do pavimento, condições ambientais e teor de asfalto.

Os equipamentos de fresagem a frio tem sido utilizado extensivamente para remoção de pavimentos e redução de dimensões. O uso desse equipamento tem aumentado substancialmente no decorrer dos últimos anos. A principal vantagem da fresagem a frio é que o material depois de fresado apresenta uma granulometria apropriada para a reciclagem e sem processamento adicional, exceto para remover fragmentos de dimensões maiores.

## **b) Etapa 2 - Redução de dimensões**

A redução de dimensões é necessária somente se o rompimento do revestimento existente for realizado por escarificação. Os seguintes métodos alternativos de fragmentação do material podem ser usados:

- para pavimentos asfálticos escarificados com tratores de esteira, um rolo de grelhas rebocado, pé-de-carneiro ou outro equipamento similar, podem quebrar os grandes pedaços, em preparação para outro métodos de redução de dimensões;
- a redução de dimensões pode, então, ser executada por um pulverizador especial, rebocado ou autopropelido. Este equipamento requer maior potência e peças mais resistentes do que os equipamentos convencionais de estabilização de solos;
- o material pode ser removido da pista e levado a um britador. Normalmente, isso somente é feito se o material for misturado em usina central; e

## **c) Etapa 3 - Mistura**

O objetivo da fase de mistura é proporcionar uma distribuição uniforme do agente rejuvenescedor ou estabilizador, por todo o material que está sendo reciclado. Essa é uma operação crítica, mas necessária para se obter uma mistura de boa qualidade.

Existem dois métodos básicos nos quais a fase de mistura pode ser completada. O material pode ser misturado no local ou ele pode ser removido e misturado em usina. A discussão, a seguir, cobrirá a adição e mistura do estabilizador usando esses dois métodos.

### **• Mistura no local**

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.

As vantagens da mistura no local são:

- o material não tem que ser transportado para fora da pista;
- 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,
- evitar prolongada interrupção do tráfego.

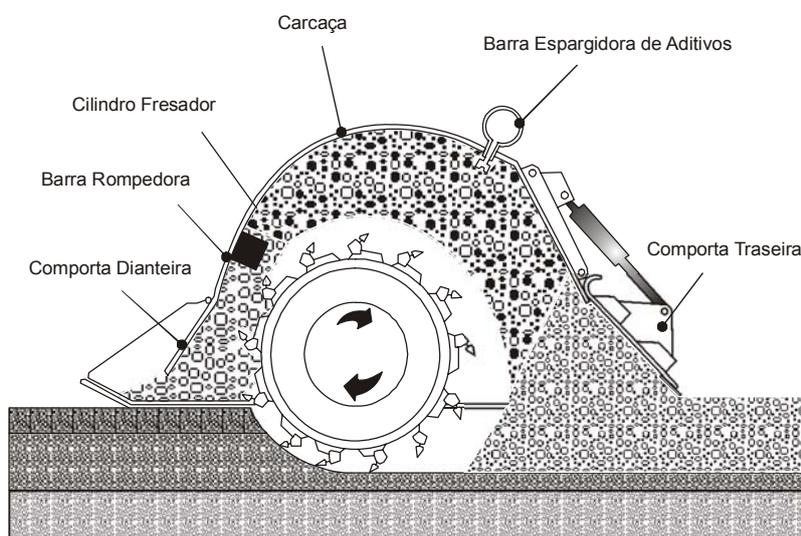
A desvantagem, normalmente, reside na maior dificuldade no controle de qualidade do material misturado, quando comparado com o processo em usina. Neste ponto, tem havido melhorias substanciais no equipamento de reciclagem para melhorar o controle de qualidade.

Existem diversos melhoramentos recentes para os equipamentos de reciclagem a frio no local. As fresadoras modificadas ou especialmente projetadas estão disponíveis para processar o material removido numa única passada. Como pode ser observado na Figura 50, isso inclui o corte até o greide (normalmente apenas o pavimento asfáltico), fragmentação, adição e mistura de aditivos.

Na reciclagem com adição de cimento Portland ou cal hidratada, a quantidade adequada destes aditivos deve ser previamente espalhada na pista de rolamento antes da fresagem e mistura.

O material misturado pode então ser distribuído numa vibroacabadora ou por meio de um dispositivo que controle o greide e a seção transversal do pavimento. A compactação completa esse processo. Uma vez que o equipamento de fresagem se desloca ao longo da estrada somente uma vez e numa operação de passada única, a produção deverá ser maior do que com a operação de passadas múltiplas. Em ambos os procedimentos, a produção é limitada mais pela velocidade do equipamento de pulverização do que por qualquer outro fator.

**Figura 50 - Dispositivo de reciclagem a frio no local**



Um outro nível de sofisticação é o conceito de trem completo, que realiza integralmente o processo de reciclagem em uma só passada. Aqui, a fresadora é usada somente para remover o material e os equipamentos subseqüentes controlam a granulometria, a introdução do aditivo (se necessário) e a mistura.

Neste equipamento, o material fresado é levado por correia transportadora até um britador de rolos, onde é fragmentado e classificado. O material é, então, levado a um misturador tipo "pug-mill", acoplado ao equipamento, onde é realizada a mistura com o agente estabilizador. A mistura resultante é, a seguir, espalhada na rodovia

através de uma distribuidora de agregados convencional que, geralmente, é acoplada ao equipamento.

- **Mistura em usina**

O material é removido da rodovia e misturado a frio numa usina misturadora. A principal vantagem da operação de uma usina, é o excelente controle de qualidade obtido na adição do estabilizador e no processo de mistura. As desvantagens são: os transportes adicionais, os custos de execução adicionais e os maiores prazos de construção.

**d) Etapa 4 - Espalhamento e compactação**

São empregadas as operações normais de espalhamento e compactação, dependendo do tipo de mistura e de estabilizador utilizado. Se forem utilizados estabilizantes ou rejuvenescedores deverá ser considerado o tempo de cura necessário.

**e) Etapa 5 - Colocação da camada de revestimento**

São adotados os procedimentos normais de construção, dependendo do tipo de material reciclado e da camada de revestimento a ser utilizada.

#### **6.4.5 CONTROLE DA QUALIDADE**

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.

Para atingir esses objetivos, os serviços de reciclagem a frio devem ser controlados para atender, do ponto de vista tecnológico, os seguintes itens:

- a) Granulometria do pavimento existente;
- b) Teor de umidade;
- c) Grau de homogeneização;
- d) Compactação; e
- e) Temperatura e umidade durante o período de cura.

Os itens potencialmente problemáticos quanto as operações de reciclagem a frio são:

- a) Espessura de corte do pavimento existente;
- b) Grau de pulverização;
- c) Controle de ligante adicional;
- d) Controle do agente reciclador; e
- e) Distribuição do ligante e/ou estabilizante.

#### 6.4.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Existem diversas vantagens no uso das técnicas de reciclagem a frio, a saber:

- a) quando uma camada de concreto asfáltico existente é pulverizada e misturada juntamente com o agregado da base existente, o asfalto residual atua como um excelente ligante para auxiliar na confecção de uma base reciclada menos suscetível à ação da água;
- b) a adição de um novo ligante ou de um estabilizante químico, tais como cal ou cimento, poderá contribuir para evitar a expansão da base reciclada, aumentar a impermeabilização da base e aumentar a capacidade de carga da estrutura do pavimento;
- c) aumentando a capacidade de carga da camada de base, a estrutura do pavimento poderá ser mais delgada, o que significará menor quantidade de material necessária e, portanto, economia de materiais virgens selecionados; e
- d) o material considerado como rejeito, devido ao grau de exigência da nova camada de revestimento, poderá ser estocado para uso futuro.

As operações de reciclagem a frio tem algumas desvantagens quando comparadas com outras operações de restauração, a saber:

- a) o equipamento de pulverização necessita freqüentemente de reparos e portanto a produção pode ser baixa;
- b) a interrupção do tráfego pode ser maior do que em outras atividades de restauração;
- c) o período de cura normalmente é necessário para se obter a resistência desejada;
- d) durante a execução e o período de cura existe muita susceptibilidade às condições climáticas, como temperatura e umidade; e
- e) o controle de qualidade das operações na pista não é tão bom quanto nas operações com usina central.

## **7 - CONSERVAÇÃO DOS PAVIMENTOS**



## **7 CONSERVAÇÃO DOS PAVIMENTOS**

### **7.1 DEFINIÇÃO E FINALIDADE**

A conservação dos pavimentos podem ser definidas como sendo um conjunto de serviços destinados à preservação do pavimento nas condições em que ele foi originalmente construído ou no estado em que foi posteriormente restaurado.

A infra-estrutura rodoviária, se conservada nas condições em que foi construída, duraria, teoricamente, para sempre. Na prática, porém, a conservação apenas ajuda a rodovia a desempenhar, de maneira satisfatória, o seu papel durante a vida para a qual ela foi projetada. A conservação não deve ser considerada como um recurso temporário, mas como um investimento aplicado na infra-estrutura rodoviária e na garantia contra uma restauração dispendiosa.

A conservação das rodovias tem três finalidades principais, a saber:

- a) prolongar a vida útil das rodovias;
- b) reduzir o custo de operação dos veículos; e
- c) contribuir para que as rodovias se mantenham permanentemente abertas ao tráfego e permitir uma maior regularidade, pontualidade e segurança aos serviços de transporte.

A primeira finalidade se relaciona mais diretamente com os interesses dos órgãos rodoviários; a segunda com os usuários da rodovia e a terceira com os habitantes da região atendida pela rodovia.

Ainda que se observe devidamente as normas de qualidade dos materiais e da construção, as rodovias se deterioram com o tempo. Portanto, o objetivo principal da conservação é amenizar os efeitos da deterioração provocados pela severidade do tráfego e do ambiente e, ao mesmo tempo, recompor a serventia da rodovia por mais um período de tempo.

A conservação rodoviária compreende várias atividades ou operações de engenharia, muitas delas em pequena escala, e que se repetem a intervalos que variam segundo o clima, o tipo de terreno, o tráfego, a qualidade inicial da construção e o tipo de revestimento.

### **7.2 CONSERVAÇÃO ROTINEIRA**

A conservação rotineira compreende um conjunto de operações realizadas com o objetivo de reparar ou sanar um defeito. Os principais serviços rotineiros para os pavimentos asfálticos são: remendos e selagem de trincas.

### 7.2.1 REMENDOS

A execução de remendos é necessária para reparar certos tipos de defeitos em revestimentos asfálticos. Os remendos são geralmente realizados por meio da colocação ou preenchimento com misturas betuminosas à quente ou à frio, em buracos produzidos naturalmente pela deterioração ou em escavações preparadas antecipadamente pelos trabalhadores. O remendo é complementado pela compactação apropriada, selagem dos bordos e limpeza, como será descrito posteriormente.

Os remendos ditos superficiais são aqueles que selam provisoriamente as trincas incipientes e evitam a penetração de umidade no pavimento. Este tipo de remendo pode ser executado através de aplicação de uma capa selante ou de uma fina camada de mistura betuminosa.

Os remendos profundos são utilizados para que os reparos executados no pavimento sejam de caráter mais permanente. O material da área a ser reparada deverá ser retirado até a profundidade necessária para estabelecer uma fundação firme. Isso poderá importar até mesmo na remoção de parte do subleito.

A execução de remendos é apropriada para as seguintes situações:

- a) reparo de panelas ou buracos;
- b) recomposição de segmentos com trincamento por fadiga;
- c) reperfilamento ou reparos localizados para a regularização prévia da superfície, quando da execução de recapeamentos asfálticos.

#### 7.2.1.1 REPARO DE PANEAS

Os buracos ou panelas são rupturas estruturais localizadas, que iniciam-se numa região que está mais enfraquecida do que o seu entorno. Os buracos que ocorrem nos pavimentos de concreto asfáltico representam a Restauração pontual do pavimento e afetam diretamente a segurança do tráfego. Não sendo reparados, rapidamente conduzirão à ruína dos trechos adjacentes, vindo a comprometer ainda mais seriamente a rodovia.

As principais causas da ocorrência de buracos (ou panelas) são:

- a) excesso de carga por eixo dos veículos;
- b) deficiência de projeto;
- c) deficiências construtivas; e
- d) ação da água devido a infiltração.

O principal responsável pela ocorrência de panelas está geralmente relacionada com a perda de capacidade de suporte, ocasionada pela presença de água na fundação ou subdimensionamento da estrutura do pavimento. Nestes casos, a seção enfraquecida exhibe

maiores deflexões sob carregamento do que outras seções, como demonstrada na Figura 51.

A aplicação contínua de cargas de tráfego pesado nas áreas enfraquecidas resultarão no rápido desenvolvimento de trincas de fadiga. Estas trincas permitem a infiltração de água, com a conseqüente ampliação da área estruturalmente enfraquecida e um buraco surgirá como resultado da ação do tráfego e do enfraquecimento dos materiais. A deterioração aumenta com a penetração de umidade, pois enfraquece a área próxima e expande o buraco, como se verifica nas etapas ilustradas na Figura 51.

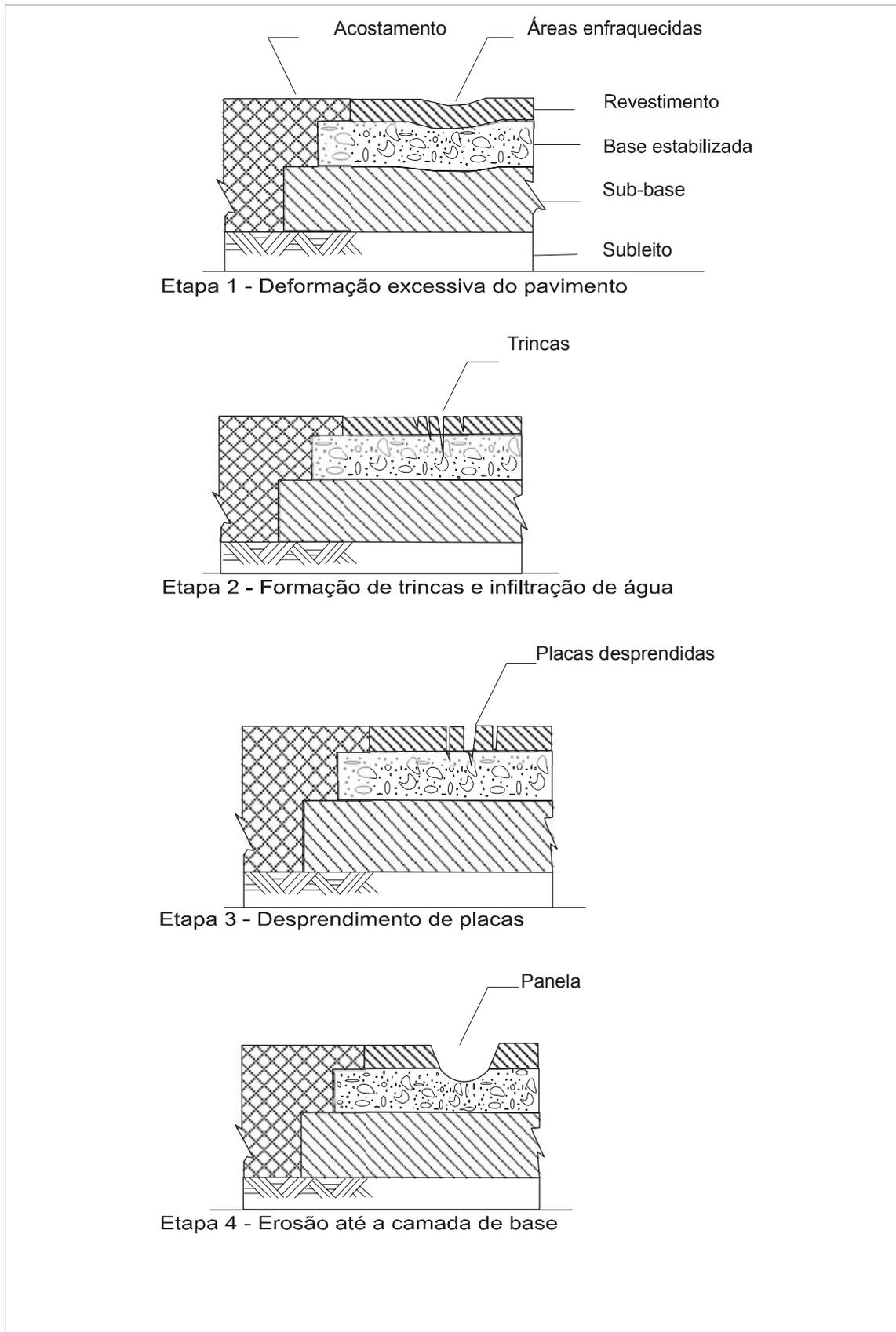
Nesta altura, a restauração é mais extensa nas camadas inferiores e a área comprometida é mais ampla do que é possível ser visualizado na superfície. Qualquer atividade de reparo nesta fase deve incluir tanto a reposição do revestimento como das camadas subjacentes. Sem este tipo de trabalho, o reparo é considerado temporário.

#### **7.2.1.2 REPARO DE TRINCAMENTO DE FADIGA**

Os pavimentos flexíveis podem desenvolver trincas de fadiga ou couro de jacaré quando são estruturalmente inadequados para as cargas de tráfego que estão sujeitos. Estes pavimentos requerem melhoria estrutural, freqüentemente através de camada(s) asfáltica(s) adicional(is) (reforço ou recapeamento espesso).

Entretanto, se as áreas mais defeituosas não forem apropriadamente reparadas, o recapeamento pode deteriorar-se mais rapidamente nos locais com trincas de fadiga. A correção prévia destes locais pode ser chamada de “reconstrução localizada”.

A seleção das áreas que serão reparadas antes da aplicação do recapeamento é parcialmente influenciada por considerações econômicas. As regiões de baixo suporte devem ser reparadas na medida que o custo adicional do remendo é compensada pela redução da espessura do reforço. A combinação entre a quantidade de remendos e a espessura de reforço deve resultar no menor custo global.

**Figura 51 - Formação de panelas em pavimentos asfálticos**

### 7.2.1.3 REPERFILAGEM

O perfil longitudinal da superfície ou do revestimento de um pavimento a ser reabilitado sempre tem deficiências. Além de pequenas irregularidades superficiais, geralmente existem deformações como afundamentos nas trilhas de roda ou corrugações, que podem ser excessivas em algumas regiões.

A reperfilagem ou reparos localizados consiste na aplicação de uma fina camada de mistura e/ou remendos localizados (em áreas mais irregulares), que não requerem preparos prévios no pavimento. Pode ser aplicada para corrigir as deformações e melhorar o conforto ao rolamento.

Quando for executado um recapeamento e que deve ser apropriadamente compactado, as áreas com deformações devem ser reparadas e/ou niveladas para que o equipamento de compactação aplique um esforço de compactação uniforme em toda a largura do pavimento

### 7.2.1.4 RECOMENDAÇÕES CONSTRUTIVAS

Para a realização dos remendos em pavimentos de concreto asfáltico, deve ser seguida a rotina de execução a seguir apresentada, cada etapa de trabalho somente sendo executada quando concluída a anterior.

A seqüência lógica apresentada deverá ser sempre executada, pois assim os resultados alcançados serão efetivamente melhores do que aqueles obtidos quando as atividades adiante listadas forem realizadas sem ordenação e disciplina.

Convém também ressaltar que embora as placas se caracterizem pela restauração pontual do revestimento asfáltico, suas causas podem decorrer de deficiências estruturais das camadas inferiores. Neste caso, deve ser feita, também, a reparação das camadas subjacentes ao revestimento - base, sub-base e mesmo o subleito - quando necessário.

Esta recomendação é de vital importância para a durabilidade dos reparos do pavimento, pois se essas camadas subjacentes forem afetadas e não forem reparadas, o defeito retornará rapidamente.

A realização dos remendos deve obedecer as oito etapas executivas adiante descritas.

#### a) 1º Etapa: Sinalização

Dispor os equipamentos de sinalização e controle de tráfego nos locais adequados.

#### b) 2º Etapa: **Demarcação da área a ser reparada**

Identificado o local a ser reparado, deverá ser demarcada a área a ser reparada com tinta, giz ou lápis cera, de forma a que toda a parte comprometida venha a ser retirada.

Esta marcação deve ser feita com linhas retas, sempre que possível paralelas ao eixo da rodovia e perpendiculares ao mesmo. Não deve ser permitida a abertura da cava com bordos arredondados.

**c) 3º Etapa: Corte do material deteriorado**

Faz-se o corte do material comprometido que, no caso do concreto asfáltico, deve ser realizado com o uso de compressor de ar equipado com martetele e ponteiro tipo pá. Caso não se disponha de compressor, usa-se a picareta.

O corte deve atingir toda a espessura da camada de revestimento, orientando-se a escavação no sentido do centro do buraco para os bordos. Os bordos devem ser sempre verticais. O corte deve ser executado até a profundidade necessária para atingir material estável, a fim de obter uma boa fundação para o remendo. O fundo deve ser nivelado.

**d) 4º Etapa: Limpeza do buraco**

Após a escavação do material a ser substituído, deve ser feita a sua remoção, utilizando-se pás e ferramentas manuais, levando-se o material para local afastado do buraco.

Não deve ser permitido que este material seja abandonado no acostamento, na pista ou nos dispositivos de drenagem próximos.

O pó remanescente no fundo da cava deve ser removido por jatos de ar comprimido. A cava deve ficar completamente limpa, sem qualquer material solto.

**e) 5º Etapa: Pintura de ligação**

Concluída a limpeza e após a inspeção da cava para verificar se todo o material comprometido foi removido, faz-se a pintura de ligação nas paredes e no fundo da escavação.

Aplica-se emulsão asfáltica ou asfalto diluído com o espargidor de asfalto ou dispositivo manual. A película ligante deve cobrir integralmente as paredes e o fundo da cava e deve-se cuidar para que não seja fina ou espessa demais.

**f) 6º Etapa: Lançamento e espalhamento da mistura betuminosa**

Após a aplicação da pintura de ligação, deverá ser lançado no buraco o material de reposição utilizando-se, conforme o caso, pré-misturado a frio ou o próprio concreto asfáltico, quando se dispuser de usina nas proximidades.

Qualquer que seja a natureza ou a origem da mistura, sua confecção deverá obedecer a prescrições de execução adequadas e dosagens controladas.

O lançamento da mistura na cava não deve ser feita com o basculamento do material, o que provocaria a segregação dos grãos mais graúdos do agregado. Utiliza-se para isto o lançamento com pás quadradas, começando o lançamento no sentido dos bordos para o centro.

Outra cautela a se adotar diz respeito à espessura da camada, que não deve exercer 10 cm, exigindo-se que, para camadas mais profundas, o lançamento se faça por etapas de 10 cm.

Depois de lançado o material na área do reparo, faz-se o seu espalhamento com ancinho, previamente umedecido com óleo, para não permitir a formação de torrões. A colocação do material no local do reparo deve prever um pequeno excesso para compensar o rebaixamento com a compactação.

#### **g) 7º Etapa: Compactação da mistura betuminosa**

Após a colocação do material e a verificação de que na periferia do remendo não existe material em excesso, inicia-se a sua compactação junto das paredes verticais, progredindo-se em direção ao centro do remendo.

Deve ser verificado nas bordas do remendo a compactação adequada do material recém colocado, de maneira que não surja um ressalto entre o pavimento antigo e o remendo executado.

Na compactação podem ser utilizados os seguintes equipamentos:

- rolo liso vibratório (solução mais conveniente);
- rolo liso comum; e
- placa vibratória;
- socador manual (solução menos indicada).

#### **h) 8º Etapa: Limpeza do local**

Após a compactação do remendo segue-se a limpeza da área. Isto compreende a remoção de todas as sobras e detritos, que deverão ser recolhidos e lançados em locais convenientes.

Os resíduos não devem ser lançados na pista, nos acostamentos ou em locais que possam comprometer a eficiência do sistema de drenagem.

### **7.2.2 SELAGEM DE TRINCAS**

A selagem de trincas consiste no enchimento de trincas e fissuras do revestimento com materiais como cimentos asfálticos, asfaltos diluídos, emulsões ou selantes especiais, para impedir a penetração de água nas camadas inferiores.

O trincamento é um defeito bastante comum nos pavimentos flexíveis e decorrente de diversas causas. Neste tópico são enfocadas apenas as trincas recuperáveis com simples serviços de reparação. Estas trincas podem ser ocorrências lineares ao longo das bordas do pavimento, nas juntas de pavimentação ou pequenas fraturas de retração em qualquer parte do pavimento.

Em um estágio mais evoluído de fraturamento, estas trincas podem ter a forma de reticulados ou malhas e, quando muito disseminadas pela superfície, constituem o chamado couro de jacaré.

Na grande maioria dos casos as trincas são causadas por carregamento excessivo dos veículos e, caso não sejam tratadas imediatamente após o seu surgimento, poderão propiciar a destruição das camadas inferiores do pavimento e até comprometer estruturalmente o subleito.

A selagem de trincas em pavimentos flexíveis é uma atividade de conservação rotineira que é executada pela maioria dos órgãos rodoviários. Em muitos casos, a vida útil dos pavimentos flexíveis pode ser estendida pela selagem adequada das trincas que surgem no pavimento. Isto é realizado através da:

- a) remoção de materiais como o pó, ou pequenas partículas de agregado, e a prevenção contra futuras infiltrações;
- b) redução da infiltração de água pela redução ou eliminação das aberturas das trincas. A infiltração da água além de causar os defeitos relacionados com a umidade também acelera os defeitos relacionados ao carregamento.

Além da prevenção dos defeitos descritos acima, a selagem das trincas é também utilizada para controlar a extensão e/ou severidade do defeito existente. Por exemplo, boas práticas de selagem de trincas podem ajudar a garantir que as trincas de retração térmica sejam mantidas em baixos níveis de severidade.

A selagem de trincas pode não ser tão eficiente em estruturas de pavimento que possuem bases e/ou subleitos drenantes. Assim como os selantes que tem vida útil muito curta são geralmente considerados como ineficientes.

Porém, na maioria dos casos, a selagem de trincas é considerada uma técnica de Restauração eficiente técnica e economicamente. Embora poucos dados de desempenho de longo prazo sejam disponíveis, informações de desempenho de curto prazo sugerem que os materiais de selagem funcionam muito bem quando a qualidade da construção também é boa.

#### **7.2.2.1 LOCAIS DE APLICAÇÃO DA SELAGEM DE TRINCAS**

Os principais pontos de infiltração de água superficial devem ser selados para garantir que os defeitos relacionados a umidade não induzam a ruptura do pavimento. Estes locais podem ser:

- a) a junta longitudinal de pavimentação entre pista e acostamento;
- b) a junta longitudinal de pavimentação entre as faixas de tráfego; e
- c) todas as trincas no revestimento do pavimento;

A junta entre pista e acostamento é um local de grande infiltração de umidade. Mesmo que sejam projetados e construídos drenos longitudinais adequados, ainda há necessidade de selagem da junta longitudinal entre pista e acostamento, pois a infiltração de grande quantidade de água através da junta pode carrear finos para o sistema de drenagem, provocando colmatção e tornando os drenos ineficientes.

As seguintes orientações são recomendadas quanto a avaliação da necessidade da selagem de trincas:

- a) executar a análise quanto ao trincamento para determinar se a selagem de trincas será eficiente. Em geral, somente as trincas transversais, longitudinais e as trincas entre pista e acostamento devem ser seladas;
- b) não devem ser seladas as trincas mais estreitas do que 4 mm e não lascadas. Estas trincas geralmente não são profundas e não causam, ainda, a Restauração. A aplicação da selagem nestas trincas, pouco ou nada resulta;
- c) devem ser limpas e seladas as trincas com largura entre 4mm e 20mm e ainda não lascadas; e
- d) devem ser reparadas com remendos asfálticos superficiais as trincas com abertura maior do que 20mm ou lascadas.

O tratamento de trincas de fadiga ou couro de jacaré através da selagem de trincas é considerado ineficiente. Este tipo de defeito indica uma ruptura estrutural que deve ser corrigida com outras formas de recuperação (capa selante ou lama asfáltica para rodovias com baixo volume de tráfego, remendos profundos e/ou reforços estruturais para rodovias de alto volume de tráfego).

#### **7.2.2.2 RECOMENDAÇÕES CONSTRUTIVAS**

A correção das trincas em revestimentos de concreto asfáltico por meio da selagem deverá seguir a seguinte seqüência de operações:

##### **a) 1º Etapa: Instalação da sinalização**

Dispor os equipamentos de sinalização e controle de tráfego nos locais adequados.

##### **b) 2º Etapa: Limpeza das trincas**

Para que haja a aderência do selante nas paredes das trincas é necessário que elas estejam absolutamente limpas e isentas de pó ou pequenas partículas de agregado.

Esta observação tem grande importância quando é utilizada emulsão asfáltica como selante, pois a sua ruptura (ionização e aderência no agregado) se faz por contato. Assim sendo, o material solto presente no interior da trinca será aderido pelo selante.

A limpeza é realizada por etapas, iniciando-se com a varredura da área a ser tratada e prosseguindo com o jateamento a ar comprimido dos espaços abertos das trincas. Quando houver grandes derramamentos de óleo ou outros materiais que possam

dissolver a mistura, deve-se ter o cuidado e lavar o local para diminuir a possibilidade de decomposição do ligante.

Se o agregado solto não puder ser removido por varrição ou jateamento, a limpeza deve ser auxiliada com o uso da alavanca e ponteiro, removendo-se as partículas do interior das fraturas. Após esta operação deverá ser feito novo jateamento.

### c) 3ª Etapa: Reparo das trincas

Após a execução da limpeza é necessário reparar as trincas com largura entre 4mm e 20mm, cujas paredes laterais não estejam em boas condições para uma selagem eficiente.

O reservatório para o selante deve ser concebido para acomodar os movimentos de contração do revestimento asfáltico. Desta forma, a abertura da trinca deve ter no mínimo 7mm para permitir a acomodação do selante e as paredes devem ser relativamente verticais. Para a obtenção destas características deve ser utilizado um equipamento adequado (routing machine) que no Brasil ainda não tem uso extensivo.

### d) 4º Etapa: Enchimento das trincas com selante

Uma vez reparadas, quando necessário for, as trincas devem ser preenchidas com selante. Os cimentos asfálticos, asfaltos diluídos e emulsões são os selantes mais utilizados no Brasil, embora não sejam os mais eficientes. Os asfaltos modificados com polímeros e silicone são reconhecidos internacionalmente como os melhores selantes.

Os materiais asfálticos não modificados, comparativamente, são muito suscetíveis a variação de temperatura e possuem baixa ductibilidade, permitindo a infiltração de água e materiais incompreensíveis.

Se forem selecionados os melhores selantes, os procedimentos de instalação devem também ser da melhor qualidade, para garantir que o selante atinja seu potencial máximo quanto à vida útil.

### e) 5º Etapa: Limpeza do local

Após a aplicação do selante segue-se a limpeza da área, que compreende a remoção de todos os detritos e sobras, que deverão ser recolhidos e lançados em locais convenientes.

#### 7.2.2.3 COMENTÁRIOS

Verifica-se que, historicamente, os benefícios da selagem tem sido de curta duração, devido a deterioração relativamente rápida dos materiais selantes das trincas. Os selantes betuminosos desempenham eficientemente suas finalidades somente entre um ano e quatro anos (geralmente menos de três anos).

A síntese 98 do NCHRP (National Cooperative Highway Research Agency) cita que o período médio de duração da selagem de trincas é de 3,6 anos. Novos materiais selantes

(asfaltos polimerizados, silicone, epoxis.) combinados com apropriadas técnicas de preparação e instalação, geralmente duram acima de sete anos.

A selagem de trincas é vista por muitos como uma tarefa de conservação de baixa prioridade, pouco rendimento e ineficiente. Porém isto deve-se em grande parte a adoção de práticas inadequadas e a falta de equipamentos específicos para o reparo das trincas e injeção do selante. Durante os últimos anos, avanços significativos em materiais e métodos para a selagem de trincas tem ocorrido no exterior e que viabilizam a selagem de trincas como uma eficiente técnica para estender a vida útil dos pavimentos.

O programa SHRP (Strategic Highway Research Program ) estudou novos materiais e procedimentos para as atividades rotineiras de selagem de trincas, para diferentes condições de pavimentos e climas, no intuito de compará-los com os materiais e procedimentos convencionais em pavimentos asfálticos. Já existem resultados que demonstram melhor desempenho e menor custo global indícios dos materiais especiais com polímeros e silicone em relação aos materiais convencionais (asfálticos).

### 7.3 CONSERVAÇÃO PERIÓDICA

A conservação periódica compreende um conjunto de operações realizadas com o objetivo de evitar o surgimento ou agravamento de defeitos. As atividades de conservação periódica geralmente envolvem a aplicação de uma camada delgada de mistura asfáltica ou um tratamento superficial simples, que têm como finalidade melhorar ou proteger a superfície do pavimento e não acrescer sua capacidade estrutural.

Os principais serviços periódicos referentes à pista de rolamento são: capa selante, lama asfáltica, camadas porosas de atrito e recapeamentos esbeltos com misturas densas. Eles têm sido extensivamente utilizados na restauração de rodovias com baixos volumes de tráfego. Entretanto, com a melhorias das técnicas e dos materiais, as atividades periódicas vêm crescentemente sendo utilizados também em rodovias de alto volume de tráfego para estender a vida do pavimento

#### 7.3.1 FINALIDADES

As principais finalidades das atividades de conservação periódica são:

- a) melhoria da superfície excessivamente desgastada - os novos agregados incorporados na superfície do pavimento promoverão melhores características de durabilidade e conseqüentemente de atrito.
- b) selagem das trincas - as resselagens ou recapeamentos esbeltos contém teor suficiente de asfalto para cobrir e selar as pequenas trincas. A prevenção contra a infiltração de água geralmente estende a vida do pavimento e ajuda a manter a integridade estrutural do pavimento.
- c) impermeabilização do pavimento - os pavimentos asfáltico são algo permeáveis, particularmente quando são novos. Os serviços de conservação periódica ao selarem o

revestimento (particularmente as trincas), restringirão a infiltração de água e reduzirão a taxa de deterioração do pavimento.

- d) melhoria das características de drenagem e de atrito do revestimento - alguns tipos de tratamento de superfície são concebidos especificamente para reduzir a hidroplanagem e o número de acidentes em pista molhada (camadas drenantes de atrito e capas selantes). Deve-se realizar a cuidadosa seleção dos tipos e granulometrias dos agregados, assim como a melhoria da declividade transversal do pavimento.
- e) reparo/ prevenção do desgaste e oxidação do pavimento - isto pode ser realizado através do rejuvenescimento da superfície por meio de incorporação de camadas ou tratamentos asfálticos, que ao recobrir o revestimento antigo previne a sua oxidação
- f) melhoria de aparência do revestimento - alguns pavimentos antigos não possuem boa aparência devido a existência de remendos, selagem de trincas e outras atividades de restauração. As atividades de conservação periódica ao tratarem da superfície do pavimento provêem uma solução simples e eficiente para cobrir estas deficiências e fornecerem uma aparência uniforme ao pavimento.
- g) permite uma delimitação visual entre pista e acostamento - uma distinção entre a aparência visual da pista e do acostamento ajudam os motoristas na condução do veículo, particularmente em tempo chuvoso. As técnicas de conservação periódica podem proporcionar esta delimitação, melhorando as características de segurança e reduzindo os defeitos relacionados à carga de tráfego próxima à junta entre pista e acostamento.

Uma atividade de conservação periódica não necessita desempenhar todas as funções descritas anteriormente e provavelmente não desempenhará. Entretanto, mesmo que desempenhe somente algumas destas funções, a resselagem ou o recapeamento esbelto pode significativamente estender a vida útil do pavimento e reduzir os gastos com a conservação rotineira.

As técnicas de conservação periódica preventiva não podem ser consideradas propriamente como melhoramentos estruturais, mesmo quando aplicados em camadas que podem atingir até 5,0 cm de espessura. Entretanto, elas podem reduzir a taxa de deterioração do pavimento devido a selagem das trincas e a prevenção contra a infiltração de água na estrutura do pavimento, o que pode ser considerado como uma contribuição indireta à integridade estrutural do pavimento.

### **7.3.2 DESCRIÇÃO DAS TÉCNICAS**

As técnicas de conservação periódica podem constituir-se na combinação de materiais asfálticos e agregados ou ainda em materiais asfálticos exclusivamente. Os tipos mais comuns de serviços de selagem são descritos a seguir.

### 7.3.2.1 CAPA SELANTE

A capa selante é um serviço executado por penetração invertida, envolvendo uma aplicação de ligante asfáltico e uma aplicação de agregado miúdo. Sua execução tem por finalidade principal o incremento das condições de impermeabilização da camada a ser tratada.

A capa selante influencia a macrotextura dos revestimentos, melhorando as condições de segurança. É aplicada sobre tratamentos superficiais, macadames asfálticos, pré-misturados de textura aberta e misturas densas desgastadas pelo ação do tráfego e das intempéries.

O ligante que geralmente empregado é a emulsão asfáltica, que pode ser aplicada em taxas reduzidas diluídas com água. A capa selante é executada com cobertura por agregado miúdo (areia ou pó de pedra).

Quando não é empregada a cobertura por agregado, usa-se a designação “pintura de impermeabilização” ou “pintura de neblina “ (fog seal). As resselagens do tipo “fog” selam a superfície e fornece algum rejuvenescimento no material asfáltico oxidado. Com essa pintura obtêm-se uma textura e tonalidade de cor mais homogêneos, porém, a refletância da pista é diminuída. O “fog” pode reduzir levemente o coeficiente de atrito do pavimento quando é aplicado pela primeira vez.

Os materiais utilizados na execução da capa selante, são:

- a) material asfáltico: emulsões catiônicas (RR-2C, RR-1C);
- b) agregado miúdo (areia ou pó de pedra)

A execução da capa selante na conservação periódica envolve as seguintes etapas construtivas:

- a) limpeza da superfície do revestimento antigo, que deve estar isenta de materiais estranhos tais como, torrões de solos, agregados soltos;
- b) aplicação de uma camada de emulsão asfáltica na taxa de 0,7 a 1,2 l/m<sup>2</sup>, que pode estar diluída em água;
- c) antes que ocorra a ruptura da emulsão, deve-se esparramar uma camada de areia média ou pó de pedra, numa taxa de 3 kg/m<sup>2</sup>a 6 kg/m<sup>2</sup>; e
- d) a camada de agregado miúdo deve ser comprimida através da passagem de um rolo compressor leve.

Não é possível uma dosagem racional da capa selante, por método direto ou indireto, devido a sua natureza e à influência preponderante das características da superfície a ser tratada. Geralmente, usam-se taxas estabelecidas pela experiência.

Na conservação de revestimentos asfálticos moderadamente fissurados, é comum usar-se a seguinte dosagem aproximada:

- a) RR - 1C, pura : 1,0 l/m<sup>2</sup>
- b) Areia média : 3,5 kg/m<sup>2</sup>

A emulsão é diluída com 25% de água, aproximadamente, para facilitar a aplicação.

### 7.3.2.2 LAMA ASFÁLTICA

A lama asfáltica é a mistura asfáltica resultante da associação, em consistência fluida, de agregados ou mistura de agregados miúdos, material de enchimento ("filler"), água e emulsão asfáltica.

A consistência de lama asfáltica e a graduação dos agregados empregados permitem que a mistura seja aplicada em espessuras bastante delgadas. O serviço tem especial aplicação no rejuvenescimento de revestimentos porosos e/ou fissurados.

Os materiais utilizados são:

- a) agregados: areia, pedrisco ou pó-de-pedra (na faixa granulométrica especificada);
- b) material de enchimento: cimento Portland, cal hidratada ou pó-de-calcáreo;
- c) material betuminoso: emulsões catiônicas (RL-1C) ou emulsões para lama asfáltica (LA-1C, LA-2C ou LA-E); e
- d) água.

As etapas de execução da lama asfáltica são:

- a) limpar a superfície do revestimento, retirando todos os materiais estranhos, tais como, torrões de solo, agregados soltos;
- b) umedecer a superfície do revestimento para retardar a penetração da emulsão no revestimento;
- c) aplicar a lama asfáltica através do caminhão de lama;
- d) corrigir qualquer falha na execução, como por exemplo a escassez ou excesso de material ou a irregularidade na emenda das faixas;
- e) liberar para o trânsito, após duas a três horas da aplicação, para que ocorra a compactação e alisamento da camada; e
- f) proceder a compactação com rolos pneumáticos se não houver tráfego previsto; e

#### 7.3.2.2.1. CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES

As principais aplicações da lama asfáltica contemplam o atendimento, isoladamente ou em conjunto, das seguintes funções:

**a) Impermeabilização**

Sendo uma mistura densamente graduada e de consistência fluída, a lama asfáltica, dentro de certos limites, tem condições de penetrar em poros superficiais e fissuras de um revestimento asfáltico, provendo a impermeabilização da superfície existente. Vale observar que a ocorrência de fissuras excessivamente abertas poderá não ser atendida nesta função, pela lama aplicada.

**b) Rejuvenescimento**

A lama asfáltica aplicada sobre um revestimento asfáltico oxidado e desgastado poderá exercer sobre o mesmo uma função rejuvenescedora, melhorando a sua textura e recuperando parcialmente as perdas de agregados finos da superfície da camada.

É de se notar que, em função de sua reduzida espessura, a lama asfáltica não apresenta de fato um “poder estrutural” relevante. Além disso, sua aplicação não deve ser estendida a superfícies excessivamente deformadas, com avançado estágio de fissuração e/ou acentuadamente desgastadas.

A experiência tem demonstrado que a oportunidade da aplicação de lama asfáltica é um fator de maior importância na sua eficácia. Se por um lado a aplicação precoce constitui-se em um desperdício, por outro a aplicação tardia não terá a eficiência desejada. Existe, portanto, um período ideal, ao longo do qual as condições de superfície ( fissuração, oxidação, desgaste e pequenas deformações ) podem ser recuperadas pela aplicação da lama asfáltica, conferindo uma “sobrevida” à estrutura. Caberá ao experimentado pessoal de conservação do órgão, julgar, em cada caso, o momento mais apropriado para a intervenção.

É possível, ainda, dentro de certas limitações, utilizar uma lama asfáltica com função de capa selante, aplicada sobre o revestimento de textura aberta ou com elevada macrotextura.

A seleção da faixa granulométrica a ser utilizada para a lama asfáltica é um aspecto de maior importância, sendo as condições de superfície e a função prevista para a lama os fatores condicionantes da escolha.

**7.3.2.2.2. DOSAGEM**

A dosagem da lama asfáltica visa determinar, para uma composição de agregados pré-definida, os teores ótimos de emulsão e água a serem incorporados à mistura.

As etapas a serem seguidas são descritas em continuação.

**a) Seleção da faixa granulométrica**

A definição da faixa granulométrica a ser utilizada é orientada, basicamente, pelo estado de superfície do pavimento a ser tratado (fissuração, desgaste, deformações ), ou, em última instância, pela espessura e textura desejadas para a lama asfáltica.

**b) Composição da mistura agregados + “filler”**

Em função dos materiais disponíveis, deve-se estudar a composição mais favorável, tendo em vista o enquadramento na faixa granulométrica desejada. Analisar, em função do exposto anteriormente, a conveniência do emprego de areia e “filler” na mistura.

### c) Definição do teor ótimo teórico de emulsão

É possível estimar-se o teor ótimo provável a partir da aplicação da fórmula de Duriez, a qual leva em consideração a superfície específica dos agregados que compõem a mistura e um parâmetro designado “módulo de riqueza”, que é função da faixa selecionada. As expressões de cálculos são as seguintes:

$$E = \frac{0,33 \times P2 + 0,81 \times P1 + 2,7 \times S3 + 9,15 \times S2 + 21,9 \times S1 + 135 \times F}{100}$$

$$L = kx \times (E)^{1/5}, e$$

$$L_e = L / r$$

sendo:

E = superfície específica da mistura agregados + “filler” (m<sup>2</sup>/Kg)

P2 = % passando 1/2” - retida n° 4

P1 = % passando n° 4 - retida n° 10

S3 = % passando n° 10 - retida n° 40

S2 = % passando n° 40 - retida n° 80

S1 = % passando n° 80 - retida n° 200

F = % passando n° 200

L = teor residual de asfalto (%)

L<sub>e</sub> = teor de emulsão (%)

r = resíduo de emulsão (%)

k = módulo de riqueza, obtido na Tabela 26 a seguir apresentada

**Tabela 26 - Obtenção de k**

FAIXA	I	II	III	IV
k	7	6	5-6	4

Apenas o título de orientação, apresentam-se, na Tabela 27, os limites expectáveis para o teor de emulsão ótimo, para cada uma das faixas da ES-P 24/91 do DER/PR:

**Tabela 27 - Limites de teor emulsão ótimo**

FAIXA	I	II	III	IV
TEOR DE EMULSÃO	16-20	14-18	12-16	8-12

(\*) teores indicativos, expressos em relação à massa total de agregados

#### d) Definição do teor ótimo de água

A quantidade ótima de água deve ser aquela que permita o máximo em trabalhabilidade, sem a ocorrência de escorrimento. Um exagerado teor de água tende a provocar a sedimentação dos finos e a flotação da emulsão asfáltica, resultando em superfície exsudada e altamente derrapante sob condições chuvosas.

O teor de água está também vinculado ao tempo da cura da massa na pista, uma quantidade maior de água implicando em maior tempo de cura.

A definição do teor ótimo de água é procedida pela análise da trabalhabilidade/consistência da massa, executando-se misturas com o teor teórico da emulsão previamente determinado e diversos teores de água.

#### e) Definição do teor ótimo de emulsão

A ajustagem da dosagem e a conseqüente definição de teor ótimo de emulsão são efetuadas pelo emprego do “Wet Track Abrasion Test” (WTAT), de acordo com a seguinte seqüência:

- (1º) moldar 3 ( três ) corpos de prova, na umidade ótima pré-definida para o teor ótimo teórico de emulsão e para teores 1% e 2%, acima e abaixo deste teor;
- (2º) submeter cada um dos corpos de prova ao WTAT, calculando a média das perdas por desgaste obtidas para cada teor;
- (3º) através da análise visual das condições de envolvimento, textura e trabalhabilidade, e da exigência de obtenção de perdas por desgaste no WTAT iguais ou inferiores a 0,10g/cm<sup>2</sup>, definir o teor ótimo de emulsão.

#### f) Apresentação da dosagem

A composição final da mistura deverá ser apresentada considerando-se a mistura agregados + filler como sendo 100%, e indicando os teores de água e emulsão asfáltica a adicionar. A título de exemplo, apresenta-se a seguir o resumo da dosagem de uma lama asfáltica:

- **(1º) Composição da mistura ( em massa ):**
  - Areia 50,0 %
  - Pó de pedra 42,0 %
  - Cimento Portland 8,0 %
  - Total (1) 100,0 %

- Água a adicionar      8,0 %
- Emulsão RL - 1C      18,0 %
- Total (2)                126,0 %

• **(2º) Granulometria de projeto e faixa de trabalho:**

A Granulometria e a correspondente Faixa de Trabalho estão apresentadas na Tabela 28, a seguir:

**Tabela 28 - Granulometria**

Peneira		% Passando em peso		
ASTM	mm	Mistura	Faixa de trabalho	Faixa 2
3/8"	9,5	100	100	100
nº 4	4,8	92	86-98	85-100
nº 8	2,4	76	70-82	65-90
nº 16	1,2	58	52-64	45-70
nº 30	0,6	40	34-46	30-50
nº 50	0,3	22	16-28	18-30
nº 100	0,15	15	12-18	10-21
nº 200	0,074	8	5-11	5-15

### 7.3.2.3 CAMADA POROSA DE ATRITO

Uma camada porosa de atrito consiste em uma mistura asfáltica a quente ou a frio que é caracterizada por um grande percentual de agregados de mesmo tamanho, o que garante um elevado teor de vazios na mistura (15% a 25%). Sua principal vantagem é prover uma superfície mais aderente, que minimiza a hidroplanagem.

Embora o emprego desta técnica conduza a excelentes resultados sob o ponto de vista de aderência e da redução da película de água superficial, normalmente quando projetada a partir de ligantes convencionais, estas camadas apresentam envelhecimento e deterioração por abrasão, maior do que as misturas densas.

A fim de maximizar a durabilidade e a resistência mecânica da camada de rolamento, devemos levar em consideração, entre outros fatores, os seguintes:

- a) perfil transversal correto para um bom escoamento das águas;
- b) resistência à abrasão adequada;
- c) apresentar um alto índice de vazios (de 15% a 25%);
- d) baixo teor de ligantes (de 3% a 5%);
- e) índice de forma dos agregados (> 0,5);

- f) baixo desgaste de abrasão "Los Angeles" dos agregados (< 30%);
- g) espessura do revestimento asfáltico entre 3 e 5 cm;
- h) execução de uma impermeabilização sobre as camadas subjacentes, quando da construção dos recapeamentos; e
- i) características físico-químicas e geológicas do ligante compatíveis com os agregados utilizados.

#### 7.3.2.4 MICROREVESTIMENTO COM MISTURA DENSA

Em muitas situações, as resselagens não são suficientes para corrigir certas deficiências superficiais, como por exemplo os afundamentos e desgastes mais severos. Nestes casos, uma fina camada de revestimento betuminoso deve ser construída e tal serviço é designado como recapeamento.

O recapeamento geralmente varia de 2,5 cm a 5,0 cm e deve prover uma superfície impermeável, resistente ao escorregamento e resistente à abrasão do tráfego.

O recapeamento é utilizado para corrigir muitas deficiências superficiais do pavimento e tem prioritariamente o intuito de aumentar o desempenho funcional do pavimento. Alguns exemplos de tipos de defeitos corrigidos são:

- a) polimento da superfície nas trilhas de roda, que resulta em decréscimo do coeficiente de atrito;
- b) pequenas irregularidades longitudinais do pavimento, que não são defeitos associados com o carregamento;
- c) inadequada declividade transversal, que resulta em problemas de drenagem superficial; e
- d) defeitos relacionados com as condições ambientais, tais como trincamento em bloco, desagregação e intemperismo.

Muitas destas deficiências podem ser parcialmente ou totalmente corrigidas através da utilização de camadas delgadas de mistura betuminosa. A necessidade de tais recapeamentos deve ser determinada depois de uma avaliação global dos defeitos de superfície observados e os resultados dos ensaios estruturais.

A preparação do pavimento é extremamente importante para o sucesso de qualquer recapeamento. Uma vez que a camada é delgada e não destina-se a promover acréscimos estruturais, devem ser corrigidos os locais mais enfraquecidos. Desta maneira, deverão ser efetuadas previamente algumas medidas como:

- a) reparos localizados;
- b) reperfilamento;
- c) limpeza e pintura de ligação;

- d) eventuais alargamentos ou melhorias na geometria da rodovia;
- e) melhoria da drenagem; e
- f) controle das trincas de reflexão.

#### **7.3.2.5 CAMADA DE MICROREVESTIMENTO ASFÁLTICO À FRIO COM POLIMERO**

O microrevestimento asfáltico com polímero é uma mistura asfáltica aplicada a frio que já este normalizada pelo DNIT.

Basicamente é similar a lama asfáltica sendo porém mais exigente a respeito das especificações de drenagem.

O microrevestimento cumpre as mesmas finalidades da lama asfáltica porém em virtude de sua constituição é mais durável.

A aplicação do microrevestimento apresenta as mesmas facilidades executivas que uma lama Asfáltica.

## **8 - AVALIAÇÃO ECONÔMICA**



## 8 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A avaliação econômica de um projeto de restauração de pavimentos consiste basicamente na comparação entre custos e benefícios econômicos, no intuito de determinar se um investimento é justificável. Diz-se que uma alternativa de restauração é atrativa economicamente quando o benefício líquido ou o retorno é pelo menos igual ao de outras oportunidades de investimento.

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos e parâmetros relativos a avaliação econômica, bem como os vários métodos de comparação entre alternativas de investimento empregados para verificar a atratividade econômica. Alguns exemplos numéricos são apresentados, com o objetivo de sedimentar, de forma aplicada, os conceitos teóricos apresentados.

### 8.1 PREÂMBULO

Pode-se dizer que a avaliação econômica consiste no conjunto de procedimentos a serem executados com vistas a determinar, à luz de conhecimentos de matemática financeira e do comportamento real ou previsível de determinadas variáveis, quais, dentre uma série de alternativas devem ser executadas e, dentre essas, qual é a mais interessante economicamente.

Importante é lembrar, também, que é sempre necessário definir o ponto de vista sob o qual a análise deve ser feita, pois o que representa custo para alguém pode significar benefício a outrem, e vice-versa.

A seleção da mais apropriada alternativa de restauração é função principalmente dos resultados da avaliação econômica. Quando as alternativas atendem aos critérios de projeto, a avaliação econômica é facilmente justificada como a única maneira de escolher a melhor alternativa.

Os mais importantes benefícios econômicos da restauração:

- a) redução do custo de operação dos veículos;
- b) redução dos custos futuros de conservação;
- c) economia do tempo de viagem de passageiros e das cargas;
- d) redução dos custos de acidentes;
- e) estímulo ao desenvolvimento econômico;
- f) acréscimo de conforto e utilidade.

Se todos os benefícios e custos de cada alternativa puderem ser descritos em termos monetários, diversos métodos de avaliação econômica (e com resultados equivalentes) podem ser utilizados para selecionar a melhor alternativa. Se, por outro lado as alternativas

não puderem ser perfeitamente descritas em termos econômicos, então a decisão não será tão inequívoca.

A avaliação econômica fornece informações importantes para o engenheiro, porém, se não houver uma alternativa com superioridade econômica acentuada, poderão ser considerados alguns critérios não mensuráveis. Alguns exemplos de benefícios e custos não monetários são: conforto, estética e nível de ruído.

## 8.2 CUSTOS DE CICLO DE VIDA

Na avaliação econômica é essencial que todos os custos e benefícios que ocorrem na vida da rodovia sejam incluídos. Isto não era efetuado adequadamente ou mesmo compreendido pelos projetistas. Eles entendiam que os primeiros custos de implantação eram suficientes para os estudos econômicos. Porém, isto não é correto, e para enfatizar a necessidade de uma análise de custos globais, o termo custos do ciclo de vida (life-cycle costs) foi incorporado na área de pavimentação.

Os custos de ciclo de vida referem-se a todos os custos (e no sentido mais amplo a todos os benefícios) envolvidos em um ciclo completo de vida do pavimento. Isto inclui custos de construção, de conservação, de restauração, e de operação.

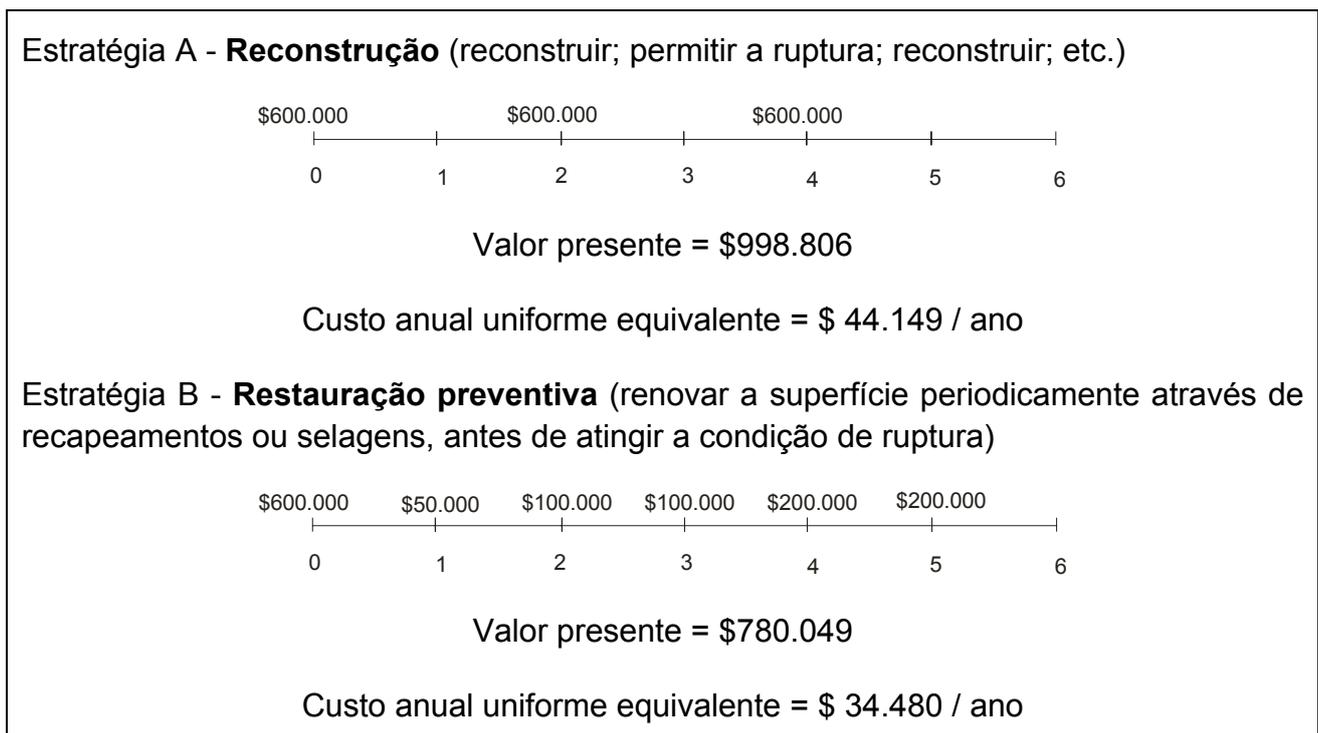
Uma analogia poderia ser feita para a situação em que uma pessoa compara custos com vistas a aquisição de um automóvel. Neste caso são verificados alguns itens como: preço de aquisição, custo de consumo de combustível, custos de operação e restauração do veículo e valor da revenda. Pois o mesmo tipo de comparação deve também ser reconhecido na restauração de rodovias.

Outro fator que obviamente deve ser verificado é a vida útil do veículo. Um veículo de baixo custo deve durar quatro anos, enquanto um veículo de alto custo pode durar uns quinze anos. Visto que todos estes custos não ocorrem ao mesmo tempo é importante determinar a quantia de dinheiro que deve ser investida em uma determinada época (geralmente na aquisição) e que renderia dinheiro suficiente, a uma específica taxa de juros, que permita o pagamento de todos os custos na medida em que eles ocorrerem. Devido a isto, a taxa de juros e o "valor de dinheiro no tempo", tornam-se importantes na avaliação econômica de alternativas de restauração.

A Figura 52 ilustra a análise de custos de ciclo de vida para duas seções adjacentes de pavimento, que estão sujeitas ao mesmo tráfego e ao mesmo clima, porém, as estratégias de Restauração são diferentes.

Os custos de ciclo de vida, que ocorrem ao longo de um período de análise (que nas duas situações é igual a seis anos), podem ser expressos em "valor presente" ou "custos anuais uniformes equivalentes". Existe uma diferença substancial nos custos para manter os pavimento em bom estado, o que ilustra o fato de que as estratégias de restauração podem impactar significativamente nos custos de ciclo de vida dos pavimentos.

**Figura 52 - Ilustração de custos de longo prazo para duas diferentes estratégias de restauração em seções de pavimento idênticas (taxa de desconto = 4% ao ano)**



### 8.3 PRINCÍPIOS BÁSICOS

Um dos princípios fundamentais na Matemática Financeira e, como consequência, da análise e seleção de alternativas de investimento, diz respeito à necessidade de se levar em consideração o fato de que o dinheiro muda de valor com o decorrer do tempo.

Este importante princípio deve ser lembrado toda vez que seja preciso comparar dois ou mais projetos alternativos de investimento, haja visto que cada projeto nada mais é do que um conjunto de desembolsos e recebimentos com uma determinada distribuição cronológica. Isto faz com que a comparação entre diversos projetos de investimento só seja viável se tais desembolsos e recebimentos forem trasladados a um instante comum no tempo.

A Matemática Financeira fornece o ferramental técnico para efetuar a transposição de valores monetários de um instante de tempo a outro, a fim de viabilizar a comparação entre diversos projetos de investimento.

Uma grande parte dos princípios de Engenharia Econômica e dos Métodos de Avaliação Econômica são aplicáveis nos projetos de restauração e podem ser sumarizados como se segue:

- deve ser claramente identificado o nível de gerência para o qual a avaliação vai ser executada; para planejamento a nível de rede ou para definir uma solução de projeto, que requer uma maior quantidade de detalhes;

- b) a avaliação econômica fornece apenas subsídios para a tomada de decisão. Outros critérios devem ser formulados antes da consideração dos resultados da avaliação econômica;
- c) devem ser consideradas todas as alternativas que atendam as restrições temporais e orçamentárias;
- d) as alternativas devem ser comparadas para um mesmo período de análise, que deve ser tal que os fatores considerados possam ser definidos com razoável confiabilidade;
- e
- e) a avaliação econômica deve incluir os custos para o órgão rodoviário, custos para o usuário e benefícios, se possível.

#### **8.4 COMPONENTES FUNDAMENTAIS**

Para manter um conjunto de estradas em condições de atender às necessidades de deslocamento de pessoas e de mercadorias, há que se incorrer em custos. Dependendo de sua natureza, esses custos podem incidir sobre o organismo que gerência as estradas de uma região ou sobre os usuários das rodovias.

Os principais custos iniciais e correntes que devem ser considerados na avaliação econômica de estratégias de pavimentação incluem:

##### **a) Custos para o órgão rodoviário**

- custos iniciais de construção;
- custos de restauração (recapeamentos, capas selantes, restauração, reconstrução etc.);
- custos de conservação rotineira ao longo do período de análise;
- valor residual ao final do período de projeto (que pode ser considerado um “custo negativo”);
- custos de engenharia e de administração;
- custos de controle de tráfego e operação da rodovia.

##### **b) Custos para os usuários**

- tempo de viagem;
- operação do veículo;
- acidentes;
- desconforto;
- tempo de espera e custos suplementares de operação dos veículos durante as operações de restauração do pavimento.

### **8.4.1 CUSTOS PARA O ÓRGÃO RODOVIÁRIO**

Entre os custos incidentes sobre o organismo que gerencia as rodovias pode-se afirmar que os principais são os custos iniciais, os custos de restauração.

#### **8.4.1.1 CUSTOS INICIAIS**

Os custos iniciais incluem tanto custos de projeto como custos de construção. Enquanto os custos de projeto são freqüentemente desconsiderados (ou são assumidos serem aproximadamente iguais para todas as alternativas), os custos de construção são geralmente considerados como muito importantes (senão o mais importante) entre os componentes de custo.

As fontes de informação sobre custos de construção são projetos anteriormente executados e dados históricos de custos. Esses custos são geralmente confiáveis devido as atualizações de dados que ocorrem periodicamente em muitos departamentos rodoviários.

Quando novos materiais ou técnicas são utilizadas, pode não serem disponíveis informações sobre custos de construção. Neste caso devem ser realizadas estimativas de custos apropriadas e análise de sensibilidade para determinar o efeito de variações no custo nos resultados finais.

#### **8.4.1.2 CUSTOS DE CONSERVAÇÃO ROTINEIRA**

Os custos de conservação rotineira embora sejam importantes na avaliação econômica de alternativas de restauração de rodovias, sua previsão com alguma acurácia é notadamente difícil.

Eles são influenciados pelo desempenho de pavimentos (que é também difícil de prever), tipo, extensão e duração de trabalhos de conservação e restauração futuros, bem como por alterações nas premissas de projeto (isto é, mudanças nas configurações e carregamentos dos veículos). Além disso, verifica-se que as atividades e custos de conservação rotineira são documentados com menor precisão do que seria necessário para avaliações precisas.

#### **8.4.1.3 CUSTOS DE RESTAURAÇÃO**

Os custos de Restauração estão associados às atividades de recuperação superficial, restauração e reciclagem. As informações disponíveis são geralmente do mesmo tipo, qualidade e confiabilidade que os obtidos para construção de pavimento novo.

A restauração pode ocorrer no início do período de análise, caso em que é tratado como um custo inicial na avaliação econômica. Podem também ocorrer como um custo futuro para um pavimento novo ou reabilitado recentemente. Nestes casos é importante estimar tão precisamente quanto possível o tempo em que será necessária a restauração. Uma

vez que custos de restauração podem ser consideravelmente grandes, o cronograma de tais custos no período de análise pode afetar significativamente os resultados. Assim sendo, deve ser determinada a sensibilidade da avaliação quanto ao período de restauração.

#### 8.4.2 CUSTOS PARA O USUÁRIO

Os três principais tipos de custos para o usuário associados com o desempenho do pavimento são os seguintes:

a) Custo de operação dos veículos

- consumo de combustível;
- desgaste de pneus;
- restauração do veículo;
- consumo de lubrificantes;
- depreciação; e
- reposição de peças.

b) Custo do tempo de viagem

c) Custo de acidentes

- acidentes com vítimas fatais;
- acidentes com feridos; e
- danos materiais.

Cada um dos custos apresentados anteriormente é função do nível de irregularidade longitudinal e conseqüentemente da velocidade praticada. A medida que o pavimento torna-se mais irregular, reduzem-se as velocidades de operação e eleva-se o tempo de viagem, o desconforto e outros custos para o usuário.

Os custos para o usuário estão relacionados obviamente com todos os fatores que afetam a irregularidade, como: estrutura do pavimento, materiais empregados, tipo e período de restauração e freqüência de conservação rotineira durante o período de análise.

Os custos operacionais também aumentam quando uma rota alternativa mais longa precisa ser utilizada ou quando o tráfego sofre redução de velocidade devido a interrupções por atividades de restauração. Isto também causa ao usuário custo devido a demoras adicionais.

### 8.4.3 BENEFÍCIOS PARA O USUÁRIO

Na categoria de benefícios oriundos das atividades de restauração de pavimentos está a redução de custos auferida pela sociedade com a execução de melhorias. Essa redução de custos pode ser devida ao menor desgaste de peças de veículos, menor consumo de combustível, redução do tempo de viagem e redução do número de acidentes, e da conseqüente redução da perda de vidas humanas, que se faz acompanhar da diminuição dos danos às mercadorias e aos veículos, bem como a elementos componentes da infraestrutura rodoviária, freqüentemente danificados quando ocorrem acidentes.

As vantagens, privilégios ou reduções de custo que ocorrem aos usuários (motoristas ou proprietários de veículos) ocorrem devido a adoção de uma determinada alternativa quando comparado com a escolha de outra. Na pavimentação, a nível de projeto, a comparação deve ser feita entre duas ou mais estratégias distintas. Os benefícios são geralmente medidos em termos de reduções dos custos para o usuário.

### 8.4.4 TAXA DE DESCONTO

A taxa de desconto (taxa mínima de atratividade ou taxa de interesse) é expressa numa taxa de juros compostos que representa o grau de interesse ou atração que o dinheiro merecerá no futuro.

Ela é utilizada diretamente para descontar valores futuros esperados para o projeto, em termos de valor presente. Também é utilizada indiretamente, como padrão de comparação, no método da taxa interna de retorno.

Embora a taxa mínima de atratividade seja, necessariamente, uma parte integrante do processo de orçamento de capital, existe, atualmente, controvérsia quanto à maneira de se determinar o valor da mesma. Contudo, é lógico pensar que a taxa mínima de atratividade deve ser pelo menos igual ao custo do dinheiro para quem investe (custo de capital).

O Governo quando decide dispender recursos monetários na melhoria de uma rodovia, perde a oportunidade de investir em outros negócios. A taxa que poderia remunerar o dinheiro, caso ele não fosse investido em rodovias, é conhecido como custo de capital ou custo de oportunidade de capital. Esta é a taxa de juros adequada para utilização nos estudos econômicos.

A taxa de desconto deve refletir a taxa média de retorno esperada em investimentos públicos, considerando os riscos e incertezas e a expectativa de inflação. A definição da taxa a ser utilizada é antes de tudo uma decisão política, que pode variar segundo a economia regional, o objetivo do estudo e o nível de risco. Nos países ditos desenvolvidos este valor varia entre 4 a 8% ao ano. Nos países em desenvolvimento os valores mais usuais estão entre 10 e 12% ao ano.

### 8.4.5 PERÍODO DE ANÁLISE

O período de análise refere-se ao intervalo de tempo para o qual a avaliação econômica será realizada. O ano inicial de construção ou restauração é geralmente designado ano 0 (zero). Os anos subsequentes são designados ano 1, ano 2, e assim por diante.

Os períodos de análise para pavimentos novos podem variar desde vinte anos até quarenta anos. Em serviços de restauração o período é geralmente mais curto, variando entre dez e vinte anos. Entretanto, o período particular escolhido é uma decisão própria de cada órgão e depende de uma série de circunstâncias.

### 8.4.6 VALOR RESIDUAL

O valor residual (terminal ou de resgate) representa o valor monetário atribuído ao pavimento ao final do período de análise. Ele pode ser significativo nos casos de pavimentação, porque nele se insere o valor de reutilização dos materiais ao final do período de projeto. Com o crescente esgotamento dos recursos, estes materiais podem vir a ser cada vez mais importantes no futuro, sobretudo sendo reciclados por ocasião da restauração de um pavimento.

O valor residual de um material depende de vários fatores, tais como: a quantidade e localização dos materiais, o nível de contaminação, a idade ou durabilidade, etc. Algumas vezes ele é considerado como um percentual do custo original, isto é, a parte relativa ao próprio material e não a mão-de-obra utilizada.

## 8.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS

Para decidir qual entre diferentes alternativas de investimento deve ser adotada, utilizam-se os métodos de comparação de alternativas de investimento. Esses métodos fundamentam-se em conceitos elementares de matemática financeira e consistem, em linhas gerais, em comparações de benefícios e custos.

Alguns dos métodos mais empregados são os do valor presente líquido, valor anual líquido, custo anual, relação benefício-custo e da taxa interna de retorno. Dentre esses métodos, o do valor presente líquido é o mais utilizado e também o mais recomendado, muito em virtude de sua simplicidade de aplicação. Em certo sentido, todos os demais métodos podem ser considerados derivações do método do valor presente líquido.

### 8.5.1 MÉTODO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO

O método do Valor Presente Líquido (VPL) é caracterizado pela transferência de todos os benefícios e custos, previstos para ocorrer ao longo do horizonte de projeto, para o instante presente, descontados à taxa mínima de atratividade. Pode ser representado matematicamente pela equação:

$$[VPL_{x,n}]_i = \sum_{t=0}^n \frac{B_{x,t} - C_{x,t}}{(1+i)^t}$$

onde VPL é o valor presente líquido dos fluxos da alternativa x, para um período de n anos, com taxa de desconto t,  $B_{x,t}$  é o valor de benefícios para a alternativa x que ocorrem no intervalo de tempo t e  $C_{x,t}$  é o valor dos custos para a alternativa x que ocorrem no intervalo de tempo t. Todos estes símbolos conservam seu significado nas demais equações em que aparecem.

O método do VPL apresenta as vantagens de ser direto e de assegurar a maximização de benefícios sociais líquidos, não havendo método de análise benefício-custo de mais fácil aplicação, interpretação clara, completo e menos tedioso.

Na avaliação de um projeto individual, pode-se afirmar que :

- a) se  $VPL > 0$ , o projeto será viável;
- b) se  $VPL = 0$ , o projeto será indiferente; e
- c) se  $VPL < 0$ , o projeto será inviável.

Quando se efetua a comparação entre alternativas, inicialmente deve ser avaliada a viabilidade de cada alternativa, utilizando as regras de decisão fundamentadas no VPL. Assumindo que mais de uma alternativa inicialmente aceitável remanesça após o cálculo dos valores presentes líquidos individuais, as regras de decisão fundamentadas no VPL podem ser usadas para selecionar a melhor alternativa dentre as demais. Estas regras são muito simples, a saber:

- a) selecionar a alternativa que maximiza o valor presente líquido; e
- b) se duas ou mais alternativas têm o mesmo VPL, os projetos são igualmente aceitáveis para o analista.

Para que estas regras sejam aplicáveis, todos os benefícios e custos associados às alternativas em consideração devem ser quantificáveis em unidades monetárias. Se não o forem, então a “melhor” alternativa pode não ser a que maximiza o VPL.

- **Exemplo de aplicação do Método do valor presente líquido**

Uma estrada é reabilitada hoje ( ano = 0) a um custo de R\$ 20.000,00/km. Os benefícios recebidos serão de R\$ 12.000,00/km ao final de um ano (ano = 1) e de 14.000,00/km ao final de dois anos (ano = 2). Os custos de conservação rotineira anual serão de R\$ 1.000,00/km/ano. Calcular o valor presente líquido (VPL) desta alternativa de Restauração assumindo um custo de oportunidade de capital (taxa de desconto) de: (a) 13% ao ano; (b) 8% ao ano; e (c) zero por cento ao ano.

Resolução:

Empregando-se a equação

$$[VPL_{x,n}]_i = \sum_{t=0}^n \frac{B_{x,t} - C_{x,t}}{(1+i)^t}$$

para a alternativa única x e n = 2 anos, resultam os valores que compõem a Tabela 29 abaixo:

**Tabela 29 - Método do VPL**

ano	custo	benefício	VPL (i=0)	VPL (i=8%)	VPL (i=13%)
0	20.000	0	-20.000	-20.000	-20.000
1	1.000	12.000	11.000	10.185	9.735
2	1.000	14.000	13.000	11.145	10.181
Total			4.000	1.331	- 85

Logo, o valor presente líquido do projeto de restauração em estudo resulta igual a R\$ 4.000,00, para uma taxa de desconto nula, R\$ 1.331,00 para uma taxa de desconto de 8% ao ano e R\$ (- 85,00) para uma taxa de desconto de 13% ao ano.

### 8.5.2 MÉTODO DO VALOR ANUAL LÍQUIDO

Uma alternativa à luz do valor presente líquido é a análise do Valor Anual Líquido (VAL) - este método é amplamente usado e pode ser desenvolvido diretamente da análise do valor presente líquido. As regras de decisão são completamente análogas às do valor presente líquido e podem ser usadas para tomar decisões, sem ambigüidade, sobre quais alternativas são inicialmente aceitáveis (VAL > 0) e qual alternativa inicialmente aceitável é a melhor (aquela que maximiza o VAL).

Basicamente, todos os valores anuais de benefícios e custos são calculados (ao invés de VP) e combinados. A análise anualizada é atraente para muitos investidores e organismos, uma vez que se adequa bem às considerações orçamentárias, e muitos dos benefícios e custos com que a análise trata ocorrem em uma base anual.

A análise do VAL requer que todos os benefícios e custos sejam “convertidos” em quantidades anuais equivalentes (análogas a um pagamento mensal de um carro). Pode-se calcular o VAL usando as seguintes fórmulas:

$$a) VP = F ( 1 + i )^{-n} ; e$$

$$b) VA = P \{ [i(1+i)^n] / [(1+i)^n - 1] \}$$

Uma vantagem de usar a análise do VAL para selecionar a melhor alternativa dentre várias alternativas inicialmente aceitáveis é que não requer períodos iguais de análise para cada uma das alternativas em consideração. Há, entretanto, uma hipótese implícita que o período de análise para cada alternativa é o mesmo e, além disso, de que os benefícios e custos individuais são repetidos.

### 8.5.3 MÉTODO DO CUSTO ANUAL

Este critério seletivo entre alternativas de investimento, que é também conhecido como análise de custos de ciclo de vida, é uma derivação do método do valor presente e do valor

anual líquido, particularizado para a situação da comparação entre alternativas em que ocorrem apenas variações nos custos, mantendo-se iguais os benefícios para todas as alternativas em consideração.

Obviamente que, por se tratar de um método que envolve a avaliação de desembolsos, aquela alternativa que apresentar o menor custo deve ser a preferida, quando o critério de decisão for econômico (vide exemplo da Figura 7.1).

A análise de custos de ciclo de vida é uma expressão em voga que aparentemente é entendida como algo novo. Esta visão é basicamente incorreta, pois representa nada mais que uma particularização dos métodos vistos anteriormente.

#### 8.5.4 MÉTODO DA RELAÇÃO BENEFÍCIO - CUSTO

O método da Relação Benefício-Custo (RBC) fundamenta-se na idéia de obter valores presentes de benefícios e custos, e do cálculo do quociente entre eles, conforme ilustra a equação abaixo, em que  $(RBC_{x,n})$  é a razão benefício-custo. Adverte-se para a necessidade de se ordenarem inicialmente as alternativas em ordem crescente de custos iniciais.

$$[RBC_{x,n}]_i = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_{x,t}}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_{x,t}}{(1+i)^t}}$$

Um projeto é considerado economicamente viável se tal quociente não for inferior à unidade. A rigor, esse resultado expressa a maximização do retorno por unidade monetária investida, o que não é igual a maximização do valor presente líquido.

O método RBC quando adequadamente aplicado, conduz aos mesmos resultados que o do valor presente líquido, porém eivado de cálculos adicionais e de interpretação pouco mais confusa, não sendo recomendável que uma alternativa seja selecionada somente com base nesse critério.

- **Exemplo de aplicação do Método da relação benefício-custo**

Para a alternativa de restauração apresentada no exemplo do item 7.5.1.1, determinar a relação benefício-custo usando uma taxa de desconto de 12% ao ano.

Resolução:

Empregando-se a equação

$$[RBC_{x,n}]_i = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_{x,t}}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_{x,t}}{(1+i)^t}}$$

para a alternativa única x e n = 2 anos, resultam os valores que compõem a Tabela 30 abaixo:

**Tabela 30 - Método relação benefício custo**

ano	custo	benefício	VP (custos)	VP (benefícios)	RBC
0	20.000	0	20.000	0	
1	1.000	12.000	893	10.714	
2	1.000	14.000	797	11.161	
Total			21.690	21.875	1.0085

Logo, a razão benefício-custo de projeto de restauração em estudo resulta igual a 1,0085, maior que a unidade; logo, decorridos dois anos desde o ano zero, o projeto é considerado economicamente viável.

### 8.5.5 MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO

O método da Taxa Interna de Retorno (TIR) visa determinar a taxa de juro para a qual o módulo do valor presente dos benefícios torna-se igual ao módulo do valor presente dos custos, podendo ser expressa pela equação:

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_{x,t}}{(1+i_x)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_{x,t}}{(1+i_x)^t}$$

A condição de viabilidade para um projeto, segundo esse critério, é que a taxa interna de retorno  $i_x$  não seja inferior à taxa mínima de atratividade.

O método da taxa interna de retorno não encerra a questão da aceitação ou rejeição de um projeto, uma vez que por si só não fornece os elementos necessários à tomada de decisão, dada a necessidade de se fazer comparação com uma base, que é a taxa mínima de atratividade, podendo resultar em escolhas incorretas, principalmente quando da comparação de projetos de diferentes níveis de investimento.

#### 8.5.5.1 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para a alternativa de restauração apresentada no exemplo do item 7.5.1.1, determinar a valor da taxa interna de retorno.

Resolução:

A taxa correspondente a um valor presente líquido nulo, ou seja, a taxa interna de retorno, pode ser determinada por interpolação dos valores obtidos de valor presente líquido e de taxas de desconto, apresentadas na Tabela 31:

**Tabela 31 - VPL e taxa de desconto**

VPL	taxa de desconto
4.000,00	0%
1.331,00	8%
185,00	12%
- 85,00	13%

Resulta, dessa maneira, que a taxa interna de retorno é igual a 12,68%. Esse valor pode ser comparado com o valor da taxa de mínima atratividade, que representa o retorno provável de ser auferido de outras opções de investimento; se a taxa interna de retorno for maior que a taxa de mínima atratividade, o projeto é viável, de acordo com o método da taxa interna de retorno.

### 8.5.5.2 MÉTODO DA TAXA INTERNA DE RETORNO INCREMENTAL

O método da taxa interna de retorno incremental pode ser entendido como um complemento do método da taxa interna de retorno, e compreende dois procedimentos básicos, o primeiro consistindo em dispor as alternativas em ordem crescente em custo inicial e em determinar a taxa interna de retorno para cada alternativa, excluindo aquelas para as quais esse valor é inferior à taxa mínima de atratividade, utilizando-se a equação abaixo, em segundo momento, determina-se a taxa interna de retorno incremental, representada por  $i_{(x+k)/x}$ , utilizando a equação:

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_{x+k} - B_{x,t}}{\left( I + i_{\frac{x+k}{x}} \right)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_{x+k} - C_{x,t}}{\left( I + i_{\frac{x+k}{x}} \right)^t}$$

onde k é número inteiro não negativo que, somando a alternativa x, identifica uma alternativa economicamente mais interessante do que seja, se o valor da taxa interna incremental resultar superior ao da taxa mínima de atratividade.

O método da taxa interna de retorno incremental permite que se evitem erros oriundos da adoção simples das taxas de retorno estimadas para cada projeto alternativo.

## 8.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é uma técnica empregada para se avaliar a intensidade com que alterações nos valores de algumas variáveis exercem alterações no valor das grandezas determinadas da viabilidade econômica do projeto.

A técnica é de muito valor na medida que permite avaliar se uma pequena alteração em um conjunto de variáveis ocasiona pequena ou grande variação nos valores que determinarão a viabilidade da alternativa em estudo.

É interessante ter em mente, também, que muitos dos valores empregados em estudos de viabilidade econômica de alternativas são estimativas, ou são valores médios, enfim, apresentam uma considerável probabilidade de diferirem dos valores efetivamente contabilizados à época em que de fato ocorrerem os desembolsos e recebimentos previstos.

### • Exemplo de aplicação de análise de sensibilidade

Considerando a alternativa de restauração o item 8.5.1, testar o efeito sobre a taxa interna de retorno de um aumento de 10% no custo de restauração.

Resolução:

Com um aumento de 10% nos custos de restauração, resulta a seguinte Tabela 32 de valores:

**Tabela 32 - Análise de sensibilidade**

ano	custo	benefício	VPL (i=0)	VPL (i=5%)	VPL (i=8%)	VPL (i=13%)
0	22.000	0	-22.000	-22.000	-22.000	-22.000
1	1.000	12.000	11.000	10.476	10.185	9.735
2	1.000	14.000	13.000	11.791	11.145	10.181
Total			4.000	268	1.331	- 85

O valor da taxa interna de retorno (taxa de desconto para a qual se tem valor presente líquido nulo) é obtido por interpolação, e resulta igual a 5,83%.

Portanto, nesse exemplo particular, a taxa interna de retorno é extremamente sensível aos custos de restauração; um aumento de 10% no custo conduziu a uma redução de  $[100 \times (12,68 - 5,83) + 12,68]$ , ou 54%, na taxa interna de retorno.

## 8.7 COMPARAÇÃO ENTRE ALTERNATIVAS

Para resumir as questões anteriormente discutidas, um procedimento generalizado para análise econômica é apresentado abaixo:

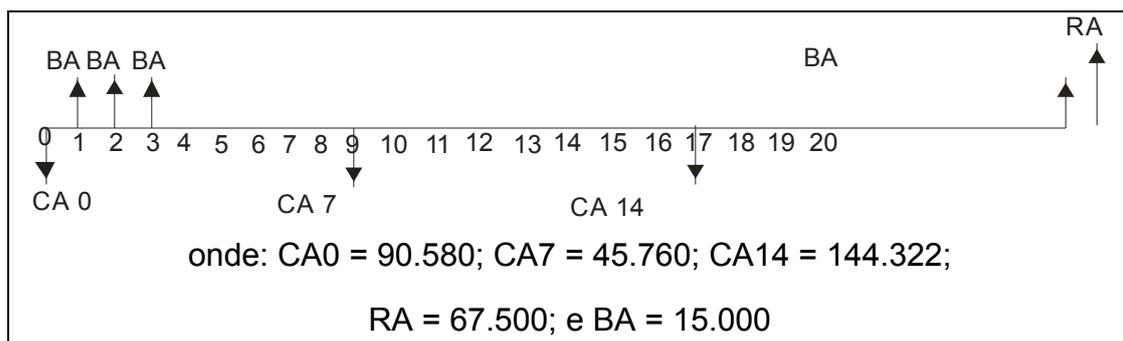
- Identificar as alternativas que devem ser consideradas;
- Determinar o período de análise que será usado para a determinação da melhor alternativa;
- Definir o fluxo de caixa para cada alternativa em consideração incluindo, por exemplo, custos de restauração para pavimentos novos;
- Comparar o orçamento disponível com o fluxo de caixa para cada alternativa para estabelecer quais são viáveis (algumas alternativas podem ser eliminadas neste ponto).
- Selecionar (ou calcular) a taxa de desconto (ou variação da mesma) mais apropriada para a avaliação.

- f) Determinar quais alternativas, se houver, preenchem o critério inicial de decisão para aceitação (algumas alternativas podem ser eliminadas neste ponto). Os métodos recomendados para avaliar a aceitação de uma alternativa nesta etapa são o valor presente líquido e seus derivados.
- g) Determinar que alternativa(s) entre o conjunto de alternativas inicialmente aceitáveis é (são) melhor(es) (muitas alternativas podem ser eliminadas neste ponto). Outra vez, os métodos recomendados para selecionar a(s) melhor(es) são valor presente líquido e seus derivados - isto é, selecionar a alternativa a que maximiza o valor presente líquido.
- h) Realizar uma análise de sensibilidade examinando o efeito de variações em todas as suposições apropriadas sobre decisões de aceitação e rejeição inicial e final (por exemplo, taxa de desconto, taxa de inflação, e estimativas de custos e/ou benefícios futuros).
- **Exemplo de aplicação de comparação entre alternativas**

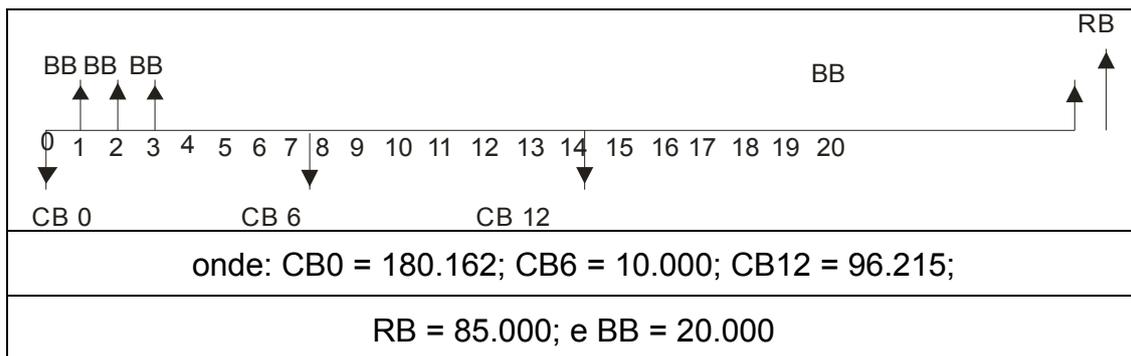
Estão sendo consideradas três alternativas de restauração, cada uma com uma vida de 20 anos, a saber:

- 1ª) A alternativa **A** é uma opção de reforço e tem o diagrama de fluxo de caixa mostrado na Figura 53, onde os custos representam: execução inicial de uma camada de reforço (CA0), um recapeamento ao final do ano 7 (CA7), uma nova camada de reforço estrutural ao final do ano 14 (CA14) e o valor residual estimado ao final da vida de serviço de 20 anos (RA). Há também benefícios ao usuário comparado às condições iniciais (BA), em termos de reduções em acidentes, reparos em veículos e tempo de viagem.

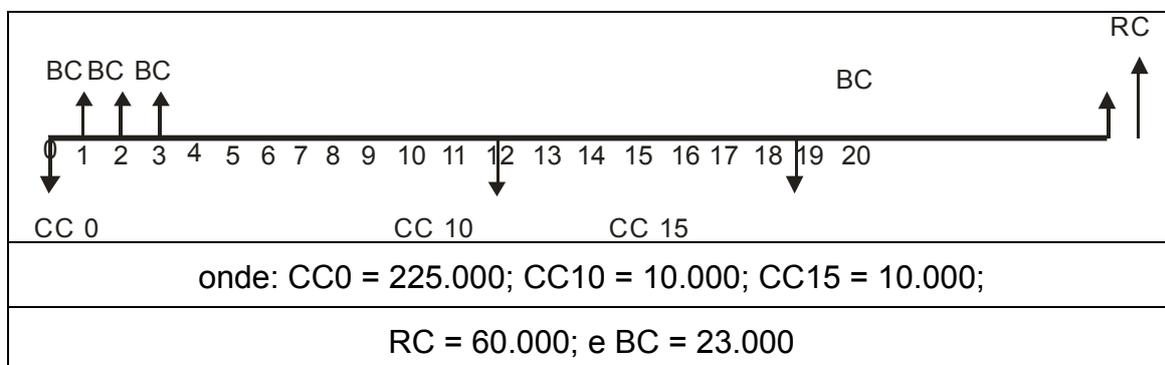
**Figura 53 - Alternativa de Restauração – Alternativa A**



- 2ª) Alternativa **B** (Figura 54) é basicamente uma opção de restauração e consiste de: restauração inicial (CB0), conservação periódica ao final do ano 6 (CB6), uma camada de reforço ao final do ano 12 (CB12), o valor residual (RB) e benefícios ao usuário (BB) comparados às condições iniciais.

**Figura 54 - Alternativa de Restauração – Alternativa B**

- 3ª) Alternativa **C** (Figura 55) é uma opção mais ampla e consiste na reconstrução de faixa e acostamento (CC0), conservação periódica ao final dos anos 10 e 15 (CC10 e CC15), o valor residual (RC) e benefícios ao usuário (BC).

**Figura 55 - Alternativa de Restauração – Alternativa C**

Pede-se:

- Para uma taxa de desconto de 4%, qual alternativa é preferida?
- Assumindo que os benefícios para todas as alternativas sejam iguais, qual alternativa é preferida?

### • Solução do problema

Os cálculos necessários para todas as questões do problema deverão ser feitos pelo menos uma vez para cada alternativa.

Inicialmente, considerando a alternativa A, o VPL é calculado dada uma taxa de desconto de 4% ao ano. (Tabela 33). Os elementos de fluxo de caixa, os fatores de conversão para valor presente e VP para cada ano são mostrados na Tabela 32, nas colunas de (1) a (5). Na coluna (6), os valores presentes do fluxo de caixa líquido anual (calculados a 4%) são apresentados.

O valor presente líquido (VPL) calculado a 4% é igual a R\$ 25.965,00. Uma vez que este valor é maior que 0, a alternativa é inicialmente aceitável. Isto é, os benefícios descontados são maiores do que os custos descontados. A razão benefício-custo (VPL[benefícios]/VP[custos]) para esta alternativa é igual a 1,124 para a taxa de desconto de 4%.

Cálculos semelhantes podem ser feitos para as alternativas B e C. A Tabela 34 mostra os cálculos básicos da alternativa B. Cálculos semelhantes são apresentados na Tabela 35 para a alternativa C.

Agora que os cálculos necessários foram feitos, as perguntas originais podem ser respondidas.

- Para uma taxa de desconto de 4%, que alternativa é preferida?

Os VPL's das alternativas são mostradas abaixo:

$$\text{VPL(A)}_{4\%} = \text{R\$ } 25.965,00; \text{VPL(B)}_{4\%} = \text{R\$ } 62.439,00; \text{VPL(C)}_{4\%} = \text{R\$ } 71.952,00.$$

Todas as alternativas tem VPL's > 0 e são, portanto, inicialmente aceitáveis. A alternativa preferida é C que maximiza o VPL para uma taxa de desconto de 4%.

- Se os benefícios para todas as alternativas são admitidos como sendo iguais, a comparação muda de algum modo. Primeiro, nos cálculos anteriores, o valor residual foi considerado como um benefício. Embora a hipótese de benefícios iguais seja feita, o valor residual deve ainda ser considerado. Usando o VPL(custos) dos cálculos anteriores e corrigindo para valor residual obtém-se o seguinte:

- $\text{VP(custos) A} = 208.696 - (0,4564) \times (67.500) = \text{R\$ } 177.889,00$

- $\text{VP(custos) B} = 248.161 - (0,4564) \times (85.000) = \text{R\$ } 209.367,00$

- $\text{VP(custos) C} = 268.008 - (0,4564) \times (60.000) = \text{R\$ } 240.624,00$

Neste caso, o problema é entendido como de minimização de custo e a alternativa A é selecionada. Note-se que, uma vez que os custos são essencialmente considerados como tendo um sinal positivo, então o valor residual é uma redução de custo e é subtraído do VP de outros custos.

Tabela 33 - Cálculo do VPL para a alternativa A

ano	(1)	(2)	(3)	(4)=	(5)=	(6)=
j	benefícios	custos	fator de VP	(1).(3)	(2).(3)	(4)-(5)
	B <sub>j</sub>	C <sub>j</sub>	$1/(1+0,04)^j$	VP benefícios	VP custos	VPL <sub>j</sub>
0	0	90.580	1.0000	0	90.580	-90.580
1	15.000		0,9615	14.423		14.423
2	15.000		0,9246	13.868		13.868
3	15.000		0,8890	13.335		13.335
4	15.000		0,8548	12.822		12.822
5	15.000		0,8219	12.329		12.329
6	15.000		0,7903	11.855		11.855
7	15.000	45.760	0,7599	11.399	34.774	-23.375
8	15.000		0,7307	10.960		10.960
9	15.000		0,7026	10.539		10.539
10	15.000		0,6556	10.133		10.133
11	15.000		0,6496	9.744		9.744
12	15.000		0,6246	9.369		9.369
13	15.000		0,6006	9.009		9.009
14	15.000	144.322	0,5775	8.662	83.342	-74.680
15	15.000		0,5553	8.329		8.329
16	15.000		0,5339	8.009		8.009
17	15.000		0,5134	7.701		7.701
18	15.000		0,4936	7.404		7.404
19	15.000		0,4747	7.120		7.120
20	15.000	-67.500	0,4564	37.652		37.652
<b>Totais</b>		<b>280.662</b>		<b>234.661</b>	<b>208.696</b>	<b>25.965</b>

Tabela 34 - Cálculo do VPL para a alternativa B

ano	(1)	(2)	(3)=	(4)	(5)=
j	benefícios	custos	(1) - (2)	fator de VP	(3).(4)
	Bj	Cj	Bj - Cj	$1(1+0,04)^j$	VP líquido
			líquido		
0	0	180.162	-180.162	1.0000	-180.162
1	20.000		20.000	0,9615	19.231
2	20.000		20.000	0,9246	18.491
3	20.000		20.000	0,8890	17.780
4	20.000		20.000	0,8548	17.096
5	20.000		20.000	0,8219	16.439
6	20.000	10.000	10.000	0,7903	7.903
7	20.000		20.000	0,7599	15.198
8	20.000		20.000	0,7307	14.614
9	20.000		20.000	0,7026	14.052
10	20.000		20.000	0,6756	13.511
11	20.000		20.000	0,6496	12.992
12	20.000	96.215	- 76.215	0,6246	- 47.604
13	20.000		20.000	0,6006	12.011
14	20.000		20.000	0,5775	11.550
15	20.000		20.000	0,5553	11.105
16	20.000		20.000	0,5339	10.678
17	20.000		20.000	0,5134	10.267
18	20.000		20.000	0,4936	9.873
19	20.000		20.000	0,4747	9.473
20	20.000	-85.000	105.000	0,4564	47.921
<b>Total</b>					<b>62.439</b>

i = 4%	
VP(benefícios)	310.559
VP(custos)	248.161
VPL	62.439
B/C	1,252

Tabela 35 - Cálculo do VPL para a alternativa C

ano	(1)	(2)	(3)=	(4)	(5)=
j	benefícios	custos	(1) - (2)	fator de VP	(3).(4)
	Bj	Cj	Bj - Cj	$1/(1+0,04)^j$	VP líquido
			líquido		
0	0	255.700	25.700	1.0000	-255.700
1	23.000		23.000	0,9615	22.115
2	23.000		23.000	0,9246	21.265
3	23.000		23.000	0,8890	20.447
4	23.000		23.000	0,8548	19.660
5	23.000		23.000	0,8219	18.904
6	23.000		23.000	0,7903	18.177
7	23.000		23.000	0,7599	17.478
8	23.000		23.000	0,7307	16.806
9	23.000		23.000	0,7026	16.159
10	23.000	10.000	13.000	0,6756	8.782
11	23.000		23.000	0,6496	14.940
12	23.000		23.000	0,6246	14.366
13	23.000		23.000	0,6006	13.813
14	23.000		23.000	0,5775	13.282
15	23.000	10.000	13.000	0,5553	7.218
16	23.000		23.000	0,5339	12.280
17	23.000		23.000	0,5134	11.808
18	23.000		23.000	0,4936	11.353
19	23.000		23.000	0,4747	10.917
20	23.000	-60.000	83.000	0,4564	37.880
<b>Total</b>					<b>71.952</b>

i = 4%	
VP(benefícios)	<b>339.961</b>
VP(custos)	<b>268.008</b>
VPL	<b>71.952</b>
B/C	<b>1,268</b>

## **9 – EXEMPLO ILUSTRATIVO**



## 9 EXEMPLO ILUSTRATIVO

Este exemplo constitui-se de uma síntese do trabalho apresentado na 25<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação (São Paulo), intitulado “Restaurar, ou Não Restaurar? Eis a Questão!”, cujos autores são Marcílio Augusto Neves, Petrúcio Lima e Silva, Geovani de Oliveira Costa e Rodrigo Magalhães de Vasconcellos Barros.

O objetivo é expor uma metodologia para o projeto de restauração de pavimentos, que inclui abordagens por procedimentos normalizados pelo DNIT (antigo DNER) e por análises tensionais das estruturas dos pavimentos, com base nos fundamentos da Mecânica dos Pavimentos. É apresentado para ilustrar a aplicação da metodologia do Projeto utilizada na Rodovia BR-153/MG, trecho Entr. BR/497 - Entr. para Patrimônio, entre os km 108 (Prata) - km 130.

A seção transversal do pavimento existente é mostrada na Figura 54 e é composta por:

- a) pista de rolamento com 7 m de largura, formada por duas faixas de tráfego de 3,5 m cada;
- b) acostamentos com largura de 2,5 m.

### 9.1 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO

#### 9.1.1 AVALIAÇÃO FUNCIONAL

Para a avaliação das características funcionais do pavimento existente, envolvendo o levantamento das degradações superficiais e das deformações em perfil, foram aplicadas duas técnicas:

- a) a das avaliações subjetivas, que permite definir o estado de Restauração do pavimento a partir de conceitos qualitativos (alfanuméricos);
- b) a das avaliações objetivas, que permite expressar a restauração do pavimento mediante a quantificação numérica e da distribuição de severidade das diversas manifestações de ruína.

##### 9.1.1.1 AVALIAÇÃO SUBJETIVA

Visando a divisão do trecho em segmentos de comportamento homogêneo, foi elaborada avaliação preliminar das características funcionais do pavimento existente. Lançou-se mão, para tal, da técnica das avaliações subjetivas, que permite definir o estado de restauração da superfície do pavimento a partir de conceitos qualitativos (alfanuméricos), com base em inspeção “in loco”.

No Brasil, a avaliação subjetiva foi oficializada no Procedimento DNIT 009/2003-PRO, por meio da determinação do VSA (Valor de serventia atual).

O trecho foi inicialmente percorrido por três técnicos que, conjuntamente, o dividiram em cinco segmentos considerados “a priori” homogêneos. Em seguida foi feita a avaliação individualmente. De maneira geral o pavimento foi considerado de regular a bom.

Os resultados obtidos com a avaliação subjetiva foram no entanto muito influenciados pelo rejuvenescimento executado em lama asfáltica. Por esta razão, em face da importância desta avaliação preliminar para a divisão do trecho em segmentos homogêneos, resolveu-se aferir o VSA pelo QI.

Para verificação do Valor da Serventia Atual fornecido pela avaliação subjetiva, foi criada a Tabela 38. O QI foi então convertido em VSA pela equação de regressão desenvolvida pelo Eng.<sup>o</sup> César Augusto Vieira de Queiroz (em “Procedure of Obtaining a Stable Roughness Scale from Road and Level Profiles” - Working Document n<sup>o</sup> 22, PICR, GEIPOT, Brasília, 1981):

$$VSA = 4,66 e^{-0,00534 \text{ QI}}$$

As dispersões observadas na Tabela 38 foram consideradas aceitáveis.

#### **9.1.1.2 AVALIAÇÃO OBJETIVA**

Para a avaliação objetiva do estado da superfície do pavimento foi elaborado inventário das degradações superficiais e geométricas existentes, dentro das áreas de observação demarcadas no pavimento (com 6m x 3,5m, largura de faixa de tráfego), a cada 20 m. Foi seguida a metodologia proposta pelo prof. Armando Martins Pereira, normalizada pelo Procedimento DNIT 006/2003-PRO. Neste inventário foram avaliados e quantificados os tipos de defeitos superficiais ocorrentes: trincas, panelas, remendos, desgaste, exsudação, etc. Relativamente às deformações em perfil, os defeitos foram avaliados por dois processos:

- a) para a irregularidade longitudinal, foram quantificados os corrugamentos, ondulações, afundamentos e escorregamentos da capa;
- b) a irregularidade transversal foi obtida executando-se medidas das flechas nas trilhas de roda interna e externa, utilizando-se treliça de alumínio com 1,20 m de base (utilizou-se a treliça especificada na DNIT 006/2003-PRO).

#### **9.1.1.3 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL**

O trecho foi percorrido por veículo em que foi acoplado o aparelho medidor tipo resposta denominado integrador de irregularidade IPR/USP. As leituras no equipamento totalizador de bordo foram anotadas em impresso apropriado para lances de 320 m. No escritório foram calculados os Quocientes de Irregularidade (QI), em contagens por km, com emprego da Equação de Calibração previamente determinada (por regressão estatística, em função de segmentos de calibração cujo QI foi obtido pelo método de Nível e Mira).

#### **9.1.1.4 LEVANTAMENTO DE DEFEITOS**

Foram ainda efetuados levantamentos da condição da superfície do pavimento, de acordo com a especificação DNIT 007/2003-PRO, compreendendo a medição das áreas das superfícies geométricas (retângulos) envoltórios dos principais tipos de defeitos ocorrentes, como trincas isoladas, trincas interligadas, painéis, remendos e desgaste. Com isto foi possível calcular, para cada estaca, o trincamento (% da área trincada) e o desgaste (%).

#### **9.1.2 AVALIAÇÃO DA DEFORMABILIDADE ELÁSTICA**

Para a avaliação do grau de deformabilidade característico do conjunto pavimento - solo de fundação, foram determinadas as deflexões reversíveis máximas, ou deflexões recuperáveis, com emprego de Viga Benkelman.

Anteriormente à realização dos serviços foram tomados os cuidados necessários. A Viga Benkelman foi aferida em laboratório, empregando-se o método proposto pelo Eng.<sup>o</sup> Salomão Pinto (DNER-PRO 175/94), obtendo-se a constante  $k$  da viga. No início dos serviços foi pesado o caminhão a ser usado nas medições, em balança apropriada, e calibrados os pneus.

A medição de deflexões foi feita em todas as estacas, de acordo com o Método DNER-ME 24/94. A cada 200 m foram feitas medidas a 0,25 m da ponta de prova, que permitiram obter também o raio de curvatura da bacia de deformação.

#### **9.1.3 ESTUDO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES**

Para a caracterização da resistência intrínseca dos materiais constituintes das camadas do pavimento e do solo de fundação, foram elaborados estudos de campo e de laboratório para conhecimento das características físicas e mecânicas dos materiais, para duas situações distintas: as condições reais que prevaleceram no campo ("in situ") e as condições "ideais" de trabalho (em laboratório).

Com os resultados foram calculados os Números Estruturais Corrigidos (SNC), de acordo com metodologia do Procedimento DNER-PRO 159/85, em função dos valores de CBR das camadas do pavimento e do subleito.

#### **9.1.4 DEFINIÇÃO DE SEGMENTOS DE COMPORTAMENTO HOMOGÊNEO**

A definição dos segmentos de comportamento homogêneo, tarefa de fundamental importância nos projetos de restauração rodoviária, é feita geralmente sem regras rígidas, sendo requerida experiência e bom senso por parte do projetista. Para tal são analisados gráficos lineares em que são lançados os valores obtidos para os parâmetros definidores do comportamento funcional (avaliações subjetivas e objetivas) e de capacidade de carga (deflexões reversíveis, raios de curvatura), além daqueles que definem as características da estrutura do pavimento (resultados de sondagens e ensaios).

Em gráfico linear do trecho foram lançadas:

- a) poligonais representativos dos quocientes de irregularidade, deflexões, trincamento e de flechas;
- b) estrutura do pavimento;
- c) defeitos ocorrentes.

Com base neste gráfico foram definidos sete segmentos supostamente homogêneos. Procurou-se separar os segmentos de comportamento elástico, correspondente aos de nº 1, 5 e 7 dos demais segmentos, nitidamente de comportamento plástico (por apresentarem deformações permanentes), de nº 2, 3, 4, e 6.

### **9.1.5 CÁLCULO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS**

Uma vez definidos os segmentos de comportamento homogêneo, torna-se necessária uma perfeita caracterização do seu estado, para a formulação e definição das medidas corretivas que irão restabelecer as condições ideais de tráfego na rodovia.

Para tal foram feitos cálculos para cada segmento dos seguintes parâmetros:

- a) análise estatística segundo metodologia do DNER, para os valores individuais de SNC, QI, trincamento (TR), desgaste, flechas nas trilhas de roda e de raios de curvatura;
- b) com os dados do inventário foi calculado o Índice de Gravidade Global (IGG) de cada segmento;
- c) análise estatística das espessuras e dos resultados de ensaios das camadas do pavimento e do subleito, definindo sua estrutura.

Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas nºs 39, 40, 41 e 42, aonde estão registrados dados pertinentes referentes, respectivamente ao Valor da Serventia, Resumo da Avaliação Funcional do Pavimento – Agrupamento A, Resumo da Avaliação Funcional do Pavimento – Agrupamento B, Resumo da Avaliação Estrutural do Pavimento – Agrupamento A, e Resumo da Avaliação Estrutural do Pavimento – Agrupamento B.

### **9.1.6 RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DO PAVIMENTO EXISTENTE**

Em função dos parâmetros dos segmentos homogêneos, procurou-se agrupar aqueles de características semelhantes.

No agrupamento A foram reunidos os segmentos nº 1, 5, e 7, de comportamento nitidamente elástico, correspondem aos locais em que havia um recapeamento com 5cm de CBUQ, que apresentava baixas deflexões e pequena incidência de defeitos superficiais (trincamento incipiente) e geométricos (quase não há afundamento plástico).

Os demais segmentos, por outro lado, aproximam-se de um comportamento plástico, ou seja, há afundamentos permanentes significativos nas trilhas de roda, resultantes do acúmulo de deformações no solo de fundação (subleito).

Pode-se dizer que o pavimento desses segmentos estava “rompido”, por terem ocorrido níveis de tensões verticais de compressão superiores às suportáveis pelo solo do subleito, por ter a estrutura do pavimento características incompatíveis com as cargas atuantes.

Nesses segmentos, em que o revestimento era constituído por tratamento superficial duplo com idade de 13 anos, havia grande variação quanto à deflectometria, tendo sido os segmentos separados em três agrupamentos, em função das amplitudes das deflexões (Tabela 36):

**Tabela 36 - Deflectometria**

AGRUPAMENTO	SEGMENTO	DEFLEXÕES
B	nº 6	68 a 130
C	nº 2 e 4	72 a 154
D	nº 3	114 a 202

O resumo das características do pavimento existente é apresentado mais adiante na Tabela 43.

Observa-se de maneira geral, no trecho que:

- a) a irregularidade longitudinal (QI) não é elevada;
- b) predominam trincas de classe 2 (sem erosão nas bordas), isoladas e interligadas, tipo jacaré;
- c) é restrita a ocorrência de trincas de classe 3 (com erosão nas bordas);
- d) em face da constante atuação da equipe de conserva, não há panelas no trecho, e os remendos executados apresentam bom aspecto visual.

Quanto às camadas constituintes, o pavimento apresenta, segundo os estudos elaborados, materiais de boa qualidade.

A base e a sub-base foram executadas com cascalhos de quartzo com finos laterizados, que apresentam (Tabela 37):

A seção transversal tipo do pavimento está apresentada na Figura 56.

**Tabela 37 - Constituição da base e sub-base**

<b>CAMADA</b>	<b>BASE</b>	<b>SUB-BASE</b>
LL (%)	NP a 33	NP a 25
IP (%)	NP a 14	NP a 11
faixa granulométrica	D	D
IG	O	O
ISC (%)	59 a 119	55 a 104

O subleito é constituído por latossolo areno-argiloso vermelho, da Formação Adamantina, de terrenos mesozóicos da Bacia Sedimentar do Paraná. Apresenta solos mediamente plásticos (IP de 4 a 12%), com baixa expansão (máximo 0,08%) e boa capacidade de suporte (ISC de 12 a 31%).

O CBUQ existente apresenta as seguintes características:

- a) faixa granulométrica: C;
- b) teor de CAP: 4,4 a 5,4%
- c) % VAZIOS: 6,4%
- d) RBV: 77;
- e) estabilidade ( kg): 930; e
- f) fluência (1/100"): 7.

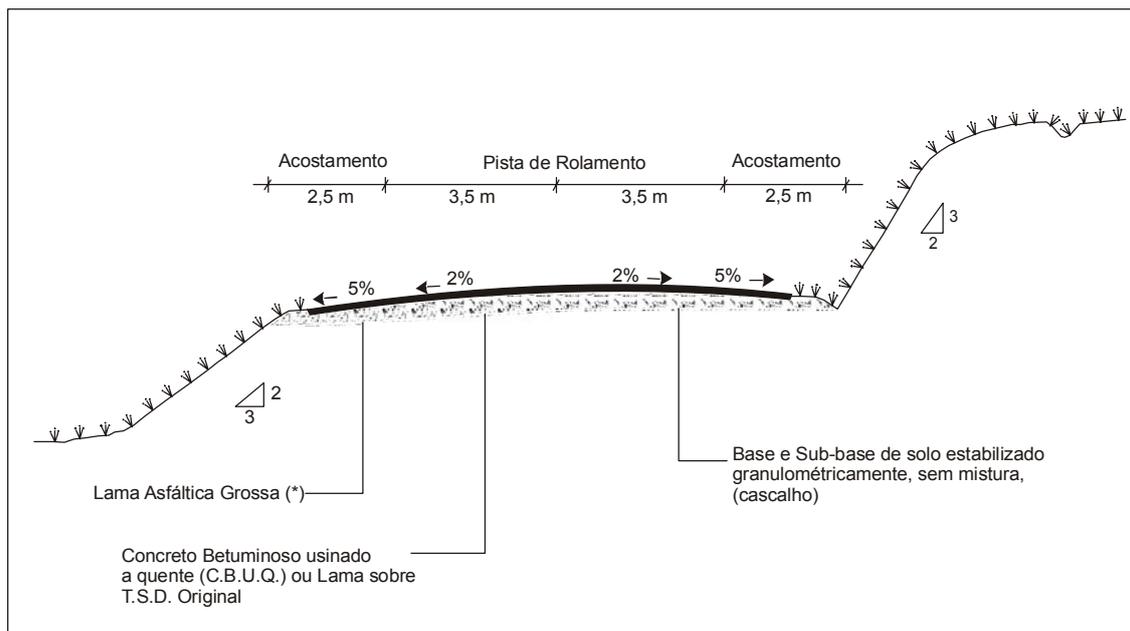
Com o CAP recuperado foram feitos ensaios de caracterização, obtendo-se:

- a) penetração (100g, 5s, 25 °C, 0,1 mm): 18;
- b) ponto de amolecimento: 92 °C;
- c) Índice de Suscetibilidade Térmica (IP) = +3,5.

Observa-se que, apesar de pouco tempo em que ficou submetido à ação das intempéries, o CAP já está oxidado, em face da baixa penetração (enquanto a original deveria situar-se entre 50 e 60) e elevado IP (asfaltos novos devem apresentar IP entre -2 e +1).

Os ensaios efetuados com amostras dos tratamentos superficiais mostraram, como se esperava, o elevado grau de deterioração da camada superior.

Figura 56 - Seção transversal - tipo de pavimento existente



(\*) EM ALGUNS LUGARES COMPLETAMENTE DESGASTADAS

Tabela 38 - Valor de serventia

CÁLCULO DO VALOR DA SERVENTIA ATUAL									
V.S.A = $4,66 \times e^{-0,00534 \times Q.I}$									
SEGMENTO ENTRE		Q I (CONT./ km)	V.S.A (ESTIMADO PELO QI)	AVALIAÇÃO SUBJETIVA (DNER - PRO 07/78)				V.S.A ADOTADO	CONCEITO
				ENG <sup>o</sup> MARCÍLIO	ENG <sup>o</sup> GEOVANI	TÉCNICO PETRÚCIO	MÉDIA		
Escala	km								
0-166	108,6-111,9(1)	19	4,2	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	Bom
166-365	111,9-115,9(2)	46	3,6	2,0	2,5	2,0	2,2	2,2	Regular
365-630	115,9-121,2(1)	20	4,2	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	Bom
630-864	121,2-125,9(2)	45	3,7	2,5	2,5	2,0	2,3	2,3	Regular
864-1080	125,9-130,2(1)	17	4,3	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	Bom

OBSERVAÇÕES:

Revestimento em CBUQ

Revestimento em Lama Asfáltica Grossa sobre T.S.D.

**Tabela 39 - Resumo da Avaliação Funcional do Pavimento  
Agrupamento A**

RODOVIA: BR - 153/MG AGRUPAMENTO : A							
CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS							
1 - DAS DEGRADAÇÕES SUPERFICIAIS:							
1.1 - AVALIAÇÃO OBJETIVA (DNIT 006/2003-PRO)							
ITEM	DEGRADAÇÕES	Ni	FREQÜÊNCIA RELATIVA	COEF. POND.	IGI		
1	FC - 1: F1, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR	44	27	0,2	5		
2	FC - 2: J, TB	109	65	0,5	33		
3	FC - 3: JE, TBE	13	8	0,8	6		
4	ALP, ATP	1	1	0,9	1		
5	O, P	1	1	1,0	1		
6	EX	2	1	0,5	1		
7	D	0	0	0,3	0		
8	R	4	2	0,6	1		
9	FLECHA MÉDIA = $\bar{F}$ = 1 mm			4/3	1		
10	DESVIO DA FLECHA = $\bar{FV}$ = 1 mm			1,0	1		
Nº DE ESTAÇÕES = 166			$\Sigma$ IGI = IGG = 50				
1.2 - AVALIAÇÃO SUBJETIVA (NOTAS: 0 a 5) - ISA = 4,0							
1.3 - DNER-ES 128/83	N	$\bar{X}$	$\sigma$	CV	MÍN.	MÁX.	
TRINCAMENTO (TR) %	154	12	16	133	0	28	
DESGASTE (D) %	-	-	-	-	-	-	
2 - DAS DEFORMAÇÕES EM PERFIL:							
IRREGULARIDADE	N	$\bar{X}$	$\sigma$	CV	MÍN.	MÁX.	
LONGITUDINAL - QI	10	19	4	21	15	23	
TRANSVERSAL-FLECHAS	33 1	1	1	100	0	2	
IGG →	0                      20                      40                      80                      160                      >						
ISA →	5   ÓTIMO   4   BOM   3   REGULAR   2   MAU   1   PÉSSIMO   0						
QI →	<                      30                      45                      60                      75                      >						
3 - CONCLUSÃO DA AVALIAÇÃO FUNCIONAL (SERVENTIA)							
PARÂMETROS	D %	TR %	IGG	ISA 0 a 5	QI CONT./km	IRI m/km	FLECHAS mm
VALORES	0	28	50	4,0	23	2,4	2
CONCEITO			REGULAR	BOM	ÓTIMO		BAIXA

**Tabela 40 - Resumo da Avaliação Funcional do Pavimento  
Agrupamento B**

RODOVIA: BR - 153/MG AGRUPAMENTO : B							
CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS							
1 - DAS DEGRADAÇÕES SUPERFICIAIS:							
1.1 - AVALIAÇÃO OBJETIVA (DNIT 006/2003-PRO)							
ITEM	DEGRADAÇÕES	Ni	FREQÜÊNCIA RELATIVA	COEF. POND.	IGI		
1	FC - 1: F1, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR	75	33	0,2	7		
2	FC - 2: J, TB	81	35	0,5	18		
3	FC - 3: JE, TBE	73	32	0,8	26		
4	ALP, ATP	0	0	0,9	0		
5	O, P	14	6	1,0	6		
6	EX	144	63	0,5	32		
7	D	229	100	0,3	30		
8	R	39	17	0,6	10		
9	FLECHA MÉDIA = $\bar{F}$ = 3 mm			4/3	3		
10	DESVIO DA FLECHA = $\overline{FV}$ = 3 mm			1,0	3		
Nº DE ESTAÇÕES = 229			$\Sigma$ IGI = IGG = 135				
1.2 - AVALIAÇÃO SUBJETIVA (NOTAS: 0 a 5) - ISA = 2,3							
1.3 - DNER-ES 128/83	N	$\bar{X}$	$\sigma$	CV	MÍN.	MÁX.	
TRINCAMENTO (TR) %	217	13	16	123	0	29	
DESGASTE (D) %	(ENCOBERTO POR LAMA ASFÁLTICA)					100	
2 - DAS DEFORMAÇÕES EM PERFIL:							
IRREGULARIDADE	N	$\bar{X}$	$\sigma$	CV	MÍN.	MÁX.	
LONGITUDINAL - QI	15	45	9	20	35	54	
TRANSVERSAL-FLECHAS	457	3	3	100	0	6	
IGG →	0 20 40 80 160 >						
ISA →	5 4 3 2 1 0						
QI →	< 30 45 60 75 >						
3 - CONCLUSÃO DA AVALIAÇÃO FUNCIONAL (SERVENTIA)							
PARÂMETROS	D %	TR %	IGG	ISA 0 a 5	QI CONT./km	IRI m/km	FLECHAS mm
VALORES	100	29	135	2,3	54	4,6	6
CONCEITO			MAU	REGULAR	REGULAR		MÉDIA

**Tabela 41 - Resumo da Avaliação Estrutural do Pavimento  
Agrupamento A**

RODOVIA: BR - 153/MG AGRUPAMENTO: A						
1 - CARACTERÍSTICAS HISTÓRICAS						
EVENTOS	ANO	TIPO (ESP.)	FIRMA	IDADE		
PAVIMENTO ORIGINAL	78	TSD (3 cm)	TERCON	13		
RESTAURAÇÃO	86	CBUQ(5 cm)	ENCALSO	05		
2 - CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO						
VMD	NÚMERO "N"	$\bar{FV}$	Ns	N (1 ANO)	Np	
ATUAL	PERÍODO		--	1990	--	
VMD	AASHTO	2.677	$1,20 \times 10^7$	$1,13 \times 10^6$	$1,67 \times 10^7$	
COMERCIAL	USACE	9.795	$4,39 \times 10^7$	$4,13 \times 10^6$	$6,10 \times 10^7$	
3 - CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS						
3.1 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS:						
ESTRUTURA DO PAVIMENTO EXISTENTE						
CBUQ	→	=====		5 cm (MÉDIA)		
TSD	→	=====		3 cm (MÉDIA)		
CAMADAS GRANULARES	}	ISC <sub>B</sub> = 87		MÁX = 46 cm		
BASE + SUB-BASE		ISC <sub>SB</sub> = 55		MÉDIA = 44 cm		
SUBLEITO	→	//////	ISC MÉDIO = 28	MÍN = 42 cm		
3.2 - CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE ELÁSTICA						
ASSENTAMENTOS REVERSÍVEIS	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS ( $10^{-2}$ mm )					
	N	$\bar{x}$	$\sigma$	CV	MÍN. --	MÁX. --
DO (MÁX.)	166	48	15	31	33	63
D22					18	40
D44					6	23
D66					3	14
D88					2	9
D110					0	8
RAIO (m)	17	154	61	40	93	215

**Tabela 42 - Resumo da Avaliação Estrutural do Pavimento  
Agrupamento B**

RODOVIA: BR - 153/MG AGRUPAMENTO: B						
1 - CARACTERÍSTICAS HISTÓRICAS						
EVENTOS	ANO	TIPO (ESP.)	FIRMA	IDADE		
PAVIMENTO ORIGINAL	66	TSD (2,5 cm)	TERMACO	25		
RESTAURAÇÃO	78	CBUQ(2,5 cm)	TERCON	13		
2 - CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO						
VMD ATUAL	NÚMERO "N" PERÍODO	$\bar{FV}$	Ns	N ( 1 ANO )	Np	
VMD COMERCIAL	AASHTO USACE	2.677 9.795	$2,17 \times 10^7$ $7,93 \times 10^7$	$1,13 \times 10^6$ $4,13 \times 10^6$	$1,67 \times 10^7$ $6,10 \times 10^7$	
3 - CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS						
3.1 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS:						
ESTRUTURA DO PAVIMENTO EXISTENTE						
CBUQ	→	_____		2,5 cm (MÉDIA)		
TSD	→	_____		2,5 cm (MÉDIA)		
CAMADAS GRANULARES BASE + SUB-BASE	→	_____	ISC <sub>B</sub> = 100	MÁX = 55 cm		
		_____	ISC <sub>SB</sub> = 84	MÉDIA = 47 cm		
		_____		MÍN = 40 cm		
SUBLEITO	→	//////	ISC <sub>MÉDIO</sub> = 16			
3.2 - CARACTERÍSTICAS DE DEFORMABILIDADE ELÁSTICA						
ASSENTAMENTO S REVERSÍVEIS	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS ( 10 <sup>-2</sup> mm )					
	N	$\bar{X}$	$\sigma$	CV	MÍN. --	MÁX. --
DO(MÁX.)	229	99	31	31	68	130
D22					22	100
D44					10	65
D66					3	38
D88					2	26
D110					2	23
RAIO (m)	27	65	26	40	39	91

**Tabela 43 - Resumo das características do pavimento existente**

AGRUPAMENTOS	A	B	C	D
SEGMENTO (ENTRE ESTACAS)	1 (0 a 166) 5 (364 a 630) 7 (864 a 1082)	6 ( 630 a 864)	2 (166 a 214) 4 (303 a 364)	3 (214 a 303)
REVESTIMENTO(ANO)	CBUQ (85) sobre TSD (78/65)	Lama asfáltica (85) sobre TSD (78/86)		
Avaliação Funcional:	Pavimento em bom estado. Fenômeno de fissuração iniciado, com trincas classe 2. Baixa irregularidade	Pavimento deteriorado, com elevado grau de deformações plásticas nas trilhas de roda. Há desgaste e trincas de classe 2 e 3.		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• VSA</li> <li>• IGG</li> <li>• Desgaste (% da área)</li> <li>• Trincamento (% da área)</li> <li>• Freqüência de trincas classe 2</li> <li>• Freqüência de trincas classe 3</li> <li>• Flechas nas trilhas de roda</li> <li>• Irregularidade (QI)</li> </ul>	4,0 (bom) 33 a 50 (regular) - 12% a 28% 16% a 33% 1% a 8% 0 mm a 2 mm 12 a 24 cont/km	2,3 (regular) 135 (mau) 100% 29% 18% 28% 0 mm a 6 mm 36 a 54 cont/km	2,2 (regular) 136 a 164 (mau) 100% 100% 12% a 47% 2% a 13% 2% a 18% 0 mm a 8 mm 30 a 68 com./km	2,2 (regular) 130 (mau) 100% 100% 13% 7% 10% 1 mm a 5 mm 41 a 55 cont./km
Avaliações Defletométricas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deflexão Benkelman</li> <li>• Raio de Curvatura</li> </ul>	Deflexões Baixas 33 a 63 63 m a 299 m	Deflexões Médias 68 a 130 39 m a 91 m	Deflexões Elevadas 72 a 154 44 m a 96 m	Deflexões Elevadas 114 a 202 22 m a 72 m

## 9.2 DADOS DO TRÁFEGO E NÚMERO “N”

Os estudos de tráfego compreenderam a coleta de dados existentes no Serviço de Trânsito da Diretoria de Restauração do DNER/MG (que efetua contagens anuais na sua malha viária), definida a Série Histórica de Tráfego no trecho, a pesquisa de tráfego atual, o estudo da sazonalidade dos fluxos de tráfego durante os meses do ano e os dias da semana, a determinação do Volume Médio Diário Anual (VMD), a projeção dos fluxos por classe de veículos, o cálculo dos fatores de veículos da frota (utilizando fatores de equivalência da “AASHTO” e do “USACE”) e o cálculo dos Números “N”(número de solicitações equivalentes às do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf).

Os dados básicos obtidos são os seguintes:

### a) Composição da Frota em 1990:

- Veículos de Passeio      836    (26,5%)
- Ônibus (duplos)      95    (3,0%)
- Tribus      15    (0,5%)
- Caminhões 2C (leves)    123    (3,5%)

- Caminhões 2C (pesados) 137 (4,4%)
- Caminhões 3C 993 (31,6%)
- Caminhões 4C 3 (0,1%)
- Semi-Reboque 2 S 1 8 (0,3%)
- Semi-Reboque 2 S 2 111 (3,5%)
- Semi-Reboque 2 S 3 677 (21,5%)
- Semi-Reboque 3 S 2 6 (0,2%)
- Semi-Reboque 3 S 3 140 (4,5%)
- VMD Total 3.144 (100%)
- VMD Comercial 2.308 (73,5%)

**b) Taxas de Crescimento do Tráfego (estudos do DER/MG):**

- Automóveis 4,2% ao ano;
- Ônibus e Caminhões 5,2% ao ano.

**c) Fatores de Veículos da Frota:**

- Critério da "AASHTO" 2,677;
- Critério do "USACE" 9,795.

Na Tabela 44 são resumidos os Números "N" calculados.

**Tabela 44 - Resumo dos Números "N" de Projeto**

NÚMERO "N"		CRITÉRIO	
		AASHTO	USACE
Ns	(1975 - 1992)	$2,17 \times 10^7$	$7,93 \times 10^7$
	(1986 - 1992)	$1,20 \times 10^7$	$4,39 \times 10^7$
Np1 ( 1990 )		$1,13 \times 10^6$	$4,13 \times 10^6$
Np ( 1993 - 2002 )		$1,67 \times 10^7$	$6,10 \times 10^7$

Np1 = Número de eixos equivalentes previstos para o ano de análise (1990);

Ns = Número de eixos equivalentes suportados pelo pavimento existente, desde a última restauração até a execução da restauração projetada;

Np = Número de eixos equivalentes a serem suportados pelo pavimento, restaurado, ou por pavimentos novos, no período do projeto (10 anos).

### **9.3 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO EXISTENTE E DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO POR PROCEDIMENTOS EMPÍRICOS**

#### **9.3.1 GENERALIDADES**

Foram elaboradas avaliações estruturais e dimensionamento de reforço por procedimentos oficializados pelo DNER, a saber: PRO 10/79, PRO 11/79 e PRO 159/85. Adicionalmente foi aplicado o método TECNAPAV, DNER - PRO 269/94 e o Critério da Resistência.

#### **9.3.2 APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DNER-PRO 10/79**

Este procedimento se origina de estudos do Prof. Armando Martins Pereira, a partir do “Test Method California 356-A”.

Inicialmente foi estimada a vida útil restante do pavimento existente. O pavimento do Agrupamento B, revestido com TSD, já atingiu a fase de fadigas, não havendo vida útil restante, pois as deflexões ( $d_o = 0,7 dp$ ) são superiores à deflexão admissível (73).

Já o Agrupamento A, que foi recapeado com CBUQ há seis anos, encontra-se no final da fase elástica. As deflexões  $dp$  são próximas da admissível (40). A vida útil restante é mínima, e inferior ao período de projeto (10 anos).

Os parâmetros do pavimento existente foram comparados com os “Critérios para o Estabelecimento das Diretrizes de Projeto”, concluindo-se que todos os segmentos necessitam de reforço da estrutura, a ser dimensionado pelo critério de deformabilidade (hipótese II). Para tal, os segmentos foram submetidos à verificação da viabilidade de concepção do reforço em camada única de CBUQ, concluindo-se pela impossibilidade desta solução, pois a deflexão estimada sobre o reforço de espessura “h” ( $d_h$ ) é superior à admissível ( $d_{adm}$ ). Foi então definido reforço em duas camadas:

- a) camada inferior, com material de alta flexibilidade, conforme recomendada a PRO 10/79, optando-se por um pré-misturado a quente (PMQ) de graduação aberta;
- b) camada superior, densa, em concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), considerada crítica no que concerne à deformabilidade.

Os resultados obtidos no dimensionamento são apresentados nas Tabelas 41 e 42.

#### **9.3.3 APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DNER-PRO 11/79**

Este procedimento tem origem em estudos argentinos de Adolfo Celestino Ruiz.

A aplicação deste procedimento iniciou-se com a avaliação estrutural, pelos critérios da Tabela III, e estimativa da vida restante do pavimento. A avaliação obtida resume-se em:

- a) os dois Agrupamentos encontram-se na fase de fadiga, não possuindo vida restante, pois as deflexões são superiores às admissíveis;

- b) o Agrupamento A tem qualidade estrutural regular, necessitando de reforço estrutural, projetado pelo critério defletométrico (hipótese Iia);
- c) o Agrupamento B apresenta má qualidade, enquadrado na hipótese IV, necessitando de reforço projetado pelo critério de resistência ou reconstrução.

Todos os segmentos tiveram reforço estrutural dimensionado pelo critério defletométrico, em camada única de CBUQ, independente do critério recomendado pela Tabela III do PRO 11/79, para propiciar uma comparação de resultados com os de outros procedimentos.

### 9.3.4 APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DNER-PRO 159/85

#### 9.3.4.1 PARÂMETROS BÁSICOS

Foram fixados os parâmetros básicos seguintes:

**a) Período de análise = 10 anos contados a partir do Ano ARO (1993);**

**b) Restrições de construção**

- Espessura de concreto asfáltico:
- mín. = 3,5 cm
- máx. = 20,0 cm
- Espessura de TSD = 2,0 cm;
- Espessura total máxima de uma alternativa = 20,0 cm;
- Número limite de etapas por alternativa - 1 etapa;
- Vida útil mínima de cada alternativa = 10 anos;

**c) Restrições de desempenho = 2 alternativas:**

- 1ª: -  $QIN_{\leq} < 60$  cont/km

-  $TRM_{\leq} < 40\%$

-  $DM_{\leq} < 40\%$

- 2ª: -  $QIN_{\leq} < 70$  cont/km

-  $TRM_{\leq} < 40\%$

-  $DM_{\leq} < 40\%$

#### 9.3.4.2 AVALIAÇÃO DO PAVIMENTO EXISTENTE

A avaliação consistiu de processamento dos parâmetros de trincamento, desgaste e irregularidade, que foram evoluídos anualmente até o final do período de análise, por meio das equações de desempenho, sendo os valores comparados com as restrições de desempenho impostas. Constatou-se que todos os segmentos homogêneos necessitam de

restauração imediata, pois as restrições são ultrapassadas no início ou ao longo do período de análise (Situações II e III).

### 9.3.4.3 ALTERNATIVAS PARA RESTAURAÇÃO

Numa primeira tentativa procedeu-se ao estudo de restauração com aplicação de lama asfáltica, para os segmentos em que a irregularidade do pavimento existente é inferior à restrição imposta, no ano ARO. Foram obtidos valores de trincamento ou desgaste que ultrapassaram as restrições de desempenho antes do final do período de análise, inviabilizando a restauração em lama asfáltica. O mesmo ocorreu com a tentativa de restauração com Tratamento Superficial Duplo. Passou-se então ao estudo da restauração em concreto betuminoso usinado quente (CBUQ). Por tentativa foram tomadas espessuras crescentes de CBUQ, a partir de 3,5 cm, examinando-se a evolução do trincamento e a irregularidade, anualmente, até encontrar uma espessura suficiente para propiciar, ao final do período de análise, valores inferiores ou iguais às restrições impostas.

Obteve-se, para as duas alternativas estudadas (restrições de desempenho), uma única solução para restauração de cada segmento homogêneo, em função das restrições impostas, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 45 e 46.

### 9.3.5 APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DNER-PRO 269/94

Este método foi desenvolvido pelos Eng.<sup>o</sup> Ernesto Simões Preussler e Salomão Pinto, considerando a “resiliência” dos materiais. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 47 e 48.

### 9.3.6 APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE RESISTÊNCIA

Para propiciar uma comparação de soluções procedeu-se neste projeto o dimensionamento de todos os segmentos homogêneos utilizando o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER (Eng.<sup>o</sup> Murillo Lopes de Souza - 1966).

Para isso, às diversas camadas constituintes do pavimento existente foram atribuídos coeficientes de equivalência estrutural compatíveis com suas características atuais, determinados pelos ensaios de laboratório e pelas observações de campo:

- a) Revestimentos: - CBUQ,  $K = 1,8$ :
- b) Camadas granulares:
  - Satisfazendo à Especificação DNER-ES-P 306/97,  $K = 1,0$ ;
  - Satisfazendo à Especificação DNER-ES-P 301/97,  $K = 0,77$ .

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 49

Para o CBUQ existente no Agrupamento A, foi adotado um coeficiente de equivalência estrutural  $K = 1,8$ , pelas razões expostas a seguir. O CBUQ novo, possui  $K = 2,0$ , segundo

o método do DNER. O CBUQ existente já se apresenta parcialmente deteriorado, em função dos seis anos de exposição ao tráfego e às intempéries, com CAP já oxidado. Seria lógico se adotar para ele um K inferior a 2,0, em face dessa deterioração. Na falta de um critério racional, optou-se por seguir as recomendações do “The Asphalt Institute”, reproduzida no livro “Principles of Pavements Design”, de YODER/WITCZAK, em que “Table 20-2”, recomenda os seguintes fatores de conversão:

I<sup>n</sup> - A . C (fine cracking, slight deformation, stable) = 0,7 - 0,9 in A . C.

O CBUQ existente apresenta tais características: trincas incipientes, pouco deformado e estável.

Adotou-se o limite superior: “conversion factor”= 0,9

Assim:  $K = 2,0 \times 0,9 = 1,8$

**Tabela 45 - Avaliação do pavimento existente/soluções para restauração  
Agrupamento A**

RODOVIA: BR-153/MG		LOTE: 03								
TRECHO: ENTRONCAMENTO BR/497 - ENTRONCAMENTO PARA PATRIMÔNIO										
SUBTRECHO:										
AGRUPAMENTO A	ESTACA INICIAL: 0 + 0,00	ESTACA FINAL: 166 + 0,00								
1 - PROCEDIMENTO DNER - PRO 159/85										
NP1 = 1130000	t = 0,052	ANO "0" = 1985	AE = 5      ARo = 8      P = 10      Af = 18							
<b>1.1 - PREVISÃO DE DESEMPENHO DO PAVIMENTO EXISTENTE</b>										
TIPO DE PAVIMENTO EXISTENTE (Re)	NO ANO DE AVALIAÇÃO - Ae (1990)		NO ANO DE ARo (1993)							
	Be	SNCe    Qle    TRe    De	Qlo    TRo    Do							
CBUQ	63	4,37    23    28    0	26    36    --							
NO ANO FINAL (2003)										
	Qlf	TRf	Df							
	32	62	--							
SITUAÇÃO II: NECESSIDADE DE RESTAURAÇÃO AO LONGO DO PERÍODO DE ANÁLISE.										
<b>1.2 - ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA RESTAURAÇÃO</b>										
TIPO	ESPESSURA H (cm)	IMEDIATAMENTE APÓS À RESTAURAÇÃO - ANO DE ARo(1993)			NO ANO FINAL(2003)					
		Ba	SNCa	Qla	TRa	Da	Qlf	TRf	Df	
2ª ALTERNATIVA:										
QI < 70, TR < 40 e D < 40	CBUQ	5,0	36	5,22	21	15	--	28	33	--
1ª ALTERNATIVA										
QI < 60 e TR < 40	CBUQ	5,0	36	5,22	21	0	--	28	33	--
<b>2 - PROCEDIMENTO "A" DNER - PRO 10/79</b>										
Ns = 12000000	Np = 16700000	dp = 63		IGG = 50			F = 1			
R = 154										
REVESTIMENTO EXISTENTE: CBUQ										
he = 5	MS = 3	AP% = 1	FC1% = 27	FC2% = 65	FC3% = 8	do = 44				
<b>2.1 - AVALIAÇÃO:</b> ITM = 12,1    ITS = 11,6    NR = 0    FASE = ELÁSTICA    ITT = 13,0    dadm = 40										
HIPÓTESE II		MEDIDAS CORRETIVAS REFORÇO				CRITÉRIOS PARA REFORÇO DEFORMABILIDADE				
<b>2.2 - DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO:</b> ITP = 12,1    IF = 55    fr = 0,61    hef = 3,1    hc = 13,0    DELTAh = 9,9    CONDIÇÃO b: hcb <sub>min</sub> = 9,9    dadm <sub>MAX</sub> = 20    dh <sub>MAX</sub> = 25    SOLUÇÃO: INVIÁVEL EM CAMADA ÚNICA DE CBUQ.    Hc = 6,2    dh = 39    DELTA% = 12    H = 1,5    H <sub>INF</sub> = 0,0    H <sub>inf</sub> = 3,5										
<b>2.3 - SOLUÇÃO PARA RESTAURAÇÃO:</b> CAMADA SUPERIOR (CBUQ) COM 6 cm E CAMADA INFERIOR (PMQ) COM 4cm.										
<b>3 - PROCEDIMENTO "B" DNER - PRO 11/79</b>										
<b>3.1 - AVALIAÇÃO:</b> dadm = 58    NT = -----    NR = 0    FASE = FADIGA										
HIPÓTESE IIa		MEDIDAS CORRETIVAS DEFLECTOMÉTRICO				CRITÉRIOS PARA REFORÇO REFORÇO				
<b>3.2 - DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO:</b> TIPO = CBUQ    dadm = 55    ESPESSURA = 3,5 cm										
<b>3.3 - SOLUÇÃO PARA RESTAURAÇÃO:</b> CAMADA DE CBUQ COM 3,5 cm.										

**Tabela 46 - Avaliação do pavimento existente/soluções para restauração  
Agrupamento B**

RODOVIA: BR-153/MG		LOTE: 03		
TRECHO: ENTRONCAMENTO BR/497 - ENTRONCAMENTO PARA PATRIMÔNIO				
SUBTRECHO:				
AGRUPAMENTO B	ESTACA INICIAL: 630 + 0,00	ESTACA FINAL: 864 + 0,00		
1 - PROCEDIMENTO DNER - PRO 159/85				
NP1 = 1130000 t = 0,052 ANO "0" = 1975 Ae = 15 ARo = 18 P = 10 Af = 28				
<u>1.1 - PREVISÃO DE DESEMPENHO DO PAVIMENTO EXISTENTE</u>				
TIPO DE PAVIMENTO EXISTENTE (Re)	NO ANO DE AVALIAÇÃO - Ae (1990)	NO ANO DE ARo (1993)	NO ANO FINAL (2003)	
	Be SNCe Qle TRe De	Qlo TRo Do	Qlf TRf Df	
TS	130 3,41 54 29 100	57 -- 100	68 -- 100	
SITUAÇÃO II: NECESSIDADE DE RESTAURAÇÃO AO LONGO DO PERÍODO DE ANÁLISE.				
<u>1.2 - ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA RESTAURAÇÃO</u>				
	TIPO	ESPESSURA H (cm)	IMEDIATAMENTE APÓS À RESTAURAÇÃO - ANO DE ARo(1993)	NO ANO FINAL(2003)
			Ba SNCa Qla TRa Da	Qlf TRf Df
2ª ALTERNATIVA:				
	QI < 70, TR < 40 e D < 40	CBUQ	6,5	63 4,52 27 15 -- 38 38 --
1ª ALTERNATIVA				
	QI < 60 e TR < 40	CBUQ	6,5	63 4,52 27 0 -- 38 38 --
2 - PROCEDIMENTO "A" DNER - PRO 10/79				
Ns = 21700000 Np = 16700000		dp = 130	IGG = 135	F = 3 R = 65
REVESTIMENTO EXISTENTE: TS				
he = 0	MS = 6	AP% = 0	FC1% = 33	FC2% = 35 FC3% = 32 do = 91
<u>2.1 - AVALIAÇÃO:</u> ITM = 11,5 ITS = 12,5 NR = 0 FASE = FADIGA ITT = 13,5 dadm = 73				
HIPÓTESE II	MEDIDAS CORRETIVAS REFORÇO		CRITÉRIOS PARA REFORÇO DEFORMABILIDADE	
<u>2.2 - DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO:</u> ITP = 12,1 IF = 62 fr = 0,57 hef = 0,0 hc = 10,4 DELTAh = 10,4 CONDIÇÃO b: hcb <sub>min</sub> = 10,4 dadm <sub>MAX</sub> = 27 dh <sub>MAX</sub> = 50 SOLUÇÃO: INVIÁVEL EM CAMADA ÚNICA DE CBUQ. Hc = 6,2 dh = 39 DELTA% = 57 H = 30,2 H <sub>INF</sub> = 19,7 H <sub>inf</sub> = 14,6				
<u>2.3 - SOLUÇÃO PARA RESTAURAÇÃO:</u> CAMADA SUPERIOR (CBUQ) COM 6 cm E CAMADA INFERIOR (PMQ) COM 15cm.				
3 - PROCEDIMENTO "B" DNER - PRO 11/79				
<u>3.1 - AVALIAÇÃO:</u> dadm = 105 NT = ----- NR = 0 FASE = FADIGA				
HIPÓTESE IV	MEDIDAS CORRETIVAS REFORÇO OU RECONSTRUÇÃO		CRITÉRIOS PARA REFORÇO RESISTÊNCIA	
<u>3.2 - DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO:</u> TIPO = CBUQ dadm = 55 ESPESSURA = 15,5 cm				
<u>3.3 - SOLUÇÃO PARA RESTAURAÇÃO:</u> CAMADA DE CBUQ COM 15,5 cm.				

**Tabela 47 - Dimensionamento de reforço de pavimento – TECNAPAV  
Agrupamento A**

RODOVIA: BR-153/MG	TRECHO: ENTRº BR/497 - ENTRº PATRIMÔNIO	
AGRUPAMENTO A	ESTACAS	0 a 166

<p>ESTRUTURA TIPO: I.R TRÁFEGO</p> <p>REFORÇO</p> <p>CAMADA 1: Revestimento = CBUQ    HR he = 5 cm</p> <p>CAMADA 2: Camadas Granulares    hcg = 44cm</p> <p>CAMADA 3: Subleito</p> <p>CBR = 28%    SILTE = - %</p> <p>100 = - %    IP = 3,0%    PEN 200</p>	<p align="center">TRÁFEGO</p> <p>NÚMERO <math>N_p = 6,10 \times 10^7</math> CRITÉRIO DO 'US CORPS OF ENGINEERS 'MÉTODO DNER-1966</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;">Dc = 63 (0,01 mm)</div> <p align="center">S% = <u>% DE SILTE</u> x 100 = - x</p> <p align="center">PEN 200</p>
---	--

ÁLCULO DA ESPESSURA EFETIVA DO REVESTIMENTO EXISTENTE: C

hef =  $\frac{807,961}{220} - 5,373 + 0,972 I_1 + 4,101 I_2 = 8,4 \text{ cm (*)}$

Dc = DEFLEXÃO CARACTERÍSTICA      Obs:  $0 \leq hef \leq he$       hef = 5 cm

CÁLCULO DA DEFLEXÃO ADMISSÍVEL PELO CRITÉRIO DE FADIGA:

$\log D_{adm} = 3,148 - 0,188 \log N_p \rightarrow D_{adm} = 48 \text{ (0,01 mm)} \times 1,2 = 58$

Obs.: PARA  $N \geq 10^7$  MULTIPLICAR  $D_{adm}$  POR 1,2

CÁLCULO DA ESPESSURA DO REFORÇO EM CONCRETO ASFÁLTICO:

$$H_R = \frac{238,14}{\sqrt{D_{adm}}} - 1,357 hef - 19,015 + 1,016 I_1 + 3,893 I_2 \quad H_R = 6 \text{ cm}$$
  

**CONCLUSÃO**  
Reforço em camada única de CBUQ com 6 cm

OBSERVAÇÃO: \* Se  $TR > 50 \%$  ou  $FC - 3 > 30 \%$  ou  $FC - 2 + FC - 3 > 80 \%$  ADOTAR hef = 0



**Tabela 49 - Avaliação do pavimento existente e dimensionamento de reforço - critério de resistência – método DNER (Engº Murilo)**

AGRUPAMENTO		A	B	
NÚMERO "N"		6,10 X 10 <sup>7</sup>	6,0 X 10 <sup>7</sup>	
PAVIMENTO EXISTENTE	SUB-BASE	TIPO h (cm) ISC K	Solo 29 55 0,77	Solo 25 84 1,0
	BASE	TIPO h (cm) ISC K	Solo 16 87 1,0	Solo 22 100 0,77
	REVESTIMENTO	TIPO h(cm) K	CBUQ 5 1,8	-
		TIPO h (cm) K	-	-
		TIPO h (cm) K	-	-
	H <sub>E</sub> = ∑ hi.ki		47	42
ISC subleito = n		28	16	
Hn ( K = 1 )		29	35	
HIPÓTESE		-	-	
REFORÇO	Hn - He		-18	-7
	inferior	TIPO K h	-	-
	superior	TIPO K h	-	-
CONCLUSÃO		O pavimento é suficiente	O pavimento é suficiente	

## **9.4 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO EXISTENTE E DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO PELA TEORIA DA MECÂNICA DOS PAVIMENTOS**

### **9.4.1 GENERALIDADES**

A avaliação e o dimensionamento foram feitos com base em análise racional das estruturas, a partir do cálculo das tensões e das deformações que atuam nas camadas de um sistema estratificado, solicitado por cargas exteriores. Os fundamentos dessa técnica são ditados pelos princípios clássicos da Mecânica dos Pavimentos e da Teoria da Elasticidade. Foram estabelecidas espessuras variáveis para o reforço, e respeitadas as leis de fadiga. Nos cálculos foi empregado sistema computacional que permita calcular os esforços em qualquer ponto das estruturas com até 10 camadas, considerando que estas apresentam elasticidade linear.

### **9.4.2 INTERPRETAÇÃO ANALÍTICA DE DEFLECTOGRAMAS (RETROANÁLISE)**

Embora já se tenham definidos os segmentos de comportamento homogêneo, e avaliadas as características funcionais e de capacidade de carga do pavimento destes segmentos, torna-se necessário realizar a sua caracterização estrutural, de forma a permitir análises do pavimento sob enfoque de estrutura, composta por camadas e submetida a esforços internos (tensões e deformações) oriundos da ação das cargas. Para tal, é necessário definir o estado tensional da estrutura, utilizando-se conceitos da Mecânica dos Pavimentos, a partir da determinação de grandezas fundamentais, como módulos de rigidez/resiliência e coeficiente do Poisson das camadas.

A metodologia aplicada baseia-se na interpretação analítica das linhas de influência dos assentamentos reversíveis (deflectogramas), para obtenção das grandezas citadas.

Para obtenção da geometria das linhas de influência, ou deflectogramas, foram realizados ensaios de carga com pneu, pela técnica das leituras seqüenciais, medindo-se os assentamentos reversíveis com a Viga Benkelman. Este ensaio, que simula os resultados obtidos por deflectógrafos de pavimento (como o do LNEC, o "Falling Weight Deflectometer" ou outros), foi normalizado como Método DNER-ME 61/94.

Após a obtenção dos deflectogramas experimentais procurou-se definir os deflectogramas característicos. Foram inicialmente calculados os parâmetros de forma (distância  $d_{30}$ ), para expurgo dos deflectogramas espúrios. Em seguida, os deflectogramas foram agrupados e traçados os diagramas experimentais característicos (Ver Figura 55).

O procedimento de interpretação consiste em comparar, por retroanálise, as linhas de influência experimentais (dos deflectogramas característicos) com os deflectogramas teóricos dos assentamentos da superfície do sistema estratificado elástico.

Essa retroanálise, feita com emprego do Programa ELSYM-5, aplicada a um sistema de três ou quatro camadas elásticas, carregado externamente por duas cargas circulares que simulam o semi-eixo padrão rodoviário (de 8,2 tf), permitiu que fossem inferidos os módulos elásticos/de rigidez das diversas camadas de uma estrutura teórica. A estrutura teórica foi obtida por tentativas, com cálculos itinerantes em computador. Inicialmente foram fixadas as espessuras das camadas, com base nas sondagens efetuadas. Os coeficientes de Poisson foram adotados em função das recomendações do “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures”, 1986 (Tabela 50):

**Tabela 50 - Coeficientes de Poisson**

MATERIAL	COEFICIENTES $\mu$	ADOTADO
CBUQ	0,15 a 0,45	0,30
Base e sub-base granular	0,30 a 0,40	0,35
Subleito	0,30 a 0,50	0,45

Para o agrupamento A considerou-se um sistema de quatro camadas: CBUQ, Base, Sub-base e Subleito. Para o B considerou-se três camadas: Base, Sub-base e Subleito. O TSD não foi considerado, por não ser camada estrutural (apenas camada de desgaste).

Na impossibilidade de determinar em laboratório o módulo de rigidez “E” do CBUQ existente, foi ele estimado em função dos ensaios realizados, em 60.000 kgf/cm<sup>2</sup>.

A partir daí, foram modificados os módulos da base, sub-base e subleito, até serem encontrados deflectogramas semelhantes aos experimentais. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 56, por agrupamentos e definidos os modelos estruturais do pavimento a ser restaurado.

#### 9.4.3 DEFINIÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA RESTAURAÇÃO DO PAVIMENTO

Durante as etapas do dimensionamento de reforço de pavimentos, e mesmo de pavimentos novos, surgem fatos que inviabilizam o emprego de camadas convencionais de concreto asfáltico. Procurou-se então, previamente, estabelecer materiais alternativos a serem empregados na restauração, compreendendo:

- concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) para camada superior de rolamento, ou “capa”, adotando-se a faixa B da Especificação DNIT 031/2004 – ES;
- “BINDER”, ou camada de ligação, a ser posicionada nas camadas intermediárias da estrutura, um pouco mais “aberta” que a capa para conseguir uma maior flexibilidade, tendo sido escolhida a faixa A da Especificação DNER-ES-P, com a vantagem adicional obter um menor teor asfáltico que o da capa, com redução nos custos;
- pré-misturado a quente (PMQ) tipo macadame, faixa B da Especificação DNIT 031/2004 – ES, que pode ser uma alternativa econômica para as camadas

intermediárias do reforço em face do baixo teor de CAP, e foi uma alternativa válida dimensionada pelo PRO 10/79;

- d) camada de vedação e regularização, usualmente empregada pelo DNER para restauração de pavimentos que apresentam deformações plásticas e elevado grau de trincamento, tem-se sucesso com a utilização de um concreto asfáltico tipo “massa fina”, dosado na faixa MIX nº 4 do “The Asphalt Institute”.

As características dos materiais são dados na Tabela 53.

Para definição dos módulos de rigidez destas camadas, recomenda-se a realização de ensaios de laboratório, após a dosagem das misturas. No entanto, não foi possível realizar tais tarefas, pois os agregados a serem empregados não estão disponíveis, pois a pedreira a ser explorada nas obras não é comercial. Tentar “britar” a pedra (ou marroar) em laboratório para executar os ensaios em nada resolveria o problema, em face das características discrepantes que se obteria do material a ser oportunamente obtido em britagem industrial.

Foi então feita pesquisa bibliográfica para estimativa dos módulos, descrita a seguir. Por ocasião de início da produção dos agregados na obra, deverão ser feitos os ensaios devidos, definindo os módulos e, por conseqüência, revisando-se os dimensionamentos.

Aproveitou-se a ocasião para estimar também o Módulo E do CBUQ existente (em função dos resultados de ensaios elaborados).

Foram empregadas quatro metodologias, e adotados valores médios às camadas.

#### **9.4.3.1 “ÁBACO DE SAUNIER”**

Para estimar o módulo de rigidez das camadas do reforço do pavimento foi empregado o conhecido “Ábaco de Saunier”, composto com base nos trabalhos de Van der Poel (“A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test-Data” - 1954 - Shell Oil Co) e de W. Heukelon (“Dynamic Testing as a Means of Controlling During and After Construction” - 1962 - Komin Klijke - Shell - Amsterdam).

Neste ábaco, obtém-se inicialmente o Módulo de Rigidez  $S_b$  do CAP (Bitumen Stiffness), em função de:

- a)  $t$  = tempo de aplicação de carga (s);
- b)  $\Delta t$  = diferença de temperatura entre a temperatura da mistura asfáltica ( $t_p$ ) e a temperatura do ponto de amolecimento do CAP ( $t_{AB}$ ), do ensaio de anel e bola;
- c) IP = Índice de Penetração do CAP, definido em função da penetração e do ponto de amolecimento.

Estando  $S_b$  definido, pode-se obter o Módulo de Rigidez  $S_m$  da mistura (Stiffness modulus) em função da sua porcentagem de vazios (V%).

O primeiro passo tomado foi o de estimar a temperatura de projeto ( $T_p$ ) das misturas, ou seja, as temperaturas médias a serem alcançadas pelas camadas de reforço na pista. Utilizou-se a expressão desenvolvida por WICTZAK, em função da temperatura ambiente (do ar) obtida junto ao IBGE.

Para o tempo de aplicação das cargas do tráfego foi adotado:

$$t_w = 0,01 \text{ s.}$$

Para o CAP-20, a ser empregado nas camadas do reforço, foram tomadas valores médios em função de ensaios recentes:

- a) Penetração = 50;
- b) IP médio entre -2 e +0,9 = -0,4;
- c)  $t_{AB}$  para IP = -0,4 = 53,5 °C.

Para o CAP do CBUQ existente foram usados valores obtidos em ensaios:

- a) Penetração = 18;
- b) IP = +3,5;
- c)  $T_{AB} = 92$  °C.

#### 9.4.3.2 “SHELL NOMOGRAPH”

Esta metodologia foi desenvolvida por Engenheiros do KSLA, da Shell Oil Co, em Amsterdam (Heukelon, Klomp), com base em trabalho original de Van der Poel, e modificada posteriormente por Van Draat e Sommer.

Inicialmente é obtido o “Bitumen Stiffness”  $S_d$ , no KSLA Nomograph, em função  $t$ ,  $\Delta t$  e IP descritos na alínea a. Os resultados são mostrados nas Tabelas 54 e 55.

#### 9.4.3.3 FÓRMULA DO “THE ASPHALT INSTITUTE”

Nesta fórmula, obtida por meio de análise de inúmeros ensaios laboratoriais, obtém-se o módulo de rigidez em função da temperatura, das características misturais e dos asfaltos e do tempo de aplicação de carga (Ver Tabela 56).

#### 9.4.3.4 MÉTODO DE FRANCKEN

L. Francken complementou análises de Westraeten, desenvolvendo um método analítico para estimativa do módulo analítico para estimativa do módulo de uma mistura betuminosa, a partir das características de seus materiais integrantes (Ver Tabela 57).

#### 9.4.4 CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO

##### 9.4.4.1 AS CARGAS SOLICITANTES

Definido o modelo estrutural do pavimento existente e, concebido o reforço estrutural, torna-se necessário estipular a magnitude e a geometria das cargas solicitantes (efeitos externos que atuarão sobre o pavimento restaurado).

Foram adotados os parâmetros usuais, ou seja:

- a) Carga padrão rodoviária por eixo simples traseiro, de rodas duplas, de 8,2 tf;
- b) Assim, tem-se no semi-eixo duas cargas de 2.050 kgf;
- c) Pressão de contato pneu-pavimento igual à pressão média de enchimento dos pneus,  $\sigma_c = 5,6 \text{ kgf/cm}^2$ ;
- d) Carga por roda circular, com raio equivalente a 10,8 cm ou 11 cm;
- e) Afastamento entre as rodas do semi-eixo = 30 cm.

Como há variações nos esforços resistentes no seio da estrutura, foram tomados três pontos de análise das tensões/deformações:

- a) No eixo central de simetria do semi-eixo ( $x = 15, Y = 0$ );
- b) No centro de cada pneumático ( $x = 0$  e  $y = 0$ , por exemplo);
- c) Na borda do pneumático ( $x = 11$  e  $y = 0$ , por exemplo).

##### 9.4.4.2 ESFORÇOS SOLICITANTES CONSIDERADOS

O programa computacional empregado para análise estrutural do pavimento permite o cálculo dos seguintes esforços solicitantes:

- a)  $\sigma_t$  = Tensão horizontal transversal (ou radial) de tração (ou compressão) na fibra inferior de qualquer camada betuminosa;
- b)  $\varepsilon_t$  = Deformação específica horizontal transversal (ou radial) de tração (ou compressão) na fibra inferior;
- c)  $\varepsilon_v$  = Deformação específica vertical de compressão no topo do solo de fundação (subleito).

Convencionou-se:

- Tração = positiva
- Compressão = negativa.

### 9.4.4.3 CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO

Pode-se dizer que o objetivo do dimensionamento é o de compatibilizar os esforços atuantes (que surgem no seio da estrutura carregada) com os esforços resistentes característicos dos materiais constituintes.

Para tal, foram utilizados dois critérios.

#### a) 1º Critério: fadiga das camadas betuminosas de reforço

Pode-se conceituar fadiga como a diminuição da resistência de um corpo por efeito de solitação repetida. O fenômeno da fadiga pode ser evitado se for mantido no pavimento um esforço solitante inferior a um valor limite (ou admissível). O valor deste limite pode ser estabelecido em laboratório, ensaiando-se o concreto asfáltico (ou outras camadas) por carregamento repetido, o que não foi possível nesse estudo pelos motivos expostos anteriormente que impossibilitaram a determinação dos módulos de rigidez.

Os esforços limites, no caso as tensões horizontais ( $\sigma_t$ ) e deformações horizontais ( $\epsilon_t$ ) na fibra inferior do CBUQ, são associados ao Número "Nf": número terminal equivalente de solicitações do eixo padrão rodoviário (de 80 kN ou 8,2 tf), tomado igual ao Número "N" calculado com os fatores de veículos da AASHTO.

Diversos autores e organismos rodoviários internacionais divulgaram relações entre as tensões/deformações limites da fadiga e número de solicitações "Nf", definindo "Leis de Fadiga", tendo sido adotadas neste trabalho as relações listadas nas Tabelas n<sup>os</sup> 58 e 59, em que são calculados os esforços limites (ou admissíveis) de tração na fibra inferior das camadas betuminosas em função do Número N de projeto ( $1,67 \times 10^7$ ).

Foi também empregado o Ábaco de NIJBOER desenvolvido a partir de ensaios de rotura de corpos-de-prova submetidos à flexão alternada, no Shell Laboratorium de Amsterdam. No ábaco entra-se com Nf e E, obtendo-se  $\epsilon_t$  limite e  $\sigma_t$  limite.

O Ábaco de NIJBOER foi construído a partir de ensaios feitos para misturas com 5% de vazios, sendo aceitável o seu emprego para o CBUQ faixa B (4% de vazios) e "binder" faixa A (6%). Para o PMQ (12% de vazios) e a camada de vedação (3%) não é recomendável o emprego do ábaco.

#### b) 2º Critério: acúmulo de deformações permanentes (ou plásticas)

Para este critério são importantes as deformações específicas verticais de compressão ( $\epsilon_v$ ) desenvolvidas nas camadas granulares e/ou no topo do solo de fundação (subleito), que geram as deformações permanentes no pavimento, como flechas nas trilhas de roda e afundamentos.

Há autores e organismos que estudaram este fenômeno, interrelacionados deformações específicas limites (ou admissíveis)  $\epsilon_v$  (lim) com o Número "Nf" de solicitações. Dentre os estudos disponíveis foram empregadas as expressões dadas na Tabela 60, em que são apresentadas as deformações limites calculadas para o Número N do projeto. Utilizou-se também o "Ábaco de Monismith".

Foi adotado  $\varepsilon_v = 2,6 \times 10^{-4}$ , dos estudos do “The Asphalt Institute”, que é o valor mais próximo da média ( $3,1 \times 10^{-4}$ ). Os valores mais exigentes ( $2,4 \times 10^{-4}$ ,  $2,1 \times 10^{-4}$  e  $2,3 \times 10^{-4}$ ) não foram considerados, pois, geralmente levam em conta o CONGELAMENTO, não existente na região.

#### 9.4.5 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO EXISTENTE (RESTAURAR OU NÃO RESTAURAR?)

##### 9.4.5.1 DO AGRUPAMENTO A

Pode-se dizer que é neste ponto que se inicia, verdadeiramente, a avaliação do pavimento existente.

O pavimento do Agrupamento A apresenta-se com boas características superficiais. Numa primeira avaliação visual, ao se inspecionar o trecho, surgiram dúvidas, como: é necessário restaurar o pavimento?

Na avaliação funcional concluiu-se que o pavimento apresenta:

- a) VSA = 4,0 (Bom);
- b) IGG = 50 (Regular);
- c) QI = 23 (Ótimo);
- d) Flecha = 2 (Baixa).

Apesar destas boas características, já houve início do processo de trincamento, havendo trincas classe 2 (sem erosão nas bordas) em 12% da área.

As deflexões reversíveis máximas são baixas (33 a 63 centésimos de milímetros), em face do recapeamento com CBUQ executado há 6 anos.

Para resolver a dúvida surgida lançou-se mão de avaliação estrutural.

Podemos avaliar se o pavimento do Agrupamento A já superou sua vida de fadiga, ou não, calculando os esforços solicitantes atuantes na sua estrutura no momento presente, quando submetido ao carregamento dinâmico do tráfego.

Os esforços solicitantes atuantes são mostrados na Figura 57, sendo:

- Na fibra inferior do CBUQ existente:

$$\sigma_t = 16,4 \text{ kgf/cm}^2, \varepsilon_t = 2,1 \times 10^{-4}$$

- No topo do subleito:

$$\varepsilon_v = -1,5 \times 10^{-4}$$

Podemos calcular a vida de fadiga ( $N_f$ ) do CBUQ existente, pelo 1º critério descrito no subitem 4.4. Pela expressão do “Asphalt Institute”, para módulo  $E = 60,000 \text{ kgf/cm}^2$  e deformação específica  $\varepsilon_t = 2,1 \times 10^{-4}$  (atuante) obtemos:

$$N_f = 5,26 \times 10^5$$

Ou seja, o pavimento existente no Agrupamento A tem uma “vida de fadiga” relativa a  $5,8 \times 10^5$  solicitações equivalentes às do eixo padrão de 8,2 tf.

O pavimento já suportou, entre 1985 e 1990, segundo os estudos de tráfego, pela AASHTO (Tabela 51):

**Tabela 51 - Dados de tráfego**

ANO	Ns no Ano	Ns Acumulado
1986	$1,45 \times 10^6$	$1,45 \times 10^6$
1987	$1,46 \times 10^6$	$2,91 \times 10^6$
1988	$3,27 \times 10^6$	$6,18 \times 10^6$
1989	$3,26 \times 10^6$	$8,44 \times 10^6$

Ou seja, o CBUQ já suportou um Ns de  $8,44 \times 10^6$ .

Logo, o pavimento já suportou sua vida de fadiga, pois já suportou um Ns superior a  $N_f$ , razão pela qual já há trincas de classe 2 em sua superfície. A tendência é a de evolução do fenômeno de fadiga, com trincamento total do CBUQ existente.

Torna-se então necessário restaurar o pavimento do Agrupamento A, apesar do seu bom aspecto visual, para que a possa suportar as cargas do tráfego no período de projeto, de 10 anos.

Podemos também estimar a vida útil do pavimento quanto ao acúmulo de deformações permanentes ao nível do subleito (2º critério).

Em função da tensão vertical de compressão atuante ( $\epsilon_v = -1,5 \times 10^{-4}$ ) podemos usar a equação do “Asphalt Institute”, por exemplo, obtendo:

$N_f^1 = 1,9 \times 10^8$ , ou seja, após este valor de  $N_f$  surgirão flechas com 13 mm no pavimento.

Quanto a este critério, conclui-se que o pavimento do Agrupamento A ainda não possui vida útil restante, pois  $N_f$  é muito superior a Ns ( $8,44 \times 10^6$ ). Isto vem confirmar as observações de campo, pois não há no trecho afundamentos plásticos no CBUQ existente (as flechas nas trilhas de roda são mínimas)

#### 9.4.5.2 AGRUPAMENTO B

A necessidade de restauração do pavimento deste agrupamento é óbvia, em face do grau de deterioração existente no TSD, principalmente as deformações plásticas ocorrentes.

A título ilustrativo foram calculadas as deformações verticais de compressão atuante no topo do subleito obtendo-se, conforme Tabela 52 abaixo:

**Tabela 52 - Deformações**

AGRUPAMENTO	atuante ( $\epsilon_v$ )	Nf
B	$8,3 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^5$

Vê-se que há deformação extremamente elevada, e reduzida vida útil. Daí termos no trecho as deformações plásticas nas trilhas de roda, que já atingem 6 mm.

#### 9.4.6 DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO DO PAVIMENTO

Constatada a necessidade de restauração do pavimento, passou-se para o dimensionamento do reforço estrutural, que é uma das opções para tal objetivo.

O reforço consiste em sobrepor ao pavimento existente uma ou mais camadas betuminosas, de forma a obter uma estrutura final em que atuem esforços (tensões e deformações) compatíveis com os limites suportáveis das camadas, quer sob enfoque da fadiga das misturas betuminosas ou quanto ao acúmulo de deformações plásticas.

Inicialmente foi feito dimensionamento para cada agrupamento, com reforço em camada única de CBUQ faixa B. Foram calculadas as tensões/deformações para o reforço com espessuras crescentes de CBUQ. Constatou-se que seriam necessárias espessuras elevadas de CBUQ, superiores a 8 cm, sendo inviável executar camada única com esta dimensão. Partiu-se então para o dimensionamento do reforço em camadas múltiplas.

Para o Agrupamento A foram estudadas as alternativas:

- a) 1 A - CBUQ + “binder”
- b) 2 A - CBUQ + PMQ
- c) 2 A - CBUQ + camada de vedação.

No Agrupamento B, tem-se a geometria superficial deformada, com afundamentos plásticos nas trilhas de roda. Além disso, o TSD é antigo e, apesar de rejuvenescimento por lama asfáltica, apresenta desgaste e trincamento significativos. Para conformar, impermeabilizar e vedar este TSD, foi considerada no reforço uma “camada de vedação”, com CBUQ tipo massa fina, com baixo teor de vazios, a ser espalhada com motoniveladora numa espessura mínima de 3 cm. Este tipo de solução tem sido largamente empregada pelo DNER em obras de restauração.

As alternativas estudadas para estes agrupamentos foram:

- a) 1B - CBUQ + “binder” + camada de vedação;
- b) 2B - CBUQ + PMQ + camada de vedação;
- c) 3B - CBUQ + camada de vedação.

Em função destes resultados, concluiu-se que:

**a) Para o Agrupamento B, a única alternativa a princípio viável se refere a reforço em três camadas, com:**

- 6 cm de CBUQ;
- 9 cm de “binder”;
- 3 cm de camada de vedação.

**b) A espessura de “binder” é elevada, razão pela qual será estudada a RECONSTRUÇÃO PARCIAL do pavimento do Agrupamento B no subitem seguinte;**

**c) Para o Agrupamento A há três soluções viáveis, tendo sido adotada a solução compatível com a dos demais agrupamentos:**

- 4 cm de CBUQ
- 5 cm de “binder”

As espessuras obtidas tem certa lógica, se forem lembradas as magnitudes das deflexões do pavimento existente. Assim, menores espessuras foram requeridas pelo Agrupamento A, em que as deflexões são baixas, e as maiores espessuras e deflexões são relativas ao Agrupamento B.

Nota – As Figuras 57, 58 e 59 e as Tabelas 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60 e 61 subsidiam, de forma ilustrada, a abordagem efetivada neste item.

**Figura 57 - Interpretação analítica de deflectogramas retroanálise**

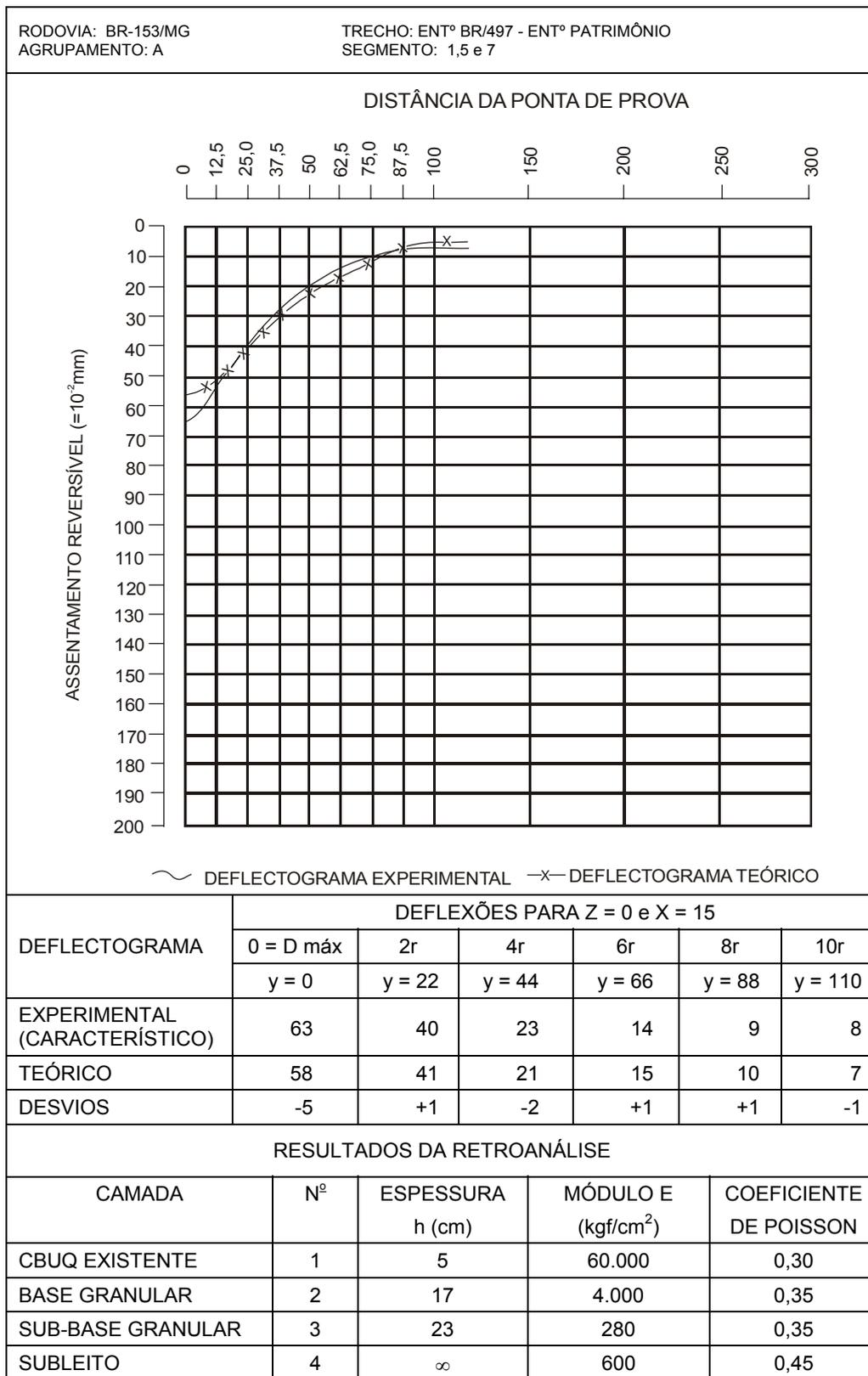
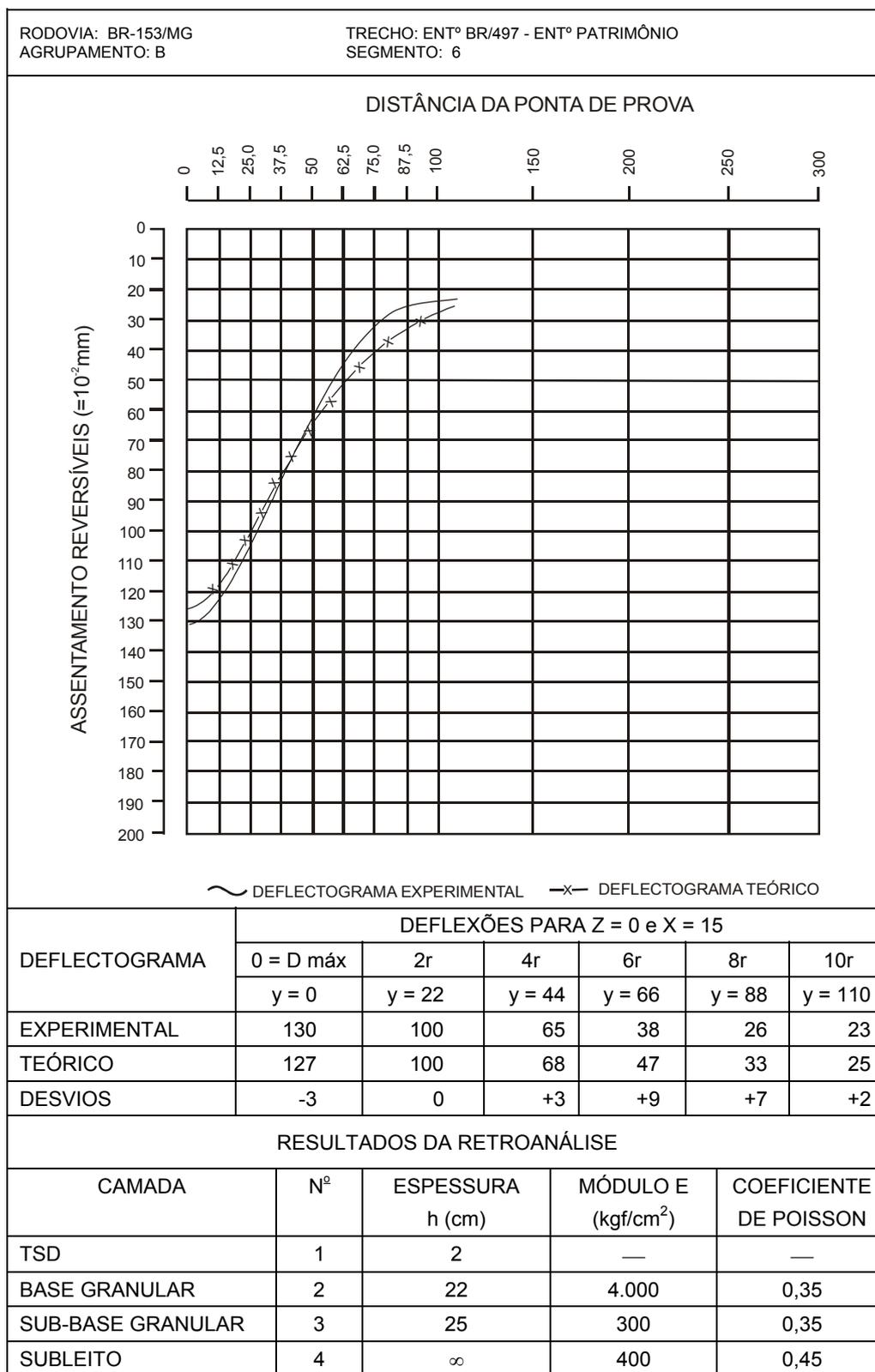


Figura 58 - interpretação analítica de deflectogramas retroanálise



**Tabela 53 - Características de materiais alternativos para reforços  
(Valores Aproximados)**

CAMADA PARÂMETRO	C.B.U.Q. (SUPERIOR)	BINDER	P.M.Q	VEDAÇÃO E REGULARIZAÇÃO	C.B.U.Q. EXISTENTE
Faixa granulométrica	B	A	B	Mix nº 4	C
Especificações	DNER-ES-P 22-71	DNER-ES-P 22-71	DNER-ES-P 106-80	The Asphalt Institute	DNER-ES-P 22-71
Espessura (cm)	4,5 ou 6	variável	variável	3	5
Volume de vazios - Vv (%)	4	6	12	3	6,4
Vazios cheios de betume Vb (%)	13,5	14,0	8,7	14,8	11,7
Volume de sólidos - Vs (%)	82,5	80,0	79,3	82,2	81,9
Teor de CAP - 20 (%)	5,7	5,9	4,0	6,3	4,95
$\mu$ (POISSON)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
MÓDULO ADOADO	28.000	22.000	13.000	33.000	60.000

OBSERVAÇÃO : Os dados relativos às misturas, como Volume de Vazios (Vv), Vazios Cheios de Betume (Vb), Volume de Sólidos (Vs) e o Teor de Betume, foram estimados em função das densidades dos agregados, para materiais enquadrados no centro das faixas granulométricas.



**Tabela 55 - Estimativa de módulos de rigidez de camadas betuminosas (Shell)**

CAMADA BETUMINOSA		P.M.Q	CBUQ existente
Volume de agregado VA (%)		79,3	81,9
Volume de betume VB (%)		8,7	11,7
Volume de vazios Vv (%)		12,0	5,4
Temperatura da mistura Tp (°C)		27,7	27,0
Ponto de amolecimento Tab (°C)		53,5	92
Índice de penetração PI		- 0,4	+ 3,5
Tempo de aplicação da carga Tw(s)		0,01	0,01
	$C_v = VA/(VA + VB)$	0,901	0,875
	$C_v^1 = C_v/[0,97+0,01x(100-(VA+VB))]$	0,827	0,846
	Sb <sub>1</sub> = (KSLA nomograph)	143	408
	$Sb_2 = 1,157 \times 10^{-6} \times Tw^{-0,368} \times e^{-PI} \times (Tab-Tp)^5$	48	221
	$n1 = 0,83 \times \log(400000/Sb \text{ KSLA})$	2.861	2.483
	$n2 = 0,83 \times \log(400000/Sb)$	3.254	2.704
E	$= Sb_1 \times [1+(2,5/n1)xC_v/(1-C_v)]^{n1*}$	15.718	43.080
	$= Sb_2 \times [1+(2,5/n2)xC_v/(1-C_v)]^{n2*}$	7.241	29.100
E (ADOTADO)		16.000	43.080
* no caso de Vv% > 3%, substituir Cv por Cv <sup>1</sup>			

OBSERVAÇÕES: 1 N/m<sup>2</sup> = 1,02 x 10<sup>-5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>

**Tabela 56 - Estimativa de módulos de rigidez de camadas betuminosas  
(The Asphalt Institute)**

RODOVIA: BR - 153/MG TRECHO: Entrº BR/497 - Entrº PATRIMÔNIO  
PELO: "THE ASPHALT INSTITUTE"

CAMADA	CBUQ - B	BINDER CBUQ - A	Vedação Mi x nº 4 I. A.
P <sub>200</sub> = Porcentagem passando no # nº 200	4	3	5
a = Raio de impressão ( cm )	15	15	15
h <sub>1</sub> = Espessura da camada asfáltica ( cm )	6	9	3
V - Velocidade do veículo ( m/s )	16,7	16,7	16,7
f - frequência ( Hz )	10	10	10
t = tempo de carregamento ( s )	0,01	0,01	0,01
V <sub>v</sub> = Volume de vazios (%)	4,0	6,0	3,0
$\eta_{70F,10^6}$ = Viscosidade absoluta a 70°F x 10 <sup>6</sup> do Cap.	1,0	1,0	1,0
pac = Teor de asfalto em peso na mistura	5,7	5,9	6,3
tp = Temperatura a uma profundidade Z (°F)	83,5	81,9	80,6
Z = Profundidade adotada (WICTAZAC) (cm)	4	9	16
psi kgf x cm <sup>-2</sup>	436.541	334.247	651.430
E (estimado)	30.095	23.043	44.910

**EQUAÇÕES:**

$$\log E = 5,55338 + 0,02883 ( P_{200}/f^{0,17033} ) - 0,03476 ( V_v ) +$$

$$0,070377 ( \eta_{70F,10^6} ) + 0,000005 [ tp^{1,3 + 0,49825 \log (f) \text{ pac } 0,5} ] -$$

$$0,00189 [ tp^{1,3 + 0,49825 \log (f) (\text{pac } 0,5/f^{1,1})} ] + 0,931757 ( 1/f^{0,02774} )$$

$$t = (( 2a + h_1 ) / V ) \times 3$$

$$f \text{ (Hz)} = \frac{1}{2} t$$
**CONVERSÕES:**

$$\text{kgf x cm}^{-2} = 0,06894 \text{ psi}$$

$$^{\circ}\text{F} = 1,8 \text{ }^{\circ}\text{C} + 32$$

**Tabela 57 - Estimativa de módulos de rigidez de camadas betuminosas (Método de Francken)**

RODOVIA: BR - 153/MG TRECHO: Entrº BR/497 - Entrº PATRIMÔNIO				
SEGUNDO MÉTODO DE: FRANCKEN				
Domínio de Aplicação do Método				
76% < VA < 85%				
9% < VB < 16,2%				
1,5% < v < 32%				
0,8 < Cv < 0,9				
5,5 < VA/VB < 6,5				
CAMADA BETUMINOSA	CBUQ - B	Binder CBUQ - A	Vedação Mix. nº 4 I. A	
Penetração (25 °C, 100g, 5s, 0,01mm) PEN (mm <sup>-2</sup> )	50	50	50	
Ponto de amolecimento Tab (°C)	53,5	53,5	53,5	
Temperatura de referência Ts (°C)	15	15	15	
Frequência f (Hz)	10	10	10	
Temperatura da mistura T (°C)	28,6	27,7	27,0	
Volume de agregados VA (%)	82,5	80,0	82,2	
Volume de betume VB (%)	13,5	14,0	14,8	
Volume de vazios Vv (%)	4,0	6,0	3,0	
A = (log 800 - log PEN)/(Tab - 25)	4,2 x 10 <sup>-2</sup>	4,2 x 10 <sup>-2</sup>	4,2 x 10 <sup>-2</sup>	
IP = 20 x (1-25 x A)/1 + 50 x A	- 0,36	- 0,36	- 0,36	
B = A / 0,12	0,352	0,352	0,352	
fR = f x e <sup>2,515 x 10<sup>4</sup> x (1/Tab-1/Ts)</sup>	0,195	0,250	0,304	
E <sup>∞</sup> = 1,436 x 10 <sup>5</sup> x (VA/VB) <sup>0,55</sup> x e <sup>(-5,84 x 10<sup>-2</sup> x v)</sup>	307659	263819	309458	
X = log fR	- 0,709	- 0,601	- 0,516	
H = -9,27 x 10 <sup>-2</sup> + 1,352 x B	0,383	0,383	0,383	
P = 6,28 x 10 <sup>-2</sup> + 0,219 x B	0,140	0,140	0,140	
R*(pen) = 6,55 x PEN <sup>-1,313</sup>	3,8 x 10 <sup>-2</sup>	3,8 x 10 <sup>-2</sup>	3,8 x 10 <sup>-2</sup>	
XL = 1/H x log(0.4343 x P) / (H + R*(pen)) - 1.672	- 0,069	- 0,069	- 0,069	
XS = XL - (0,4343/H) + (0,75/P)	4,159	4,159	4,159	
DETERMINAÇÃO DO MÓDULO REDUZIDO R*				
X < XL R* = R*(pen) x e <sup>(H/0,4343) x (X + 1,672)</sup>				
XL < X < XS R* = 0,4343 x (P/H) + Px (X-XL)	9,01 x 10 <sup>-2</sup>	9,01 x 10 <sup>-2</sup>	0,107	
X > XS R* = 1 - 0,25 x e <sup>-Px(X-XS)/0,25</sup>				
IE* I = E <sup>∞</sup> x R*	27.713	26.148	33.052	

## DEFINIÇÕES:

A - Susceptibilidade da penetração à temperatura;

IP - Índice de penetração;

B - Susceptibilidade da penetração ao tempo de aplicação da carga;

fR - Frequência reduzida;

E<sup>∞</sup> - Módulo puramente elástico;

IE\* I - Módulo de rigidez

OS DEMAIS SÍMBOLOS DEFINEM VALORES PARTICULARES DE VARIÁVEIS.

Tabela 58 - Esforços limites - 1º critério: fadiga das camadas betuminosas

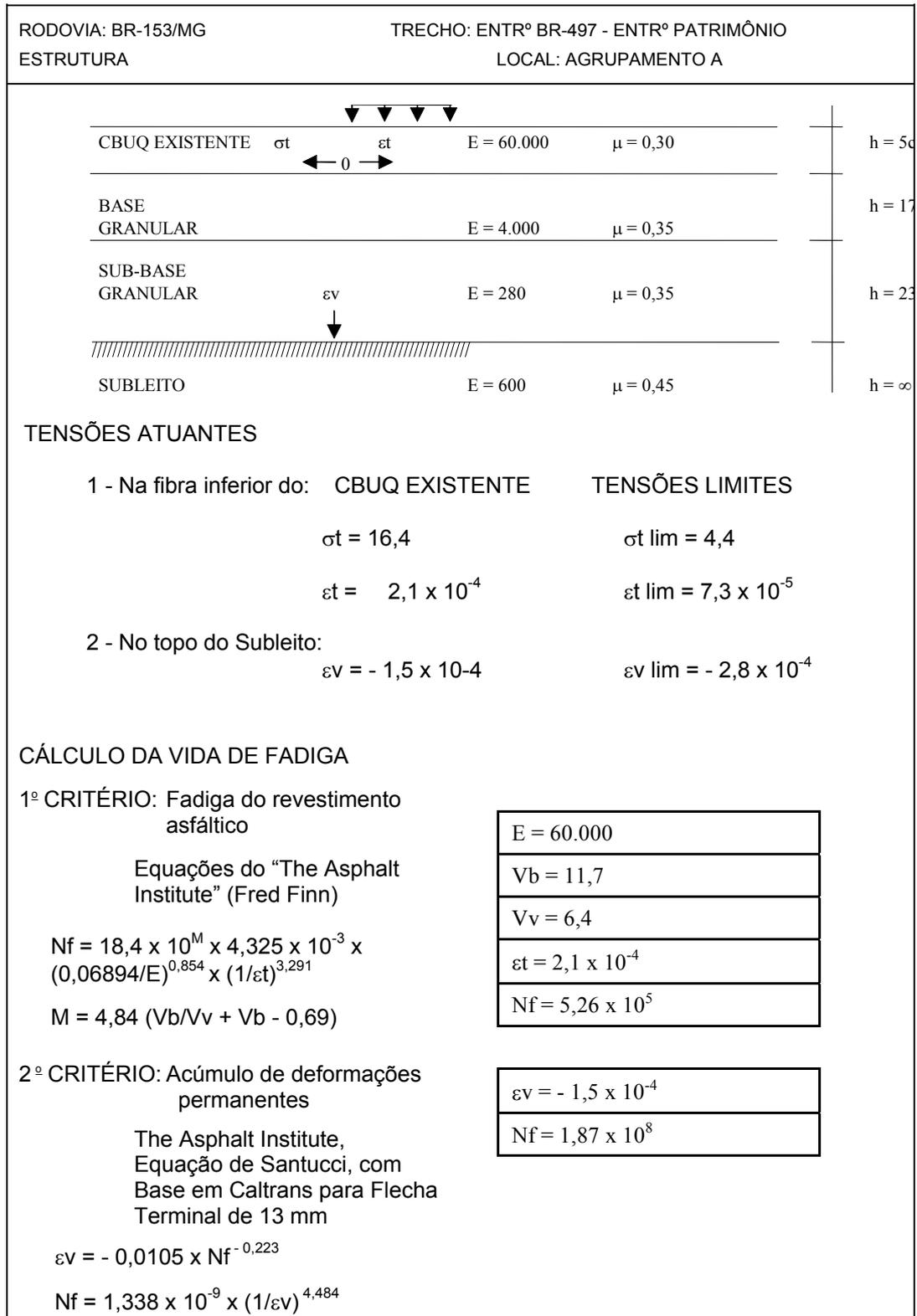
RODOVIA: BR - 153/MG TRECHO: Entfº BR/497 - Entfº PATRIMÔNIO											
FÓRMULA GERAL											
NF = $1,67 \times 10^7$											
CAMADA											
CBUQ - 8											
Binder CBUQ - A											
NF = $a(1/\epsilon)^b$ ou											
Módulo de rigidez (E)											
Volume de betume - Vb (%)											
Volume de vazios - Vv (%)											
nº	AUTORES	a	b	A	B	$\sigma$ (lim)	$\epsilon$ (lim)	$\sigma$ (lim)	$\epsilon$ (lim)		
1	Belgian Road Research Center (BRRC)	$4,856 \times 10^{-14}$	4,762	$1,6 \times 10^{-3}$	-0,21	1,4	$4,9 \times 10^{-5}$	1,1	$4,9 \times 10^{-5}$	22.000	
2	Federal Highway Administration (FHWA)	$9,7255 \times 10^{-15}$	5,163	$1,931 \times 10^{-3}$	-0,194	2,1	$7,7 \times 10^{-5}$	1,7	$7,7 \times 10^{-5}$	14,0	
3	Transport and Road Research Laboratory (TRRL)	$1,71 \times 10^{-10}$	4,32	$5,484 \times 10^{-3}$	-0,231	3,3	$1,2 \times 10^{-4}$	2,6	$1,2 \times 10^{-4}$	6,0	
4	ULLIDTZ (Denmark)	$1,41 \times 10^{-15}$	5,62	$2,279 \times 10^{-3}$	-0,178	3,3	$1,2 \times 10^{-4}$	2,6	$1,2 \times 10^{-4}$		
5	NAASRA (Austrália)	$5,76 \times 10^{-13}$	5,00	$3,566 \times 10^{-3}$	-0,20	3,6	$1,3 \times 10^{-4}$	2,8	$1,3 \times 10^{-4}$		
6	B.W. Porter/T.W. Kennedy (University of Texas)	$1,85 \times 10^{-5}$	3,04	$2,77 \times 10^{-2}$	-0,329	3,3	$1,2 \times 10^{-4}$	2,5	$1,2 \times 10^{-4}$		
7	THE ASPHALT INSTITUTE				M -		0,394		0,048		
		$a = 18,4 \times 10^M \times 4,325 \times 10^{-3} \times (0,06894/E)^{0,854}$			a -		$3,2 \times 10^{-6}$		$1,8 \times 10^{-6}$		
		$b = 3,291$			A -		$2,1 \times 10^{-2}$		$1,8 \times 10^{-2}$		
		$A = a^{1/b} - B = 0,304$			$\epsilon$ -		$1,4 \times 10^{-4}$		$1,1 \times 10^{-4}$		
8	NIJBOER (SHELL, KSLA)	No Ábaco anexo -					$1,4 \times 10^{-4}$		$1,6 \times 10^{-4}$		
		ADOTADOS					$4,9 \times 10^{-5}$		$1,2 \times 10^{-4}$		



Tabela 60 - Esforços limites - 2º critério: acúmulo de deformações permanentes

RODOVIA: BR-153/MG TRECHO: Entrº BR/497 - Entrº PATRIMÔNIO		Número N =		1,57 x 10 <sup>7</sup>	
FÓRMULA GERAL					
Nº	AUTORES	CRITÉRIO TERMINAL	a	b	εV (Limite)
1	D, W, Potter/G, S, Donald (NAASRA)	Flecha de 20 mm a 30 mm	-0,0085	-0,14	-9,3 x 10 <sup>-4</sup>
2	SHELL (Claessem, Edwards, Sommer, Uge)	Flecha de 20 mm	-0,028	-0,25	-4,4 x 10 <sup>-4</sup>
3	L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (LNPC)	-	-0,021	-0,24	-3,9 x 10 <sup>-4</sup>
4	Transport and Road Research Laboratory (TRRL)	Flecha de 10 mm	-0,015	-0,253	-2,2 x 10 <sup>-4</sup>
5	SHELL KSLA (Dorman e Metcalf)	-	-0,0116	-0,21	-3,5 x 10 <sup>-4</sup>
6	The Asphalt Institute (L, E, Santucci)	Flecha de 13 mm	-0,0105	-0,223	-2,6 x 10 <sup>-4</sup>
7	Center de Recheches Routières (CRR)	-	-0,011	-0,23	-2,4 x 10 <sup>-4</sup>
8	Nottingham University	Deformações excessivas	-0,0216	-0,28	-2,1 x 10 <sup>-4</sup>
9	Monismith (University of California)	-			-2,6 x 10 <sup>-4</sup>
10	Kentucky highway	-	Em Tabela		-2,3 x 10 <sup>-4</sup>
ADOTADO					-2,3 x 10 <sup>-4</sup>

Figura 59 - Verificação de tensões - cálculo de vida de fadiga



**Tabela 61 - Alternativas estudadas para reforço do pavimento**

AGRUPAMENTOS	A	B	C	D
Em camada única de CBUQ	CBUQ $\geq$ 8 cm inviável	CBUQ $\geq$ 34 cm inviável	CBUQ $\geq$ 36 cm inviável	CBUQ $\geq$ 36 cm inviável
Com CBUQ + "binder"	CBUQ = 4 cm "binder" = 5 cm *	CBUQ = 6 cm "binder" = 9 cm vedação = 3 cm	CBUQ = 6 cm "binder" = 19 cm vedação = 3 cm	CBUQ = 6 cm "binder" = 22 cm vedação = 3 cm
Com CBUQ + PMQ	CBUQ = 4 cm PMQ = 5 cm *	CBUQ = 6 cm PMQ $\leq$ 2 e $\geq$ 10 vedação = 3 cm inviável	CBUQ = 6 cm PMQ = 38 cm vedação = 3 cm inviável	CBUQ = 6 cm PMQ = 52 cm vedação = 3 cm inviável
Com CBUQ + vedação	CBUQ = 6 cm vedação = 3 cm	CBUQ $\leq$ 7 e $\geq$ 15 vedação = 3 cm inviável	CBUQ $\leq$ 5 e $\geq$ 25 vedação = 3 cm inviável	CBUQ $\leq$ 4 e $\geq$ 52 vedação = 3 cm inviável

\* Sem Camada de Vedação

## 9.5 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS NOVOS

### 9.5.1 GENERALIDADES

Serão executados pavimentos novos nos locais em que forem projetados melhoramentos para a rodovia, como interseções reformuladas e terceiras faixas de tráfego. Para os acostamentos, atualmente não revestidos, foi prevista em função dos estudos de capacidade a sua estruturação, no mesmo nível da pista de rolamento, devendo ser executado novo pavimento, aproveitando-se as camadas granulares já existentes.

Neste cenário também se inclui a reconstrução parcial do pavimento do Agrupamento B. Para este Agrupamento foram obtidas espessuras elevadas de reforço, pelos dimensionamentos elaborados pelos procedimentos PRO 10/79, PRO 11/79 e TECNAPAV e, também, pela aplicação da teoria da Mecânica dos Pavimentos, conforme registrado na Tabela 62.

**Tabela 62 - Agrupamento B**

AGRUPAMENTO B	PRO 10	PRO 11	TECNAPAV	MECÂNICA
ESPESSURAS (cm)	21	16	18	18

Os custos de execução de reforços com estas espessuras são extremamente elevados, ainda mais se contarmos com a necessidade de estender estas espessuras aos acostamentos e terceiras faixas, para compatibilização construtiva. Procurou-se então estudar a alternativa de RECONSTRUÇÃO PARCIAL do pavimento deste agrupamento, e executar estudo econômico comparativo para definição da melhor solução.

O dimensionamento de pavimentos novos foi elaborado por duas metodologias, descritas a seguir, a partir dos dados básicos, com ISC do subleito e Números "N".

### 9.5.2 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO DNER

Foi empregado o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER, de 1966, do Eng.<sup>o</sup> Murillo Lopes de Souza. O ISC do subleito foi tomado igual a 9%. Em função do número N do projeto, de  $6,1 \times 10^7$  (USACE), a espessura mínima de revestimento necessária é de 10 cm de CBUQ.

Os coeficientes estruturais adotados, e as espessuras necessárias obtidas no dimensionamento são os constantes na Tabela 63.

**Tabela 63 - Coeficientes estruturais**

Camada	K	Espessura
CBUQ	2,0	10 cm
Base	1,0	15 cm
Sub-base	1,0	15 cm

Este dimensionamento se aplica à reconstrução, terceiras faixas, acostamentos e interseções.

### 9.5.3 DIMENSIONAMENTO PELA TEORIA DA MECÂNICA DOS PAVIMENTOS

O dimensionamento com base na teoria da mecânica dos pavimentos foi feito separadamente para a reconstrução do Agrupamento B, terceiras faixas e acostamentos. Para tal é preciso de antemão definir as características estruturais dos materiais do pavimento existente e das camadas novas a serem adicionadas.

Para o subleito e sub-base existente foram mantidos os módulos de elasticidade, o coeficiente de Poisson e espessuras determinados na retroanálise (ver subitem 5.2), pois estas camadas não sofrerão intervenção.

Para as camadas granulares novas a serem incorporadas à estrutura, e para as camadas granulares existentes (no caso a base) a serem recuperadas com escarificação e recompactação, é também necessário definir módulos elásticos compatíveis com suas características.

Para tais camadas, em face da impossibilidade de executar ensaios de laboratório para determinação dos módulos de resiliência, foi feita pesquisa dentre os diversos trabalhos sobre o assunto que vem sendo publicado pela COPPE, IPR e ABPv.

De maneira geral os solos granulares apresentam elasticidade não linear, com módulos dependentes da tensão confiante ( $\sigma_3$ ) com modelo:

$$MR = K1 \sigma_3^{k2}$$

Já nos solos coesivos, por outro lado, os módulos são função da tensão desvio ( $\sigma_d$ ), tendo-se, segundo estudos de Salomão Pinto, Ernesto Preussler e Jacques Medina, modelos de forma:

$$MR = f(\sigma_d)$$

Estudos recentes tem mostrado que os solos de comportamento laterítico, como os encontrados na base do pavimento existente e na jazida estudada, tem módulos afetados pela tensão desvio ( $\sigma_d$ ), aproximando-se de modelos de solos coesivos. Apresentam no entanto elevados valores de MR, superiores aos dos solos finos coesivos, atingindo a 15.000 kgf/cm<sup>2</sup>.

Um modelo matemático recentemente obtido pela COPPE para solos pedregulhosos lateríticos em função de  $\sigma_d$  é expresso por:

- $MR = 9.200 + 44.584 (1,0 - \sigma_d)$ , para  $\sigma_d < 1,0$
- $MR = 9.200 - 2.240 (\sigma_d - 1,0)$ , para  $\sigma_d > 1,0$

Teremos:

- $\sigma_d - MR$  (kgf/cm<sup>2</sup>)
- 0,1 - 13.325
- 0,5 - 11.492
- 1,0 - 9.200
- 2,0 - 6.960
- 3,0 - 4.720

As bases existentes estão “trabalhando” com os seguintes módulos (segundo a retroanálise feita no subitem 9.5.2), mencionados na Tabela 64.

**Tabela 64 - Módulos**

AGRUPAMENTO	MÓDULO
A	4.000
B	4.000

Observa-se que nos Agrupamentos A e B, a base apresenta módulo elevado, característico dos solos lateríticos.

Isto posto, resolveu-se adotar nos dimensionamentos:

- a) Para as camadas granulares a serem recuperadas, com escarificação, adição de solo de jazida (cascalho) e recompactação na energia do Proctor Intermediário, módulo de 4.000 kgf/cm<sup>2</sup>, compatível com o valor atual das bases dos Agrupamentos A e B;
- b) Para as bases novas, a serem executadas com materiais não trabalhados de jazida estudada, compactados na energia AASHTO modificada, módulo de 7.000 kgf/cm<sup>2</sup> (para  $\sigma_d$  próximo de 2,0) valor conservador se considerarmos os resultados que as pesquisas tem alcançado (13.325 para  $\sigma_d = 0,1$ ).

Para as camadas betuminosas foram mantidos os módulos calculados anteriormente:

- a) CBUQ, 28.000 kgf/cm<sup>2</sup>
- b) “binder”, 22.000 kgf/cm<sup>2</sup>.

### 9.5.3.1 DIMENSIONAMENTO PARA RECONSTRUÇÃO

No dimensionamento da reconstrução parcial do pavimento do Agrupamento B foram estudadas, por tentativa, várias alternativas. Inicialmente foi tentada a reconstrução com camada única de CBUQ sobre a base existente (escarificada e recompactada). Foram obtidas espessuras elevadas, inviabilizando a tentativa. Introduziu-se então uma camada de “binder”, sobre a base existente. As tentativas foram infrutíferas, pois se obtiveram espessuras da ordem de 4 cm de CBUQ mais “binder” acima de 10 cm.

Introduziu-se então no dimensionamento uma camada de base nova, com cascalho da jazida estudada no projeto. Foram variadas as espessuras da base, entre 10 cm e 20 cm, e do “binder”, concluindo-se ao final pela solução constante na Tabela 65.

**Tabela 65 - Situação adotada**

AGRUPAMENTO	CBUQ	“binder”	BASE-NOVA
B	4 cm	5 cm	15 cm

A reconstrução do pavimento deverá compreender:

- a) Remoção do TSD existente;
- b) Escarificação e compactação da base existente numa espessura de 15 cm;
- c) Execução de base nova, com espessura de 15 cm, com solos lateríticos da jazida estudada, compactada a 100% da energia AASHTO modificada;
- d) Execução do “binder” com 5 cm de espessura;
- e) Execução de CBUQ com 4 cm de espessura.

### 9.5.3.2 DIMENSIONAMENTO PARA TERCEIRAS FAIXAS

Para as terceiras faixas localizadas no Agrupamento B, o novo pavimento poderá ser executado concomitantemente à reconstrução da pista de rolamento. Assim, será necessário apenas execução de sub-base e base novas no bordo externo da terceira faixa, onde for feito novo terrapleno. No restante, a pavimentação é idêntica à da pista, com as camadas obedecendo ao dimensionamento da reconstrução.

Para o Agrupamento A, é preciso compatibilizar a solução para pavimentação da terceira faixa com a do reforço da pista de rolamento.

PISTA	3ª FAIXA
CBUQ ( reforço ) = 4 cm	
"BINDER" ( reforço ) = 5 cm	
CBUQ EXISTENTE = 5 cm	"BINDER" 5 cm degrau
BASE EXISTENTE	BASE NOVA

Conforme se verifica, a melhor opção corresponde ao preenchimento do degrau entre pista e acostamento com "binder", para se reduzir os problemas de infiltração de água que geralmente ocorrem no contato com o revestimento existente.

Com base nesta premissa, foram calculados os esforços solicitantes a serem gerados no pavimento das terceiras faixas. Foram feitos estudos variando as espessuras da base nova, e da sub-base; concluindo-se que ambas devem ter 15 cm.

### TERCEIRAS FAIXAS

#### Agrupamento A

CBUQ	$E = 28.000 \quad \mu = 0,30$	$h = 4 \text{ cm}$
"BINDER"	$E = 22.000 \quad \mu = 0,30$	$h = 10 \text{ cm}$
BASE NOVA	$E = 7.000 \quad \mu = 0,35$	$h = 15 \text{ cm}$
SUB-BASE NOVA	$E = 4.000 \quad \mu = 0,35$	$h = 15 \text{ cm}$
RESTO DA SUB-BASE EXISTENTE	$E = 280 \quad \mu = 0,35$	$h = 10 \text{ cm}$
SUBLEITO	$E = 600 \quad \mu = 0,45$	

#### ESFORÇOS ATUANTES

- Na fibra inferior do

"binder":  $\sigma_t = 2,3 \text{ kgf/cm}^2$   
 $\epsilon_t = 1,2 \times 10^{-4}$

- No topo do subleito

$$\epsilon_v = -2,3 \times 10^{-4}$$

(tem-se compressão no CBUQ)

#### ESFORÇOS LIMITES

$$\sigma_t (\text{lim}) = 2,6 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\epsilon_t (\text{lim}) = 1,2 \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_v (\text{lim}) = 2,6 \times 10^{-4}$$

Como as tensões e deformações atuantes calculadas não ultrapassam aos limites estipulados pelo 1º e 2º critérios, a estrutura dimensionada é satisfatória.

### 9.5.3.3 DIMENSIONAMENTO PARA ACOSTAMENTOS

No Agrupamento B os acostamentos serão pavimentados conjuntamente com a reconstrução da pista, valendo o dimensionamento apresentado na alínea a, pois serão integralmente aproveitadas as camadas granulares existentes.

Para o Agrupamento A, da mesma forma que para as terceiras faixas, é preciso compatibilizar a pavimentação dos acostamentos com a solução do reforço da pista, preenchendo-se o degrau de 5 cm atualmente existente com “binder”.

Não foi previsto, por se tratar de acostamento, a inclusão de camadas granulares novas na estrutura, apenas a recuperação da base existente, com escarificação, adição de solos e recompactação, numa espessura de 15 cm.

A estrutura final a ser obtida será a seguinte:

#### ACOSTAMENTOS

##### Agrupamento A

CBUQ	E = 28.000	$\mu = 0,30$ h = 4 cm
“binder”	E = 22.000	$\mu = 0,30$ h = 10 cm
BASE EXISTENTE ESCARIFICADA E RECOMPACTADA	E = 4.000 $\mu = 0,35$	h = 15 cm
RESTANTE DA BASE E SUB-BASE EXISTENTE	E = 280 $\mu = 0,35$	h = 25 cm
SUBLEITO	E = 600 $\mu = 0,45$	

Foram calculados os esforços atuantes:

- Na fibra inferior do “binder”:

$$\sigma_t = 3,7 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\varepsilon_t = 1,5 \times 10^{-4}$$

- No topo do subleito:

$$\varepsilon_v = -2,5 \times 10^{-4}$$

(tem-se compressão no CBUQ)

No topo do subleito se desenvolverá uma deformação inferior ao valor limite ( $-2,6 \times 10^{-4}$ ), não devendo ocorrer acúmulo de deformações plásticas no acostamento, mesmo que todo o tráfego o utilize.

Os esforços para a fibra inferior do “binder” são superiores aos valores limites:

- $\sigma_t$  (lim) = 2,6 kgf/cm<sup>2</sup>;
- $\epsilon_t$  (lim) = 1,2 x 10<sup>-4</sup>.

No entanto, considera-se que estes valores foram calculadas em função do Número “N” previsto para a pista de rolamento. Pode-se, ao invés de limitar as tensões e deformações, estimar, com base nos esforços atuantes, a vida de fadiga do “binder” dos acostamentos.

Pela expressão do “Asphalt Institute”, constante da Figura 59, tem-se:

$$N_f = 7,6 \times 10^6$$

Ou seja, o pavimento dos acostamentos terá uma vida de fadiga de 7,6 x 10<sup>6</sup>, ou:

- $7,6 \times 10^6 \times 100 = 46\%$
- $1,67 \times 10^7$

Sua estrutura suportará 46% do tráfego da pista de rolamento. É difícil, ou quase impossível, prever com exatidão a porcentagem de veículos comerciais que trafegarão nos acostamentos, pois não haverá limite físico entre eles e a pista (não haverá degrau, apenas faixa contínua pintada). A largura reduzida, de 2,5 m, insuficiente para conter todo o caminhão, é um fator inibidor da utilização total dos acostamentos. Como nas rampas mais acentuadas foram projetadas terceiras faixas com largura adequada, o número de 46% parece a princípio adequado, uma vez que se imagine que o comportamento dos motoristas será utilizar os acostamentos temporariamente, para permitir uma ultrapassagem de veículo mais rápido, retornando em seguida à pista.

Se, por outro lado, houver algum segmento em que todo o tráfego comercial fizer uso contínuo do acostamento, ter-se-á sua “vida de fadiga” reduzida. Em função dos estudos de tráfego, tem-se os dados consignados na Tabela 66.

**Tabela 66 - Dados de tráfego**

ANO	Número “N”	“N” Acumulado
1º: 1993	1,31 x 10 <sup>6</sup>	1,31 x 10 <sup>6</sup>
2º: 1994	1,38 x 10 <sup>6</sup>	2,69 x 10 <sup>6</sup>
3º: 1995	1,45 x 10 <sup>6</sup>	4,14 x 10 <sup>6</sup>
4º: 1996	1,53 x 10 <sup>6</sup>	5,97 x 10 <sup>6</sup>
5º: 1997	1,61 x 10 <sup>6</sup>	7,28 x 10 <sup>6</sup>
6º: 1998	1,69 x 10 <sup>6</sup>	8,97 x 10 <sup>6</sup>

Logo, com a vida de fadiga será de 7,6 x 10<sup>6</sup>, o pavimento deverá apresentar trincamento por fadiga entre o 5º e o 6º ano em pontos localizados no trecho no Agrupamento A. Considerou-se aceitável essa hipótese para o dimensionamento dos acostamentos.

## 9.6 SOLUÇÕES ADOTADAS NO PROJETO

### 9.6.1 GENERALIDADES

Ao longo dos itens anteriores foram apresentados dimensionamentos por diversos métodos, para várias alternativas, tanto para restauração do pavimento existente como para pavimentos novos. Neste subitem serão comparados os resultados obtidos, quanto aos aspectos técnicos e econômicos, com o objetivo de escolher as melhores soluções a serem empregadas nas obras.

### 9.6.2 COMPARAÇÃO TÉCNICA ENTRE RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTOS - ALTERNATIVAS PROPOSTAS

Na Tabela 70 são confrontados os diferentes resultados obtidos entre os dimensionamentos efetuados pela análise teórica à luz da mecânica dos pavimentos e pelos métodos empíricos, para a restauração do pavimento existente. Para o reforço do pavimento existente na pista de rolamento foram obtidos no dimensionamento, pelas várias metodologias, resultados extremamente variados, quanto à concepção do reforço e espessuras. Isto se deve às diferenças conceituais entre os métodos.

Observa-se que o Agrupamento B exige espessuras elevadas de reforço em camadas múltiplas por quatro dos seis métodos empregados. Em termos de espessuras de CBUQ, com  $K = 2$ , pode-se fazer uma comparação mais objetiva entre as opções de reforço do pavimento (Tabela 67). Para tal considerou-se:

**Tabela 67 - Comparação entre as opções de reforço**

CBUQ	$K = 2,0$ ;
"binder"	$K = 2,0$ ;
PMQ	$K = 1,7$ ;
Camada de vedação	$K = 2,0$

Há maior proximidade de resultados entre a PRO 10/79 e o dimensionamento pela teoria da mecânica dos pavimentos. Porém, conceitualmente o PRO 10/79, ao mostrar a impossibilidade de executar reforço unicamente integrado por camada densa de CBUQ, recomendou a introdução no reforço de uma camada intermediária, aberta, de Pré-Misturado a Quente (PMQ).

Nas análises efetuadas à luz da mecânica dos pavimentos, a introdução de PMQ aberto (com cerca de 12% de vazios) mostrou-se imprópria, levando a estrutura a trabalhar com elevadas tensões e deformações de tração na fibra inferior do PMQ.

Por este motivo, recomenda-se para o reforço do pavimento a execução das camadas e espessuras do dimensionamento pela mecânica dos pavimentos. Ao fazê-lo, manteve-se próximas também das conclusões obtidas com o PRO 10/79, que é o método empírico mais bem estruturado dentre os disponíveis, pois o "binder" projetado com 6% de vazios

será “mais aberto” que o CBUQ (4%). Pode-se a grosso modo dizer que o “binder” é 50% “mais aberto” que o CBUQ faixa B.

Dessa forma, a primeira alternativa de restauração proposta correspondeu ao reforço estrutural de todo o pavimento do trecho, nos dois Agrupamentos, por meio de:

#### ALTERNATIVA I

##### a) Agrupamento A:

- “binder”: 5 cm;
- CBUQ: 4 cm;

##### b) Agrupamento B:

- Camada de Vedação: 3 cm;
- “binder”: 9 cm;
- CBUQ: 6 cm.

Em face das espessuras elevadas do reforço do Agrupamento B, foi estudada uma segunda alternativa, com reconstrução parcial do pavimento. A reconstrução foi também recomendada, como opção, na avaliação estrutural, utilizando-se a PRO 11/79.

Os resultados obtidos no dimensionamento pelas dois métodos são apresentadas a seguir, na Tabela 68.

**Tabela 68 - Métodos utilizados**

Metodologias	RECONSTRUÇÃO PARCIAL DO PAVIMENTO – Agrupamento B
Método DNER 66 ( Murillo Lopes de Souza)	10 cm CBUQ + Base existente recuperada *
Mecânica dos Pavimentos	4 cm CBUQ + 5 cm de “binder” + 15 cm Base nova + Base existente recuperada *

\* Com escarificação, adição de solos e compactação

Há dois aspectos a serem comentados. Quanto à espessura de revestimento, o Método DNER - 66 recomenda adotar, em função do Número “N “ ( $6 \times 10^7$ ), espessura mínima de 10 cm de CBUQ. Pelas análises mecânicas concluiu-se que com 9 cm de CBUQ ter-se-á tensões e deformações em níveis toleráveis (quanto a fadiga) na fibra inferior do “binder”, e compressão no CBUQ.

Quanto às camadas granulares, no dimensionamento pelo método DNER - 66 conclui-se que as espessuras e materiais existentes são suficientes e satisfatórias. Isso se deve ao fato de existir um subleito com boa capacidade de suporte. Por análise mecânica no entanto foi necessária a introdução de uma camada de base nova, com 15 cm de espessura, de maneira a assegurar uma deformação vertical de compressão no topo do subleito compatível com sua resistência, evitando-se o surgimento de deformações plásticas durante o período do projeto.

Recomendou-se então, numa segunda alternativa, que a restauração fosse procedida nas seguintes premissas:

#### ALTERNATIVA II

##### a) Agrupamento A

- Reforço com:
  - “binder” = 5 cm;
  - CBUQ = 4 cm;

##### b) Agrupamento B

- Reconstrução parcial com:
  - Remoção do TSD existente;
  - Recuperação da base existente;
  - Base nova = 15 cm;
  - “binder” = 5 cm;
  - CBUQ = 4 cm.

### 9.6.3 COMPARAÇÃO DE CUSTOS ENTRE ALTERNATIVAS

Foram calculados os quantitativos dos serviços envolvidos na restauração do pavimento e execução de pavimentos novos para as Alternativas I e II. Com base em preços unitários colhidos junto ao órgão rodoviário foram orçadas as duas alternativas, obtendo-se os valores consignados na Tabela 69.

**Tabela 69 - Custos das alternativas**

ALTERNATIVA	CUSTO DA PAVIMENTAÇÃO (Julho/90)
I	Cr\$ 496.180.000,00 (US\$ 7.443.400,00)
II	Cr\$ 331.544.000,00 (US\$ 4.973.600,00)

Em seqüência, são apresentadas as Tabelas 70 e 71 que registram, respectivamente, dados comparativos relativamente aos resultados obtidos, segundo as várias metodologias.

A Alternativa II, mostrada nas Tabelas 69 e 70, é 33% mais econômica que a Alternativa I; foi então a solução proposta para a restauração desse trecho da BR - 153/MG.

**Tabela 70 - Comparação de espessuras de reforço estrutural**

<b>AGRUPAMENTO</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
DNER - 66 ( Murillo )	Pavimento suficiente	Pavimento suficiente
PRO 159/85	5 cm CBUQ	7 cm CBUQ
TECNAPAV	6 cm CBUQ	6 cm CBUQ + 12 cm PMQ
PRO 11/79	4 cm CBUQ	16 cm CBUQ ou Reconstrução
PRO 10/79	6 cm CBUQ + 4 cm PMQ	6 cm de CBUQ + 15 cm PMQ
MECÂNICA DOS PAVIMENTOS	4 cm CBUQ + 5 cm "binder"	6 cm CBUQ + 9 cm "binder" + 3 cm VEDAÇÃO

**Tabela 71 - Espessuras de reforço em termos de CBUQ ( cm )**

<b>AGRUPAMENTOS</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
PRO 159/85	5	7
TECNAPAV	6	16
PRO 11/79	4	16
PRO 11/79	9	19
MECÂNICA DOS PAVIMENTOS	9	18

## **BIBLIOGRAFIA**



**BIBLIOGRAFIA**

- a) ADLER, Hans A. *Economia appraisal of transport projects*. Baltimore: Johns Hopkins, 1987.
- b) AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *An advanced course in pavement management systems*. Washington, D. C., 1991.
- c) ————. *AASHTO guide for design of pavement structures*. Washington, D. C., 1986.
- d) ————. *Guidelines for pavement maintenance*. Washington, D. C., 1981.
- e) ————. *Guidelines for pavement management systems*. Washington, D. C., 1990.
- f) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Pavement management implementation*. Philadelphia, PA., 1992. (ASTM. Special Technical Publ. 1121).
- g) ANDRADE, Mário Henrique Furtado. *Aspectos técnicos, econômicos e institucionais da gerência de conservação rodoviária*. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado) - USP. Escola Politécnica.
- h) ————. *Controle de qualidade, Curso CQ 14*. Rio de Janeiro: DNER. Dr.DT. DCTec., 1995.
- i) ————. Viabilidade econômica de restauração, curso VER 18. Rio de Janeiro: DNER. Dr.DT. DCTec., 1996.
- j) ————, AMARAL, G. *Gerência de conservação rodoviária. Curso GC 10*. Rio de Janeiro: DNER. Dr.DT. DCTec., 1994.
- k) ————, DOMINGUES., Felipe Augusto Aranha. Consideração sobre o financiamento e gestão da conservação rodoviária. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28., 1991, Belo Horizonte, 1994. *Anais ...* Rio de Janeiro: ABPv, 1994. v. 2.
- l) ————, PEREIRA, D. A. M. *Restauração rodoviária, Curso RR I*. Rio de Janeiro: DNER. Dr.DT. DCTec, 1994.
- m) ————. et ai. *Sistema de gerência de pavimentos, Curso SGP 19*. Rio de Janeiro: DNER. Dr.DT. DCTec, 1997.
- n) ARCHONDO-CALLAO, Rodrigo S. *HDM. manager paved road maintenance module*. Washington, D. C.: World Bank, 1992.
- o) ASPHALT INSTITUTE. *Alternatives in pavement maintenance, rehabilitation and reconstruction*. 1. ed. College Park, Maryland, 1987. (Asphalt Institute. Information Series, 178).
- p) ————. *Asphalt cold-mix recycling*. Lexington, Kentucky, 1986. (Asphalt Institute. Manual Series, 21).

- q) ————. *Asphalt hot-mix recycling*. 1. ed. Lexington, Kentucky, 1986. (Asphalt Institute. Manual Series, 20).
- r) ————. *Asphalt overlays for highway and street rehabilitation*. Ed. rev. Lexington, Kentucky, 1990. (Asphalt Institute. Manual Series, 17).
- s) BALADI, Gilbert Y. *Analysis of pavement distress data, pavement distress Índices and remaining service life*. Michigan: Univ. of Michigan 1991.
- t) BALBO, J. T. *Pavimentos asfálticos: patologias e Restauração*. São Paulo: Plêiade, 1997.
- u) BARROS, R. M. V., NEVES, M. A., SILVA, P. M. Estudos para a reciclagem da rodovia BR-050/GO. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo. *Anais ...* Rio de Janeiro: ABPv, 1991, v.I.
- v) BOTTURA, E. J. *Contribuição ao estudo da serventia dos pavimentos flexíveis*. São Paulo, 1989. Dissertação (Mestrado) - USP. Escola Politécnica.
- w) BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. *DNER-ES 128/83: levantamento da condição da superfície de segmentos - Testemunha de rodovias de pavimento flexível ou semi-rígido para gerência de pavimentos a nível de rede*. Rio de Janeiro, 1983.
- x) ————. *DNER-ES 313/97: concreto betuminoso*. Rio de Janeiro, 1997.
- y) ————. *DNER-ES 321/97: restauração de pavimentos flexíveis*. Rio de Janeiro, 1997.
- z) ————. *DNER-ME 24/78: determinação de deflexões com a viga Benkelman*. Rio de Janeiro, 1978.
- aa) ————. *DNER-PRO 08/78: avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos*. Rio de Janeiro, 1978.
- bb) ————. *DNER-PRO 10/79: projeto de reforço de pavimento flexível, procedimento A*. Rio de Janeiro, 1979.
- cc) ————. *DNER-PRO 11/79: projeto de reforço de pavimento flexível, procedimento B*. Rio de Janeiro, 1979.
- dd) ————. *DNER-PRO 159/85: projeto de restauração de pavimentos asfálticos*. Rio de Janeiro, 1985.
- ee) ————. *DNER-PRO 164/87: calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade de superfícies de pavimentos*. Rio de Janeiro, 1987.
- ff) ————. *DNER-PRO 173/86: método de nível e mira para calibração de sistemas medidores de irregularidade tipo resposta*. Rio de Janeiro, 1986.
- gg) ————. *DNER-PRO 182/90: medição de irregularidade de superfície de pavimento com sistemas integradores IPR e Maysmeter*. Rio de Janeiro, 1990.

- hh) ————. *DNER-PRO 269/94: Projeto de restauração de pavimentos flexíveis - TECNAPAV*. Rio de Janeiro, 1994.
- ii) ————. *DNER-PRO 277/97: metodologia para controle estatístico de obras e serviços*. Rio de Janeiro, 1997.
- jj) ————. *DNER-TER 01/78: defeitos nos pavimentos asfálticos*. Rio de Janeiro, 1978.
- kk) ————. *Manual de pavimentação*. Rio de Janeiro, 1996.
- ll) ————. *Estudos de consultoria para a elaboração de projeto de norma para utilização de reciclagem a quente em projetos de restauração de pavimentos flexíveis*, relatório final. Rio de Janeiro, 1987.
- mm) DOMINGUES., Felipe Augusto Aranha. Avaliação funcional dos pavimentos: síntese sobre a serventia e medição de irregularidades. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo, 1994. *Anais ...* Rio de Janeiro: ABPv, 1991. v. 4.
- nn) ————. *Manual para identificação de revestimentos asfálticos de pavimentos*. São Paulo: F. A. A. Domingues, 1993.
- oo) ————. QUEIROZ., César Augusto Vieira de. Estado da arte das medições de irregularidade das rodovias no Brasil. In: REUNIÃO MUNDIAL DA FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 10., 1984, Rio de Janeiro. *Road construction and maintenance technology: progress in technique equipment and materials*. Rio de Janeiro: **DNER**, 1984.
- pp) DUARTE, José Carlos, SILVA, Prepredigna D. E., FABRÍCIO, João Menescal. Correlação entre deflexões características em pavimentos flexíveis medidos com viga Benkelman e com FWD - Failing Weight Deflectometer. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996, Salvador. *Anais ...* Rio de Janeiro: ABPv, 1996. v. 2.
- qq) EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. *Pesquisa de inter-relacionamento dos custos de construção, conservação e utilização de rodovias*, relatório final, 1981. Brasília, 1982. 12 v.
- rr) RES CONSULTANTS. *Techniques for pavement rehabilitation*. Champaign, 111., 1987.
- ss) ESTADOS UNIDOS. Federal Highway Administration. *Pavement rehabilitation manual*. Washington., **D. C.**, 1988.
- tt) FINN, Fred N., MONISMITH, Cari L. Asphalt overlay design procedures. *Syntheses of Highway Practice*. Washington, D. C., n. 116, dec. 1984.
- uu) GRANT, Eugene L., IRESON, William G. *Principies of engineering economy*. 5. ed. New York: The Ronald Press, 1970.
- vv) HARRAL, C., FAIZ, A. *Road deterioration in developing countries: causes and remedies*. Washington, D. C.: Worid Bank 1984.

- ww) HAAS, R., HUDSON, W. R., ZANIEWSKI, J. *Modern pavement management*. Florida: Krieger Publ., 1994.
- xx) HIRSHFIELD, H. *Engenharia econômica e análise de custos*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1989.
- yy) HUANG, Y. H. *Pavement analysis and design*. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- zz) LARSEN, J. *Tratamento superficial na conservação e construção de rodovias*. Rio de Janeiro: ABEDA, 1985.
- aaa) LÊ BIHAN, Robert. *Guia para conservação periódica e reforço dos pavimentos*, s. l.: ENECON, INGEOUTE, 1980.
- bbb) MEDINA, Jacques de. *Fundamentos de mecânica de pavimentos*. Rio de Janeiro, 1988. Tese (Professor Titular) UFRJ/COPPE.
- ccc) MENDES FILHO, J. T. *Utilização do modelo de insumo - Produto de Leontief para determinação de alguns benefícios indiretos resultantes de construção e Restauração de obras de infra-estrutura de transportes*. São Carlos, 1985. Tese (Mestrado) - USP.
- ddd) MERLIN, E. *O uso das técnicas de reciclagem como procedimento alternativo na Restauração e Restauração de pavimentos asfálticos*. Curitiba, 1992. Tese (Professor Titular) - UFPR.
- eee) NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Transportation Research Board. *Distress identification manual for the long-term pavement performance project*. Washington, D. C., 1993. (SHRP P-338).
- fff) ———. *Recycling materials for highway. Synthesis of highway practice*. NCHRP. Washington, D. C., n. 54, 1978.
- ggg) NEVES, Marcílio Augusto, SILVA, Petrócio Lima e, COSTA, Geovani de Oliveira, et ai. Restaurar ou não restaurar? Eis a questão! In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO 25., 1991, São Paulo. *Anais ...* Rio de Janeiro: ABPv., 1991. v. 4.
- hhh) PARANÁ. Departamento de Estradas de Rodagem. *Manual de serviços rodoviários*. Curitiba, 1991.
- iii) PATERSON, Willian D. O. *Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management*. Baltimore: Johns Hopkins, 1987.
- jjj) PEREIRA, Armando Martins. *Análise crítica dos fatores de equivalência adotados pelo DNER e sua adequação às rodovias de tráfego pesado*. Curitiba, 1995. Tese (Professor Titular) - UFPR. Departamento de Transportes. Setor de Tecnologia.
- kkk) ———. *Estabelecimento das bases para um sistema de gerência de pavimentos ajustados às condições da malha rodoviária paranaense*. Curitiba, 1995. Tese (Professor Titular) - UFPR. Departamento de Transportes. Setor de Tecnologia.
- III) PETERSON, Dale E. Life-cycle cost analysis of pavements. *Synthesis of Highway Pratico*. NCHRP. Washington, D. C., n. 122, dec. 1985.

- mmm) PINTO, Salomão. *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. Rio de Janeiro, 1991. Tese (Doutorado) - UFRJ/COPPE.
- nnn) \_\_\_\_\_. *Materiais Pétreos*. Rio de Janeiro: IME, 1994.
- ooo) \_\_\_\_\_. *Tópicos especiais em mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1991.
- ppp) \_\_\_\_\_. *Materiais betuminosos. Conceituação, especificações e utilização*. Rio de Janeiro: IPR, 1992.
- qqq) PINTO, Salomão, Preussler, E.S. *Módulos resilientes de concretos asfálticos*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 15., 1980, Belo Horizonte. **Anais ...** Rio de Janeiro: ABPv, 1980.
- rrr) PINTO, Salomão, PREUSSLER, E.S. *Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis* – Editora COPIARTE, 2002
- sss) PINTO, ISAAC. E. *Contribuição ao Estudo das Características Físicas e Mecânicas de mistura reciclada com uso da Técnica de Espuma de Asfalto*, Tese de Mestrado USP, 2002
- ttt) \_\_\_\_\_. *Proposição de método para projeto de reforço de pavimentos flexíveis, considerando a resiliência*. Rio de Janeiro: IPR, 1982.
- uuu) \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. *Versão II*. Rio de Janeiro: IPR, 1984.
- vvv) \_\_\_\_\_. *A consideração da resiliência no projeto de pavimentos*. Ed. rev. Rio de Janeiro: DNER. Dr. DTc. DCTec, 1994.
- www) \_\_\_\_\_. *Tecnologia nacional para restauração de pavimentos rodoviários e aeroportuários* - Programa TECNAPAV. In: Reunião Anual de Pavimentação, 19., 1984, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: ABPv, 1984.
- xxx) PREUSSLER, E.S., Medina, J., Pinto, S. *Resiliência de solos tropicais e sua aplicação á mecânica dos pavimentos*. In: Simpósio de Solos Tropicais EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro. **Anais ...** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1981.
- yyy) PREUSSLER, Ernesto Simões, PINTO, Salomão, CAMPELLO, Clauber Santos. *Um estudo das propriedades mecânicas de solos tropicais*. In: Reunião Anual de Pavimentação, 25., 1991, São Paulo. **Anais ...** Rio de Janeiro: ABPv, 1991.
- zzz) \_\_\_\_\_, PREUSSLER, Ernesto Simões. *A consideração de resiliência no projeto de pavimentos*. Ed. rev. Rio de Janeiro: DNER. DrDTc. DCTec., 1994.
- aaaa) QUEIROZ, César Augusto Vieira de. *Performance prediction models for pavement management in Brazil*. Austin: Univ. of Texas, 1981. 634p. Tese (Doutorado) - Univ. do Texas.

- bbbb) ————. Technical and economic issues in road deterioration and maintenance. In: SEMINÁRIO PROVIAL - REGIÃO SUL E SUDESTE, 1993. *Anais ...* São Paulo: IPC, 1993.
- cccc) SAYERS, Michael W., GILLESPIE Thomas D., PATERSON, Willian D. O. *Guidelines for conducting and calibration road roughness measurements..* Washington, D. C.: BIRD, 1986. (World Bank Technical Paper, 46).
- dddd) SAYERS, Michael W., GILLESPIE Thomas D., QUEIROZ, César Augusto Vieira de. *The internacional road roughness experiment: establishing correlation and calibration standard for measurements.* Washington, D. C.: BIRD, 1986. (World Bank Technical Paper, 45).
- eeee) SCHLIESSLER, Andreas, BULL, Alberto. *Caminos, un nuevo enfoque para la gestion y conservador! de redes viales.* Santiago: CEPAL, 1992.
- ffff) SPECIAL REPORT. Highway Research Board. *The AASHO road test.* Washington, D. C., n. 61 F, 1962. Report 5: Pavement research.
- gggg) ————. *The AASHO road test.* Washington, D. C., n. 61G, 1962. Report 7:Final summary.
- hhhh) TRANSPORT AND ROAD RESEARCH LABORATORY. *Deflection measurements and road strengthening.* Berkshire, 1986.
- iiii) TUCHUMANTEL JÚNIOR., Osvaldo. Reciclagem de pavimentos - conceitos, Interpretações e controle. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23., 1988, Florianópolis . *Anais ...* Rio de Janeiro: ABPv., 1988. v. 3.
- jjjj) WATANATADA, T. et ai. *The highway design and maintenance standards model.* Baltimore: Johns Hopkins, World Bank, 1987. 2v.
- kkkk) WORLD **BANK**. *The road maintenance problem and international assistance.* Whashington, D. C., 1981.
- llll) YODER, Eldon Joseph, WITCZAK, Matthew W. *Principies of pavement design.* 2. ed. New York: J. Wiley, 1975.
- mmmm) APS, Márcia, BENUCCI, Liedi Mariane, USP, J.M. FABRÍCIO, J.V. FALABELLA, ECL e MOURA, Edson, USP, IFI – International Friction Index, 2004.