

Paulo César Pinto

PAVIMENTOS

DIAGNÓSTICO
E
AVALIAÇÃO

Paulo César Pinto

PAVIMENTOS

DIAGNÓSTICO E AVALIAÇÃO



Capivari de Baixo
2024

Editora Univinte – 2024.
Título: Pavimentos: diagnóstico e avaliação.
Autor: Paulo César Pinto.
Capa: Andreza dos Santos.
Revisão: Do Autor.
Editoração: Andreza dos Santos.

CONSELHO EDITORIAL Expedito Michels – Presidente Emillie Michels Andreza dos Santos	
Dr. Diego Passoni	Dra. Beatriz M. de Azevedo
Dr. José Antônio dos Santos	Dra. Patrícia de Sá Freire
Dr. Nelson G. Casagrande	Dra. Solange Maria da Silva
Dra. Joana Dar’c de Souza	Dr. Paulo Cesar L. Esteves
Dr. Rodrigo Luvizotto	Dra. Adriana C. Pinto Vieira
Dr. Amilcar Boeing	Esp. Gabriela Fidelix de Souza

P65p

Pinto, Paulo César.

Pavimentos: diagnóstico e avaliação. [recurso eletrônico] /
Paulo César Pinto. Capivari de Baixo : Editora Univinte, 2024.
15,0 MB ; PDF.

ISBN: 978-65-87169-87-3.

1. Engenharia civil. 2. Pavimentação. I. Título.

CDD: 625.8

(Catalogação na fonte por Andreza dos Santos – CRB/14 866).

Editora Univinte – Avenida Nilton Augusto Sachetti, nº 500 – Santo André, Capivari de Baixo/SC. CEP 88790-000.

Todos os Direitos reservados.

Proibidos a produção total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio.
A violação dos direitos de autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo art. 184 do Código Penal.



Editora
univinte

Publicado no Brasil - 2024.

PAULO CÉSAR PINTO

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade de Passo Fundo (UPF, 2008), Formação Pedagógica pelo Instituto Federal SulRiograndense (IFSUL, 2022), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pelo Instituto de Pós-Graduação (IPOG, 2021), Mestre em Engenharia de Transportes com ênfase em Infraestrutura pela Universidade de São Paulo (USP, 2010). Membro da International Society for Concrete Pavements desde 2009. Em processo de doutoramento no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGCI - UFRGS). Servidor Público (engenheiro Civil) na Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade de Santa Catarina (SIE-SC). Professor dos cursos de engenharia na Univinte-Fucap. CEO Infravia Consultoria. Experiência na área de engenharia civil e infraestrutura de transportes, com ênfase em pavimentação. Atuação em gerência de pavimentos, monitoramento e manutenção de redes pavimentadas, projeto, diagnóstico, avaliação e desempenho de pavimentos, misturas asfálticas e base cimentada para pavimentação.

APRESENTAÇÃO

Apresenta-se, neste e-book, uma abordagem quanto ao diagnóstico e avaliação de pavimentos de asfalto e de concreto. Assuntos imprescindíveis na formação técnica de um engenheiro civil na atuação em infraestrutura de transportes.

Os temas percorridos se mostram de interesse para o entendimento da origem dos processos de degradação de um pavimento, obtenção de parâmetros técnicos no que diz respeito à sua serventia, funcionalidade e estrutura.

Em suma, os assuntos darão subsídios aos processos de tomada de decisão em nível de conservação, manutenção e restauração de um pavimento.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO AO DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS, AVALIAÇÃO FUNCIONAL E DE ADERÊNCIA	8
2 CONCEITO DE SERVIENTIA DE PAVIMENTOS.....	10
3 DETERIORAÇÃO DOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	16
3.1 DESEMPENHO FUNCIONAL.....	16
3.2 DESEMPENHO ESTRUTURAL.....	17
3.3 MECANISMOS DO TRINCAMENTO	18
3.3.1 Trincas por fadiga.....	19
3.3.2 Trincas por envelhecimento.....	21
3.3.3 Trincas por reflexão.....	21
3.3.4 Outros tipos de trincamento	22
3.4 MECANISMOS DAS DEFORMAÇÕES	23
3.5 MECANISMOS DA DESAGREGAÇÃO	26
3.6 ADEQUAÇÃO ESTRUTURAL	27
3.7 DESEMPENHO QUANTO À SEGURANÇA.....	27
3.8 GATILHOS PARA A RESTAURAÇÃO.....	29
3.9 INTERAÇÕES ENTRE OS DEFEITOS.....	32
3.10 EVOLUÇÃO DA DETERIORAÇÃO.....	34
4 DEFEITOS DE SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	36
4.1 CAUSAS DOS DEFEITOS E IMPORTÂNCIA DO DIAGNÓSTICO CORRETO	36
4.2 TERMINOLOGIA E TIPOS DE DEFEITOS.....	38
5 PRINCIPAIS DEFEITOS EM PAVIMENTOS RÍGIDOS	48
5.1 RELAÇÃO DOS PRINCIPAIS DEFEITOS	49
5.1 CAUSAS DOS PRINCIPAIS TIPOS DE DEFEITOS	58
6 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL.....	68
7 AVALIAÇÃO OBJETIVA DE SUPERFÍCIE.....	77
7.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS – DETERMINAÇÃO DO IGG	77
7.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS – DETERMINAÇÃO DO ICP	84
7.2.1 Levantamento preliminar de dados	85
7.2.2 Inspeção no pavimento	85
7.2.3 Tipos de defeitos	90
7.2.4 Determinação do ICP	92
7.2.5 Avaliação do pavimento	95

7.2.6 Considerações finais	96
8 AVALIAÇÃO DE ADERÊNCIA EM PISTAS MOLHADAS	97
8.1 MICROTEXTURA E MACROTEXTURA	98
8.2 EQUIPAMENTOS MEDIDORES DE ATRITO	103
8.3 ÍNDICE DE ATRITO INTERNACIONAL – IFI	105
9 AVALIAÇÃO DE RUÍDO PROVOCADO PELO TRÁFEGO	106
10 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL	109
10.1 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL	111
10.2 EQUIPAMENTOS DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL NÃO -DESTRUTIVA.....	115
10.3 VIGA BENKELMAN (VB)	117
10.3.1 Equipamento por impacto <i>falling weight deflectometer</i> (FWD)	121
10.4 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL EM PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	126
10.4.1 Dados a serem levantados	126
10.5 NOÇÕES DE RETROANÁLISE	129
10.6 SIMULADORES DE TRÁFEGO	135
10.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
11 DELIMITAÇÃO DE SEGMENTOS HOMOGÊNEOS	140

1

INTRODUÇÃO AO DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS, AVALIAÇÃO FUNCIONAL E DE ADERÊNCIA

O objetivo principal da pavimentação é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas, e proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança. Uma vez que o solo natural não é suficientemente resistente para suportar a repetição de cargas de roda sem sofrer deformações significativas, torna-se necessária a construção de uma estrutura, denominada pavimento, que é construída sobre o subleito para suportar as cargas dos veículos de forma a distribuir as solicitações às suas diversas camadas e ao subleito (Croney, 1977), limitando as tensões e as deformações de forma a garantir um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo.

O desempenho adequado do conjunto de camadas e do subleito relaciona-se à capacidade de suporte e à durabilidade compatível com o padrão da obra e o tipo de tráfego, bem como o conforto ao rolamento e a segurança dos usuários. O desafio de projetar um pavimento reside no fato, portanto, de conceber uma obra de engenharia que cumpra as demandas estruturais e funcionais. Aliado a esses dois objetivos, o pavimento deve ainda ser projetado da forma mais econômica possível, atendendo as restrições orçamentárias.

Do ponto de vista do usuário, o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois os defeitos ou irregularidades nessa superfície são percebidos uma vez que afetam seu conforto. Quando o conforto é prejudicado, significa que o veículo também sofre mais intensamente as consequências desses defeitos. Essas consequências acarretam maiores custos operacionais, relacionados a maiores gastos com peças de manutenção dos veículos, com consumo de combustível e de pneus, com o tempo de viagem etc. Portanto, atender o conforto ao rolamento também significa economia nos custos de transporte. Modelos empíricos de desempenho mostram claramente a correlação entre a irregularidade e os custos operacionais (Geipot, 1981; Robinson, 1986). Esses modelos são empregados em planejamento e em gerência de pavimentos e de manutenção, tendo alguns sido

desenvolvidos pela Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários (Geipot, 1981), utilizados nos programas de gerência do HDM III (*The Highway Design and Maintenance-III*), World Bank (1985), e também incorporados na nova versão IV (World Bank, 2000).

2

CONCEITO DE SERVENTIA DE PAVIMENTOS

A avaliação funcional de um pavimento relaciona-se à apreciação da superfície dos pavimentos e como este estado influencia no conforto ao rolamento. O primeiro método estabelecido de forma sistemática para a avaliação funcional foi o da serventia de um dado trecho de pavimento, concebida por Carey e Irick (1960) para as pistas experimentais da AASHO (*American Association of State Highway Officials*, hoje AASHTO, *American Association of State Highway and Transportation Officials*). O valor de serventia atual é uma atribuição numérica compreendida em uma escala de 0 a 5, dada pela média de notas de avaliadores para o conforto ao rolamento de um veículo trafegando em um determinado trecho, em um dado momento da vida do pavimento. Esta escala compreende cinco níveis de serventia, conforme expresso na Tabela 1, sendo também adotada no país pelo DNIT 009/2003-PRO (DNIT, 2003d).

Tabela 1 – Níveis de Serventia (DNIT, 2003d)

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

Nos Estados Unidos a avaliação subjetiva de conforto ao rolamento do pavimento é denominada *Present Serviceability Ratio* (PSR), correspondendo no Brasil ao valor de serventia atual (VSA) (DNIT, 2003d).

O VSA é, em geral, elevado logo após a construção do pavimento, quando bem executado, pois este exhibe uma superfície suave, praticamente sem irregularidades. A condição de perfeição, sem qualquer irregularidade (VSA = 5), não é encontrada na prática. Como exemplo, nas pistas experimentais da AASHO, na década de 1960, foram obtidos valores de serventia atual inicial de 4,2 para

pavimentos asfálticos e de 4,5 para pavimentos de concreto de cimento Portland. Com o aprimoramento das técnicas construtivas, é possível obter nos dois tipos de pavimento valores iniciais mais próximos da nota 5. Portanto, o VSA, logo após o término da construção do pavimento, depende muito da qualidade executiva e das alternativas de pavimentação selecionadas.

O VSA do pavimento diminui com o passar do tempo por dois fatores principais: o tráfego e as intempéries. A forma da curva de serventia com tempo decorrido de utilização da via é mostrada esquematicamente na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Todos os veículos que passam pelo trecho são “registrados” na estrutura uma vez que cada passagem de carga contribui incrementalmente para o estado de deterioração do pavimento. Portanto, a superfície sofre alterações que deterioram seu estado de superfície e causam desconfortos crescentes aos usuários. Os veículos, principalmente os caminhões e ônibus, ao trafegarem sobre as irregularidades (depressões, corrugações, trilhas de rodas, entre outras), têm sua carga estática acrescida devido a efeitos dinâmicos e que atuam por um período curto de tempo nas proximidades da irregularidade (Fernandes Jr. e Barbosa, 2000). Como ilustração desse efeito, a Figura 2 mostra a variação da carga dinâmica produzida por um eixo simples de rodas duplas com a carga legal estática de 100kN e por um eixo tandem duplo com a carga legal estática de 170kN, trafegando a 90km/h sobre um pavimento com elevada irregularidade. O aumento na magnitude de solicitação intensifica de forma não-linear a progressão dos defeitos, acentuando-os e provocando um aumento na irregularidade da superfície ou queda da serventia.

O clima contribui para a aceleração da deterioração do pavimento uma vez que a água da chuva pode provocar queda de capacidade de suporte. Como consequência, a estrutura ao ser solicitada pelo tráfego sofre maiores deslocamentos, provocando maiores danos estruturais e de superfície. O pavimento já trincado na superfície facilita a entrada de água. Com a evolução das trincas, o decréscimo do valor de serventia é ainda mais acentuado. A temperatura também afeta o comportamento dos materiais. O aumento da temperatura reduz a viscosidade dos ligantes asfálticos e a resistência das misturas asfálticas às

deformações permanentes. Temperaturas muito baixas podem provocar trincamento no revestimento asfáltico por retração e levam ainda ao seu enrijecimento que, se muito delgado, e construído sobre materiais muito deformáveis, fica mais suscetível ao trincamento por fadiga.

Figura 1 – Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo decorrido de utilização da via

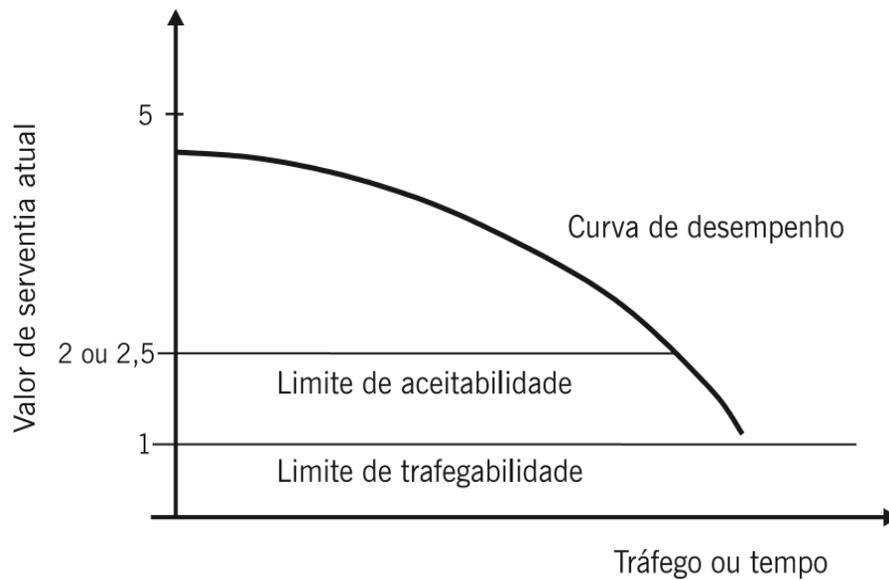
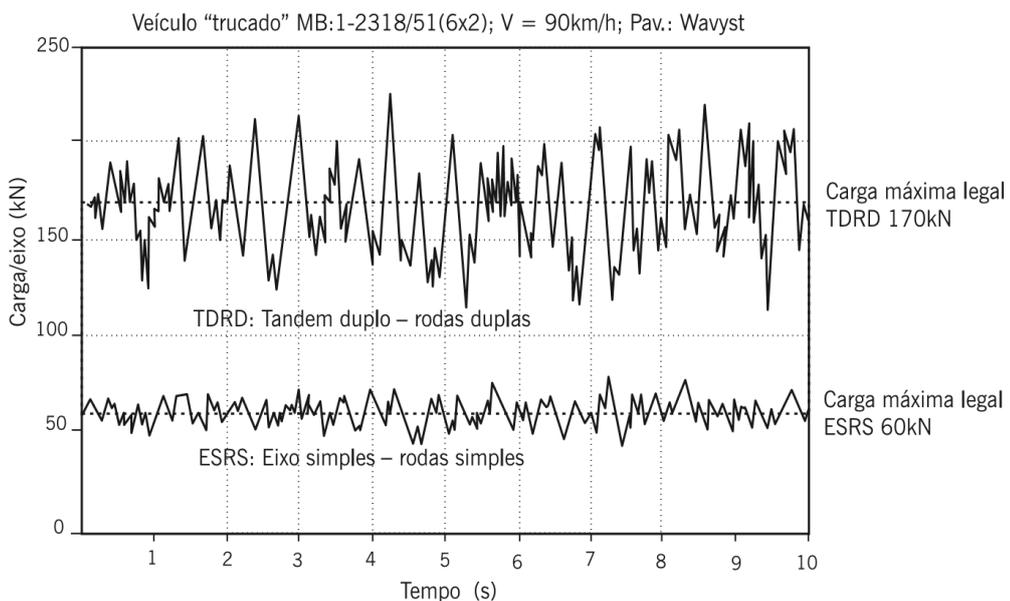


Figura 2 – Variação da carga dinâmica de dois eixos legais trafegando em uma via com elevada irregularidade (Fernandes Jr. e Barbosa, 2000)



Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** estão indicados dois limites: de aceitabilidade e de trafegabilidade. Para os usuários, há um limite de aceitabilidade das condições de rolamento do pavimento, abaixo do qual o nível de conforto passa a ser inaceitável; este limite depende da categoria da rodovia e do tráfego. O guia de dimensionamento de pavimentos norte-americano da AASHTO (1993) introduziu pioneiramente já na sua primeira versão da década de 1960, além do critério de resistência, também o critério de serventia para o cálculo das estruturas de pavimento. Esse método atribui como limite da aceitabilidade a nota 2,5 para vias de alto volume de tráfego e 2,0 para as demais. Na prática, sempre que o valor de serventia atual atinge este patamar, uma intervenção de manutenção corretiva deve ser realizada de modo a repor o índice a um valor superior – Figura 3. No período em que o pavimento apresenta VSA acima deste valor, deve-se realizar manutenção preventiva periódica de modo a prolongar o tempo em que o mesmo permanece em condição aceitável quanto ao rolamento. Caso não haja manutenção ou esta seja inadequada, o pavimento pode atingir o limite de trafegabilidade, situação na qual se torna necessária sua reconstrução. Este limite depende dos padrões estabelecidos, estando geralmente próximo ao valor de serventia atual de 1,0 – **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Após manutenção corretiva, o valor de serventia eleva-se novamente podendo atingir valores menores, iguais ou maiores à serventia inicial do pavimento. Esta situação é representada na Figura 4 pelas letras A, B e C. Este novo valor depende do tipo de revestimento asfáltico, da espessura projetada e da qualidade executiva. Após a restauração do pavimento, a serventia volta a diminuir dependendo da estrutura original, do grau de deterioração em que se encontrava, e do tipo e espessura da camada de manutenção. Essas diferenças podem ser observadas no exemplo da restauração do tipo A, onde se destacam três diferentes curvas de serventia, denominadas pelos algarismos 1, 2 e 3.

Figura 3 – Período recomendável para a manutenção dos pavimentos

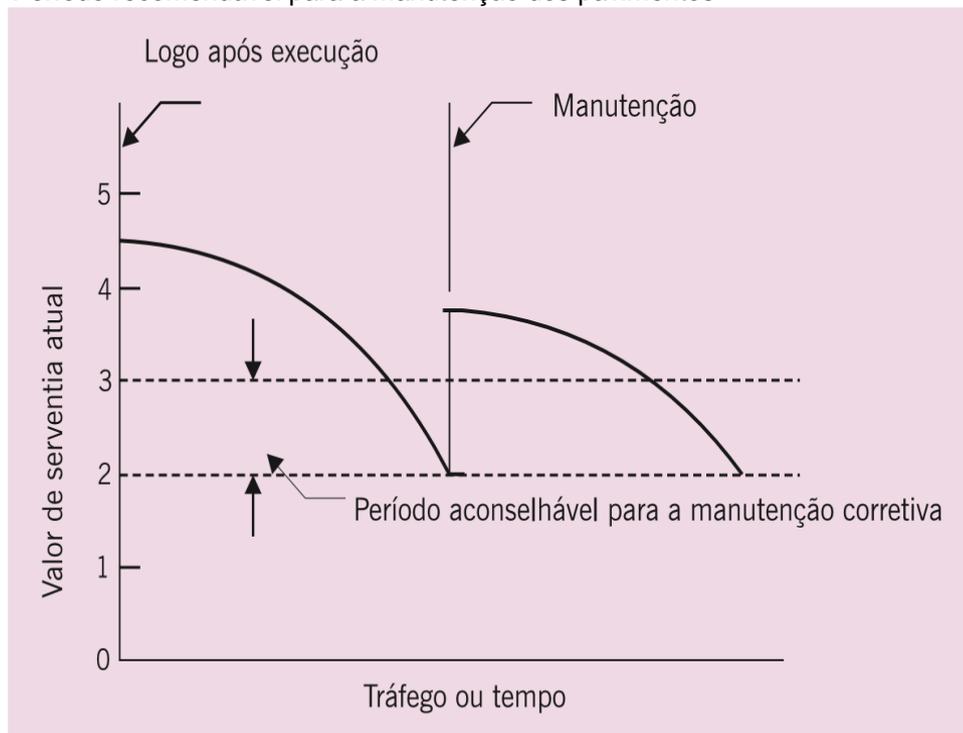
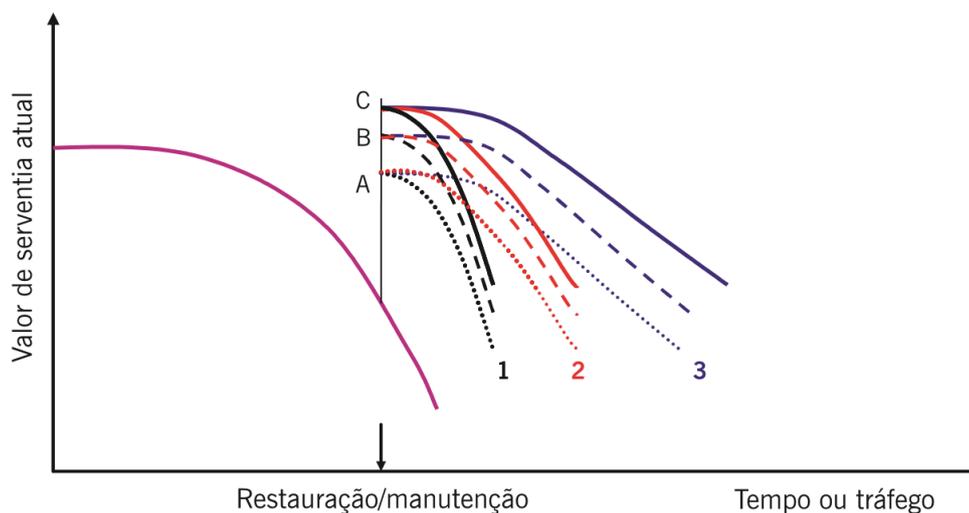


Figura 4 – Período recomendável para a manutenção dos pavimentos



A manutenção de um pavimento asfáltico não deve ser realizada tão-somente como correção funcional ou estrutural e próxima ao limite de aceitabilidade. É aconselhável um plano estratégico de intervenções periódicas, envolvendo também manutenção preventiva, de modo a garantir um retardamento do decréscimo das

condições de superfície. Essas técnicas envolvem às vezes uma simples selagem de trincas ou execução de camadas asfálticas delgadas. Algumas técnicas de restauração são apresentadas no Capítulo 11 do Livro “Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros de Bernucci, Motta, Ceratti e Soares, de 2010”. Serviços periódicos de conservação devem ser sempre realizados envolvendo técnicas reparadoras em locais específicos, como limpeza e preservação do sistema de drenagem, dos acostamentos e das áreas lindeiras à estrada.

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.

3.3 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 sido, 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.

3.3.1 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

ε_t = 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

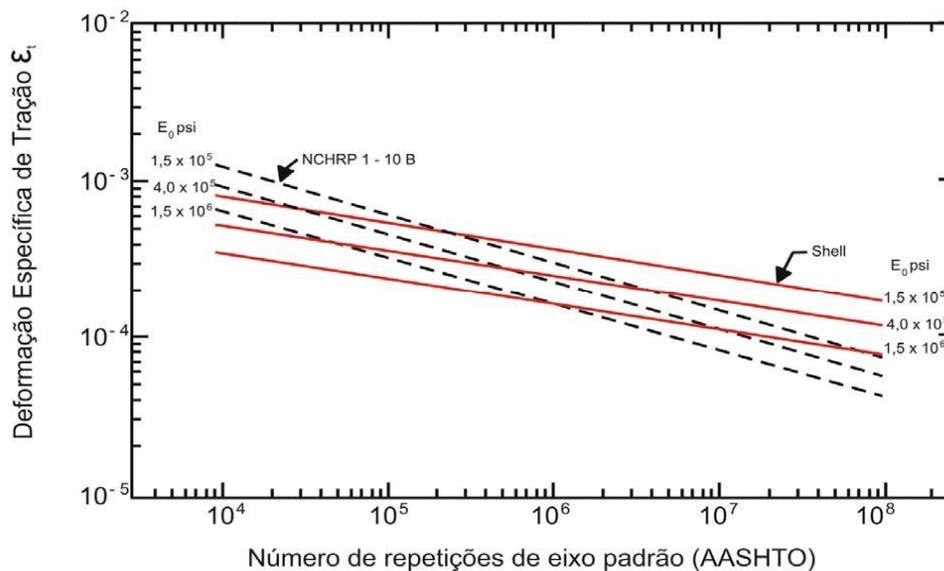
mistura resulta no aumento da vida de fadiga (exceto para níveis acima do teor ótimo), devido ao acréscimo da espessura do filme asfáltico.

As curvas de projeto da Shell e do Instituto do Asfalto são mostradas na Figura 5, a título de ilustração, demonstrando a relação inversa existente entre o número de repetições e as deformações.

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	Acréscimo	Acréscimo	Acréscimo	Decréscimo
Teor de asfalto	Acréscimo	Acréscimo	Acréscimo	Acréscimo
Graduação do agregado	Mais fechadas	Acréscimo	Acréscimo	Decréscimo
Teor de vazios	Decréscimo	Acréscimo	Acréscimo	Acréscimo
Temperatura	Decréscimo	Acréscimo	Acréscimo	Acréscimo

Figura 5 – Comparação entre as curvas de projeto da Shell e do Instituto do Asfalto (NCHRP – 10B) para fadiga de misturas betuminosas



3.3.2 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 se torna 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.

3.3.3 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.

3.3.4 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 prevalecentes 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.

3.4 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, frequentemente, solevamentos ao redor da área carregada.
- b. Carregamentos estáticos ou de longa duração podem causar afundamentos em materiais de comportamento viscoso, como as misturas betuminosas e alguns tipos de solo.
- c. Finalmente, um grande número de repetições de cargas de pressões reduzidas podem causar pequenas deformações que se acumulam ao longo do tempo e se manifestam como afundamentos canalizados nas trilhas de roda.

Tabela 3 – Resumo das causas típicas de deformação permanente

Causa Geral	Causa específica	Exemplo de defeito
Associada com o carregamento	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
Não associada com o carregamento	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 6. A curva A representa um pavimento adequado em termos de espessuras e tipos de materiais

utilizados.

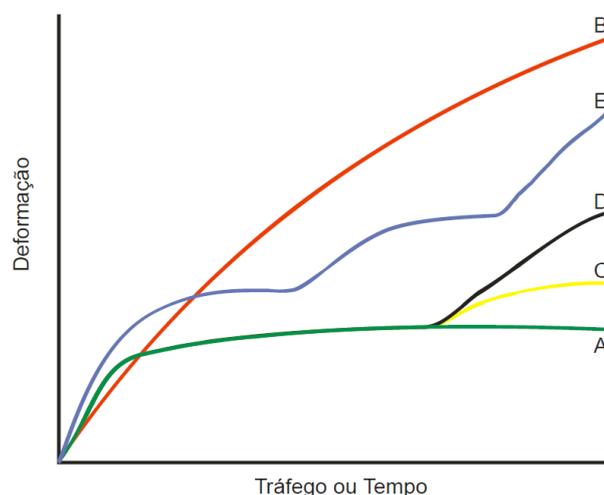
Observa-se que a deformação ocorre principalmente devido a densificação. O formato côncavo da curva e a assíntota apresentada sugerem uma pós-compactação até atingir-se o grau de densificação que deveria ter sido atingido durante o processo construtivo.

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.

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.

Figura 6 – Tipos de curvas de afundamento nas trilhas de roda considerando os efeitos de umidade e conservação



3.5 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 se torna 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 a 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.

3.6 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.

3.7 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.

3.8 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 frequentemente 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 7.

Na Figura 7, 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 7, 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.

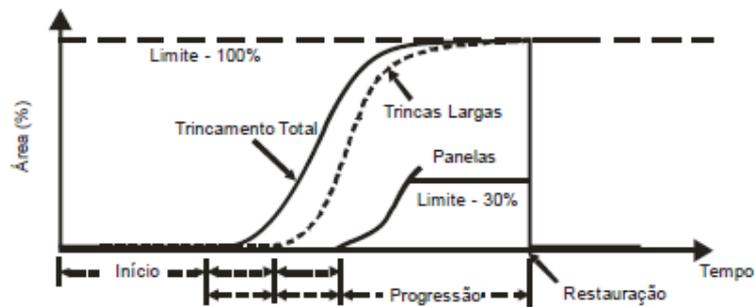
Modernamente, com a implementação dos Sistemas de Gerência de Pavimento e dos modelos de análise técnico-econômica, como o HDM-IV do Banco Mundial, pode-se abordar o problema da definição de gatilhos para a deflagração de intervenções de restauração através da minimização do custo total de transporte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

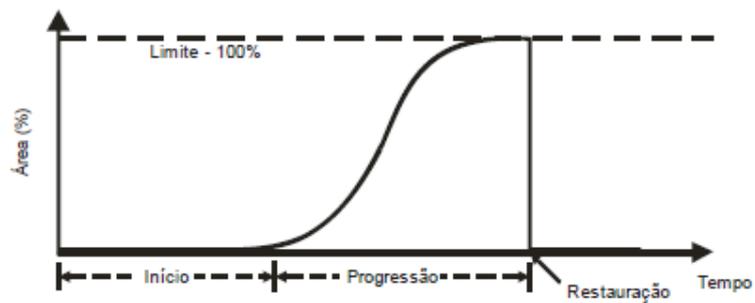
obtidos são extremamente dependentes do volume de tráfego, do nível de restauração do pavimento existente e dos recursos disponíveis.

Figura 7 – Principais tipos de defeitos e suas relações

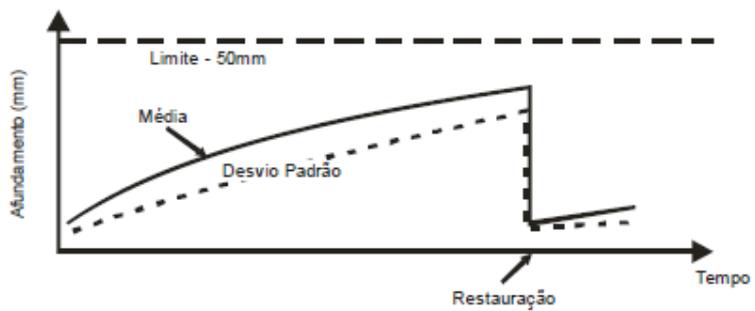
(a) Trincamento e Painelas



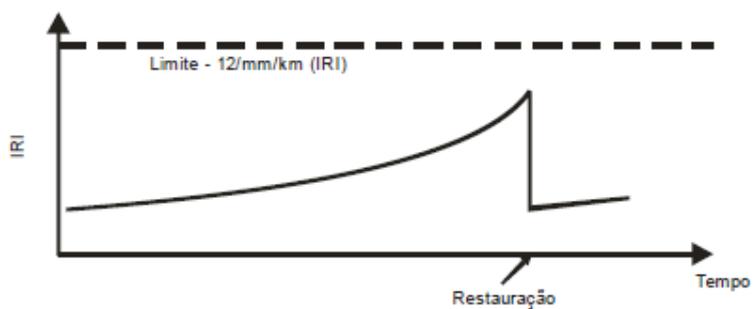
(b) Desgaste



(c) Afundamento de Trilha



(d) Irregularidade



3.9 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.

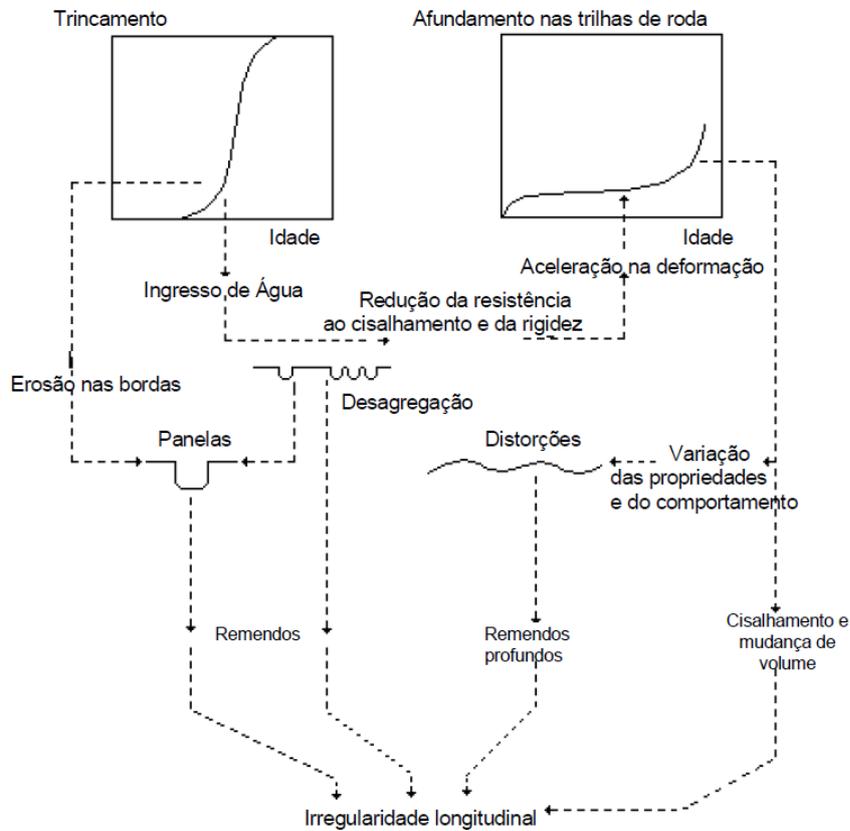
O processo de deterioração apresentado por um pavimento pode ser sentido pela variação das condições de sua superfície ao longo do tempo e os mecanismos que regem o processo esquematizados na

Figura 8.

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.

Figura 8 – Interação entre os defeitos em rodovias pavimentadas



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 panelas.

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.

3.10 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 9). 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.

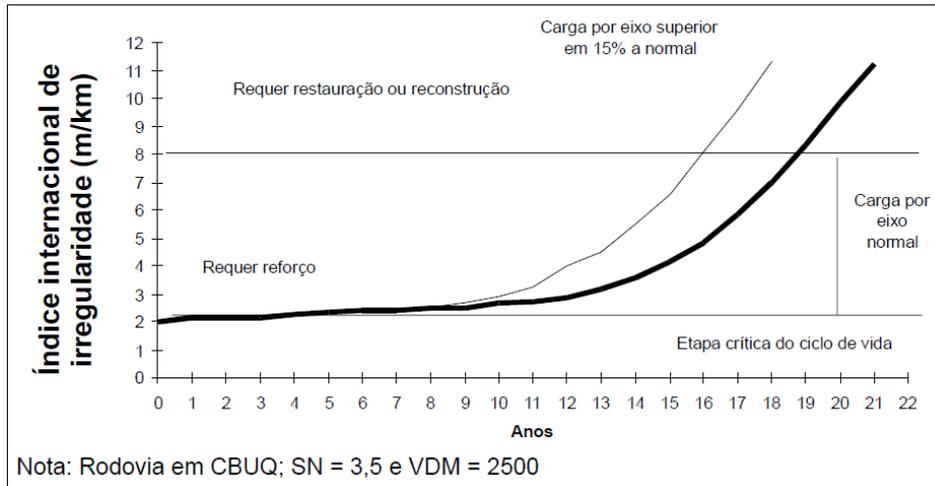
Durante a primeira etapa descrita anteriormente, uma rodovia pavimentada pode ser mantida em bom estado mediante conservação rotineira, a um custo bastante baixo. Na etapa seguinte, com o aumento da deterioração, o pavimento deve ser recuperado de maneira a permanecer em bom estado, por meio de selagem, 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.

Figura 9 – Evolução da deterioração em rodovias pavimentadas

4



DEFEITOS DE SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Os defeitos de superfície são os danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos que podem ser identificados a olho nu e classificados segundo uma terminologia normatizada (DNIT 005/2003-TER-DNIT, 2003a). O levantamento dos defeitos de superfície tem por finalidade avaliar o estado de conservação dos pavimentos asfálticos e embasa o diagnóstico da situação funcional para subsidiar a definição de uma solução tecnicamente adequada e, em caso de necessidade, indicar a melhor ou melhores alternativas de restauração do pavimento. Na gerência de pavimentos ou de manutenção, o conjunto de defeitos de um dado trecho pode ser resumido por índices que auxiliem na hierarquização de necessidades e alternativas de intervenção.

4.1 CAUSAS DOS DEFEITOS E IMPORTÂNCIA DO DIAGNÓSTICO CORRETO

Os defeitos de superfície podem aparecer precocemente (devido a erros ou inadequações) ou a médio ou longo prazo (devido à utilização pelo tráfego e efeitos das intempéries). Entre os erros ou inadequações que levam à redução da vida de projeto, destacam-se os seguintes fatores, agindo separada ou conjuntamente: erros de projeto; erros ou inadequações na seleção, na dosagem ou na produção de

materiais; erros ou inadequações construtivas; erros ou inadequações nas alternativas de conservação e manutenção.

Os erros de projeto decorrem de diferentes fatores, muitos comumente relacionados à dificuldade de prever o tráfego real que atuará no período de projeto. Essa dificuldade advém da ausência de dados de tráfego local ou da falta de planejamento estratégico regional, o que leva ao desconhecimento das taxas de crescimento real. Também é difícil quantificar o volume de tráfego gerado por uso não previsto em projeto, tais como utilização como via alternativa pelo maior conforto ao rolamento ou por não ser cobrado o pedágio. Deve-se incluir nessas falhas de prognóstico a dificuldade de prever o excesso de carga, comumente praticado em muitas rodovias brasileiras não controladas por balança.

Ainda com relação ao projeto, podem ocorrer erros ou problemas no dimensionamento estrutural, tais como: incompatibilidade estrutural entre as camadas gerando fadiga precoce dos revestimentos (ex.: revestimento asfáltico com módulo de resiliência muito elevado – alta rigidez, e muito delgado sobre camadas muito resilientes ou deformáveis); especificação em projeto de material inexistente ou de difícil disponibilidade local, obrigando substituições incorretas durante a obra; concepção estrutural que permita aprisionamento de água na estrutura de pavimento e falhas no sistema de drenagem; ou mesmo subdimensionamento estrutural, seja por erro de projeto ou erro na previsão da capacidade de suporte dos materiais.

Quanto aos erros ou inadequações na seleção de materiais, na dosagem ou na produção de misturas, destacam-se alguns exemplos ilustrativos: seleção incorreta de solo para reforços do subleito ou para misturas; seleção imprópria de agregados e de graduação para compor bases e sub-bases, ou ainda revestimentos asfálticos; dosagem incorreta de materiais estabilizados com cimento ou cal; dosagem incorreta do teor de ligante asfáltico nas misturas asfálticas; variações de materiais e teores durante a usinagem; uso de temperatura inadequada na usinagem das misturas asfálticas, entre outros.

Entre os erros e problemas construtivos, destacam-se alguns exemplos: espessuras menores que as previstas em projeto; falta de compactação apropriada

das camadas, causando deformações e afundamentos excessivos ou rupturas localizadas; técnica de compactação inadequada, com uso de equipamentos de baixa eficiência; compactação de misturas asfálticas em temperaturas inadequadas ou variabilidade de temperatura na massa asfáltica durante o processo de compactação; erros nas taxas de imprimação ou de pintura de ligação, entre outros.

As inadequações na seleção de alternativas de conservação e manutenção podem causar novos defeitos, como por exemplo: reforço de revestimento asfáltico delgado de rigidez elevada sobre pavimento muito trincado possibilitando a reflexão de trincas precocemente; tratamentos superficiais delgados para redução de irregularidade; restauração com revestimentos permeáveis sobre superfícies já muito trincadas, permitindo a entrada de água, entre outros.

Antes da adoção de qualquer alternativa de restauração ou aplicação de qualquer critério numérico ou normativo para cálculo de reforços, um bom diagnóstico geral dos defeitos de superfície é imprescindível para o estabelecimento da melhor solução. Portanto, para corrigir ou minimizar uma consequência (defeito), deve-se conhecer as prováveis causas que levaram ao seu aparecimento. Para tanto, recomenda-se: verificação *in situ* dos problemas de superfície, relações com as condições geométricas, dos taludes e de drenagem; levantamento de dados climáticos, de tráfego, de mapas geológicos, pedológicos ou geotécnicos; levantamento de memórias técnicas e de relatórios de projeto e de controle; e estabelecimento de um cenário global dos defeitos e sua relação com todos os dados observados e levantados.

4.2 TERMINOLOGIA E TIPOS DE DEFEITOS

Para a classificação dos defeitos, utiliza-se a norma DNIT 005/2003 – TER: *Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos: terminologia*.

Os tipos de defeitos catalogados pela norma brasileira e que são considerados para cálculo de indicador de qualidade da superfície do pavimento (IGG – índice de Gravidade Global) são: fendas (F); afundamentos (A); corrugação e ondulações transversais (O); exsudação (EX); desgaste ou desagregação (D); panela ou buraco (P); e remendos (R).

As **fendas** são aberturas na superfície asfáltica e podem ser classificadas como *fissuras*, quando a abertura é perceptível a olho nu apenas à distância inferior a 1,5m, ou como *trincas*, quando a abertura é superior à da fissura. As fendas representam um dos defeitos mais significativos dos pavimentos asfálticos e são subdivididas dependendo da tipologia e da gravidade.

A gravidade é caracterizada por *classe 1* (fendas com abertura não superior a 1mm), *classe 2* (fendas com abertura superior a 1mm), e *classe 3* (fendas com abertura superior a 1mm e desagregação ou erosão junto às bordas).

Quanto à tipologia, as trincas *isoladas* podem ser: transversais curtas (TTC) ou transversais longas (TTL), longitudinais curtas (TLC) ou longitudinais longas (TLL), ou ainda de retração (TRR). As trincas *interligadas* são subdivididas em: trincas de bloco (TB) quando tendem a uma regularidade geométrica, ou ainda (TBE) quando as trincas de bloco apresentam complementarmente erosão junto às suas bordas; ou trincas tipo couro de jacaré (J) quando não seguem um padrão de reflexão geométrico de trincas como as de bloco e são comumente derivadas da fadiga do revestimento asfáltico, ou ainda (JE) quando as trincas tipo couro de jacaré apresentam complementarmente erosão junto às suas bordas.

Outro defeito importante são os **afundamentos** derivados de deformações permanentes seja do revestimento asfáltico ou de suas camadas subjacentes, incluindo o subleito. Os afundamentos são classificados como: afundamento por consolidação (AC), quando as depressões ocorrem por densificação diferencial, podendo ser localizado (ALC) quando a extensão não supera 6m, ou longitudinal nas trilhas de roda (ATC) no caso que exceda 6m de extensão; ou afundamentos plásticos (AP), quando as depressões são decorrentes principalmente da fluência do revestimento asfáltico, podendo ser localizado (ALP) ou longitudinal nas trilhas de

roda (ATP). Em geral, neste último tipo de afundamento, há certa compensação volumétrica, com solevamento da massa asfáltica junto às bordas do afundamento.

As **corrugações** (O) são deformações transversais ao eixo da pista, em geral compensatórias, com depressões intercaladas de elevações, com comprimento de onda entre duas cristas de alguns centímetros ou dezenas de centímetros. As **ondulações** (O) são também deformações transversais ao eixo da pista, em geral decorrentes da consolidação diferencial do subleito, diferenciadas da corrugação pelo comprimento de onda entre duas cristas da ordem de metros. Ambas são classificadas pela letra (O) na norma brasileira, embora sejam decorrentes de fenômenos diferentes.

A **exsudação** (EX) é caracterizada pelo surgimento de ligante em abundância na superfície, como manchas escurecidas, decorrente em geral do excesso do mesmo na massa asfáltica.

O **desgaste** (D) ou ainda **desagregação** decorre do desprendimento de agregados da superfície ou ainda da perda de mástique junto aos agregados.

A **panela** (P) ou **buraco** é uma cavidade no revestimento asfáltico, podendo ou não atingir camadas subjacentes.

O **remendo** (R) é um tipo de defeito apesar de estar relacionado a uma conservação da superfície e caracteriza-se pelo preenchimento de panelas ou de qualquer outro orifício ou depressão com massa asfáltica.

Outros defeitos, apesar de não acarretarem prejuízo nos indicadores do tipo IGG, são também importantes e devem ser considerados para uma análise da solução de restauração: escorregamento do revestimento asfáltico, polimento de agregados, bombeamento de finos, trincas distintas das anteriores como trincas de borda próximas aos acostamentos e parabólicas, falhas do bico espargidor, desnível entre pista e acostamento, marcas impressas na superfície – marcas de pneus, empolamento ou elevações por expansão ou raízes de árvores, entre outros.

São ilustrados entre a Figura 10 e a Figura 15 alguns tipos dos defeitos de superfície citados e que serão considerados para o cálculo do IGG, além de alguns exemplos de defeitos não considerados pela especificação brasileira, mas que a observação e anotação de sua ocorrência auxiliarão na solução ou minimização de problemas futuros. A cada tipo de defeito são associadas algumas causas prováveis para seu aparecimento na superfície. O importante a ser ressaltado é que o diagnóstico da situação geral, envolvendo a compreensão das causas dos defeitos é a etapa mais importante do levantamento da condição funcional para fins de projeto de restauração ou de gerência de manutenção.

Figura 10 – Fendas

DEFEITOS		ALGUMAS CAUSAS PROVÁVEIS
 (a) Trincas isoladas curtas longitudinais (TLC)	 (b) Trincas longitudinais longas (TLL)	(a) TLC: falhas na execução, na temperatura de compactação ou mesmo na dosagem da mistura asfáltica. Envelhecimento de ligante asfáltico (b) TLL: falhas executivas, recalques diferenciais. Podem também aparecer junto à trilha de roda ou como falha de juntas longitudinais de diferentes frentes de compactação. Envelhecimento do ligante asfáltico
 (c) Trinca de retração (TRR)	 (d) Trinca de retração (TRR)	(c) e (d) TRR: trincas decorrentes da reflexão de trincas de placas de concreto de cimento Portland ou de trincas preexistentes
 (e) Trincas de bloco com erosão (TBE)	 (f) Trincas de bloco sem erosão (TB)	(e) TBE: trincas de bloco em tratamento superficial decorrentes de reflexão de trincas em solo-cal da base, com erosão junto às bordas (f) TB: trincas de bloco decorrentes de reflexão das trincas em solo-cimento da base

Figura 10 – Fendas (continuação)

DEFEITOS



(g) Trincas tipo couro de jacaré com erosão (JE)



(h) Trincas tipo couro de jacaré (J)



(i) Conjunto de trincas longitudinais longas



(j) Trinca de retração térmica

ALGUMAS CAUSAS PROVÁVEIS

(g) e (h) JE e J – várias causas podem gerar o trincamento jacaré, entre elas: ação da repetição de cargas do tráfego; ação climática – gradientes térmicos; envelhecimento do ligante e perda de flexibilidade seja pelo tempo de exposição seja pelo excesso de temperatura na usinagem; compactação deficiente do revestimento; deficiência no teor de ligante asfáltico; subdimensionamento; rigidez excessiva do revestimento em estrutura com elevada deflexão; reflexão de trincas de mesma natureza; recalques diferenciais; entre outros. Podem aparecer em trilhas de roda, localizadamente, junto às bordas ou de forma generalizada

(i) Trincas decorrentes da ação de umedecimento da base por infiltração de água pelos acostamentos não protegidos e ação conjunta do tráfego

(j) Trinca de retração térmica em ambientes sujeitos a baixas temperaturas

Figura 11 – Afundamentos e escorregamentos

DEFEITOS



(a) Afundamento por consolidação em trilha de roda (ATC)



(b) Afundamento por consolidação localizado (ALC)



(c) Afundamento plástico nas trilhas de roda (ATP)



(d) Escorregamento de massa (E)

ALGUMAS CAUSAS PROVÁVEIS

(a) ATC: afundamento decorrente de densificação ou ruptura por cisalhamento de camadas subjacentes ao revestimento; pode também ocorrer por descolamento de película de asfalto junto ao agregado (*stripping*); em geral desenvolvem-se trincas dentro das trilhas de roda ou à sua borda. Em geral sem compensação volumétrica lateral, a não ser em alguns casos de ruptura por cisalhamento

(b) ALC: problemas ou deficiências construtivas, falhas de compactação, presença de solo “borrachudo”; problemas de drenagem; rupturas por cisalhamento localizadas; em geral desenvolvem-se trincas nas depressões

(c) ATP: falha na dosagem de mistura asfáltica – excesso de ligante asfáltico; falha na seleção de tipo de revestimento asfáltico para a carga solicitante; em geral com sollevamento lateral – compensação volumétrica junto à depressão

(d) E: Escorregamento de massa asfáltica por fluência decorrente de excesso de ligante; em geral junto às depressões localizadas, às trilhas de roda e às bordas de pavimentos

Figura 12 – Escorregamentos, corrugação e exsudação

DEFEITOS



(a) Escorregamento do revestimento (E)



(b) Corrugação (O)



(c) Exsudação (EX)
(Foto: Moura, 2004)



(d) Detalhe de exsudação (EX)

ALGUMAS CAUSAS PROVÁVEIS

(a) E: escorregamento do revestimento asfáltico por falhas construtivas e de pintura de ligação; difere do escorregamento de massa por fluência do subleito (d) anterior

(b) O: corrugação devido à fluência da massa asfáltica – comprimento de onda da ordem de centímetros a dezenas de centímetros; em geral ocorre em área de aceleração ou desaceleração, rampas sujeitas ao tráfego de veículos pesados e lentos, curvas, entre outros locais. Não se deve confundir com a ondulação causada por adensamento diferencial do subleito que provoca comprimentos de ondas da ordem de metros

(c) e (d) EX: falhas de dosagem provocando excesso de ligante em alguns pontos ou de maneira generalizada; pode ocorrer por segregação de massa, com concentração de ligante em alguns pontos e falta em outros; ou ainda por cravamento de agregados em base e ascensão de ligante à superfície

Figura 13 – Desgaste, desagregação, polimento de agregados

DEFEITOS



(a) Desgaste (D)



(b) Desagregação (D)



(c) Deslocamento e perda de agregados



(d) Polimento de agregado

ALGUMAS CAUSAS PROVÁVEIS

(a) e (b) D: falhas de adesividade ligante-agregado (*stripping*); presença de água aprisionada e sobrepessão em vazios da camada de revestimento gerando descolamento de ligante (*stripping*); problemas de dosagem – deficiência no teor de ligante; falhas de bico em tratamentos superficiais; problemas executivos ou de projeto de misturas – segregação de massa asfáltica

(c) D: problemas na adesividade ligante asfáltico-agregado provocando o descolamento e remoção dos agregados pelo tráfego; agregados com baixa resistência mecânica ou química

(d) Seleção deficiente de agregados – problemas de adesividade somados à potencialidade de polimento das superfícies dos agregados pela ação dos pneus de veículos

Figura 14 – Painéis e remendos
DEFEITOS

**ALGUMAS CAUSAS
PROVÁVEIS**



(a) Painel atingindo a base (P)



(b) Painel (P)

(Foto: Silva, 2003)



(c) Remendo mal executado (R)



(d) Remendo bem executado (R)

(a) e (b) P: local onde havia trincas interligadas e com a ação do tráfego e intempéries houve remoção do revestimento ou mesmo de parte da base; falha construtiva – deficiência na compactação, umidade excessiva em camadas de solo, falha na imprimação; desagregação por falha na dosagem, *stripping* ou ainda segregação. Na foto (b): falha na pintura de ligação em camadas de revestimento causando o destacamento ou “despelamento”

(c) e (d) R: preenchimento de depressões ou painéis com massa asfáltica; apesar de ser uma atividade de conservação é considerado um defeito por apontar um local de fragilidade do revestimento e por provocar danos ao conforto ao rolamento. Na foto (d) consta uma conservação bem executada; na foto (c), demonstra-se falta de técnica para reparos

Figura 15 – Outros defeitos

DEFEITOS



(a) Segregação



(b) Bombeamento de finos



(c) Falha de bico espargidor



(d) Recalque diferencial

ALGUMAS CAUSAS PROVÁVEIS

(a) Concentração de agregados em uma área e de mástique em outras, resultado da deficiência de ligante em alguns locais e excesso em outros; problemas na definição de faixa granulométrica da mistura, problemas de usinagem, problemas diferenciais de temperatura de distribuição e compactação. Pode ser classificado como desgaste (D)

(b) Subida à superfície por meio de fendas de material fino devido à presença de água sob pressão causada pela ação do tráfego e rapidamente aliviada após solicitação provocando a ascensão dos finos

(c) Falha nos bicos espargidores em tratamentos superficiais, em geral com falta de ligante asfáltico provocando deficiência de cobertura e envolvimento dos agregados e seu conseqüente desprendimento pela ação do tráfego

(d) Falhas construtivas de compactação, adensamento diferencial causado por alterações substanciais no material da fundação, alargamentos de faixas com preexistência de pistas anteriores

5

PRINCIPAIS DEFEITOS EM PAVIMENTOS RÍGIDOS

Nesta seção, é apresentada uma nomenclatura padronizada para os diversos tipos de defeitos que geralmente ocorrem em pavimentos rígidos de concreto de cimento Portland, segundo o disposto na Norma DNIT 061/2004 – TER – Defeitos nos pavimentos rígidos – Terminologia.

Os defeitos mais comuns nos pavimentos rígidos estão normalmente associados ao emprego de técnicas executivas e materiais inadequados, aliados à ausência de uma manutenção rotineira requerida por esse tipo de estrutura.

A experiência tem mostrado que a maioria destes tende a se agravar com o decorrer do tempo.

Nos pavimentos rígidos tem sido mais frequente a ocorrência de defeitos localizados, associados a uma ou várias causas específicas, ao invés da degradação uniforme de todo um trecho construído, decorrente de deficiências de projeto ou de um processo de fadiga do concreto, nas proximidades do final da vida útil do pavimento.

Para se garantir o funcionamento satisfatório de um pavimento rígido, é fundamental que seja permanentemente feito o controle da ocorrência destes defeitos, além do acompanhamento da sua evolução com o decorrer do tempo, executando-se prontamente os reparos que assegurem a manutenção da condição estrutural do pavimento.

Explicitamente, os principais fatores causadores da degradação de um pavimento rígido são:

- Deficiência da capacidade de suporte da fundação;
- Drenagem mal projetada ou mal executada;
- Excesso de carga dos veículos comerciais;
- Execução deficiente ou falta de manutenção do material selante das juntas.

A manutenção da selagem das juntas tem importância decisiva para a durabilidade do pavimento, devido aos selantes existentes no mercado possuírem uma vida útil muito curta em relação à prevista para o pavimento.

A destruição do material selante de uma junta de um pavimento rígido costuma abrir o caminho para as infiltrações, que atingem a fundação do pavimento, criando condições para o surgimento de diversos tipos de defeitos.

5.1 RELAÇÃO DOS PRINCIPAIS DEFEITOS

Os defeitos mais comuns que ocorrem em pavimentos rígidos, e a sua designação, são enumerados a seguir.

a) Alçamento de placas

Desnívelamento das placas nas juntas ou fissuras transversais e, eventualmente, na proximidade de canaletas de drenagem e obstáculos fixos, tais como encontros de ponte, fundações de prédios ou intervenções feitas no pavimento (ver Figura 16 e Figura 17)

Figura 16 – Fissuras

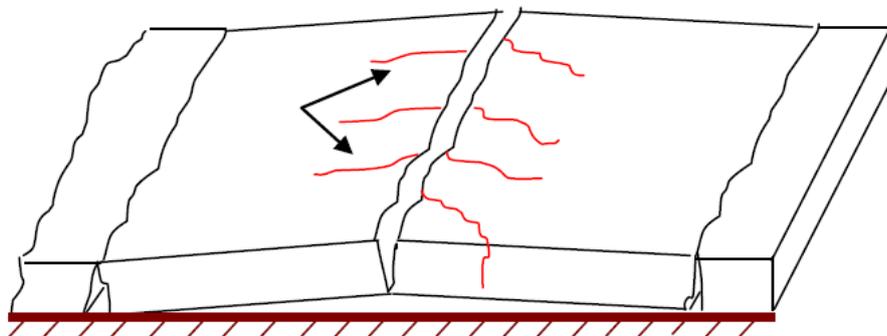
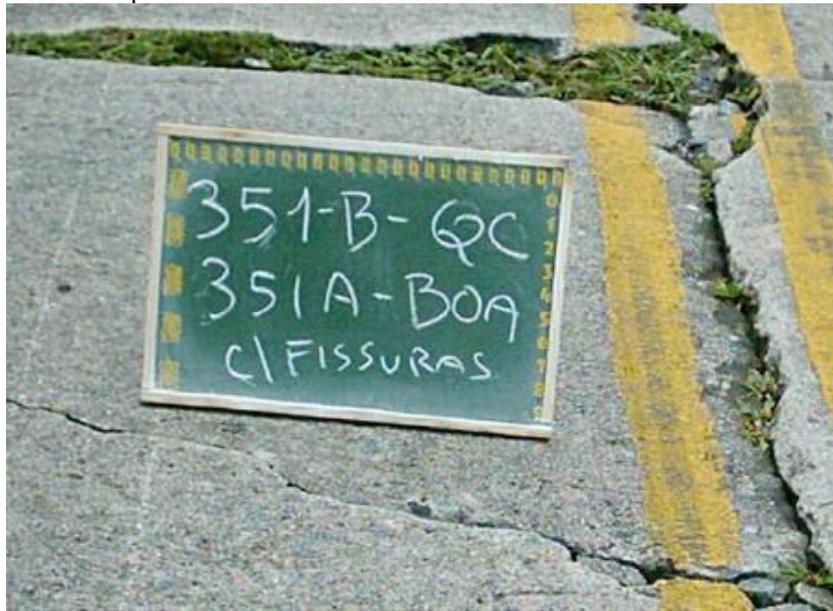


Figura 17 – Alçamento de placas



b) Fissura de canto

É a fissura que intercepta as juntas a uma distância de, no máximo, 1,8 m das bordas ou juntas do pavimento (longitudinal e transversal), medindo-se a partir do seu canto (ver Figura 18 e

Figura 19). Esta fissura atinge toda a espessura da placa.

Figura 18 – Fissura de canto

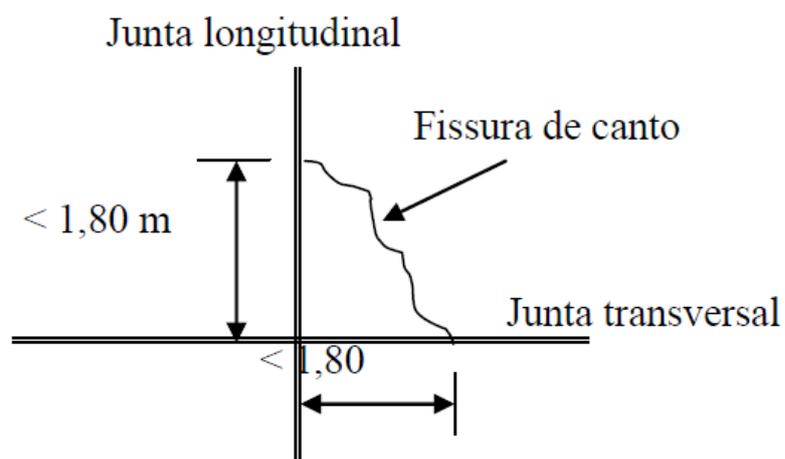


Figura 19 – Fissura de canto



c) Placa dividida

É a placa que apresenta fissuras, dividindo-a em quatro ou mais partes (ver Figura 20 e Figura 21)

Figura 20 – Placa dividida

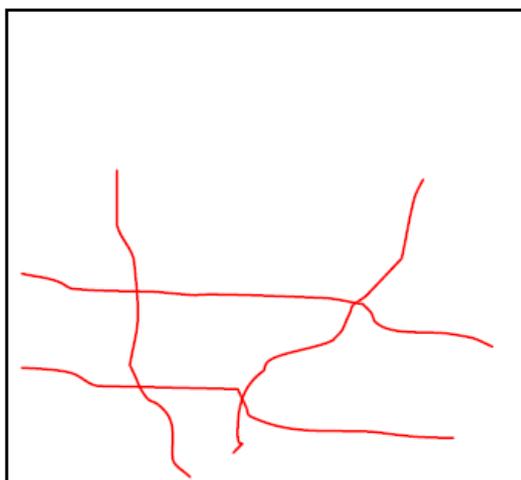


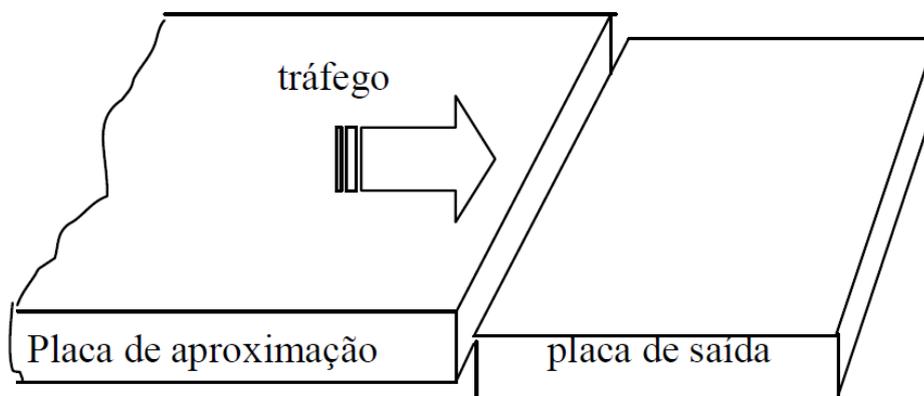
Figura 21 – Placa dividida



d) Escalonamento ou degrau nas juntas

Caracteriza-se pela ocorrência de deslocamentos verticais diferenciados e permanentes entre uma placa e outra adjacente, na região da junta (ver Figura 22).

Figura 22 – Escalonamento ou degrau nas juntas



e) Falha na selagem das juntas

É qualquer avaria no selante que possibilite o acúmulo de material incompressível na junta, ou que permita a infiltração de água. As principais falhas observadas no material selante são:

- Má qualidade ou inadequabilidade do material;
- Rompimento, por tração ou compressão;
- Extrusão do material;
- Crescimento de vegetação;
- Endurecimento (oxidação) do material;
- Perda de aderência às placas de concreto;
- Quantidade deficiente de selante nas juntas.

f) Desnível pavimento-acostamento

É o degrau formado entre o acostamento e a borda do pavimento, geralmente acompanhado de uma separação dessas bordas.

g) Fissuras lineares

São fissuras que atingem toda a espessura da placa de concreto, dividindo-a em duas ou três partes. Quando as fissuras dividem a placa em quatro ou mais partes, o defeito é denominado de "placa dividida".

Como fissuras lineares enquadram-se:

- Fissuras transversais, que ocorrem na direção da largura da placa, perpendicularmente ao eixo longitudinal do pavimento;
- Fissuras longitudinais, que ocorrem na direção do comprimento da placa, paralelamente ao eixo longitudinal do pavimento;
- Fissuras diagonais, que são fissuras inclinadas que interceptam as juntas do pavimento, a uma distância maior que a metade do comprimento dessas juntas ou bordas.

h) Grandes reparos

Entende-se como "grande reparo" uma área do pavimento original maior que 0,45 m², que foi removida e posteriormente preenchida com um material de enchimento.

i) Pequenos reparos

Entende-se como —pequeno reparo uma área do pavimento original menor ou igual a 0,45 m², que foi removida e posteriormente preenchida com um material de enchimento.

j) Desgaste superficial

Caracteriza-se pelo descolamento de argamassa superficial, fazendo com que os agregados graúdos aflorem na superfície do pavimento e, com o tempo, fiquem com a sua superfície polida.

k) Bombeamento

Consiste na expulsão de finos plásticos existentes no solo de fundação do pavimento, através das juntas, bordas ou trincas, quando da passagem das cargas solicitantes.

Os finos bombeáveis têm a forma de uma lama fluída, sendo identificados pela presença de manchas terrosas ao longo das juntas, bordas ou trincas.

l) Quebras localizadas

São áreas das placas que se mostram trincadas e partidas, em pequenos pedaços, tendo formas variadas, situando-se geralmente entre uma trinca e uma junta ou entre duas trincas próximas entre si (em torno de 1,5 m).

m) Passagem de nível

São defeitos que ocorrem em passagens de nível, consistindo em depressões ou elevações próximas aos trilhos.

n) Fissuras superficiais (rendilhado) e escamação

As fissuras superficiais (rendilhado) são fissuras capilares, que ocorrem apenas na superfície da placa, tendo profundidade entre 6 mm e 13 mm, que apresentam tendência a se interceptarem, formando ângulos de 120°.

A escamação caracteriza-se pelo descolamento da camada superficial fissurada, podendo, no entanto, ser proveniente de outros defeitos, tais como o desgaste superficial.

o) Fissuras de retração plástica

São fissuras pouco profundas (superficiais), de pequena abertura (inferior a 0,5 mm) e de comprimento limitado. Sua incidência costuma ser aleatória e elas se desenvolvem, formando ângulo de 45° a 60° com o maior eixo longitudinal da placa.

p) Esborcinamento ou quebra de canto

São quebras que aparecem nos cantos das placas, tendo forma de cunha, que ocorrem em uma distância não superior a 60 cm do canto (ver Figura 23 e Figura 24).

Este defeito difere da fissura de canto, pelo fato de interceptar a junta num determinado ângulo (quebra em cunha), ao passo que a fissura de canto ocorre verticalmente em toda a espessura da placa.

Figura 23 – Esborcinamento ou quebra de canto

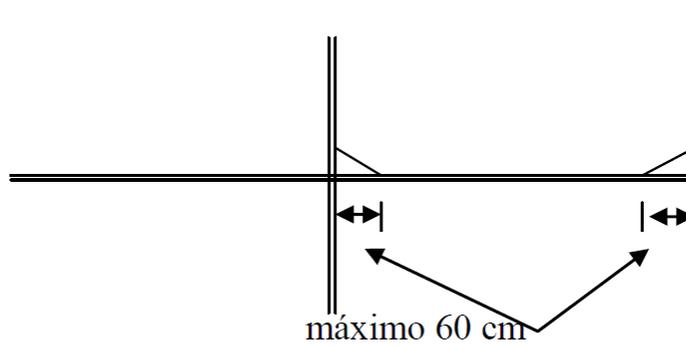


Figura 24 – Quebra de canto



q) Esborcinamento de juntas

O esborcinamento das juntas se caracteriza pela quebra das bordas da placa de concreto (quebra em cunha) nas juntas, com o comprimento máximo de 60 cm, não atingindo toda a espessura da placa (ver Figura 25 e

Figura 26).

Figura 25 – Esborcinamento de juntas

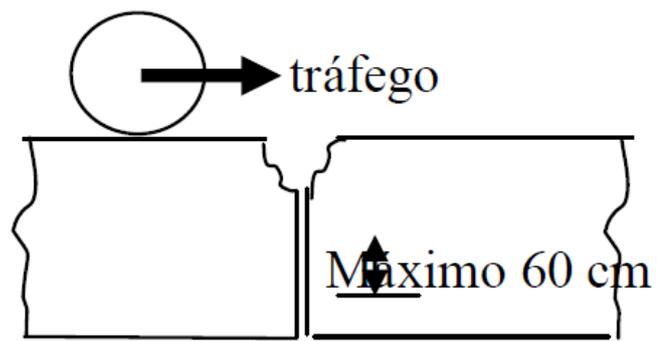
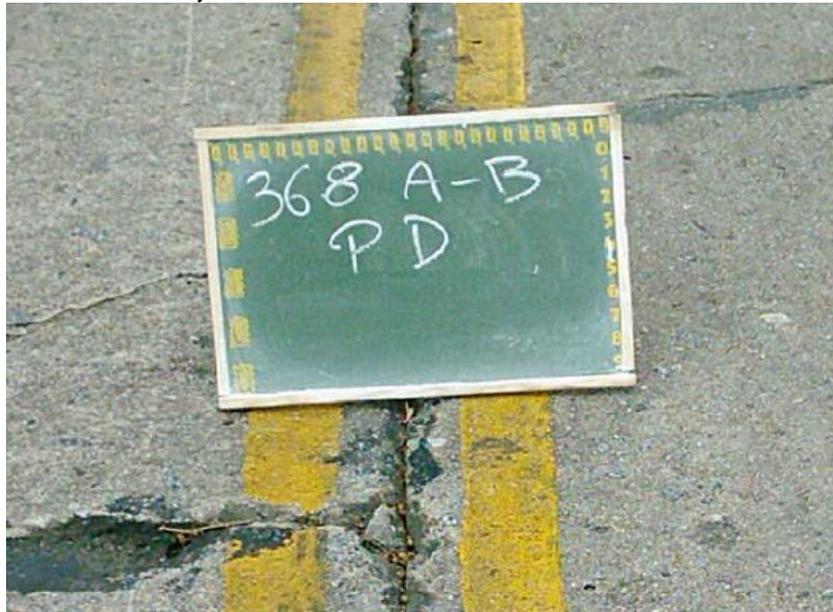


Figura 26 – Esborcinamento de juntas



r) Placa “bailarina”

É a placa cuja movimentação vertical é visível sob a ação do tráfego, principalmente na região das juntas, como mostrado na Figura 27 e Figura 28.

Figura 27 – Placa bailarina

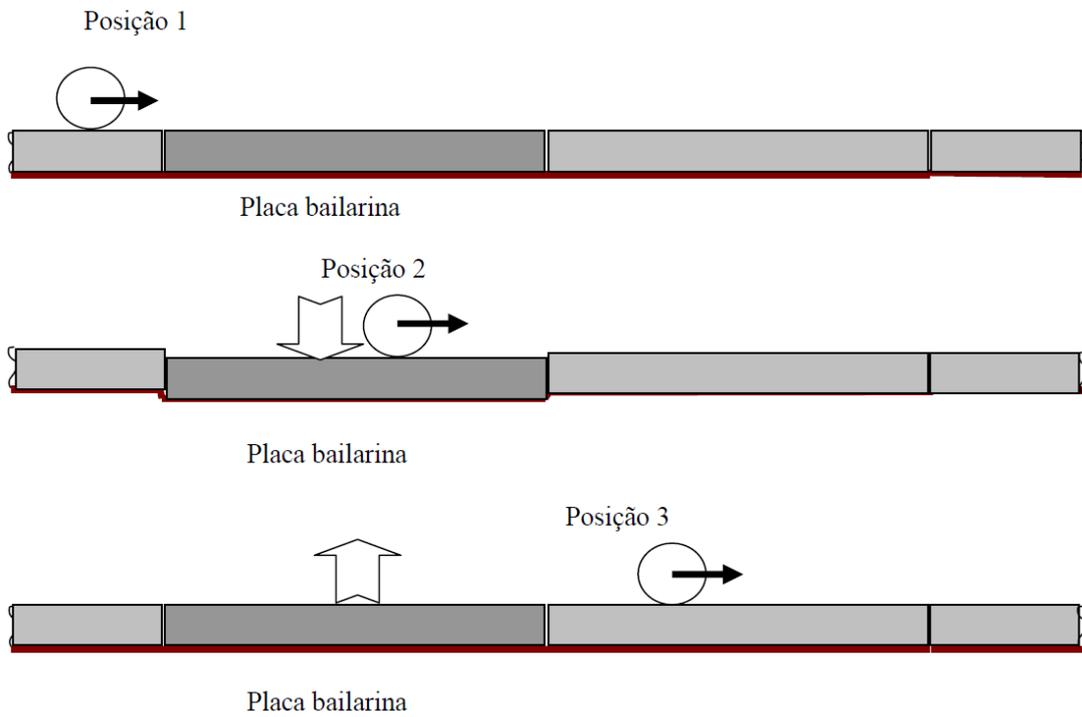
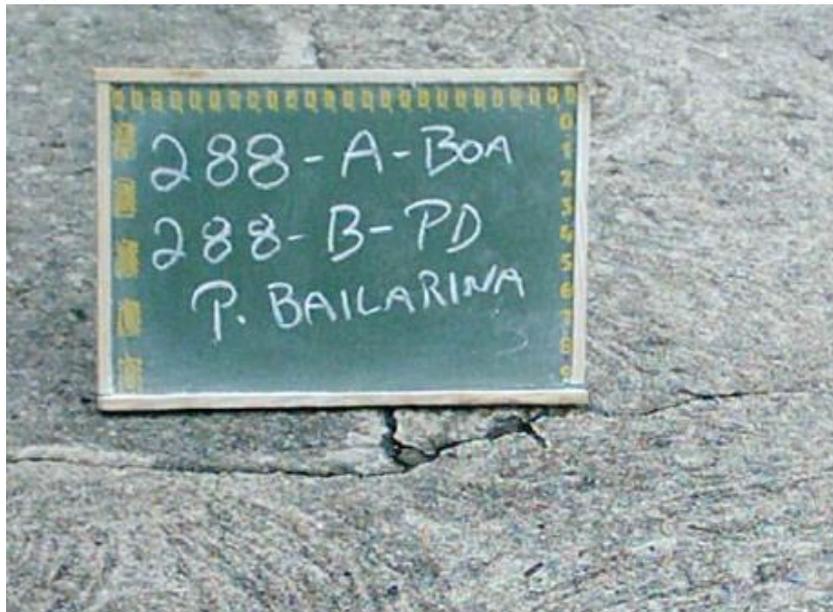


Figura 28 – Placa bailarina



s) Assentamento

Caracteriza-se pelo afundamento do pavimento, criando ondulações superficiais de grande extensão, podendo ocorrer que o pavimento permaneça íntegro.

t) Buracos

São reentrâncias côncavas observadas na superfície da placa, caracterizadas pela perda de concreto no local, apresentando área e profundidade bem definida (ver causas na subseção 0).

5.1 CAUSAS DOS PRINCIPAIS TIPOS DE DEFEITOS

a) Alçamento de placas

A causa para este defeito é a expansão (dilatação) linear do pavimento, devida às variações sazonais de valor significativo, aliada à deficiência ou ausência de junta de dilatação nas placas adjacentes a obstáculos fixos, tais como canaletas de drenagem, encontros de ponte, fundações de prédios e outros.

b) Placa dividida

A divisão de uma placa em quatro ou mais partes se deve às fissuras que ocorrem nestas placas nos diversos sentidos (transversal, longitudinal e diagonal).

A causa deste defeito está relacionada com as causas que deram origem a estas fissuras.

Considerando a existência de várias fissuras, e em diversos sentidos, em uma mesma placa, isto pode ser decorrente das seguintes anomalias:

- Deficiência no suporte da fundação do pavimento;
- Subdimensionamento da espessura do pavimento;
- Fadiga do concreto.

c) Escalonamento ou degrau nas juntas

O degrau que ocorre em uma junta é causado pela perda progressiva da eficiência nesta junta, que é definida como sendo a capacidade de uma placa transmitir uma carga à placa adjacente, sendo esta eficiência determinada pela expressão:

$$E (\%) = \frac{2 \times d'}{d + d'} \times 100$$

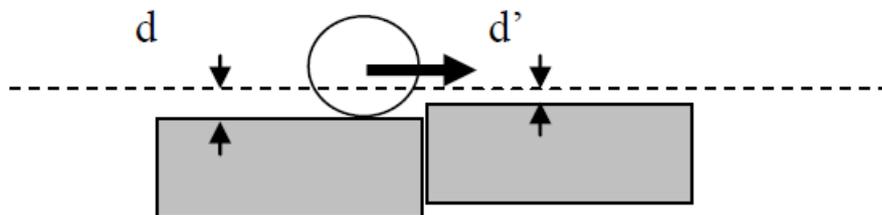
Onde:

E = eficiência da junta

d = deslocamento vertical do lado carregado da junta, em mm

d' - deslocamento vertical do lado descarregado da junta, em mm (ver Figura 8).

Figura 29 – Escalonamento ou degrau nas juntas



A causa deste defeito costuma ser a falta ou deficiência dos dispositivos capazes de garantir esta transmissão de carga nas juntas, tais como barras de transferência, encaixe tipo macho-fêmea ou entrosagem dos agregados, quando a junta é executada por serragem.

Outra causa pode ser qualquer deficiência na sub-base ou o dimensionamento de placas de dimensões curtas, aliada à passagem de tráfego pesado e canalizado.

Além de reduzir o conforto e a segurança do tráfego e provocar danos nos veículos, estes degraus contribuem, de forma significativa, para a redução da vida útil do pavimento.

d) Falha na selagem das juntas

Este defeito tem sido o mais comum em pavimentos de concretos, sendo geralmente motivado pela execução deficiente da selagem, ou pela escolha de um material selante inadequado ou de baixa vida útil.

Os selantes à base de policloropreno, que geralmente são pré-moldados, são aqueles que apresentam maior vida útil, tendo o inconveniente do alto custo.

Na maioria dos casos são empregados selantes do tipo mastiques, à base de poliuretano, silicone ou simplesmente com misturas asfálticas, que são aplicados “in loco” e geralmente a frio.

O defeito mais comum tem sido o descolamento do masticado das bordas da junta, que pode ser decorrente da falta de aplicação de um “primer”, que é necessário para a maioria dos selantes disponíveis no mercado.

Outro defeito que ocorre tem sido a fissuração do material selante, que se pode apresentar sob a forma de pequenas fissuras ou, então, com fissuras maiores, geralmente no sentido longitudinal da junta.

Quando estas fissuras são pequenas, elas podem ser decorrentes da ação de raios ultravioletas, que incidem no material selante, quando ele ainda está em processo de cura e não recebe nenhuma proteção contra a ação destes raios.

As fissuras maiores podem ser decorrentes de esforços aplicados sobre o selante, pela passagem de veículos ou por vibrações, enquanto ele está ainda em processo de cura.

Admite-se que o tempo necessário de cura de um selante seja obtido pelo quociente da profundidade do selante (em mm) por 2,5 mm/dia, que é a taxa média de endurecimento do selante com a idade.

Desta forma, um selante aplicado em uma junta, tendo 10 mm de profundidade, que seria um caso mais comum, necessita de um período de cura de $10/2,5 = 4$ dias.

Durante este período de quatro dias, a partir da aplicação do selante, ele não deve estar sujeito a nenhuma das ações acima referidas.

e) Desnível pavimento – acostamento

As causas para este defeito são as mesmas citadas para os degraus nas juntas, alínea c.

f) Fissuras

As fissuras são descontinuidades que ocorrem na placa de concreto, que não são previstas no projeto do pavimento.

As causas que dão origem às fissuras podem ser:

- Fissuras transversais

Estas fissuras têm o sentido transversal da placa e são provocadas pela retração hidráulica ou por perda d'água.

Elas somente aparecem depois de o concreto ter endurecido, sendo que, para a sua formação, é necessário o dispêndio de uma grande energia, razão porque estas fissuras apresentam uma pequena abertura, que raramente ultrapassa 0,5 mm.

De uma maneira geral, estas fissuras costumam abranger toda a espessura da placa.

As causas prováveis para este tipo de fissura são:

- Cura deficiente;
- Atraso na serragem das juntas transversais;
- Profundidade insuficiente do corte da junta;
- Placas com comprimento acima do adequado para o tipo de agregado empregado no concreto, que geralmente varia de 5 a 7 m;
- Insuficiência de suporte da fundação;
- Subdimensionamento da espessura do pavimento.

Nas fissuras transversais localizadas próximas de uma junta transversal, as causas podem ser:

- Ineficiência ou má colocação das barras de transferência;
 - Amarração do trecho engraxado das barras de transferência aos caranguejos de apoio destas barras;
 - Colagem do concreto novo de uma placa ao concreto antigo da placa adjacente, no caso de juntas executadas por meio de fôrmas.
- Fissuras longitudinais

São provocadas pelas seguintes causas:

- Largura excessiva da placa (maior que 3,80 m);
 - Empenamento da placa no sentido transversal, com o levantamento das bordas longitudinais, devido a um elevado gradiente de temperatura e umidade entre a superfície superior e a inferior da placa, aliado à passagem de tráfego pesado sobre as bordas do pavimento;
 - Profundidade insuficiente do corte da junta longitudinal, no caso de pavimento com várias faixas de tráfego.
- Fissuras diagonais

São provocadas por deficiência no suporte da fundação, ou são oriundas da formação simultânea de fissuras transversal e longitudinal.

- Fissuras de canto

A ocorrência de fissuras de canto se deve a uma das seguintes causas:

- Falta ou deficiência dos dispositivos de transmissão de carga nas juntas, tais como barras de transferência, encaixe tipo macho-fêmea ou entrosagem dos agregados, quando a junta for executada por serragem;
- Subdimensionamento da espessura do pavimento;
- Recalque diferencial da fundação do pavimento, devido à falta de uniformidade da capacidade de suporte desta fundação;
- Empenamento dos cantos da placa, devido às variações térmicas e de umidade entre a superfície superior e a inferior da placa.

- Fissuras não direcionadas

A causa deste tipo de fissura é a retração plástica, que é aquela que ocorre no concreto antes do início da sua pega, sendo formada praticamente sem a necessidade de nenhuma energia, pois o concreto ainda não iniciou a sua fase de endurecimento, não tendo ainda nenhuma resistência.

Desta forma, devido às futuras deformações volumétricas a que o concreto será submetido (retração hidráulica por perda d'água ou retração térmica), estas fissuras tendem a apresentar uma grande abertura, que pode ultrapassar a 0,5 mm.

Devido às dimensões da placa de concreto, onde a superfície exposta prepondera em relação ao volume, é praticamente descartada a possibilidade da ocorrência da retração térmica em pavimentos.

Muitas vezes, quando a evaporação da água do concreto, depois de terminado o acabamento do pavimento, é muito rápida, estas fissuras podem ser inúmeras e esparsas, formando um rendilhado (*crazy cracks*), sendo preponderantemente superficiais e de aberturas bem insignificantes.

A causa deste tipo de fissura é a execução do pavimento em ambiente de muita insolação, ação de ventos e baixa umidade relativa do ar.

Elas são, às vezes, perceptíveis a olho nu durante a concretagem, como também podem não ser logo observadas, aparecendo depois, quando o concreto iniciar a sua fase de endurecimento.

Para evitar este tipo de fissura, o pavimento, quando executado em condições ambientais adversas, deve ser protegido contra a insolação por coberturas ou pela formação de neblina artificial (fog spray), para evitar a evaporação da água de mistura do concreto, enquanto está sendo executado o pavimento.

Outras causas para este tipo de fissura são problemas relacionados com os aditivos empregados no concreto (qualidade ou superdosagem), que podem retardar demasiadamente a pega do concreto, agravando as consequências da retração plástica.

g) Desgaste superficial

O desgaste superficial do pavimento, bem como a sua escamação e o lasqueamento, são provocados pelas seguintes causas:

- Emprego de concreto de baixa qualidade;
- Emprego de agregados sujos ou com pó aderente;
- Excesso de água de mistura no concreto;
- Concreto com exsudação elevada por deficiência de finos;
- Descolamento da pasta ou argamassa de cobrimento, devido ao acúmulo de água na superfície do pavimento depois do seu acabamento, que costuma ser evitado pela raspagem da superfície do concreto;

Este tipo de defeito tende a progredir, tornando o pavimento desconfortável ao tráfego, além de originar a formação de buracos no pavimento.

h) Bombeamento

A expulsão de finos plásticos existentes no solo de fundação do pavimento, através das juntas, bordas ou trincas, quando da passagem das cargas solicitantes, provoca inicialmente o amolecimento da fundação e posteriormente o descalçamento das placas que cobrem a área afetada.

Com o suporte da fundação tornando-se deficiente, as placas sofrem maiores tensões de tração com a passagem do tráfego, acima daquelas que foram consideradas no dimensionamento do pavimento, o que acelera o processo de fadiga do concreto e provoca a sua ruptura precoce.

O bombeamento pode ser, também, decorrente da ausência de uma sub-base ou pela sua execução de modo inadequado, além da ausência da colocação de lençol de plástico entre a placa e a sub-base.

i) Passagem de nível

As depressões ou elevações próximas aos trilhos, que ocorrem em passagens de nível, são decorrentes de projeto inadequado ou de uma execução deficiente do pavimento neste local.

j) Esborcinamento ou quebra de canto

As quebras e esborcinamento de cantos e bordas são decorrentes da retirada das fôrmas nestes locais de maneira brusca, ou com o concreto tendo ainda uma resistência baixa.

Podem, também, ser devidas a uma utilização imprópria dos veículos pesados, quando eles trafegam fora das trilhas consideradas no projeto.

k) Esborcinamento de juntas

O esborcinamento nas juntas pode ter como causas:

- Remoção precipitada das fôrmas;
- Serragem prematura da junta, quando o concreto ainda não apresenta uma resistência adequada;
- Infiltração de materiais incompressíveis na junta, quando ela está muito aberta (em tempo frio), que posteriormente irão comprimir as bordas da junta, quando o tempo se tornar quente e as juntas se fecharem.

l) Placa “bailarina”

A movimentação vertical da placa sob a ação do tráfego, principalmente na região das juntas, tem como causas as perdas localizadas ou generalizadas de suporte da fundação, aliadas à existência de juntas ineficientes e à ação do tráfego pesado e canalizado.

Este defeito costuma progredir com o tempo, acarretando o surgimento de trincas e fissuras na placa, além de facilitar o bombeamento.

m) Assentamento

Este defeito pode ser decorrente das seguintes causas:

- Deficiência ou falta de uniformidade no suporte da fundação;
- Projeto ou execução deficiente da sub-base.

No caso da execução de pavimento com fôrmas trilho, fôrmas deslizantes ou utilizando dispositivos de apoio das placas vibratórias, as saliências e depressões podem ser decorrentes das ondulações dos locais onde se apoiam estes dispositivos ou equipamentos de vibração e acabamento, devido a estas ondulações serem transmitidas para o pavimento.

n) Buracos

As reentrâncias côncavas observadas na superfície da placa são oriundas da progressão de outros defeitos já existentes, como as fissuras profundas e generalizadas, escamação, lasqueamento, desgaste superficial, bem como o emprego de concreto de baixa qualidade.

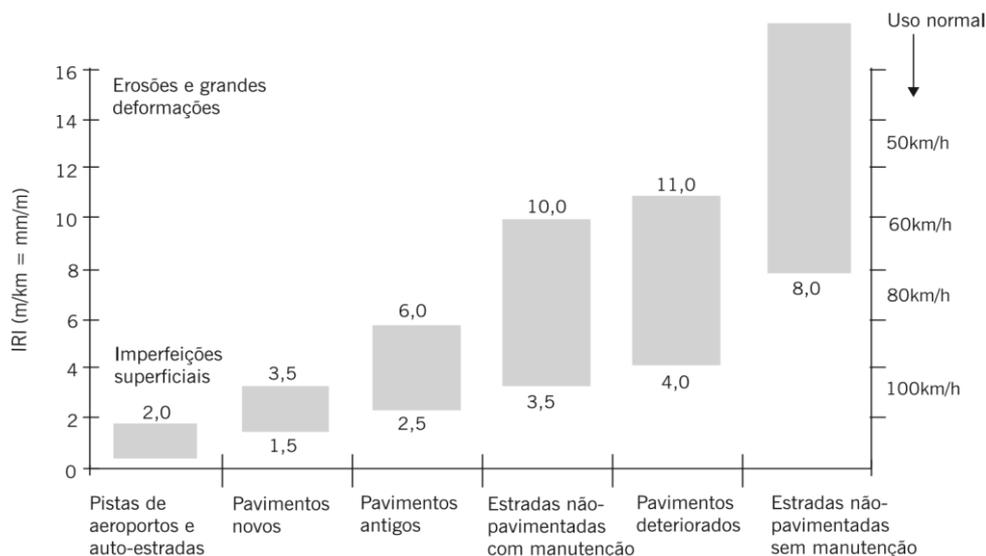
6

IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

A irregularidade longitudinal é o somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação a um plano de referência ideal de projeto geométrico que afeta a dinâmica do veículo, o efeito dinâmico das cargas, a qualidade ao rolamento e a drenagem superficial da via. Existe um índice internacional para a medida da irregularidade, designado de IRI – *international roughness index* (índice de irregularidade internacional) que é um índice estatístico, expresso em m/km, que quantifica os desvios da superfície do pavimento em relação à de projeto. A Figura 30 mostra as faixas de variação do IRI em diversas situações (Sayers e Karamihas, 1998). O IRI tem sido utilizado como ferramenta de controle de obras e aceitação de serviços em alguns países.

A irregularidade longitudinal é medida ao longo de uma linha imaginária, paralela ao eixo da estrada e, em geral, coincidente com as regiões de trilhas de roda, podendo em alguns casos haver o interesse de melhor detalhar o perfil, levantando-o em diversas linhas paralelas imaginárias. A linha de levantamento longitudinal possui uma largura variável de alguns milímetros a centímetros e depende do tipo de equipamento empregado.

Figura 30 – Diversas faixas de variação do IRI dependendo do caso e situação (Sayers e Karamihas, 1998)



Há mais de um século os técnicos procuram quantificar a qualidade de rolamento de seus pavimentos. Um dos primeiros equipamentos norte-americanos para tal finalidade foi o perfilógrafo; um dos exemplos é o perfilógrafo da Departamento de Transportes de Illinois, da década de 1920, que operava à baixa velocidade – Figura 31. Outro exemplo bastante conhecido é o perfilógrafo da Departamento de Transportes da Califórnia de 1958, que também operava com baixa velocidade.

O primeiro equipamento para a avaliação da irregularidade usado na pista da AASHO levou seu nome: *AASHO road test profilometer* –

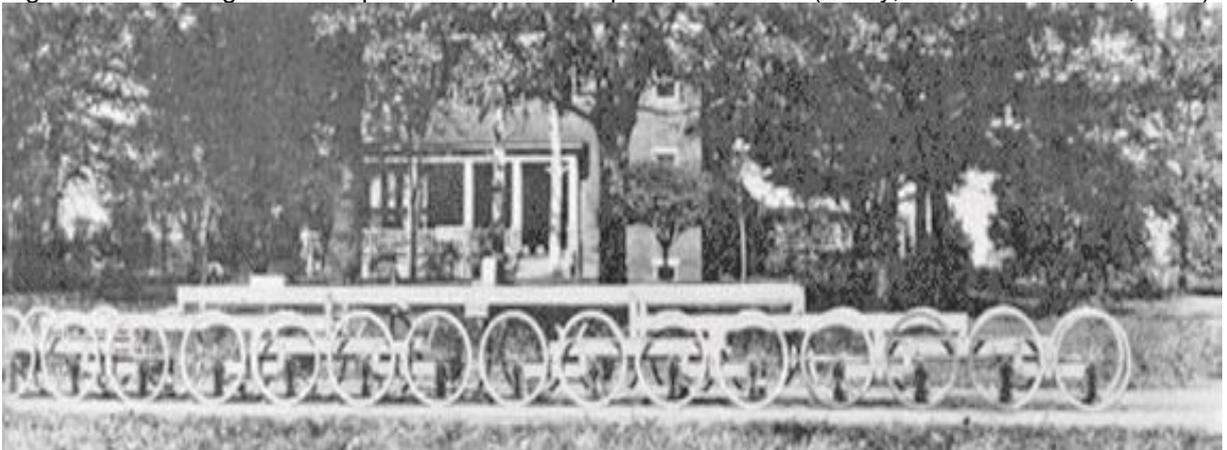
. Para a avaliação mais extensiva das irregularidades, e não só para pesquisa, foi desenvolvido o perfilômetro CHLOE que também foi empregado nas pistas da AASHO e nos departamentos de transportes norte-americanos.

A irregularidade pode ser levantada com medidas topográficas ou por equipamentos medidores do perfil longitudinal com ou sem contato, ou ainda indiretamente avaliada por equipamentos do tipo “resposta”, que fornecem um somatório de desvios do eixo de um veículo em relação à suspensão. Essa terminologia se deve ao fato desses equipamentos medirem mais o efeito da irregularidade nos veículos do que propriamente a irregularidade. Têm sido empregadas diversas classificações de equipamentos, dependendo do tipo e

princípio utilizado para o levantamento. Segundo Sayers e Karamihas (1998), tem-se empregado largamente a seguinte classificação:

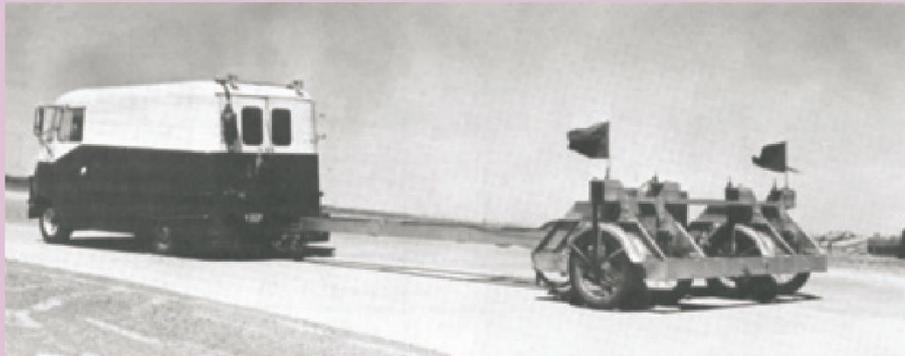
- Avaliação direta: por meio de equipamentos de classe I (nível e mira; Dipstick, perfilômetro do TRL etc.) e classe II (perfilógrafos, equipamentos com sensores a laser, APL francês etc.);
- Avaliação indireta: equipamentos de classe III do tipo-resposta (TRL Bump integrator, Maysmeter, Merlin etc.).

Figura 31 – Perfilógrafo do Departamento de Transportes de Illinois (Carey, Huckins e leathers, 1962)

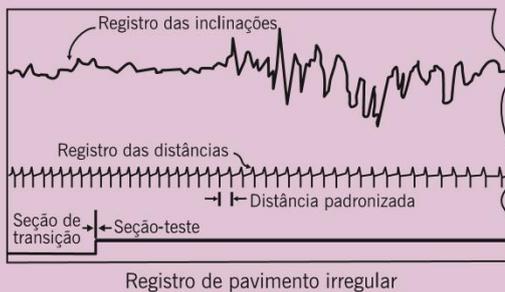


A avaliação subjetiva da serventia realizada por um painel de avaliadores é classificada por alguns autores e órgãos como classe IV, uma vez que a serventia e a irregularidade se correlacionam.

Figura 32 – Perfilômetro da AASHO empregado inicialmente na avaliação de suas pistas experimentais (Carey, Huckins e leathers, 1962)

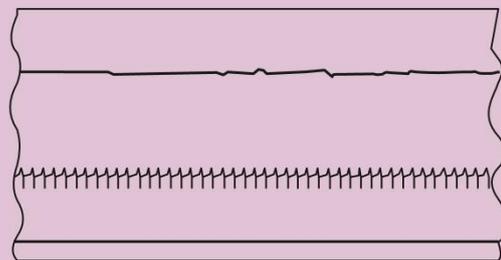


(a) Perfilômetro empregado nas pistas experimentais da AASHO



Registro de pavimento irregular

(b) Exemplo de registro do perfil longitudinal com alta irregularidade



Registro de pavimento confortável

(c) Exemplo de registro do perfil longitudinal com baixa irregularidade

Como classe I, tem-se o levantamento topográfico do perfil longitudinal feito por nível e mira (DNER-ES 173/86). O levantamento longitudinal é feito nas trilhas de roda externa e interna a cada 0,50m, geralmente. Trata-se de método relativamente lento e trabalhoso, sendo empregado para calibração de outros instrumentos de medida de irregularidade de maior rendimento. A

Figura 33 mostra um exemplo de uma plotagem de levantamento de irregularidade longitudinal efetuado pelo método topográfico

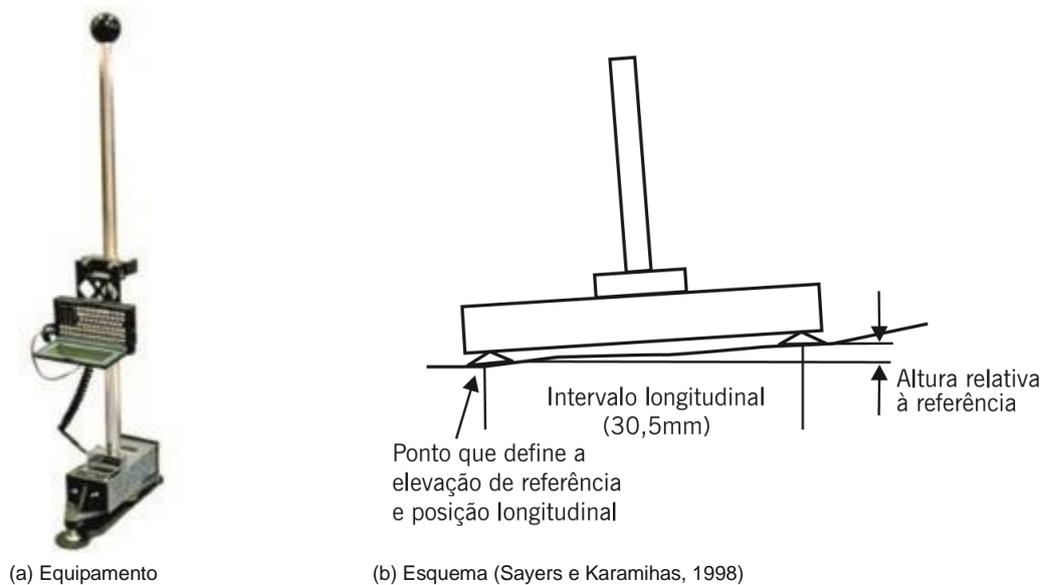
O *dipstick* é um equipamento classe I também usado para calibração de trecho de referência por se tratar de um método manual de nivelamento de pequeno rendimento. Um operador caminha com o aparelho ao longo das trilhas de roda; o aparelho é girado 180° em torno do segundo ponto de apoio de modo que os dois apoios estão sempre em uma linha imaginária na longitudinal paralela ao eixo. O aparelho possui um inclinômetro instalado que fornece leituras da ordem de um milésimo de polegada. A

mostra uma foto do equipamento portátil e um esquema de seu funcionamento.

Figura 33 – Exemplo de levantamento da irregularidade longitudinal por nível e mira (Queiroz, 1984)



Figura 34 – Exemplo de equipamento *dipstick* e esquema de funcionamento



O APL – *Analyseur de profil en long* (analisador de perfil longitudinal) francês foi desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (Laboratório Central de Pontes e Estradas) para medida de irregularidade. É um equipamento rebocável, podendo ser empregado um único equipamento ou dois paralelos, para o levantamento das irregularidades nas trilhas de roda. O reboque é puxado por um braço muito rígido, com uma roda em contato com a superfície e possui um pêndulo inercial de baixa frequência que serve como referência horizontal. A velocidade de levantamento é de 72km/h; são registrados comprimentos de onda entre 1 e 40m (comprimentos de onda que interferem nos veículos trafegando entre 80 e 130km/h). A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra uma foto do equipamento francês classificado como de classe II.

Ainda na classe II, existem os equipamentos que fazem o levantamento do perfil longitudinal sem contato. Um exemplo de equipamento dessa classe é mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que é o TUS – *Transversoprofilomètre à ultrasons* que emprega ondas ultra-sônicas para levantamento da irregularidade.

A Figura 37 mostra outro tipo de equipamento sem contato que utiliza o princípio da onda de luz laser para as medidas de irregularidade. Na Figura 37(a) encontra-se uma foto do equipamento francês Palas 2 que utiliza um conjunto composto por diodo laser e uma câmera filmadora acoplada capaz de levantar 175 pontos de uma seção transversal com 4m de largura.

Na Figura 37(b) mostra-se um equipamento brasileiro da mesma classe com uma barra contendo cinco lasers para o levantamento da seção transversal com até 3,5m de comprimento.

Figura 35 – Exemplo de equipamento API francês

Figura 36 – Exemplo de equipamento munido de barra com ultrassom



Fonte: Vectra, 2005.



Fonte: Vectra, 2005.

Figura 37 – Exemplos de equipamentos medidores de irregularidade de classe II



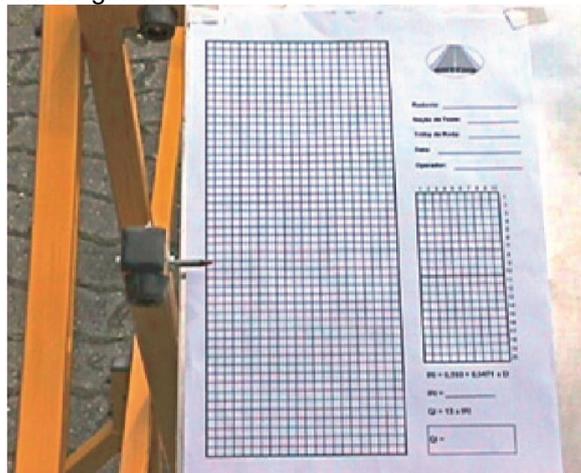
A avaliação da irregularidade pode ser feita por equipamento Merlin, de classe III, desenvolvido pelo Transport Research Laboratory (TRL) inglês, para ser utilizado em países em desenvolvimento (Cundill, 1991). Na atualidade são mais empregados para levantamento de pequenos trechos ou para calibração de trechos para os equipamentos tipo-resposta também de classe III. Trata-se de uma estrutura metálica com 1,80m de comprimento, munido de uma roda na parte dianteira, uma ponta de prova e um pé traseiro – assemelha-se a uma bicicleta sem a roda traseira – **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(a). Anexada à ponta de prova, há uma haste capaz de registrar em uma folha de papel um gráfico condizente com os

movimentos da ponta de prova na proporção de 1:10 (1mm de irregularidade: 10mm de registro) – **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(b).

Figura 38 – Exemplo de equipamento Merlin medidor de irregularidade



(a) Vista geral do equipamento
Fonte: Silva, 2005.

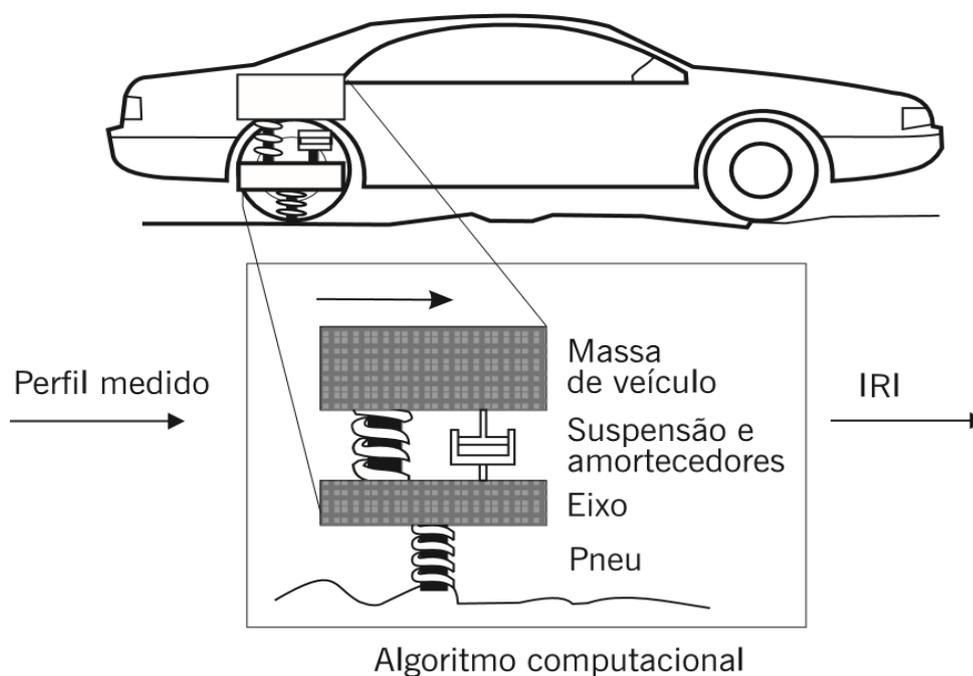


(b) Folha de registros
Fonte: Silva, 2005.

Há uma série de equipamentos tipo-resposta de classe III, muito difundidos e utilizados pela sua praticidade. São sistemas de simples operação e relativamente de baixo custo, com uma unidade sensora/transmissora que registra os movimentos da carroceria do veículo em relação ao eixo traseiro, por meio de um sistema sensível a uma fotocélula, e transmite essas vibrações do movimento a uma unidade de processamento. Um registrador mostra a contagem de movimentos verticais em um trecho de via de determinada extensão (em geral de 80 a 320m). Os registros são de QI (quociente de irregularidade). A Figura 39 mostra o princípio de funcionamento de equipamentos dessa natureza.

O Maysmeter é um equipamento medidor de irregularidade do tipo-resposta; foi utilizado no Brasil na Pesquisa do Inter-relacionamento de Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias que estudou extensivamente a irregularidade longitudinal dos pavimentos e sua relação com os custos operacionais; seus modelos foram introduzidos pelo Banco Mundial no Programa HDM III para gerência de rodovias e de manutenção de pavimentos. A medição de irregularidade pelo Maysmeter é normatizada no Brasil pelo DNIT (DNER-PRO 182/94).

Figura 39 – Princípio de funcionamento de equipamento tipo-resposta



Fonte: Gillespie *et al.*, 1980.

Na década de 1980, dentro do mesmo conceito, foi concebido um equipamento pelo IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias e pela USP – Universidade de São Paulo, denominado integrador IPR/USP. O equipamento é composto por dois conjuntos: um sensor de deslocamentos vertical instalado no diferencial para ser sensibilizado pelo movimento vertical entre o chassi e o diferencial, e um quantificador de irregularidades digital. A medição de irregularidade pelo IPR/USP é normatizada no Brasil pelo DNIT (DNER-PRO 182/94 – DNER, 1994b). Os equipamentos tipo-resposta fornecem um valor de *QI* (quociente de irregularidade) que numericamente pode ser relacionado com o *IRI* através da seguinte expressão:

$$QI = 13 \times IRI(1)$$

O DNER especifica o procedimento de calibração e manutenção dos equipamentos Maysmeter e do IPR/USP, (DNER-PRO 164/94 e PRO 229/94, DNIT 1994a, 1994c). Alguns estudos complementares foram realizados para ajuste dos

procedimentos de calibração para projetos de vias e de redes rodoviárias, e ainda para controle de concessões (Bottura, 1998).

7

AVALIAÇÃO OBJETIVA DE SUPERFÍCIE

7.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS – DETERMINAÇÃO DO IGG

A condição de superfície de um pavimento asfáltico deve ser levantada, analisados seus defeitos e causas, e atribuídos indicadores numéricos que classifiquem seu estado geral. O DNIT 006/2003 – PRO (DNIT, 2003b) estabelece

um método de levantamento sistemático de defeitos e atribuição do índice de Gravidade Global (IGG), que poderá ser empregado em projetos de reforço. Para sistemas de gerência de manutenção emprega-se geralmente o DNIT 007/2003 – PRO (DNIT, 2003c). Muitas vezes o levantamento dos defeitos e o cálculo do IGG precedem o levantamento estrutural para poder melhor embasá-lo.

Para o levantamento dos defeitos são utilizadas planilhas para anotações das ocorrências, material para demarcação de estacas e áreas da pesquisa, e treliça metálica para determinação do afundamento nas trilhas de roda das áreas analisadas. A Figura 40 mostra um exemplo de treliça, com haste móvel central, capaz de medir os afundamentos com a precisão de 0,5mm.

O IGG não é determinado para toda a área da pista, mas de forma amostral para algumas estações com área e distanciamento entre elas prefixados pela especificação do DNIT. As estações são inventariadas nas rodovias de pista simples a cada 20m, alternados entre faixas, portanto, em cada faixa a cada 40m; nas rodovias de pista dupla, a cada 20m, na faixa mais solicitada pelo tráfego, em cada uma das pistas. A superfície de avaliação corresponde a 3m antes e 3m após cada uma das estacas demarcadas, totalizando em cada estação uma área correspondente a 6m de extensão e largura igual à da faixa a ser avaliada. A

Figura 41 mostra um exemplo das estações em pista simples.

Faz-se a anotação numa planilha utilizando a terminologia e codificação de defeitos apresentados no item 4 existentes na área demarcada. Observe-se que não se dá importância neste método à área atingida pelo defeito, mas à sua ocorrência ou não. Os afundamentos nas trilhas de roda externa e interna devem ser mensurados com o auxílio da treliça metálica e anotados na planilha na coluna referente à estação onde foi feita uma única medida em cada trilha. A Figura 42 mostra um exemplo de uma planilha com 18 estações inventariadas.

A especificação do DNIT subdivide em oito categorias de defeitos: 1. fissuras e trincas; 2. trincas de bloco ou tipo couro de jacaré sem erosão; 3. trincas de bloco ou tipo couro de jacaré com erosão; 4. afundamentos localizados ou nas trilhas; 5. corrugação e panelas (além de ondulações); 6. exsudação; 7. desgaste; 8. remendos. Devem ser anotados os afundamentos nas trilhas externa e na interna, e registrada a existência de afundamentos por consolidação e escorregamentos.

Figura 40 – Treliza metálica para medida dos afundamentos em trilhas de roda

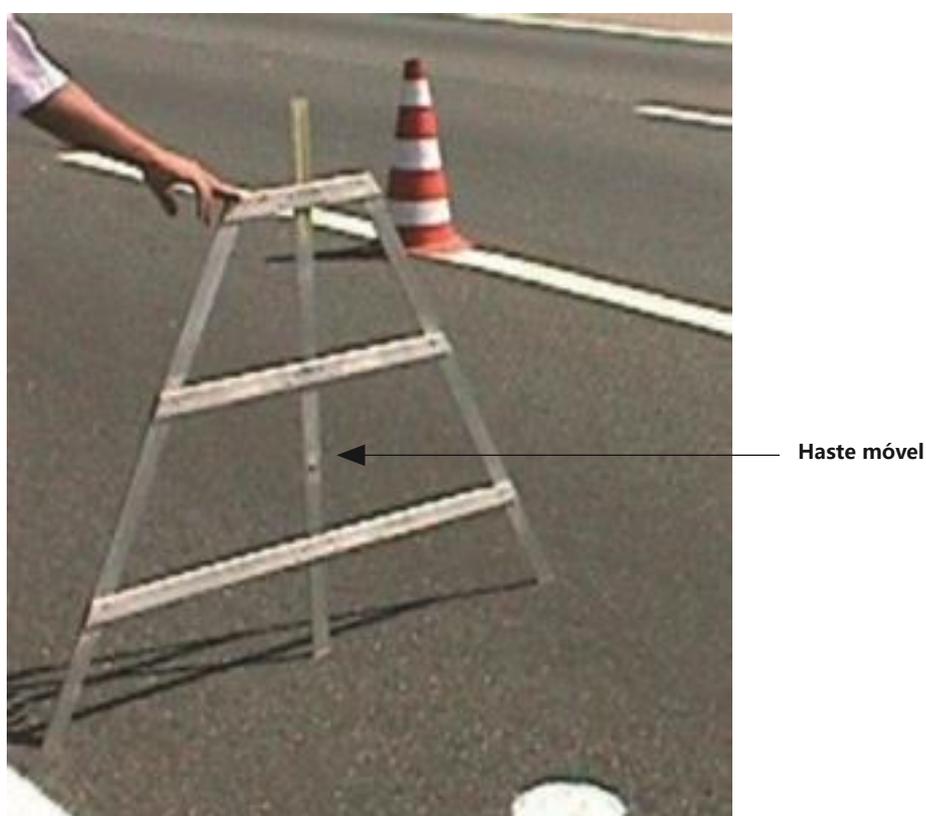
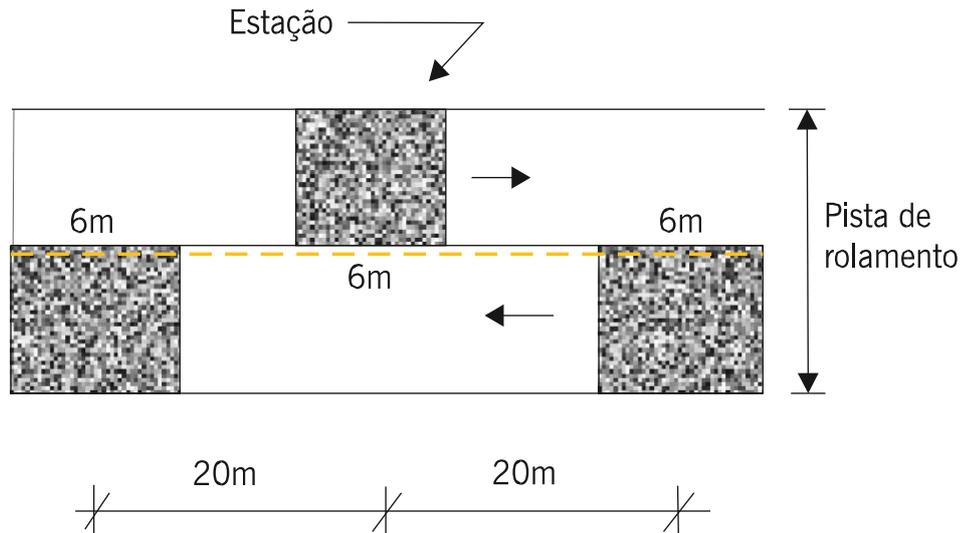


Figura 41 – Exemplo de demarcação de áreas para inventário de defeitos



De posse dos dados levantados, deve-se proceder a uma análise prévia de forma a subdividir a via em segmentos que possuam as mesmas características ou defeitos. No exemplo da planilha da Figura 42, há dois segmentos: o primeiro que se inicia na estação 1 e termina na 10, e o segundo com início na estação 11 e final na 18. O método contabiliza as frequências absolutas f_a de cada um dos oito tipos de defeitos (somatório da quantidade de estações que apresentam aquele tipo de defeito) e uma frequência f_r , relativa ao conjunto das estações de um dado segmento; ou seja, é a frequência absoluta multiplicada pela porcentagem de estações onde ocorre este determinado tipo de defeito, sendo que 100% corresponde à totalidade das estações de um dado segmento.

A Figura 43 mostra um exemplo do cálculo das frequências absolutas e relativas do primeiro segmento do exemplo anterior, com a computação dos defeitos da estação 1 a 10. Observe-se que a estação 5 possui dois defeitos do tipo 1; contabiliza-se apenas um defeito desta categoria nessa estação. Da mesma forma, deve-se contabilizar para os defeitos dos tipos 1, 2 e 3 apenas o mais grave deles na estação. Observe-se no exemplo que na estação 4 há trincas do tipo 1 e 2; deve prevalecer apenas o tipo 2 que é o mais grave deles; da mesma forma, no exemplo da estação 7, há trincas do tipo 1 e 3, devendo prevalecer a do tipo 3, ou seja, a mais grave delas. Assim, os defeitos do tipo 2 prevalecem sobre o 1, da mesma

forma que o 3 prevalece sobre o 1 e 2. Os defeitos do tipo 1 somente são considerados quando não houver defeitos do tipo 2 ou 3.

A norma estabelece um fator de ponderação prefixado para os defeitos, ou seja, confere a gravidade daquele tipo de defeito sobre os demais. Na Figura 43 são apresentados estes fatores, que devem ser utilizados para o cálculo do índice de gravidade individual *IGI*, expresso por:

$$IGI = f_r \cdot f_p(2)$$

Onde:

IGI = índice de gravidade individual de cada tipo de defeito;

f_r = frequência relativa;

f_p = fator de ponderação.

Figura 42 – Exemplo de planilha empregada para levantamento do estado de superfície pela norma do IGG

Inventário de superfície																				
Rodovia			Trecho										Operador							
			Subtrecho										Revestimento tipo							
Data	Folha		Estaca inicial										Estaca final							
Estação			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Faixa			D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E
Configuração da terraplenagem			A	A	A	SMA	C	C	SMC	C	C	C	A	A	SMC	C	C	A	A	A
Tipo	OK	Sem defeito																		
1	F1	Fissuras																		
(FCI)	TTC	Trincas transversais curtas					X													
	TTL	Trincas transversais longas				X					X	X				X		X		
	TLC	Trincas longitudinais curtas					X		X											
	TLL	Trincas longitudinais longas	X														X			
	TRR	Trincas isoladas retração																		
2	J	Couro de jacaré				X				X								X	X	
(FCII)	TB	Trincas em bloco																		
3	JE	Couro de jacaré com erosão		X					X	X			X	X	X	X	X		X	
(FCIII)	TBE	Trincas em bloco com erosão																		
4	ALP	Afundamento plástico local								X			X							
	ATP	Afundamento plástico trilha		X					X				X	X	X	X	X	X	X	X
5	O	Ondulação																		
	P	Panela											X				X			
6	EX	Exsudação																		
7	D	Desgaste	X		X	X	X		X				X	X	X	X	X		X	X
8	R	Remendo												X				X		
	ALC	Afundamento consolidação local																		
	ATC	Afundamento consolidação trilha																		
	E	Escorregamento													X					
	TRI	Afundamento trilha interna (mm)	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	4	6	8	3	2	5	5	4
	TRE	Afundamento trilha externa (mm)	0	3	1	0	1	0	3	1	0	1	7	4	9	6	7	6	4	8

Figura 43 – Exemplo de planilha de cálculo do IGG

Tipo	Natureza do defeito	Frequência absoluta	Frequência relativa	Fator de ponderação	Índice de gravidade individual
1	(FCI) F, TTC, TTL, TLC, TLL, TRE	3	30,0%	0,2	6,00
2	(FCII) J, TB	2	20,0%	0,5	10,00
3	(FCIII) JE, TBE	3	30,0%	0,8	24,00
4	ALP, ATP	3	30,0%	0,9	27,00
5	O, P	0	0,0%	1,0	0,00
6	E	0	0,0%	0,5	0,00
7	D	5	50,0%	0,3	15,00
8	R	0	0,0%	0,6	0,00
9	F = (TRI + TRE)/2 em mm	TRI = 0,2	TRE = 1,0	F = 0,6	0,15
10	FV = (TRlv + TREv)/2	TRlv = 0,18	TREv = 1,33	FV = 0,76	0,76
Número de estações inventariadas		10	IGI = (F x 1/4) quando F ≤ 30		IGI = FV quando FV ≤ 50
Índice de gravidade global		83	IGI = 40 quando F > 30		IGI = 50 quando FV > 50

Exemplificando, observe-se que o defeito do tipo 1, aparece em três das estações, entre as dez do segmento. Dessa forma, a frequência absoluta é 3, a frequência relativa é 30% (3 estações em 10), o fator de ponderação é 0,2 (prefixado por norma) e o *IGI* é 6 (30 x 0,2). Observe-se que a existência de corrugação (O) e panela (P) eleva significativamente o valor final do IGG uma vez que o fator de ponderação é igual à unidade.

Para o cálculo do *IGI* dos afundamentos em trilha de roda, considera-se a média *F* dos afundamentos (a norma denomina flechas para os afundamentos nas trilhas de roda) e a média *FV* das variâncias das flechas da seguinte forma:

$$F = (\sum_i^j FRE + \sum_i^j FRI) / 2 \quad (3)$$

$$FV = (FRE_v + FRI_v) / 2 \quad (4)$$

Onde:

FRE = flecha na trilha externa em milímetros de cada uma das estações do segmento;

FRI = flecha na trilha interna em milímetros de cada uma das estações do segmento;

i = primeira estação do segmento;

j = última estação do segmento;

F= média aritmética da média das flechas na trilha externa e da média das flechas na trilha interna do segmento;

FREv = variância das flechas medidas na trilha externa do segmento, considerando todas as estações de i a j;

FRIv = variância das flechas medidas na trilha interna do segmento, considerando todas as estações de i a j;

FV = média da variância das flechas na trilha externa e da variância das flechas na trilha interna do segmento.

Para a contabilização da contribuição das flechas ou afundamentos nas trilhas para o IGG, calculam-se dois índices de gravidade individual da seguinte forma:

$$IGI_F = F \cdot \frac{4}{3} \quad (\text{quando } F \leq 30) \quad (5)$$

ou

$$IGI_F = 40 \quad (\text{quando } F > 30) \quad (6)$$

e

$$IGI_{FV} = FV \cdot 1,0 \quad (\text{quando } FV \leq 50) \quad (7)$$

ou

$$IGI_{FV} = 50 \quad (\text{quando } FV = 50) \quad (8)$$

A contribuição das flechas compreende, portanto, dois índices de gravidade individual: o primeiro calculado utilizando-se as expressões 5 ou 6, dependendo da magnitude da média das flechas; e um segundo calculado empregando-se as expressões 7 ou 8, dependendo da magnitude das variâncias. Além desses dois índices, observe-se que a norma leva ainda em consideração nos defeitos tipo 4 a existência de trilhas, com fator de ponderação bastante elevado de 0,9. Assim, pode-se constatar que a existência de trilhas de roda nos segmentos pode elevar sobremaneira o valor do índice de gravidade global.

O índice de gravidade global é calculado pela seguinte expressão:

$$IGG = \sum IGI \quad (9)$$

Onde:

IGG = índice de gravidade global do segmento em análise;

IGI = cada um dos índices de gravidade individual calculados para os oito tipos de defeitos e para as trilhas de roda.

A norma DNIT 06/2003 foi revista em substituição à DNER-PRO 08/1994 e estabelece um novo critério ou novas faixas de qualidade do segmento com base no valor de IGG. A Tabela 4 mostra as duas escalas.

Tabela 4 – Conceitos do Índice de Gravidade Global IGG por Faixa de Valores

Norma DNIT 06/2003		Norma DNER 08/1994	
Conceito	Limites	Conceito	Limites
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$		
Bom	$20 < IGG \leq 40$	Bom	$0 < IGG \leq 20$
Regular	$40 < IGG \leq 80$	Regular	$20 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$	Mau	$80 < IGG \leq 150$
Péssimo	$IGG > 160$	Péssimo	$IGG > 150$

Embora o IGG reflita as condições funcionais do estado superficial dos pavimentos, a atribuição de um conceito serve para distinguir casos, subdividindo-os em poucas classes, mas o conceito não deve substituir a referência ao valor calculado, visto que segmentos de mesmo conceito podem ter diferentes valores de IGG, e portanto, condições diversas a serem consideradas no projeto de restauração. Vale a pena, mais uma vez, reforçar a ideia de que um bom diagnóstico dos defeitos, com observações globais, identificando as causas que levaram às patologias é imprescindível para um adequado projeto de restauração. O valor de IGG é um critério complementar.

7.2 PAVIMENTOS RÍGIDOS – DETERMINAÇÃO DO ICP

Para se avaliar de uma maneira objetiva a condição estrutural de um pavimento rígido em um determinado instante, deve-se determinar o Índice de Condição deste Pavimento – ICP.

Este índice é um número obtido a partir do levantamento dos defeitos observados em toda a extensão, ou apenas em um determinado trecho de um pavimento, e do grau de severidade destes defeitos.

Por meio do conhecimento deste índice, pode o DNIT estabelecer a estratégia ou política de manutenção, prevenção e de recuperação.

Geralmente, os pavimentos ou trechos de pavimentos que apresentam ICP igual ou maior que 70 não necessitam de um programa imediato de recuperação, ao passo que aqueles com ICP menor que 40 são considerados deficientes ou praticamente já destruídos.

Nos pavimentos com ICP entre 40 e 70, devem ser recuperados os defeitos mais graves observados em alguns trechos ou em todo o pavimento, recuperação esta que seja suficiente para elevar-se o ICP do pavimento para um valor igual ou superior a 70.

Na determinação do ICP, devem ser consultadas as seguintes Normas:

DNIT 060/2004 – PRO – Pavimento rígido – Inspeção visual – Procedimento;

DNIT 062/2004 – PRO – Pavimento rígido – Avaliação objetiva – Procedimento.

7.2.1 Levantamento preliminar de dados

Antes da inspeção de um pavimento ou de um trecho deste pavimento, deve ser feito um levantamento histórico deste pavimento, procurando-se obter o maior número de informações sobre o projeto, construção, operação, reparos e reforços realizados.

As principais informações a serem levantadas são:

- Espessura média das placas da pista e do acostamento;
- Material empregado na sub-base e a espessura desta sub-base;
- Resistência característica à tração na flexão ($f_{ctM,k}$) do concreto do pavimento (pista e acostamento), definida no projeto;
- Data da entrega do pavimento ao tráfego;
- Datas das recuperações anteriores realizadas em trechos do pavimento;
- Evolução do tráfego de veículos comerciais, desde a época da construção até o momento da determinação do ICP.

7.2.2 Inspeção no pavimento

Para a determinação do ICP do pavimento, a tarefa inicial é a realização de uma inspeção visual criteriosa em todo o pavimento, ou em trechos deste pavimento, para levantamento de defeitos ou outras anomalias existentes neste pavimento, associada às informações obtidas no levantamento inicial dos dados e naquelas contidas no cadastro documental da rodovia, quando ele for disponível.

O roteiro para esta inspeção está detalhado na Norma DNIT 060/2004 – PRO – Pavimento rígido – Inspeção visual – Procedimento.

Os aspectos relevantes desta inspeção são descritos nas subseções seguintes.

A definição dos trechos da rodovia a serem inspecionados deve basear-se em dados sucintos de campo, nas informações de escritório ou do cadastro documental e em indícios que mostrem a necessidade da inspeção em determinados trechos, cabendo esta definição ao engenheiro responsável pela inspeção.

A inspeção pode ser feita em toda a extensão do pavimento, ou em alguns trechos selecionados deste pavimento, sendo este tipo de inspeção denominado de —inspeção por amostragemll.

A inspeção realizada em toda a extensão do pavimento, por ser muito dispendiosa em termos de pessoal e de tempo, deve ser adotada para rodovias de pequena extensão ou em pavimentos destinados a fins específicos, tais como postos de pedágio, de pesagem ou de arrecadação.

Outra situação que justifica uma inspeção em todo o pavimento é quando esta inspeção tiver por finalidade a realização de obras de recuperação, quando é necessário um levantamento exato da quantidade, tipos e extensão dos defeitos existentes.

Na inspeção por amostragem, que apresenta maior economia e mais rapidez, apenas são inspecionados determinados trechos do pavimento.

7.2.2.1 Amostragem

a) Amostragem Selecionada

O trecho escolhido para a inspeção, tanto no caso de a inspeção ser feita em todo o pavimento como no caso da inspeção ser feita por amostragem, deve ser dividido em partes denominadas de amostras, devendo cada amostra ser identificada por caracteres numéricos e composta, de preferência, por 20 placas, o que facilita os cálculos para a determinação do ICP.

Quando necessário, pode-se considerar uma amostra com mais de 20 placas, porém nunca com menos.

No caso de placas com mais de 9 (nove) metros de comprimento, deve-se considerá-las, imaginariamente, subdivididas por juntas em perfeitas condições, de tal modo que cada subdivisão não tenha mais do que 9 (nove) metros de comprimento.

Na inspeção realizada em toda a extensão do pavimento, devem ser levantados os defeitos de todas as amostras deste pavimento.

Quando a inspeção for por amostragem, somente algumas amostras do trecho são inspecionadas, sendo necessário que se estabeleça um número mínimo de amostras a serem inspecionadas, para que o resultado da inspeção tenha um elevado grau de confiabilidade.

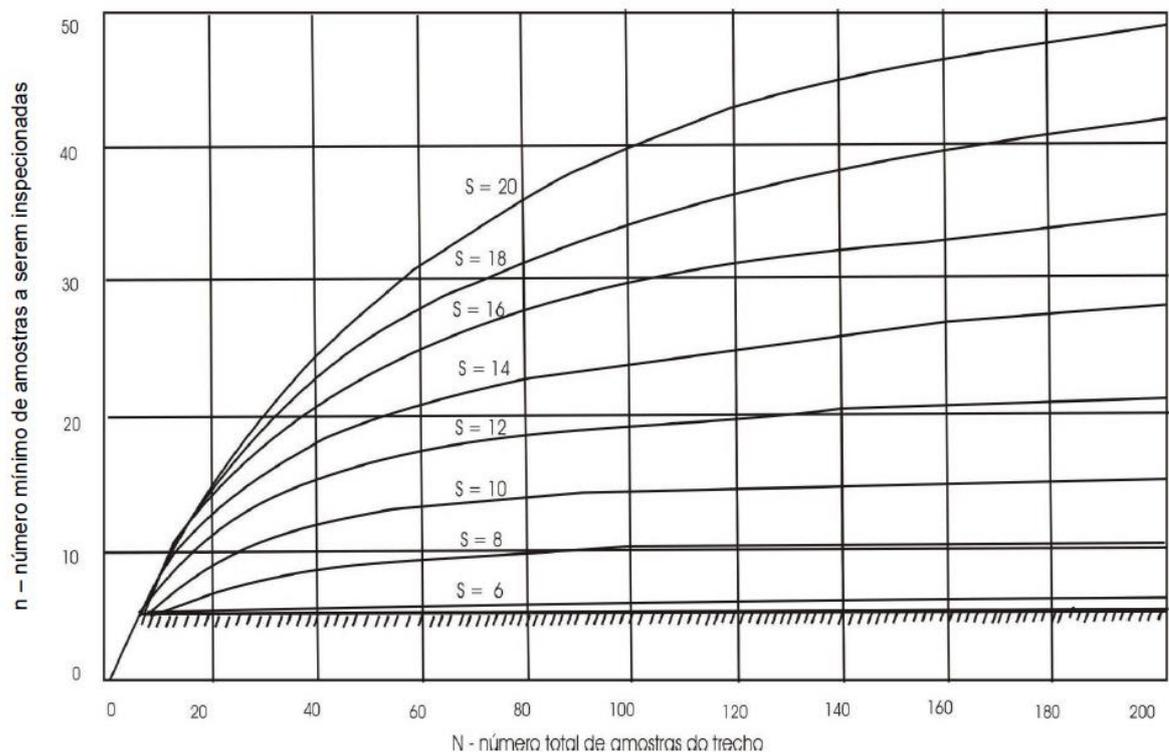
Este número mínimo (n) é obtido por meio de uma equação, que é função do número total de amostras do trecho (N), do erro admissível ($\pm e$) e do desvio padrão (S) da média dos resultados individuais do Índice de Condição do Pavimento, isto é:

$$n = \frac{NS^2}{\frac{e^2}{4}(N-1) + S^2}$$

Essa equação garante, com 95% de confiança de que o erro na avaliação, baseado nos dados coletados na inspeção, estará dentro da faixa admissível ($\pm e$).

No gráfico da Figura 44, são apresentadas as curvas que permitem a obtenção imediata de (n), para um erro admissível (e) de $\pm 5\%$, desde que sejam conhecidos os valores de (N) e de (S).

Figura 44 – Determinação do número mínimo de amostras (n) ($e=\pm 5$)



Recomenda-se que inicialmente sejam adotados para (S) valores entre 8 e 14, sendo S = 10 uma boa estimativa.

É aconselhável, também, que seja efetuado o cálculo do desvio padrão (S) para as primeiras amostras inspecionadas, com o objetivo de verificar se o valor inicialmente adotado foi adequado.

O número de amostras (n) a serem inspecionadas em um trecho não deve ser menor do que 5 (cinco).

A seleção das amostras para inspeção deve ser aleatória, cabendo ao engenheiro responsável a escolha do método que garanta essa aleatoriedade.

Para se obter uma maior representatividade da amostragem escolhida aleatoriamente, recomenda-se que, no caso do número (N) de amostras de um trecho ser igual ou maior do que 10, seja utilizado o método de "amostragem sistemática".

Este método consiste em selecionar as amostras com um espaçamento constante, sendo que apenas a primeira amostra (amostra inicial) é determinada aleatoriamente.

O valor do espaçamento (i) é obtido pela relação “N/n”, aproximando-se o resultado para o número inteiro imediatamente inferior, onde:

N = total de amostras contidas no trecho; n = número mínimo de amostras a serem inspecionadas.

A amostra inicial é determinada aleatoriamente no intervalo [1:i], sendo as demais amostras obtidas pelo acréscimo sucessivo do valor “i”.

Exemplo prático:

Considera-se um trecho com 25 amostras numeradas:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Ao entrar no gráfico da Figura 44 com N=25, e admitindo-se um desvio padrão S=10, encontra-se para “n” o valor igual a 10.

O procedimento subsequente é o seguinte: Determina-se inicialmente o valor do espaçamento (i) entre as amostras, sendo o valor de (i) igual ao número inteiro imediatamente inferior ao resultado obtido de N/n.

Assim, tem-se:

$$\frac{N}{n} = \frac{25}{10} = 2,5 \therefore i = 2$$

Obtêm-se aleatoriamente, no intervalo [1:i], a amostra inicial.

No exemplo considerado, o intervalo [1:i] da amostra inicial é o intervalo [1:2], podendo a amostra inicial ser a nº 1 ou a nº 2.

Se for escolhida a amostra nº 2, chega-se às demais, acrescentando-se sucessivamente, o valor de $i=2$.

	2		4		6		8		10		12		14		16		18		20		22		24	
--	---	--	---	--	---	--	---	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--	----	--

Desta forma, foram selecionadas 12 (o mínimo eram 10 amostras), distribuídas ao longo de todo o trecho a ser inspecionado, o que garante a representatividade da amostragem.

b) Amostragem Adicional

Amostra adicional é a amostra na qual ocorrem defeitos atípicos no pavimento, que podem acontecer onde existem passagens de nível, canaletas de drenagem, caixas de inspeção, bueiros ou em qualquer outra interrupção do pavimento.

Quando um defeito atípico ocorrer em uma amostra selecionada, ela passa a ser considerada como sendo atípica.

Para cada amostra adicional existente no trecho, deve ser escolhida aleatoriamente outra amostra selecionada.

7.2.3 Tipos de defeitos

Na inspeção no pavimento para a determinação do ICP, os defeitos considerados típicos devem ser numerados como indicado na Tabela 5.

Cada tipo de defeito pode apresentar um determinado grau de severidade, sendo estes graus classificados conforme a dimensão do defeito, a sua condição ou conforme a maneira como ele afeta o conforto, segurança e escoamento do tráfego.

Estes graus de severidade são classificados em:

- a) **Baixo (B)**: o defeito causa um baixo desconforto de rolamento;
- b) **Médio (M)**: o defeito causa um médio desconforto de rolamento, sem causar prejuízo ao tráfego;
- c) **Alto (A)**: o defeito compromete a segurança de rolamento e provoca interrupções no escoamento do tráfego, devendo ser imediatamente reparado.

Durante a inspeção, deve-se anotar em cada placa da amostra o número do defeito, seguido do seu grau de severidade.

Assim, por exemplo, o defeito 10 B existente em uma placa é um desgaste superficial com grau de severidade B.

Tabela 5 – Defeitos típicos dos pavimentos rígidos

Defeito N°	TIPO	Defeito N°	TIPO
1	Alçamento de placa (Blow-up)	11	Bombeamento
2	Fissuras de canto	12	Quebras localizadas
3	Placa dividida	13	Passagem de nível
4	Escalonamento ou degrau nas juntas	14	Fissuras superficiais (rendilhado) e escamação
5	Defeito na selagem das juntas	15	Fissuras de retração plástica
6	Desnível pavimento – acostamento	16	Esborcimento ou quebra de canto
7	Fissuras lineares	17	Esborcimento de juntas
8	Grandes reparos (área > 0,45m ²)	18	Placa bailarina
9	Pequenos reparos (área ≤ 0,45m ²)	19	Assentamento
10	Desgaste superficial	20	Buracos

7.2.4 Determinação do ICP

Quando uma amostra de pavimento não possui nenhum defeito visível, ela tem um ICP igual a 100.

Um determinado tipo de defeito e seu respectivo grau de severidade podem afetar uma ou várias placas da amostra, reduzindo desta forma o seu ICP, que se tornará menor que 100.

O número de placas afetadas por este tipo de defeito e respectivo grau de severidade, quando relacionado com o total de placas da amostra, indica um percentual, que é designado como “densidade de defeitos” da placa.

O cálculo do ICP de um pavimento segue o seguinte modelo matemático:

$$ICP = 100 - \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{m_i} A(T_i, S_j, D_{ij}) F(t, q)$$

ICP = Índice de Condição do Pavimento;

A = valor dedutível, dependente do tipo do defeito (T_i), do grau de severidade (S_j) e da densidade de defeitos (D_{ij});

i = contador para tipos de defeitos;

j = contador para graus de severidade;

p = número total de placas defeituosas;

m_i = número de graus de severidade para o tipo de defeito;

F (t,q) = uma função de ajustamento para defeitos múltiplos, que varia com o valor dedutível somado (t) e o número de deduções (q).

Na Seção 6 do Anexo A (Normativo) da Norma DNIT 062/2004-PRO, apresentam-se gráficos para cada tipo de defeito e grau de severidade, que relacionam a densidade de defeitos com o valor dedutível (CVD).

Na Figura 45, apresenta-se um modelo de Ficha de Inspeção já preenchida, que exemplifica a determinação do ICP e do conceito a ser dado à qualidade do pavimento de uma determinada amostra.

O procedimento para o preenchimento desta ficha e o cálculo do ICP é apresentado a seguir:

- O somatório dos valores deduzíveis de todos os defeitos e respectivos graus de severidade, existentes na amostra, dará o valor dedutível total;
- Este valor dedutível total deve ser corrigido, determinando-se o valor dedutível corrigido (VDC), sendo esta determinação feita da seguinte maneira:
 - Contam-se inicialmente quantos valores deduzíveis (CVD) são maiores que 5;
 - Esta quantidade de valores acima de 5 é designada pela letra “q”;
 - No gráfico do Anexo C do manual IPR737 (DNIT, 2010), existem curvas para diversos valores de “q”;
 - Entrando no gráfico para o valor de “q” encontrado e com o valor dedutível total, obtém-se o valor dedutível corrigido;
 - O ICP da amostra é a diferença entre 100 e o valor dedutível corrigido.

Figura 45 – Ficha de inspeção de ICP – Exemplo

PAVIMENTO : xxxxxxxx TRECHO: _____ km xx a km yy DATA _____ xx / xx / xxxx

AMOSTRA Nº _____ xx MEDIDA / PLACA (m) _____ c x L

Nº PÁGINAS : _____ xx Nº DE ANEXOS : _____ xx CHEFE DA EQUIPE : _____ xxxxx

ASSINATURA DO ENGº RESPONSÁVEL : _____ X X X

Placa Nº	pista 1	pista 2	TIPOS DE DEFEITOS					
			TIPOS DE DEFEITOS	GRAUS DE SEVERIDADE	Nº DE PLACAS AFETADAS	% DE PLACAS AFETADAS	VALOR DEDUTÍVEL	
1	10 B		1 . Alçamento de placas					
2	10 B		2 . Fissura de canto					
3	1B 13 M	1 B 13 M	3 . Placa dividida					
4	1B 13 M 2 A 10 B	1 B 13 M	4 . Degrau de junta					
			5 . Defeito na selagem das juntas					
			2	B	1	5	5	
			10	B	6	30	5	
5	11A	11A	6 . Desnível pavimento acostamento					
			7 . Fissuras lineares					
			11	A	2	10	6	
7	2 B 10 B		8 . Grandes reparos					
			9 . Pequenos reparos					
			13	M	4	20	29	
8	2 A 10 B		10 . Desgaste superficial					
			15	A	1	5	0	
			18	B	1	5	2	
9	10 B	15 A	VALOR DEDUTÍVEL TOTAL				93	
			VALOR DEDUTÍVEL CORRIGIDO (VDC) q = 4				52	
10	18 B		IPC = 100 - VDC = 100 - 52 = 48 CONCEITO razoável					

O conceito a ser dado à amostra do pavimento em função do ICP é apresentado na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Conceitos dos pavimentos em função do ICP

	Excelente	Muito Bom	Bom	Razoável	Ruim	Muito Ruim	Destruído
CONCEITO							
	100	85	70	55	40	25	10
							0

7.2.5 Avaliação do pavimento

Se o tipo de inspeção utilizado foi em todo o pavimento, o valor do ICP do pavimento é a média aritmética dos valores dos ICP obtidos para as amostras deste pavimento.

Se a inspeção no trecho for por amostragem, podem ocorrer dois casos:

- Se não houver amostras adicionais, o valor do ICP do trecho é a média aritmética dos ICP obtidos para as amostras deste trecho;
- Se houver amostras adicionais inspecionadas, o ICP do trecho é obtido por meio da seguinte fórmula:

$$ICP_t = \frac{N - A}{N} ICP_1 + \frac{A}{N} ICP_2$$

Onde:

ICPt = ICP do trecho;

ICP1 = ICP médio das amostras aleatórias;

ICP2 = ICP médio das amostras adicionais;

N = número total de amostras do trecho;

A = número de amostras adicionais inspecionadas.

7.2.6 Considerações finais

O cálculo do ICP é baseado nas informações contidas na Ficha de Inspeção.

O avaliador, após analisar todas as informações fornecidas pela inspeção visual e pelo cadastro documental da rodovia, pode discordar do conceito atribuído ao trecho, em função do ICP calculado.

Como a avaliação por meio da determinação do ICP é objetiva, sendo o ICP calculado da maneira apresentada neste Manual, deve o avaliador, nesse caso, justificar a alteração do conceito, devidamente consubstanciada.

8

AVALIAÇÃO DE ADERÊNCIA EM PISTAS MOLHADAS

A avaliação da segurança envolve vários aspectos do pavimento, da sinalização, do comportamento humano etc. Quanto ao aspecto do pavimento, além da geometria e irregularidade superficial, é importante avaliar o atrito pneu-pavimento, principalmente em dias de chuva, que envolve a quantificação da resistência à derrapagem que é função da aderência.

Vários fatores colaboram para a aderência pneu-pavimento em pistas molhadas, mas dois são essenciais: a textura superficial da pista e características dos pneus (ranhuras, pressão de inflação, dimensões e tipo). A habilidade do motorista, a geometria da via e as condições gerais do veículo como amortecedores, freios etc., contribuem para evitar acidentes. A segurança em pistas molhadas pode ser considerada como um dos aspectos funcionais de um pavimento, muito embora haja pouca tradição no país de sua avaliação ou medida em rodovias, sendo mais usual em aeroportos. As condições de aderência de pavimentos aeroportuários constituem-se fatores de grande relevância nas avaliações de superfície e na decisão de manutenções, principalmente das pistas de pouso e decolagem.

A hidroplanagem ou aquaplanagem ocorre quando os pneus perdem o contato com o pavimento devido à presença de um filme de água não rompido pelos pneus ou pela textura da pista. Nessa situação os pneus deixam de rolar sobre a superfície e passam a escorregar sobre ela. A manutenção do contato entre as superfícies é essencial, portanto, para evitar a hidroplanagem. Através desse contato pode-se garantir o atrito, que é mobilizado quando uma das superfícies está em movimento em relação à outra. Quando o atrito fica reduzido, pode-se perder o controle da direção e a frenagem também fica prejudicada. Um fator que interfere consideravelmente na redução do atrito é o aumento de velocidade de deslocamento de uma das superfícies (no caso os pneus) em relação à outra (no caso os pavimentos). O contato de um pneu com um pavimento é uma interação complexa, dependendo de fatores como adesão entre a borracha e o pavimento e histerese decorrente da deformação do pneu provocada principalmente pelos agredidos presentes na superfície.

8.1 MICROTTEXTURA E MACROTTEXTURA

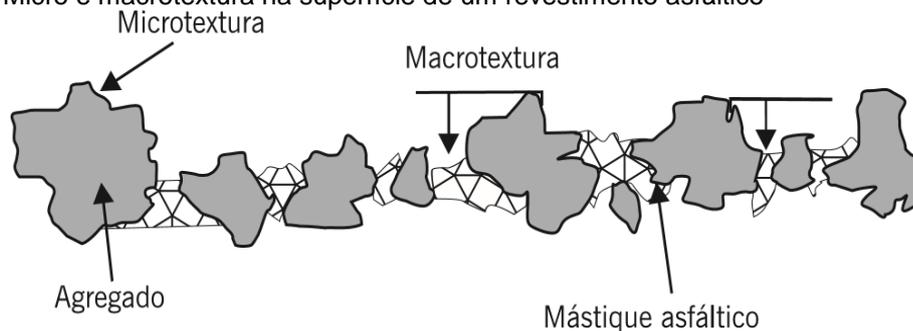
Como a textura do pavimento é um dos aspectos da aderência que os engenheiros rodoviários podem interferir, este é o principal foco das avaliações e medidas desses especialistas. A classificação da textura segundo a PIARC (*The World Road Association*) depende do comprimento de onda ou distância entre dois picos ou depressões na superfície conforme indicado na Tabela 7.

Tabela 7 – Classificação da textura de um pavimento

Classificação da textura	Faixa de comprimento de onda
Microtextura	$\lambda < 0,5\text{mm}$
Macrotextura	$0,5\text{mm} \leq \lambda < 50\text{mm}$
Megatextura	$50\text{mm} \leq \lambda < 500\text{mm}$
Irregularidade	$0,5\text{m} \leq \lambda < 50\text{m}$

A megatextura e a irregularidade interferem na dinâmica veicular e no contato do veículo com o pavimento, afetando também a estabilidade direcional e a aderência em pistas molhadas. No entanto, para a avaliação da textura da superfície no que se refere à aderência são enfocadas a microtextura, dependente da superfície e aspereza dos agregados, e a macrotextura, dependente da rugosidade formada pelo conjunto agregados e mástique. A Figura 46 representa esquematicamente esses dois tipos de textura.

Figura 46 – Micro e macrotextura na superfície de um revestimento asfáltico



A microtextura pode ser avaliada por um equipamento simples como o pêndulo britânico (ASTM E 303). Esse equipamento é munido de um braço pendular cuja extremidade tem uma sapata recoberta de borracha para ser atritada contra a superfície do pavimento umedecida. A Figura 47 mostra o equipamento pêndulo britânico sendo operado para a determinação do VRD – valor de resistência à derrapagem. A Tabela 8 mostra as classes de microtextura dependentes do VRD.

Tem-se recomendado o valor mínimo de 47 para garantir pelo menos uma microtextura medianamente rugosa. A microtextura é uma característica muito importante para rompimento da película de água e promoção do contato pneu-pavimento para baixas velocidades de deslocamento, de até cerca de 40km/h.

A macrotextura pode ser determinada de várias formas, sendo a mais comum pelo ensaio simples de altura média da mancha de areia (ASTM E 965). Os materiais envolvidos nesse teste são de baixo custo e são mostrados na Figura 48(a). A areia deve ser uniforme, arredondada, passante na peneira N° 60 (0,177mm) e retida na peneira N° 80 (0,250mm), com um volume de 25.000mm³.

Tabela 8 – Classes de Microtextura

Classe	Valor de resistência à derrapagem
Insuficientemente rugosa	< 25
	25 ≤ VRD ≤ 31
	32 ≤ VRD ≤ 39
	40 ≤ VRD ≤ 46
Medianamente rugosa	47 ≤ VRD ≤ 54
Rugosa	55 ≤ VRD ≤ 75
Muito rugosa	VRD > 75

Fonte: ABPV, 1999.

Figura 47 – Operação do pêndulo britânico para a determinação do valor de resistência à derrapagem



Fonte: Moura, 2004.

Figura 48 – Equipamentos e passos do ensaio de mancha de areia



Fonte: Moura, 2004.

A areia deve ser espalhada sobre a superfície do pavimento com auxílio de uma base de um pistão circular, que é movimentada em círculos, paralelamente à superfície do pavimento, de modo a distribuí-la de forma homogênea, perfazendo um círculo de areia – Figura 48(b). O espalhamento cessa quando aparecem algumas pontas dos agregados. Mede-se na sequência o diâmetro do círculo de areia com auxílio de uma trena ou régua, em três direções distintas e faz-se a média das três determinações – Figura 48(c).

A altura média de mancha de areia pode ser calculada pela expressão:

$$HS = \frac{4V}{D^2\pi} \quad (10)$$

Onde:

HS = altura média de mancha de areia em mm;

V = volume constante de areia de 25.000mm³;

D = diâmetro médio do círculo de areia em mm.

A classificação da macrotextura é dada pela altura média de mancha de areia segundo critérios mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Classes De Macrotextura

Classe	Altura média de mancha de areia (mm)
Muito fina ou muito fechada	HS ≤ 0,20
Fina ou fechada	0,20 < HS ≤ 0,40
Média	0,40 < HS ≤ 0,80
Grosseira ou aberta	0,80 < HS ≤ 1,20
Muito grosseira ou muito aberta	HS > 1,20

Fonte: ABPV, 1999.

Tem-se recomendado a macrotextura dos pavimentos asfálticos na faixa entre 0,6mm e 1,2mm de altura média da mancha de areia (ABPv, 1999). Abaixo de 0,6mm, a macrotextura passa a ter uma tendência de ser fechada e aumenta o risco de hidroplanagem. Acima de 1,2mm, a textura é muito aberta, causando desgaste excessivo nos pneus, maior consumo de combustível e tendência a maior ruído ao

rolamento. A macrotextura é uma das características mais importantes e que afetam a aderência, principalmente para velocidades de deslocamento acima de 50km/h.

A Figura 49 mostra dois exemplos de mancha de areia em revestimentos asfálticos: um concreto asfáltico de macrotextura fechada, e um microrrevestimento asfáltico a frio com textura aberta.

Um dos fatores que mais interfere no atrito é a macrotextura, portanto, qualquer defeito de superfície que promova o fechamento da textura é prejudicial. A exsudação (EX), vista no item 3, é um dos defeitos mais indesejáveis sob este aspecto. Em contrapartida, o desgaste (D) pode causar melhoria de macrotextura, pois a perda de mástique e a consequente exposição das pontas dos agregados fazem com que os canais formados entre agregados possibilitem maior vazão superficial. O polimento de agregados é prejudicial para a microtextura, tornando a superfície do agregado menos áspera e, portanto, com menor capacidade de ruptura da lâmina d'água.

Figura 49 – Exemplo de mancha de areia em dois tipos de revestimento com macrotexturas distintas



(a) Concreto asfáltico com macrotextura fechada.



(b) Microrrevestimento asfáltico a frio com macrotextura aberta.

Fonte: Moura, 1998.

Um dos fatores que mais interfere no atrito é a macrotextura, portanto, qualquer defeito de superfície que promova o fechamento da textura é prejudicial. A exsudação (EX), vista no item 3, é um dos defeitos mais indesejáveis sob este aspecto. Em contrapartida, o desgaste (D) pode causar melhoria de macrotextura, pois a perda de mástique e a conseqüente exposição das pontas dos agregados fazem com que os canais formados entre agregados possibilitem maior vazão superficial. O polimento de agregados é prejudicial para a microtextura, tornando a superfície do agregado menos áspera e, portanto, com menor capacidade de ruptura da lâmina d'água.

Todos os defeitos que interferem na geometria da via, como afundamentos de trilhas de roda ou localizados, e que resultem no acúmulo de água na superfície do pavimento, são indesejáveis para a aderência, pois aumentam a espessura de película de água, aumentando o risco de hidroplanagem.

8.2 EQUIPAMENTOS MEDIDORES DE ATRITO

Para a medida do atrito, há diferentes métodos e técnicas. Os equipamentos medidores não-estáticos mais comuns são em geral rebocáveis e permitem a medida do atrito de um ou mais pneus que são bloqueados e arrastados (simulação de frenagem), ou ainda com pneus livres para rolares, porém neste caso com certo ângulo em relação à direção de deslocamento. Um exemplo deste último tipo de equipamento é o μ Meter, muito utilizado em pistas de aeroportos e disponível no país para esta finalidade específica – Figura 50.

Tendo em vista que o teste de medida de atrito em condições molhadas é mais severo, a superfície é umedecida artificialmente de forma uniforme e com quantidade de água preestabelecida de modo a formar uma lâmina d'água de espessura padronizada. Por causa da complexidade desse fenômeno, as normas têm especificado dois padrões de pneu (liso ou ranhurado) para os equipamentos medidores de atrito de forma a analisar somente o efeito das diferentes texturas

superficiais e dos agregados que compõem os revestimentos. Emprega-se comumente a velocidade de referência de 60km/h para as medidas de atrito.

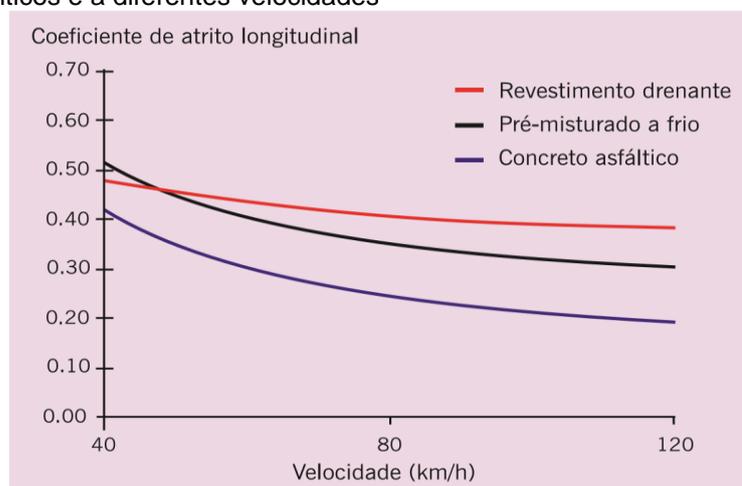
Figura 50 – Exemplo de equipamento de medida de atrito μ Meter



Fonte: M. Paraízo.

Há equipamentos capazes de realizar as medidas de atrito a diferentes velocidades, como é o caso do equipamento francês Adhera que opera com pneu liso e roda bloqueada, sobre lâmina d'água de 1mm de espessura sobre o pavimento e velocidades de 40 a 120km/h. Resultados do coeficiente de atrito longitudinal obtidos com este equipamento são mostrados na Figura 51. Observe-se que nesse caso, o revestimento drenante, tipo camada porosa de atrito (CPA), é aquele que mostra a menor redução do atrito com o aumento da velocidade.

Figura 51 – Resultados de coeficiente de atrito longitudinal medido em três tipos diferentes de revestimentos asfálticos e a diferentes velocidades



Fonte: Modificado de Brosseaud, 2002.

8.3 ÍNDICE DE ATRITO INTERNACIONAL – IFI

Da mesma forma que o IRI para a avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos, para o atrito foi concebido o índice Internacional de Atrito IFI (*International Friction Index*), em 1992 pela PIARC para criar uma escala única, permitindo a comparação de resultados. A concepção deste índice foi resultado de uma extensa pesquisa com 41 equipamentos diferentes, empregados para a investigação de atrito, e as correlações empíricas entre eles foram geradas a partir de 15.000 dados. O procedimento de cálculo do IFI consta na norma ASTM E-1960. O IFI corresponde ao atrito de um veículo de passeio deslocando-se a 60km/h, com pneus lisos e rodas travadas, sobre pavimento molhado.

Vários estudos vêm sendo realizados atualmente para definição de limites aceitáveis para o IFI, tanto em pavimentos asfálticos de rodovias como de aeroportos (Aps *et al.*, 2003; 2004a; 2004b).

9

AVALIAÇÃO DE RUÍDO PROVOCADO PELO TRÁFEGO

Cresce cada vez mais no mundo a preocupação com os danos ao meio ambiente e à qualidade de vida das pessoas. Um aspecto desses problemas é o excesso de ruído gerado nas cidades. Parte desse ruído provém do deslocamento dos veículos e nesse caso o pavimento tem também influência nessa geração. No país esta preocupação ainda é recente, mas espera-se que passe a ser cada vez mais considerada, especialmente nas áreas urbanas. Muitos tipos de misturas asfálticas têm sido projetadas atualmente já voltadas para esta questão. Devido à limitação de espaço, este tópico é somente introduzido neste livro, recomendando-se ao leitor interessado buscar informações sobre o assunto em outras publicações tais como Láo (2004), Láo e Motta (2004), Nascimento *et al.* (2005) entre outros. O excesso de ruído pode provocar doenças no homem, baixar sua capacidade de trabalho, aumentar o estresse etc.

Muitos estudos verificaram a contribuição de alguns tipos de revestimentos de pavimentos na emissão, propagação e absorção do ruído proveniente da interação de sua superfície com os pneumáticos dos veículos automotores que por ele circulam. No exterior esses estudos já se fazem há algum tempo. No país estão se iniciando. São necessários sensores e microfones adaptados para essas medições. Há também uma série de ensaios de laboratório que permitem avaliar a absorção dos ruídos em cada tipo de mistura asfáltica projetada, testando-se corpos-de-prova, e também revestimentos de concreto de cimento Portland.

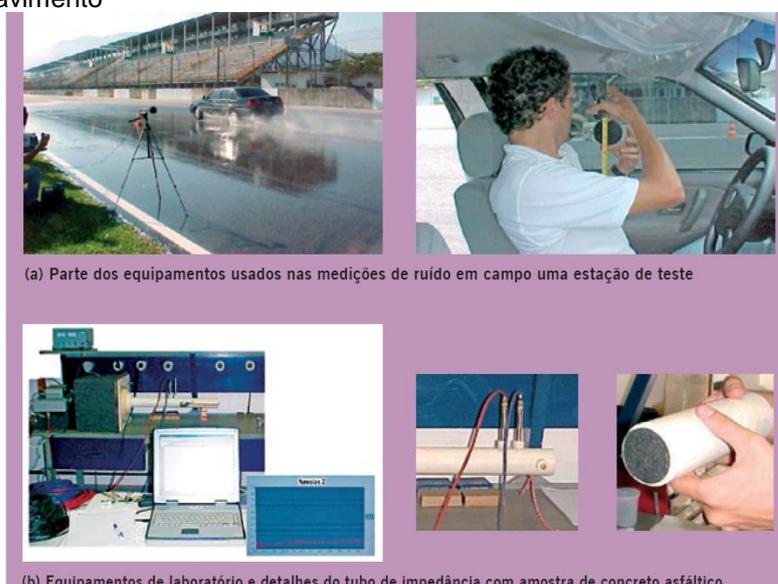
Láo (2004) realizou campanhas de campo e de laboratório de medições do ruído no interior e exterior de um veículo, com ele se deslocando com o motor desligado. Essas medidas foram associadas à textura dos revestimentos asfálticos, à distribuição granulométrica dos agregados, sua disposição nos revestimentos dos pavimentos, a determinações do coeficiente de absorção acústico e à porcentagem de vazios em corpos-de-prova moldados ou extraídos das estações de teste.

A Figura 52 mostra parte do esquema utilizado por Láo (2004) nessas medições de campo de ruído gerado pelo veículo em movimento em pista seca e molhada, externos e internos ao veículo, e parte dos equipamentos usados nas avaliações de absorção acústica de amostras de misturas asfálticas em laboratório em tubos de impedância. A Figura 53 mostra alguns dos resultados obtidos no campo e no laboratório. As medidas são feitas em geral em decibéis.

Todos os estudos mostram a grande influência da textura superficial dos revestimentos nos ruídos gerados no deslocamento dos pneus sobre os pavimentos, da presença ou não de água no contato, da velocidade, do tipo de mistura asfáltica e, em algum grau, do tipo de ligante asfáltico.

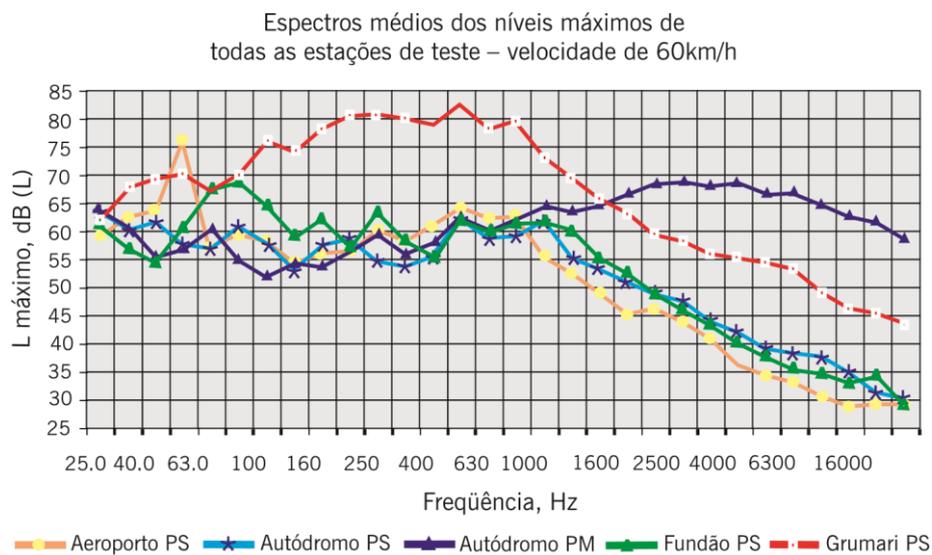
O emprego de técnicas de pavimentação capazes de contribuir com a redução do ruído oriundo das vias de alta velocidade e alto volume de tráfego, que cortam os grandes centros urbanos, traz benefícios econômicos ao poder público, pois poderá reduzir gastos com isolamentos das edificações que apresentam fragilidade acústica de suas fachadas como por exemplo hospitais e repartições públicas de atendimento aos cidadãos, e traz grandes benefícios à saúde da população, além de reduzir o gasto energético devido à possibilidade de se manter as janelas abertas mesmo em moradias próximas a viadutos, autoestradas etc.

Figura 52 – Exemplo de arranjos de conjunto de equipamentos para medições de ruído gerado com a contribuição do pavimento

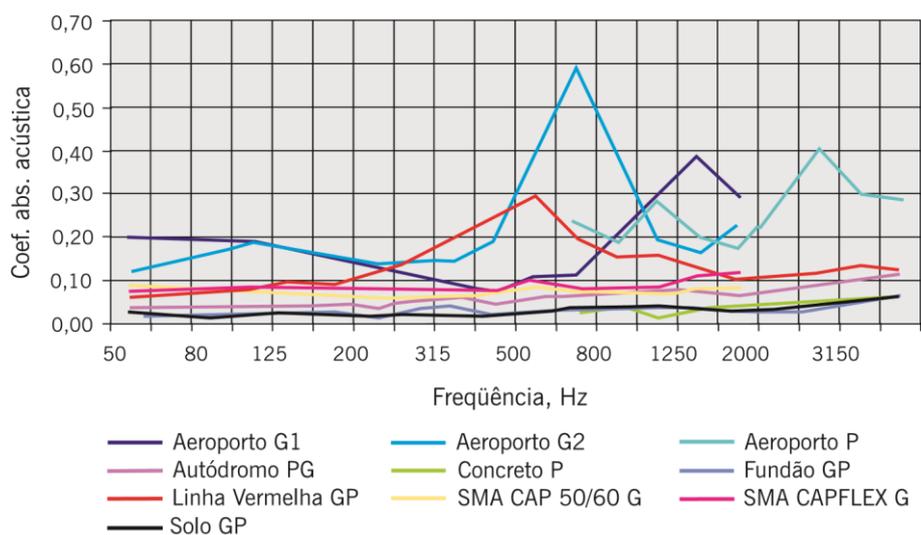


Fonte: Láo, 2004.

Figura 53 – Exemplo de resultados obtidos em medições de ruído em campo e em laboratório



(a) Medições de campo



(b) Medições de laboratório

Fonte: Láo, 2004.

10

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

Os pavimentos são estruturas que em geral não apresentam ruptura súbita, mas sim deterioração funcional e estrutural acumuladas a partir de sua abertura ao tráfego. A parcela estrutural é associada aos danos ligados à capacidade de carga do pavimento e é tratada neste capítulo, enquanto os aspectos funcionais são objeto dos Capítulos 0 a 0. A avaliação de pavimentos tem como conceitos associados:

- **Serventia:** qualidade do pavimento, num determinado instante, quanto aos aspectos para o qual foi construído em relação ao conforto ao rolamento e segurança;
- **Desempenho:** variação da serventia ao longo do tempo (ou do tráfego) de uso do pavimento;
- **Gerência:** administração, gestão e otimização dos recursos aplicada ao planejamento, projeto, construção, manutenção e avaliação dos pavimentos;
- **Restauração:** conjunto de operações destinadas a restabelecer na íntegra ou em parte as características técnicas originais de um pavimento (intervensões); incluem as ações de manutenção denominadas preventivas e reforço;
- **Manutenção preventiva:** operação de correções localizadas que não atingem a maioria da superfície do pavimento, repondo pequena parcela da condição de serventia;
- **Reforço:** operação de restauração onde se aproveita o valor residual da estrutura do pavimento e acrescenta-se nova camada de mistura asfáltica (também dito recapeamento). Atualmente, pode incluir a fresagem de parte do revestimento antigo além da colocação de nova camada estrutural de revestimento ou camadas de reposição de conforto ao rolamento;
- **Reconstrução:** operação de refazer o pavimento, no todo desde o subleito, ou mais comumente atualmente a partir da sub-base por retirada total dos materiais de base e revestimentos antigos e substituição por

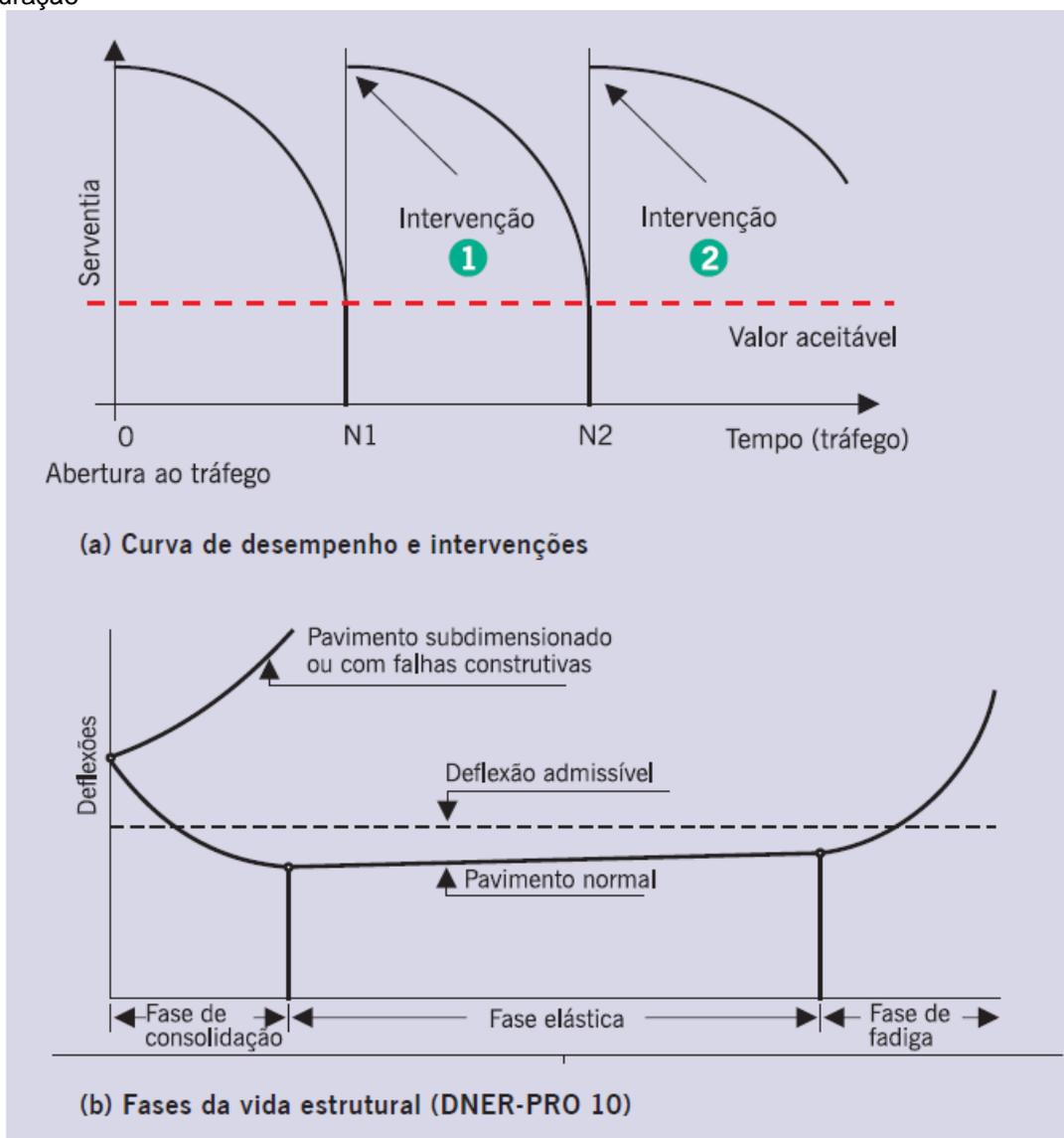
novos materiais ou por reciclagem dos mesmos sem ou com adição de estabilizantes tais como asfalto-espuma, cimento Portland ou cal hidratada. Após a reciclagem constrói-se nova capa asfáltica como revestimento.

Uma forma de se representar uma curva de desempenho de um pavimento ao longo de vários ciclos de restauração pode ser a indicada na Figura 54. O critério de avaliação pode ser funcional ou estrutural, e o nível mínimo aceitável para este parâmetro define o momento de fazer a intervenção corretiva de restauração ou reforço.

A avaliação funcional, incluindo a segurança, como visto nos capítulos anteriores, tem como palavras-chave: conforto ao rolamento, condição da superfície, interação pneu-pavimento, defeitos e irregularidades.

A avaliação estrutural, por sua vez, está associada ao conceito de capacidade de carga, que pode ser vinculado diretamente ao projeto do pavimento e ao seu dimensionamento. Os defeitos estruturais resultam especialmente da repetição das cargas e vinculam-se às deformações elásticas ou recuperáveis e plásticas ou permanentes. As deformações elásticas são avaliadas por equipamentos próprios chamados genericamente de defletômetros por medirem os deslocamentos verticais nomeados como “deflexão” do pavimento. Elas são responsáveis pelo surgimento da maioria dos trincamentos ao longo da vida do pavimento, e que podem levar à fadiga do revestimento. As deformações plásticas são acumulativas durante os anos de vida de um pavimento e resultam em defeitos do tipo afundamento localizado ou nas trilhas de roda, medidos por meio de treliça normatizada, mostrada no Capítulo 0

Figura 54 – Representações esquemáticas de curvas de desempenho de um pavimento e etapas de restauração



10.1 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

A avaliação estrutural de um pavimento pode ser feita por métodos: destrutivo, semidestruutivo ou não-destrutivo.

Um método destrutivo é aquele que investiga a condição estrutural de cada camada que compõe o pavimento por abertura de trincheiras ou poços de sondagem, permitindo recolher amostras de cada material até o subleito e realizar ensaios de capacidade de carga in situ. Pela sua própria natureza destrutiva só pode

ser empregado em alguns poucos pontos selecionados como representativos de cada segmento a ser avaliado.

A Figura 55 mostra exemplos de extração de corpos-de-prova e de poços de sondagem em pavimentos em uso para avaliação das camadas. Com a extração de amostras do pavimento é possível identificar os tipos de materiais das camadas e subleito, as espessuras de camadas e fazer coleta de amostras para ensaios de laboratório. É possível determinar a massa específica e a umidade de cada camada para comparar com as condições de umidade ótima e massa específica máxima dos ensaios de compactação, e assim, avaliar eventuais excessos de umidade ou deficiência de grau de compactação. A retirada de corpos-de-prova do revestimento asfáltico, por sonda rotativa, permite avaliar o grau de envelhecimento do ligante, entre outras observações possíveis.

Um método semidestrutivo é aquele que se vale de aberturas menores de janelas no pavimento que permitam utilizar um instrumento portátil de pequenas dimensões para avaliar a capacidade de carga de um pavimento, tal como o uso de cones dinâmicos de penetração – DCP (Trichês e Cardoso, 2001; Trichês et al., 2004). A Figura 56 mostra um exemplo dessa técnica expedita de avaliação da capacidade de carga de subleitos e camadas de solo fino do pavimento. A aplicação deste ensaio só permite em geral correlação com o ISC dos materiais, com certa precisão. Atualmente também começam a ser usados, com mais propriedade, equipamentos portáteis para avaliação expedita do módulo de elasticidade do pavimento, através de pulsos, aplicados na superfície, e medições do retorno dos mesmos, como o exemplo mostrado na Figura 56 a direita.

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

A cada passagem de roda o pavimento sofre um deslocamento total que tem duas componentes:

1. Deformação elástica que resulta na flexão alternada do revestimento, chamada por convenção de deflexão, cuja medida é a principal forma de avaliação estrutural de um pavimento em uso.
2. Deformação permanente que resulta no afundamento de trilha de roda cuja medida também é um critério de definição da vida útil estrutural e funcional de um pavimento visto que, a partir de certo valor, pode interferir na condição de conforto e segurança do tráfego.

Figura 55 – Exemplos de extração de corpos-de-prova e de poços de sondagem em pavimentos em uso

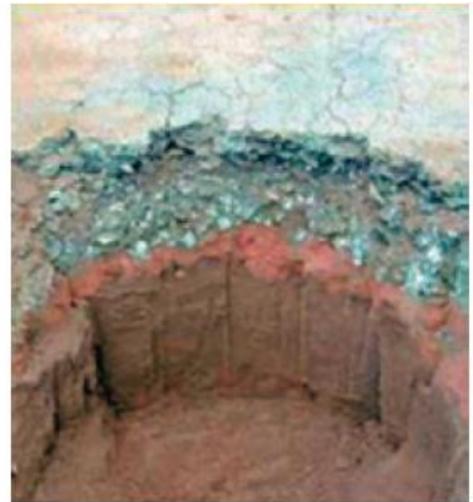


Foto: Dynatest, 2004



Figura 56 – Exemplo de equipamentos DCP de avaliação estrutural expedita de subleitos e camadas de solo



Figura 10.4 Equipamento de avaliação expedita do módulo elástico do pavimento
(Foto Abdou, 2005)

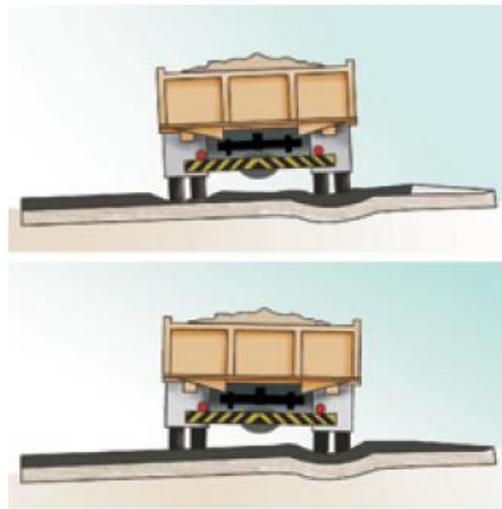
Quando se mede o deslocamento elástico em vários pontos a partir da carga tem-se a denominada bacia de deflexão ou linha de influência da carga sobre um ponto do pavimento (DNER-ME 061/94).

A Figura 57(a) mostra o resultado da repetição das deformações elásticas num pavimento de revestimento de concreto asfáltico como trincamento generalizado e interligado, chamado de “couro de jacaré”. Já na Figura 57(b) observa-se o resultado do acúmulo das deformações permanentes, que podem ocorrer tanto no revestimento quanto no subleito ou como contribuição de todas as camadas do pavimento. As deformações permanentes são medidas por treliça padronizada com 120cm de base.

Figura 57 – Defeitos estruturais de trincamento e afundamento por repetição de cargas



(a) Fadiga



(b) Deformação permanente

10.2 EQUIPAMENTOS DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL NÃO - DESTRUTIVA

Os equipamentos utilizados em avaliações não-destrutivas (NDT – *nondestructive deflection testing*) podem ser divididos em:

1. Carregamento quase-estático: ensaio de placa e viga Benkelman, por exemplo.
2. Carregamento vibratório: dynaflect, por exemplo.
3. Carregamento por impacto: *falling weight deflectometer* (FWD).

Há bastante diferença entre os valores numéricos de avaliação estrutural realizados utilizando-se cada um desses tipos de equipamentos, que podem ser usados para levantamentos da condição de pavimentos para sistema de gerência em nível de rede, para análises de rotina ou para projeto de reabilitação. Todos os equipamentos devem ser constantemente calibrados por processos específicos e seguem rotinas de aplicação determinada pelo tipo de carregamento (ASTM D 4695).

Os equipamentos de medição de deflexão do pavimento – defletômetros – mais utilizados no país são de duas gerações bastante distintas:

- O primeiro a ser desenvolvido, na década de 1950, foi a viga Benkelman, sendo o engenheiro do Departamento de Transportes da Califórnia, A. C Benkelman, o seu criador. Foi introduzido no Brasil em 1962 (Carneiro, 1965);
- O segundo grupo é dos equipamentos de peso batente (*falling weight deflectometer*) – FWD – criados na década de 1980. Foi introduzido no Brasil em 1994 (DNER, 1998).

Os dois tipos de equipamentos são empregados no país para avaliação estrutural. Com esses equipamentos são medidos os seguintes parâmetros:

1. Deflexão máxima: deslocamento sob o centro da carga (FWD) ou sob o centro das rodas duplas de um eixo simples (viga Benkelman), sendo a deflexão normalmente expressa em 10^{-2} mm (d_0).
2. Raio de curvatura: círculo ou arco de parábola que passa por dois pontos da deformada (viga Benkelman), normalmente sob a carga e a 25cm do centro da mesma (d_0 e d_{25}).

Deformada, bacia de deformação ou bacia deflectométrica: medidas dos deslocamentos elásticos ou recuperáveis em vários pontos a partir do centro do carregamento (d_0 , d_{25} , d_{50} etc.).

Como complemento à avaliação estrutural não-destrutiva de pavimentos podem ser usados equipamentos como o geo-radar, munido de radar para estimar as espessuras das camadas ao longo da via (Gonçalves e Ceratti, 1998; ASTM D 4748). A seguir são descritos os equipamentos mencionados.

10.3 VIGA BENKELMAN (VB)

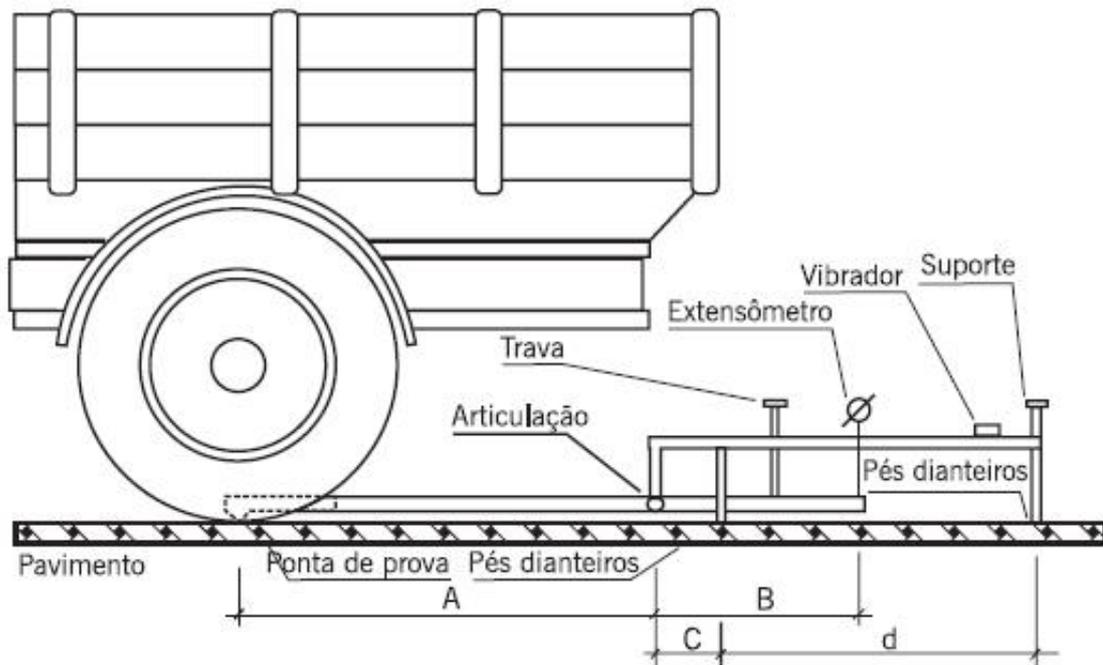
A viga Benkelman consiste de um equipamento muito simples que necessita de um caminhão com eixo traseiro simples de roda dupla carregado com 8,2t, para aplicar a carga sob a qual será medida a deformação elástica. A Figura 58 mostra um esquema desse equipamento com o caminhão (DNER-ME 24/94) e um exemplo de medida em campo.

O ensaio completo consiste em: (i) colocar a ponta de prova da viga Benkelman entre os pneus da roda geminada traseira do caminhão, colocando-a exatamente sob o seu eixo; (ii) fazer uma leitura inicial do extensômetro que se situa a uma distância segura para o operador sobre o braço móvel da viga – leitura L_i ; (iii) fazer o caminhão se afastar lentamente até 10m de distância da ponta de prova ou até que o extensômetro não acuse mais variação da leitura; (iv) ler o extensômetro – leitura L_f . (Figura 59).

A leitura final corresponde ao descarregamento do pavimento e todo o deslocamento recuperado é associado à deformação elástica do pavimento (deflexão). Calcula-se a deflexão d_0 pela expressão (11), sendo K a constante da viga dada pela relação entre o braço maior e o braço menor, articulados:

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

Figura 58 – Esquema da viga Benkelman (DNER-ME 24/94) e exemplo de medida em campo



(a) Esquema da viga Benkelman (DNER ME 24/94)



(b) Medida com viga Benkelman em campo

Figura 59 – Passos do ensaio com a viga Benkelman

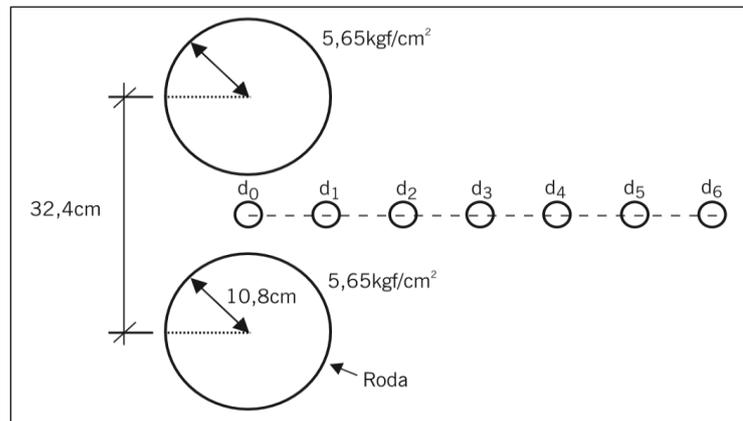


A Figura 60 mostra o esquema de medidas quando se deseja obter a bacia de deflexão com a viga Benkelman. É um procedimento trabalhoso e de pouca precisão quando realizado com a viga convencional, mas hoje é possível encontrar no país vigas automatizadas, nas quais a leitura dos deslocamentos se faz com medidores elétricos tipo LVDT. Todas as leituras intermediárias devem ser referidas à leitura final, para o cálculo da deflexão no ponto considerado.

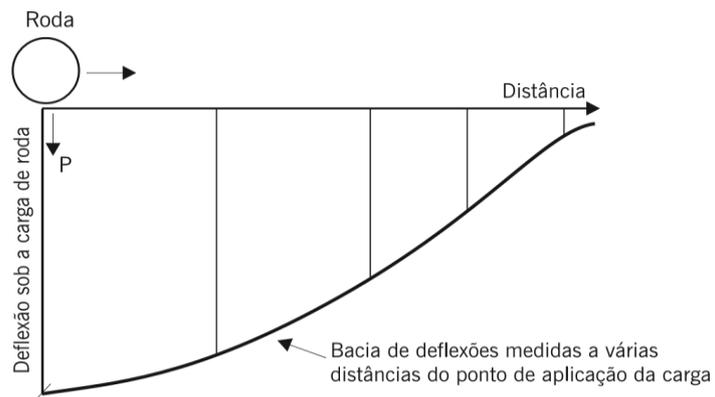
Na maioria das vezes medem-se somente a deflexão máxima d_0 e mais um ponto, em geral a 25 cm. do inicial (d_{25}), para cálculo do chamado raio de curvatura, que representa um arco de parábola que passa pelos dois pontos. A Figura 61 mostra o esquema deste cálculo (DNER-ME 24/94). A partir da expressão (12), indicada para cálculo do raio de curvatura R com as deflexões em centésimos de milímetro, obtém-se o raio em metros:

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

Figura 60 – Esquema de leituras com a viga Benkelman para obtenção da deformada

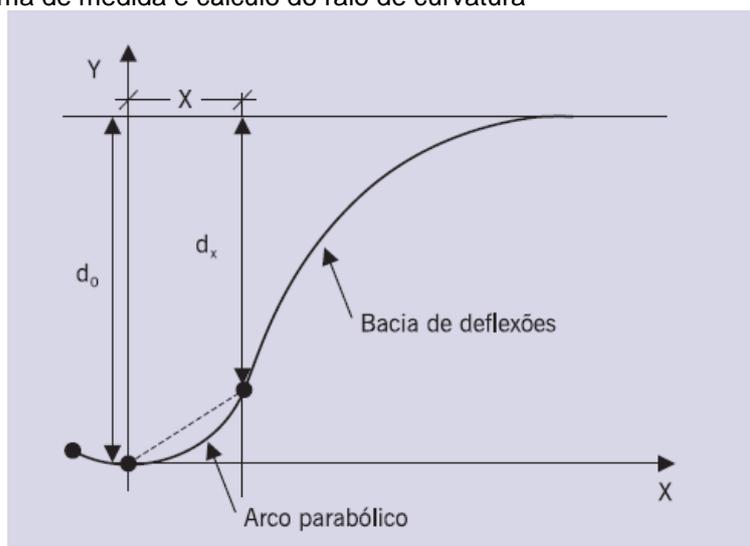


(a) Em planta



(b) Resultado

Figura 61 – Esquema de medida e cálculo do raio de curvatura



10.3.1 Equipamento por impacto *falling weight deflectometer* (FWD)

Os equipamentos mais atuais de medida dos deslocamentos elásticos de um pavimento são os de impacto por queda de um peso suspenso a certa altura, sobre amortecedores que comunicam o choque a uma placa metálica apoiada sobre o pavimento no ponto de leitura da deflexão máxima – Figura 62.

As normas DNER-PRO 273 e ASTM D 4695 descrevem o uso desse tipo de equipamento. O equipamento é totalmente automatizado, sendo rebocado por um veículo utilitário leve que carrega parte do sistema de aquisição de dados feito por computador, conectado aos sensores instalados na parte rebocada, que é o defletômetro propriamente dito. O ensaio consiste em se aplicar a carga de impacto e ler os deslocamentos em vários sensores colocados ao longo de um suporte em posições convenientemente escolhidas para se obter a linha de deslocamentos. Note-se que essa é uma diferença importante entre o FWD e a viga Benkelman. Outra diferença marcante está na forma de aplicação da carga: dinâmica no FWD e quase estática na VB.

Embora ambos os tipos de defletômetros sejam preparados para medir os deslocamentos elásticos, pelas diferenças de concepção entre eles, as deflexões

não são iguais, nem existe uma correlação simples e universal entre medidas realizadas com o FWD e a VB. Em cada tipo de pavimento pode-se obter certa correlação entre esses valores, porém não generalizável.

A Figura 63 mostra exemplos de FWD existentes no país, sendo de duas marcas, e tendo diferenças entre eles como: tipo de amortecedor, placas segmentadas ou não, tipo de sensor de medida de deslocamentos, forma do pulso de carga etc. (Macêdo, 1996). Por serem equipamentos mais sofisticados exigem, também, calibrações periódicas e especializadas. Lamentavelmente, embora já se tenha no país cerca de 10 equipamentos FWD, não existe nenhum centro de calibração como em outros países. Um exemplo de centro de calibração de FWD está na Figura 64 (Fonte: DOT Pensilvânia).

A

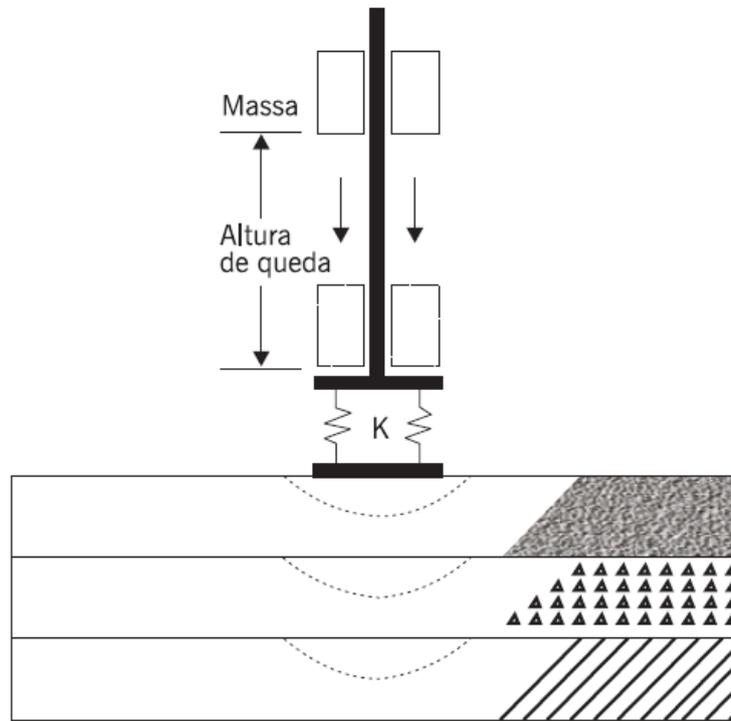
Figura 65 mostra o esquema de medidas da deformada com o FWD e o esquema das leituras internas dos sensores.

As vantagens do FWD em relação à VB convencional são:

- acurácia nas medições;
- possibilidade de aplicação de vários níveis de carga;
- maior produtividade (mais pontos levantados por dia);
- ensaio não influenciado pelo operador;
- registro automático de temperatura e de distâncias dos pontos de ensaio.

Algumas desvantagens do FWD são: custo do equipamento, necessidade de calibrações mais sofisticadas, diferenças de resultados entre marcas.

Figura 62 – Esquema de um defletômetro de impacto





(a) Vista geral do FWD Dynatest



(b) Detalhe do prato de aplicação de carga e da barra de sensores



(c) FWD - KWAB



(d) Detalhe do sistema de carregamento

Figura 63 – Exemplos de modelos de FWD



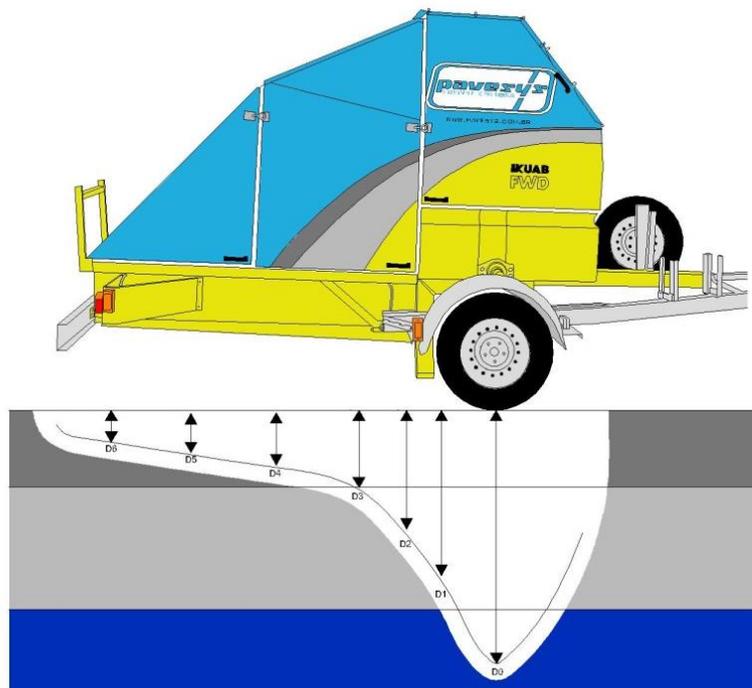


Figura 64 – Exemplo de modelo de centro de calibração de FWD



Fonte: Centro Regional de Calibração do Norte dos EUA.

Figura 65 – Esquema de medidas com o FWD



Fonte: www.pavesys.com.br.

Tanto o FWD quanto a VB podem ser usados no controle da capacidade de suporte das camadas do pavimento desde a sua construção, o que vem sendo cada vez mais usado no país com muitas vantagens (Soares et al., 2000).

A ordem de grandeza das deflexões dos pavimentos asfálticos varia muito com as características da estrutura, o tipo de revestimento, o nível de trincamento, as condições climáticas etc. Mas como valor típico pode-se indicar de 30 a 50 ($\times 10^{-2}$ mm) para um pavimento com revestimento de concreto asfáltico e base granular em boa condição estrutural, e da ordem de 80 ($\times 10^{-2}$ mm) para um pavimento com revestimento de tratamento superficial.

A vantagem de se poder medir com acurácia a bacia deflectométrica do pavimento é utilizá-la para estimar os módulos de elasticidade das camadas, o que permite uma avaliação estrutural mais adequada de cada segmento e o cálculo do reforço estrutural, se necessário, pelos princípios da mecânica dos pavimentos. Isto é possível através da técnica chamada de retroanálise, que será discutida, sucintamente, a seguir.

10.4 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL EM PAVIMENTOS RÍGIDOS

A avaliação das condições estruturais de um pavimento rígido deve ser feita por meio de levantamentos de dados sobre o projeto e a execução deste pavimento, pela determinação ou avaliação do estado em que se encontra a sua superfície de rolamento, pelo levantamento dos defeitos estruturais que apresentam e, finalmente, pelos resultados dos ensaios realizados tanto nos materiais como na própria estrutura, quer da fundação como do pavimento ou do conjunto fundação-pavimento.

Com esta avaliação deverá ser definido o tipo de reabilitação a ser adotado.

Os procedimentos a serem adotados na avaliação das condições estruturais do pavimento e de sua fundação são descritos a seguir.

Compreende o levantamento de dados e de todas as informações possíveis sobre o pavimento, incluindo a sua avaliação.

Nesta fase identificam-se as restrições existentes na escolha de cada procedimento de reabilitação.

10.4.1 Dados a serem levantados

- a) Condição global (estrutural e funcional) do pavimento e do acostamento;
- b) Informações sobre o projeto e a construção do pavimento;
- c) Materiais componentes da estrutura;
- d) Tráfego solicitante, com a distribuição e a frequência das cargas por eixo;
- e) Condições climáticas;
- f) Condições do sistema de drenagem do pavimento;
- g) Condições de segurança;
- h) Outros julgados necessários.

No processo de levantamento e avaliação dos dados, recomenda-se que sejam adotadas as seguintes etapas:

- a) Coleta de dados de escritório - se possível, deverão ser obtidas informações referentes a projeto, construção e manutenção pesada, materiais utilizados, tráfego solicitante, condições climáticas e dados de desempenho do pavimento;
- b) Levantamento preliminar dos dados de campo - compreende o levantamento de defeitos, condições de drenagem, levantamento subjetivo da regularidade superficial, alternativas de controle de tráfego e condições de segurança da rodovia;
- c) Avaliação preliminar dos dados levantados e definição da necessidade de coleta de dados adicionais - por meio dessa avaliação serão selecionadas as alternativas possíveis de reabilitação e definida a necessidade de coleta de dados adicionais;
- d) Levantamento complementar dos dados de campo - compreende um levantamento mais detalhado dos dados obtidos inicialmente e a realização de trabalhos específicos, tais como extração de corpos-de-prova, medição da regularidade superficial e da resistência à derrapagem, de deslocamentos verticais, verificação da eficiência do sistema de drenagem etc;
- e) Ensaio de laboratório - são realizados a seguir os ensaios de amostras extraídas do pavimento e da fundação, tais como resistência mecânica, granulometria, massa específica etc;
- f) Avaliação final dos dados - compreende a avaliação estrutural e funcional do pavimento; para tanto, se for necessário, outros dados deverão ser levantados;
- g) Compilação final dos dados de campo e de laboratório, preparação e elaboração do relatório final.

O levantamento dos dados e a avaliação destes deverão ser feitos de acordo com a sistemática modelo da Figura 66 (*“Modelo para levantamento de dados e avaliação de pavimentos rígidos, tendo em vista a escolha de procedimentos de reabilitação da rodovia”*).

A quantidade de dados e de ensaios irá depender da extensão e importância da rodovia e dos recursos disponíveis para esses estudos.

Figura 66 – Modelo para levantamento de dados e avaliação de pavimentos rígidos, tendo em vista a escolha de procedimentos de reabilitação da rodovia

1) Avaliação Estrutural

• Defeitos Existentes

- nenhum defeito ou poucos defeitos associados à capacidade de carga do pavimento (defeitos estruturais)
- incidência moderada de defeitos associados à capacidade de carga do pavimento (defeitos estruturais)
- grande incidência de defeitos associados à capacidade de carga do pavimento (defeitos estruturais)

• Deficiência estrutural do pavimento (perda da capacidade de suportar as cargas solicitantes)

- Sim Não

2) Avaliação Funcional

• Regularidade superficial

- Muito boa Regular Muito ruim
 Boa Ruim

• Índice de Serventia atual (PSI)/taxa de serventia atual (PSR)

- valor _____
- conceito _____

• Resistência à derrapagem

- Adequada Questionável Insatisfatória

3) Variação Observada nas Avaliações Efetuadas

• Ocorre variação sistemática ao longo da rodovia

- Sim Não

• Ocorre variação localizada ao longo da rodovia

- Sim Não

10.5 NOÇÕES DE RETROANÁLISE

O entendimento do pavimento como uma estrutura que forma um sistema em camadas que trabalham solidariamente, permite compatibilizar os materiais em termos de rigidez. Aplicando-se os princípios da mecânica dos pavimentos (Medina e Motta, 2005) é possível fazer uma avaliação estrutural mais adequada de todas as camadas e do subleito.

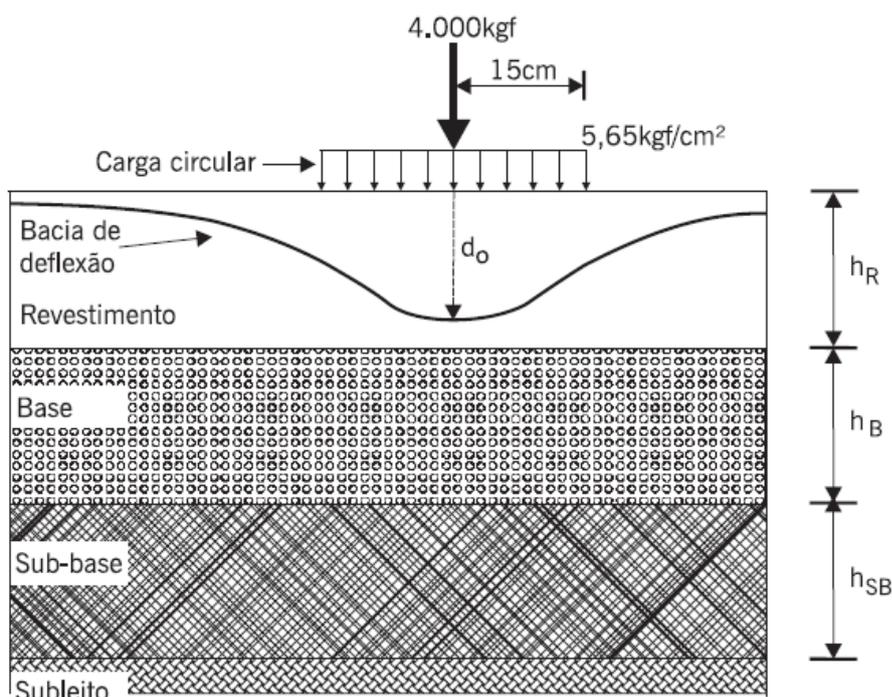
Para se aplicar o cálculo de tensões e deformações para um dimensionamento apropriado do reforço do pavimento, é necessário se conhecer a rigidez de todas as camadas do pavimento e do subleito. Como a maioria dos pavimentos, em uso, foi dimensionada pelo método do CBR (ou ISC), não se conhece a princípio essa característica dos materiais em cada trecho. Mesmo se conhecendo os valores dos módulos de resiliência da época do projeto e construção, eles tendem a ser variáveis com o tempo e o uso e, em alguns casos, pelo clima. Uma forma de resolver esse problema seria por meio da avaliação destrutiva por abertura de poços, que permitam coletar amostras para determinação destes parâmetros em laboratório. Mas isto é um serviço lento e causa transtornos adicionais ao pavimento.

Surgiu então um método que permite inferir os módulos de elasticidade das camadas do pavimento e do subleito por interpretação das bacias de deformação – a retroanálise. Usa-se aqui o termo módulo de elasticidade por ser nesse caso um parâmetro retrocalculado e não determinado em laboratório por meio do ensaio de carga repetida, como é o caso do módulo de resiliência.

A Figura 67 indica os elementos necessários para entender o conceito do método de retroanálise de pavimentos. Tendo-se o conhecimento da carga externa aplicada para a qual foi obtida a bacia deflectométrica e, conhecendo-se as características básicas dos tipos de materiais presentes em cada camada e suas espessuras, é possível inferir os módulos de elasticidade a partir das deflexões obtidas. Esta especificação é feita considerando-se uma determinada combinação de módulos das camadas de modo a fazer coincidirem a bacia teórica calculada e a

bacia de campo determinada. Esta última pode ser obtida a partir de ensaios não-destrutivos, utilizando-se equipamentos como a viga Benkelman, universalmente usada, ou o FWD, instrumento capaz de obter determinações mais acuradas (Macedo, 1996; Albernaz, 1997; Villela e Marcon, 2001; Nóbrega, 2003).

Figura 67 – Esquema dos dados necessários para se fazer uma retroanálise de pavimento



Fonte: Nóbrega, 2003.

A norma ASTM D 5858 apresenta uma diretriz de entendimento desta técnica e cuidados na sua interpretação. Não se tem ainda norma correspondente no país, mas o Manual de reabilitação do DNER (1998) comenta a retroanálise.

Os dados de entrada do processo de retroanálise são: a configuração do carregamento, a bacia deflectométrica, seção-tipo do pavimento, coeficientes de Poisson e faixas de valores modulares para cada camada da estrutura.

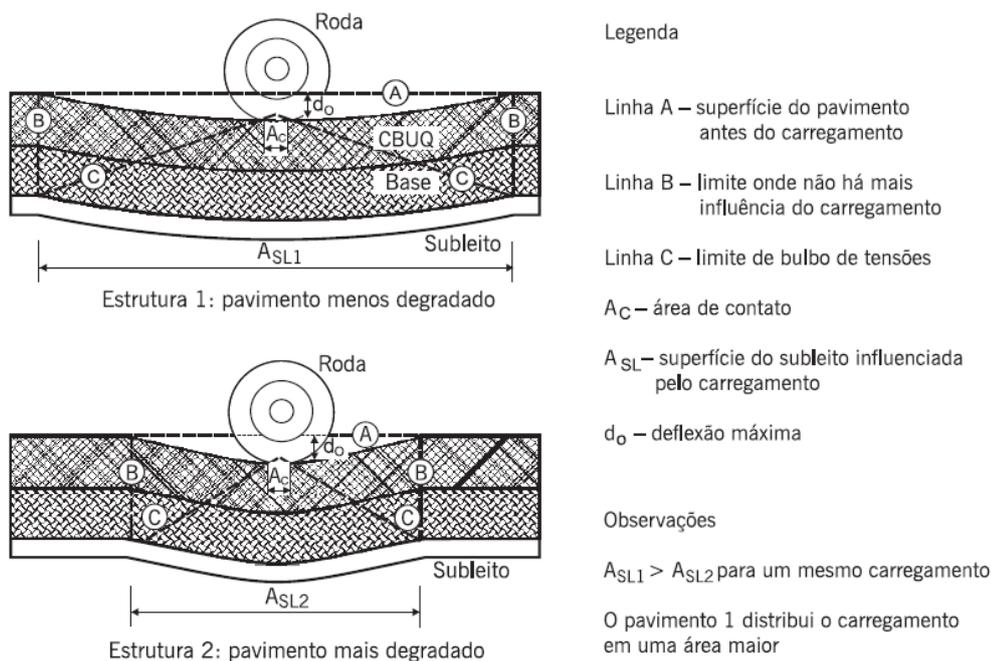
Em relação aos procedimentos de avaliação estrutural e projeto de reforço de pavimentos flexíveis adotados pelo DNER (PRO-10/79 – procedimento A, PRO-

11/79 – procedimento B, PRO-159/85 e PRO-269/94), a retroanálise dos módulos de elasticidade de um pavimento apresenta as seguintes vantagens:

- Possibilita a obtenção dos módulos nas condições de campo;
- Minimiza o número de sondagens para determinação das espessuras e coletas de amostras para determinação dos parâmetros desejados, que são de difícil reprodução em laboratório, além de serem onerosas, perigosas e demoradas;
- Os ensaios não-destrutivos são menos onerosos e menos demorados do que os ensaios destrutivos;
- Possibilita o uso pleno da bacia deflectométrica, não só a deflexão máxima (d_0) como nas técnicas de avaliação estrutural preconizadas pelo DNER.

Os métodos tradicionais fazem a caracterização estrutural de um pavimento a partir dos valores individuais de deflexão máxima, considerando-os isoladamente. A deflexão máxima possibilita a determinação dos locais onde o pavimento apresenta variações nas deformações verticais reversíveis quando do carregamento imposto pelo tráfego. Entretanto, um mesmo valor de deflexão reversível máxima pode representar inúmeros níveis de qualidade estrutural, tanto mais crítica quanto mais concentrada a bacia, dependendo também do tipo da estrutura. Ou seja, pode-se obter uma mesma deflexão máxima para diversas combinações estruturais, conforme ilustra a Figura 68.

Figura 68 – Diferentes formas de bacia deflectométrica indicam diferentes capacidades de carga para a mesma deflexão máxima



Fonte: Nóbrega e Motta, 2003.

Nos procedimentos A e B do DNER é recomendado o levantamento da bacia deflectométrica, em poucos pontos (dois ou três pontos em 1km de extensão), mas não é feito o uso pleno desta determinação. O procedimento B incorpora esses dados no cálculo do raio de curvatura, o que subestima a potencialidade da bacia deflectométrica que, usada de forma adequada, fornece parâmetros bastante úteis para a avaliação estrutural completa, que engloba a estimativa dos módulos de elasticidade das camadas que compõem o pavimento.

A sistemática de retroanálise se justifica por permitir:

- Inferir os módulos de elasticidade “E” nas condições de campo;
- Eliminar ou minimizar coleta de amostras;
- Caracterizar com rapidez as camadas em termos de elasticidade;
- Verificar a condição estrutural de cada camada e subleito.
- As desvantagens de obtenção dos módulos de elasticidade por retroanálise são:

- A sensibilidade do cálculo dos valores dos módulos de elasticidade aos valores das bacias deflectométricas que possuem uma imprecisão inerente aos levantamentos de campo;
- A confiabilidade dos instrumentos e dos procedimentos operacionais de medição das deflexões deve ser continuamente verificada;
- Os módulos de elasticidade retroanalizados não representam necessariamente os módulos reais dos materiais das camadas e sim “módulos equivalentes” (igualdade depende de diversos fatores, como por exemplo número de camadas, grau de trincamento, homogeneidade de material e regularidade de espessura);
- O conjunto de módulos retroanalizados não é único, depende do programa utilizado para obtê-los, das hipóteses simplificadoras, dos níveis de ajustes atingidos etc.

Esta idéia não é nova e já existem métodos de retroanálise desde a década de 1970. Porém, com o advento dos equipamentos automatizados tipo FWD e com o avanço da computação houve um acelerado desenvolvimento dessa tecnologia, hoje fartamente disponível em várias versões de softwares.

Os programas se dividem em simplificados e iterativos. Entre os iterativos, todas as empresas e instituições que possuem FWD dispõem de um método de retroanálise associado, por exemplo, o LAYMOD. É possível também se conseguir na internet muitos desses programas.

Entre os programas simplificados brasileiros tem sido utilizado o RETRAN2CL, desenvolvido por Albernaz (1997) que se baseia nas seguintes hipóteses e simplificações, entre outras:

- Modelagem como um sistema ideal elástico de duas camadas: (i) pavimento, e (ii) subleito;
- Materiais da estrutura de pavimento são considerados sem peso, homogêneos e isotrópicos;
- Pavimento tem uma espessura uniforme e uma largura infinita; o subleito tem espessura infinita;

- Coeficiente de Poisson é 0,5 para o pavimento e o subleito;
- Aplicação em pavimento com espessura menor que o raio da placa de carga não é confiável.

A Figura 10.16 mostra uma das telas do programa RETRAN2CL onde é possível observar o ajuste entre a bacia medida e a calculada e os módulos retroanalisados do pavimento e do subleito. Com esses valores é possível avaliar a capacidade estrutural do pavimento e calcular a eventual espessura de reforço necessária para o trecho avaliado.

A retroanálise não serve somente para avaliação estrutural e projeto de reforço, já tendo sido usada para o desenvolvimento de método de dimensionamento de pavimentos novos de vias de baixo volume de tráfego (Alvarez Neto, 1997; Alvarez Neto et al., 1998). Nos referidos trabalhos, a retroanálise foi usada na estimativa de módulos de trechos já implantados e serviu de calibração do método de dimensionamento proposto. Além disso, a retroanálise é recomendada como forma de estimar o módulo de trabalho do subleito (“para grandes extensões, o levantamento in situ torna-se mais econômico que a realização de uma campanha de ensaios para extração, coleta e ensaios de amostras de solos”, p. 152, Alvarez Neto, 1997).

Os dados da retroanálise podem contribuir para a elaboração de projetos mais confiáveis, para pavimentos mais duráveis, representando um ganho de tempo nos projetos e minimizando a coleta de amostras. A retroanálise é o procedimento de projeto de reforço que mais evoluiu no momento no mundo.

É fundamental que os procedimentos de retroanálise de bacias deflectométricas sejam claramente compreendidos para que o projetista e o contratante conheçam as vantagens e as limitações da modelagem utilizada. Há, ainda, a necessidade de balizar os programas e procedimentos de retroanálise pelos ensaios de laboratório ou faixas de valores de módulos consistentes.

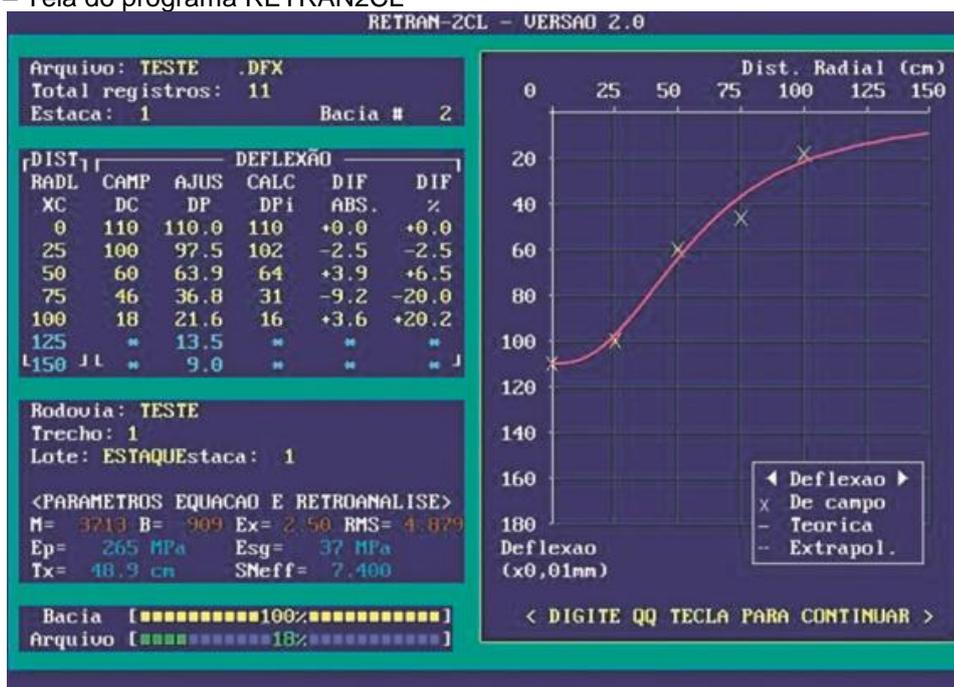
No caso de um trecho homogêneo de pavimentos, têm-se em geral medidas de bacias em várias seções ou estacas intermediárias. Uma questão que se coloca

é: (i) deve-se fazer a retroanálise em todos os pontos levantados, para em seguida obter a média dos módulos retroanalizados, ou então (ii) deve-se obter uma bacia média e fazer somente uma retroanálise por trecho? A primeira hipótese sempre é a melhor, porém é muito trabalhosa e consome bastante tempo de análise. Mostra-se que é possível chegar a resultados adequados definindo duas curvas correspondentes à curva média mais ou menos um desvio padrão, e assim fazer a retroanálise obtendo-se valores próximos da análise ponto a ponto (Nóbrega et al., 2003).

10.6 SIMULADORES DE TRÁFEGO

Os simuladores de tráfego são grandes equipamentos de campo que permitem fazer importante avaliação estrutural de seções de pavimento, para determinação de vida de fadiga em condições muito mais próximas da situação real de condições de tráfego e de materiais do que os ensaios de laboratório vistos no Capítulo 6, mas de forma acelerada em relação ao desempenho.

Figura 69 – Tela do programa RETRAN2CL



Fonte: Albernaz, 1997.

Existem vários tipos desses equipamentos que consistem de forma geral em fazer atuar uma ou duas rodas de caminhão sobre uma curta seção do pavimento a ser testado, por ciclos de carga contínuos durante várias horas por dia. Assim, reproduz-se em curto espaço de tempo o número de passagens de eixos previstos no projeto da estrutura ensaiada.

Assim é possível testar novos materiais e métodos de dimensionamento, entender o comportamento de distintos perfis de pavimentos e concluir sobre eficiências de técnicas de restauração, por exemplo.

No país há três tipos de simuladores de tráfego em atividade:

- O primeiro instalado foi o simulador circular do IPR/DNER em 1980 no Rio de Janeiro (Silva, 2001), mostrado na Figura 70(a). A concepção desse simulador é baseada no princípio do simulador francês de pista do LCPC instalado em Nantes, apresentado na Figura 70(b);
- O segundo instalado no país foi o simulador linear da UFRGS/DAER-RS em 1995 em Porto Alegre (Núñez, 1997), mostrado nas Figura 70(c) e (d);
- O terceiro tipo é o simulador móvel tipo HVS (heavy vehicle simulator), de concepção brasileira, que permite testar trechos de estradas em uso (Fritzen, 2005), mostrado nas Figura 70(e) e (f). Esse tipo de equipamento tem a grande vantagem de poder ser transportado para o local de teste. Existem dois desses equipamentos móveis disponíveis e atuantes no país desde 2003.

Existem no mundo simuladores HVS que podem ser deslocados de um ponto a outro por meio de carreta como o brasileiro ou através de sua própria potência – Figura 71(a). Torna-se possível a simulação acelerada do comportamento de um pavimento ao longo de sua vida de serviço com a construção de um pequeno trecho de pavimento numa faixa adicional colocada ao lado do pavimento existente – Figura 71(b) ou na própria pista. Além desses aspectos, o HVS pode simular os testes com controle de temperatura através de uma câmara add-on. Os efeitos da umidade também podem ser levados em consideração com o uso de sistemas de molhagem

da superfície e técnicas simples de injeção de água nas camadas de base, sub-base e subleito.

10.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação estrutural é fundamental para se determinar a capacidade de carga de um pavimento desde a sua construção e ao longo da sua vida para definir a época mais adequada de fazer uma intervenção de restauração e qual deve ser a técnica a ser empregada.

Cada pavimento tem sua deflexão admissível, determinada a partir de um dimensionamento mecanístico, que faz uso dos parâmetros de módulo de resiliência dos materiais de cada camada e do subleito e dos critérios de fadiga e de deformação permanente definidos ao longo deste livro. Da mesma forma, o projeto de um reforço estrutural também deverá ser feito levando em conta esses critérios.

Como já declarado no prefácio, foge do escopo deste livro o detalhamento desses métodos de dimensionamento, mas estimula-se o leitor a procurar outros livros sobre o assunto, como, por exemplo, Pinto e Preussler (2002); Huang (1993, 2003); Medina e Motta (2005), entre outros.

Figura 70 – Exemplos de simuladores de tráfego



(a) Simulador do IPR no Rio de Janeiro



(b) Simulador do LCPC de Nantes na França



(c) Simulador da UFRGS/DAER-RS em Porto Alegre



(d) Detalhe do simulador da UFRGS/DAER-RS



(e) Simulador brasileiro móvel tipo HVS



(f) Simulador brasileiro móvel tipo HVS em uso

Figura 71 – Exemplos de simuladores de tráfego tipo HVS – *heavy vehicle simulator* em outros países



(a) Detalhe da autolocomoção



(b) Teste em faixa adicional ao lado da pista existente

11

DELIMITAÇÃO DE SEGMENTOS HOMOGÊNEOS

Para a delimitação de segmentos homogêneos a partir de levantamentos defletométricos pode-se utilizar o procedimento indicado pela AASHTO (1993). Esse procedimento faz uso do método das diferenças acumuladas, que consiste na seguinte sequência de cálculo:

- 1) Calcula-se o valor médio da deflexão para todo o trecho (\bar{D}).
- 2) Calcula-se a diferença entre cada valor individual e o valor médio.
- 3) Calculam-se os valores acumulados das diferenças.
- 4) Plota-se em um gráfico, nas abscissas as distâncias e nas ordenadas os valores acumulados das diferenças.

Cada variação de coeficiente angular da curva obtida indica uma mudança do comportamento médio de um determinado segmento para outro, delimitando as extremidades dos segmentos homogêneos. Analiticamente considera-se:

$$\text{Deflexão média } \bar{D}_i = \frac{D(i-1) + D_i}{2} \quad (13)$$

$$\text{Área entre estações e curva } A_i = \bar{D}_i \times \Delta l_i \quad (14)$$

Onde:

\bar{D}_i = deflexão na estaca i ;

Δl_i = distância entre estações.

$$\text{Área acumulada } A_c = \sum_{i=1}^n A_i$$

$$\text{Distância acumulada } L_c = \sum_{i=1}^n \Delta l_i$$

$$\text{Diferença acumulada } Z_i = \sum A_i - \text{tg}\alpha \sum \Delta l_i$$

Onde:

$$\text{tg}\alpha = \frac{A_c}{L_c}$$

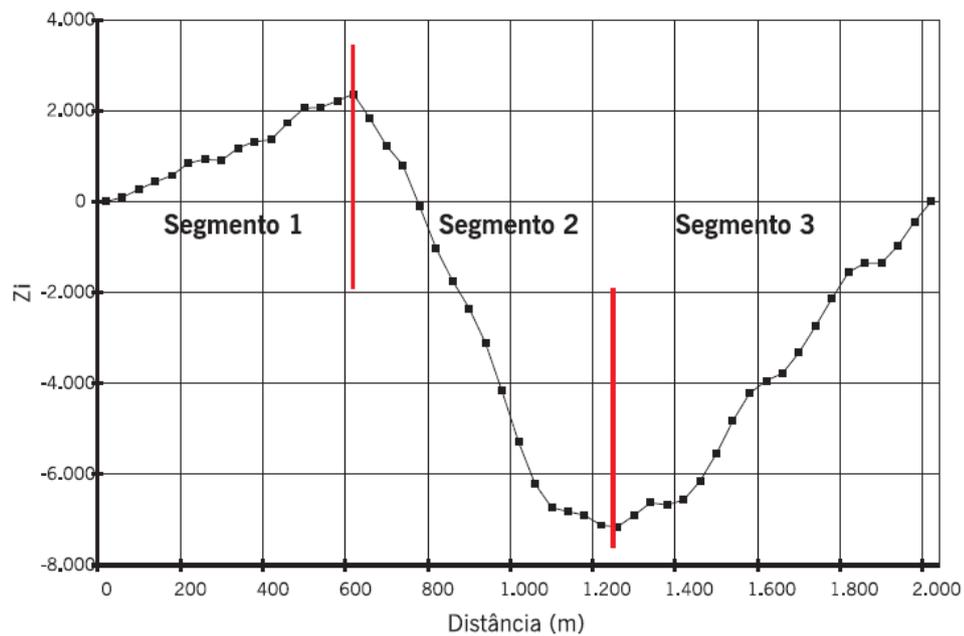
A Tabela 11.1 e a Figura 11.1 exemplificam esse procedimento.

Tabela 10 – Exemplo de aplicação do procedimento para delimitação em segmentos homogêneos

Ponto	Deflexão, (x10 ⁻² mm)	\bar{D}	Δl_i	$\Sigma \Delta l_i$	A_i	ΣA_i	Z_i
0	87	0,0	0	0	0	0	0
40	89	88,0	40	40	3.520	3.520	98
80	91	90,0	40	80	3.600	7.120	276
120	88	89,5	40	120	3.580	10.700	434
160	90	89,0	40	160	3.560	14.260	572
200	95	92,5	40	200	3.700	17.960	850
240	80	87,5	40	240	3.500	21.460	928
280	90	85,0	40	280	3.400	24.860	906
320	95	92,5	40	320	3.700	28.560	1.184
360	83	89,0	40	360	3.560	32.120	1.322
400	90	86,5	40	400	3.460	35.580	1.360
440	100	95,0	40	440	3.800	39.380	1.738
480	87	93,5	40	480	3.740	43.120	2.056
520	85	86,0	40	520	3.440	46.560	2.074
560	93	89,0	40	560	3.560	50.120	2.212
600	86	89,5	40	600	3.580	53.700	2.370
640	58	72,0	40	640	2.880	56.580	1.828
680	83	70,5	40	680	2.820	59.400	1.226
720	67	75,0	40	720	3.000	62.400	804
760	59	63,0	40	760	2.520	64.920	-98
800	66	62,5	40	800	2.500	67.420	-1.020
840	69	67,5	40	840	2.700	70.120	-1.742
880	72	70,5	40	880	2.820	72.940	-2.344
920	61	66,5	40	920	2.660	75.600	-3.106
960	57	59,0	40	960	2.360	77.960	-4.168
1.000	58	57,5	40	1.000	2.300	80.260	-5.290
1.040	67	62,5	40	1.040	2.500	82.760	-6.212
1.080	78	72,5	40	1.080	2.900	85.660	-6.734
1.120	89	83,5	40	1.120	3.340	89.000	-6.816
1.160	78	83,5	40	1.160	3.340	92.340	-6.898
1.200	82	80,0	40	1.200	3.200	95.540	-7.120
1.240	87	84,5	40	1.240	3.380	98.920	-7.162
1.280	97	92,0	40	1.280	3.680	102.600	-6.904
1.320	88	92,5	40	1.320	3.700	106.300	-6.626
1.360	81	84,5	40	1.360	3.380	109.680	-6.668
1.400	95	88,0	40	1.400	3.520	113.200	-6.570
1.440	97	96,0	40	1.440	3.840	117.040	-6.152
1.480	105	101,0	40	1.480	4.040	121.080	-5.534
1.520	102	103,5	40	1.520	4.140	125.220	-4.816
1.560	99	100,5	40	1.560	4.020	129.240	-4.218
1.600	86	92,5	40	1.600	3.700	132.940	-3.940
1.640	93	89,5	40	1.640	3.580	136.520	-3.782
1.680	101	97,0	40	1.680	3.880	140.400	-3.324
1.720	99	100,0	40	1.720	4.000	144.400	-2.746
1.760	103	101,0	40	1.760	4.040	148.440	-2.128
1.800	97	100,0	40	1.800	4.000	152.440	-1.550
1.840	84	90,5	40	1.840	3.620	156.060	-1.352
1.880	87	85,5	40	1.880	3.420	159.480	-1.354
1.920	103	95,0	40	1.920	3.800	163.280	-976
1.960	95	99,0	40	1.960	3.960	167.240	-438
2.000	98	96,0	40	2.000	3.860	171.100	0
				2.000	Total	4.257.500	

Fonte: AASHTO, 1993.

Figura 72 – Exemplo de delimitação dos segmentos homogêneos pelo método das diferenças acumuladas



Fonte: AASHTO, 1993.