



**ANA CAROLINA PEREIRA MARQUES
ISABELLA CONTI BREDA**

**UTILIZAÇÃO DE TESTES NÃO DESTRUTIVOS NA
OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA ANÁLISE
ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS:
REVISÃO DA LITERATURA**

LAVRAS – MG

2022

**ANA CAROLINA PEREIRA MARQUES
ISABELLA CONTI BREDÁ**

**UTILIZAÇÃO DE TESTES NÃO DESTRUTIVOS NA
OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA ANÁLISE
ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS:
REVISÃO DA LITERATURA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

**ANA CAROLINA PEREIRA MARQUES
ISABELLA CONTI BREDÁ**

**UTILIZAÇÃO DE TESTES NÃO DESTRUTIVOS NA OBTENÇÃO DE
PARÂMETROS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS:
REVISÃO DA LITERATURA**

**USE OF NON-DESTRUCTIVE TESTS TO OBTAIN PARAMETERS FOR
STRUCTURAL ANALYSIS OF PAVEMENT: LITERATURE REVIEW**

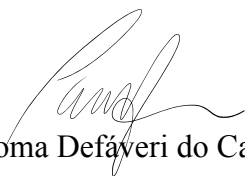
Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 28 de abril de 2022.

Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva - UFLA

Dr. Eduardo Souza Cândido - UFLA

Dr. Paulo Roberto Borges - UFLA



Prof. Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva

Orientador

**LAVRAS-MG
2022**

RESUMO

As rodovias desempenham um papel fundamental no transporte de carga e passageiros no Brasil. O investimento no setor de infraestrutura rodoviária é de fundamental importância, pois representa um dos gargalos para o crescimento econômico do país. Parte deste investimento deve ser direcionado a manutenção das rodovias já existentes, visto que a baixa qualidade das mesmas é a causa de atrasos, acidentes e do alto custo operacional da frota. Para que haja uma manutenção oportuna, é essencial a inspeção periódica das vias e análise estrutural, para avaliação do comportamento da estrutura perante as solicitações de carga exercidas pelo tráfego. A avaliação estrutural é feita através da caracterização do módulo resiliente das camadas do pavimento obtido por meio de retroanálise da espessura das camadas e bacias de deflexão. Por meio de uma revisão bibliográfica foram analisados testes não destrutivos para obtenção dos parâmetros de cálculo utilizados na retroanálise, com o intuito de buscar uma análise estrutural mais eficiente a nível de rede. Foram estudados os testes “*Ground Penetrating Radar*” (GPR) e “*3 D Ground Penetrating Radar*” (GPR-3D) para obtenção da espessura de camada, em substituição dos atuais métodos de obtenção de tal parâmetro utilizados no Brasil, baseados em dados histórico-cadastrais e sondagem direta. E para a obtenção das bacias de deformação, foram estudados os testes “*Falling Weight Deflectometer*” (FWD), “*Light Weight Deflectometer*” (LWD) e “*Traffic Speed Deflectometer*” (TSD) em substituição da viga Benkelman, método mais utilizado no país. A partir da revisão da literatura se obteve resultados de que a implementação de novas tecnologias, para a caracterização da estrutura por meio dos testes estudados, apresenta vantagens em relação a execução e obtenção de dados, se comparado aos métodos mais utilizados atualmente no Brasil. Foi possível concluir que a utilização dos equipamentos GPR e FWD se revelam promissores, visto que a suas implementações geram uma maior produtividade a nível de rede e seu uso já se mostra mais consolidado em diversos países. Também foi possível observar a importância da escolha de um teste que permita a consolidação de um banco de dados que facilite a análise de dados e retroanálise do módulo resiliente.

Palavras-chave: Análise Estrutural. Testes Não-Destrutivos. Bacia de Deflexão. Módulo Resiliente. Espessura de Camada Asfáltica.

ABSTRACT

Roads play a key role in the transport of cargo and passengers in Brazil. Investment in the road infrastructure sector is of fundamental importance, as it represents one of the bottlenecks for the country's economic growth. The maintenance of existing highways should receive part of these investments, since their low quality is the cause of delays, accidents and the high operational cost of the fleet. In order to have timely maintenance, periodic inspection of the roads and structural analysis is essential to evaluate the behavior of the structure in the face of load requests exerted by traffic. For structural evaluation it is necessary the characterization of the resilient modulus of the pavement layers, obtained by the back-calculation of the thickness of the layers and deflection basins. Non-destructive tests were analyzed through a literature review to obtain the calculation parameters used in the back-calculation, in order to seek a more efficient structural analysis at the network level. The tests Ground Penetrating Radar (GPR) and 3D Ground Penetrating Radar (GPR-3D) were studied to obtain the layer thickness, replacing the current methods of obtaining such parameter used in Brazil, based on historical cadastral data and direct drilling. In order to obtain the deformation basins, the Falling Weight Deflectometer (FWD), Light Weight Deflectometer (LWD) and Traffic Speed Deflectometer (TSD) tests were studied to replace the Benkelman beam, the most used method in the country. With the analyzes it was possible to conclude that the implementation of new technologies, for the characterization of the structure through the studied tests, presents advantages in relation to the execution and acquisition of data, if compared to the most used methods currently in Brazil. It was possible to conclude that the use of GPR and FWD equipment are promising, since their implementations generate greater productivity at the network level and their use in other countries is already consolidated. It was also possible to observe the importance of choosing a test that allows the consolidation of a database that facilitates data analysis and retro-analysis of the resilient module.

Keywords: Structural Analysis. Non-Destructive Testing. Deflection Basin. Resilient Module. Asphalt Layer Thickness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de tensões nos diferentes tipos de pavimento:	
(a) Pavimento rígido; (b) Pavimento rígido; (c) Pavimento flexível.	3
Figura 2 - Camadas do pavimento asfáltico.....	4
Figura 3 - Período recomendável para a manutenção dos pavimentos.....	7
Figura 4 - Bacia de deflexão formada por aplicação de carga no pavimento.....	10
Figura 5 - Transformação teórica de pavimento real para pavimento equivalente.....	11
Figura 6 - Diferentes formas de bacias de deflexão indicando as diferentes capacidades de carga.....	12
Figura 7 - Elementos necessários para o cálculo de retroanálise do módulo resiliente.....	13
Figura 8 - Cálculo retroativo e progressivo para obtenção do módulo resiliente.....	14
Figura 9 - "Ground Penetration Radar"	17
Figura 10 - "3D Ground Penetrating Radar" (GPR 3D).....	17
Figura 11 - Modo de reflexão dos pulsos gerados pelo GPR (a) reflexão da superfície superior da camada asfáltica e (b) reflexão da superfície inferior da camada asfáltica.....	21
Figura 12 - Radargrama obtido a partir de ensaio GPR.....	21
Figura 13 - Diagrama de espessuras obtido após a interpretação dos sinais.....	22
Figura 14 - Modo de reflexão dos pulsos gerados pelo GPR 3D (c) reflexão da superfície superior da camada asfáltica e (d) reflexão da superfície inferior da camada asfáltica.....	22
Figura 15 - Interpolação do sinal de pulsos gerados pelo GPR 3D.....	23
Figura 16 - "Falling Weight Deflectometer"	25
Figura 17 - "Traffic Speed Deflectometer"	26
Figura 18 - "Light Weight Deflectometer"	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Maneiras de aquisição da espessura das camadas.	18
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos métodos de aquisição das espessuras das camadas.	19
Tabela 3 - Diferenças na concepção e execução do GPR e GPR 3D.	20
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens entre o GPR e GPR 3D.	23
Tabela 5 - Métodos de execução e tipos de carregamentos dos testes.	27
Tabela 6 - Comparativo de vantagens e desvantagens da viga Benkelman e os aparelhos dinâmicos	28
Tabela 7 - Comparativo de vantagens e desvantagens dos testes FWD, LWD e TSD.....	30

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>“American Association of State Highway and Transportation Officials”</i>
ASTM	<i>“American Society for Testing and Materials”</i>
CNT	Confederação Nacional de Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FWD	<i>“Falling Weight Deflectometer”</i>
GPR	<i>“Ground Penetrating Radar”</i>
GPR 3D	<i>“3D Ground Penetrating Radar”</i>
LWD	<i>“Light Weight Deflectometer”</i>
MR	Modulo resiliente
PMCE	Método do ponto médio comum estendido
TSD	<i>“Traffic Speed Deflectometer”</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1.	Pavimento	3
2.2.	Pavimento asfáltico	4
2.2.1.	Estrutura do pavimento asfáltico	5
2.2.2.	Deterioração e defeitos do pavimento asfáltico	6
2.3.	Manutenção do pavimento	7
2.4.	Sistema de gerenciamento de pavimentos	8
2.5.	Avaliação estrutural do pavimento	8
2.5.1.	Parâmetros defletoométricos	9
2.5.2.	Comportamento tensão deformação	11
2.5.3.	Noções de retroanálise	13
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
4.1.	Espessura das camadas	16
4.2.	Bacias de deflexão	25
5.	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados apresentados pela Confederação Nacional de Transporte - CNT de transporte e logística (2018), no Brasil o modal rodoviário desempenha um papel crucial no transporte de mercadorias sendo responsável por 65% de sua movimentação. A partir dos dados divulgados a respeito da densidade de malha rodoviária pavimentada no Brasil é possível observar a baixa densidade de rodovias pavimentadas em km por km². O Brasil apresenta uma malha rodoviária pavimentada de 25,1 km/1000 km², valor baixo se comparado a países de mesmas proporções continentais como os Estados Unidos que apresenta 437,8 km/1000 km² de malha pavimentada, o valor também se mostra baixo se comparado a países da América Latina como o Uruguai que apresenta uma densidade de malha pavimentada de 43,9 km/1000 km². Tal indicativo é um fator limitante do crescimento econômico do país, que utiliza em sua maioria o modal rodoviário para o trânsito de produtos, porém possui tão pouco desenvolvimento nesse âmbito.

No plano CNT de transporte e logística (2018), foi estimado que o investimento necessário para satisfazer a demanda de construção de rodovias no país é de 496,1 bilhões de reais, porém o investimento cumulativo entre 2011 e 2020 foi de apenas 21,3% desse total estimado. O desafio que o setor de infraestrutura rodoviária enfrenta atualmente frente ao cenário apresentado é a otimização dos investimentos destinados à construção de novos pavimentos e a efetiva manutenção de pavimentos já existentes. Segundo a CNT (2018), o custo operacional da frota nacional poderia ser reduzido em cerca de 25% caso todas as rodovias pavimentadas do Brasil estivessem em ótimo estado de conservação.

Como enfatizaram Hou et al. (2021), o monitoramento do estado de saúde do pavimento antes que ocorram danos irreversíveis é essencial para a manutenção oportuna. Muitos danos ao pavimento podem ser detectados e analisados, monitorando as respostas estruturais dinâmicas da estrutura e avaliando as condições da superfície asfáltica.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, órgão responsável por normalizar os procedimentos relacionados à construção, inspeção e manutenção da infraestrutura de transportes no país, ressalta em seu manual de restauração de pavimentos asfálticos, DNIT-IPR 720 (2006) a dificuldade da logística e implementação da manutenção de rodovias. Diferente do projeto de construção de um novo pavimento, o projeto de reforço estrutural deve levar em consideração diversos aspectos da estrutura já existente para o seu desenvolvimento. A implementação de projetos de reabilitação efetivos e economicamente

viáveis conta com etapas preliminares de avaliação da condição estrutural, logística de aquisição de dados e correlação de dados históricos com dados de campo.

De acordo com o Balbo (2007), um dos métodos de avaliação estrutural de pavimentos mais comumente utilizado no Brasil, consiste na avaliação da resposta do pavimento à aplicação de carga e posterior correlação dos valores obtidos para caracterização da capacidade estrutural. O procedimento consiste na aferição das bacias de deformação por meio de aparelhos como a viga de Benkelman, dados histórico-cadastrais de espessura das camadas ou sondagens diretas e posterior cálculo dos módulos resilientes da estrutura por meio da retroanálise utilizando *softwares* especializados como o ELSYM5 ou FEPAVE.

Porém como o próprio DNIT - IPR 720 (2006) ressalta, tal procedimento se encontra obsoleto perante as novas tecnologias que vêm sendo aperfeiçoadas em diversos países e também aponta ser inevitável a adoção das novas tecnologias no futuro. O órgão justifica o motivo pelo qual os manuais ainda adotarem os procedimentos de avaliação por meio da viga Benkelman e por dados histórico-cadastrais ou sondagem direta, ser o custo das novas tecnologias e equipamentos, bem como a falta de normalização dos novos equipamentos presentes no mercado. Além disso, diferentes equipamentos demandam algoritmos específicos de cálculo para realização da retroanálise dos dados. Para a implantação de novos equipamentos no mercado é necessária a consolidação de conhecimentos a respeito dos equipamentos, aprimoramento das técnicas e normalização de execução dos testes.

Em diversos locais do mundo o emprego dos equipamentos “*Falling Weight Deflectometer*” (FWD), variações do FWD, “*Ground Penetrating Radar*” (GPR) e sua adaptação 3D, tem proporcionado uma caracterização estrutural satisfatória do pavimento (MARECOS et al., 2017; ZHAO; AL-QADI, 2016). Tais equipamentos permitem uma melhor previsão de desempenho, servindo de recurso para elaboração de projetos que visam definir prioridades de reabilitação e destinação do orçamento a nível de rede. Viabilizando a realização de projetos de restauração mais eficientes tecnicamente e economicamente (NOURELDIN et al., 2005).

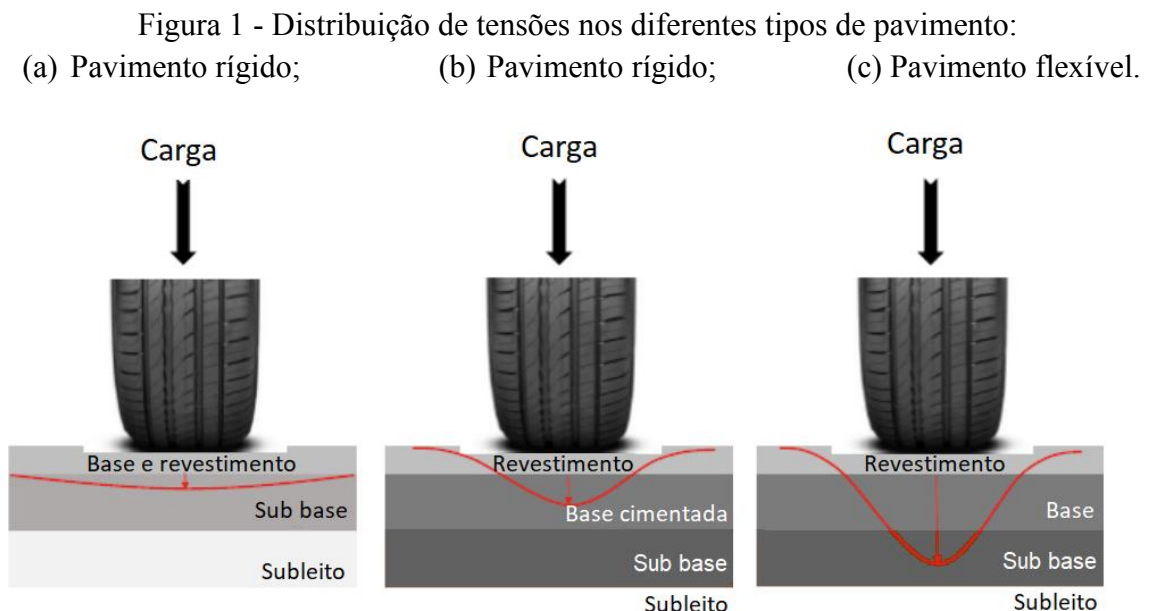
Em vista disso, através de uma revisão de literatura este trabalho tem como objetivo buscar informações sobre equipamentos e aplicações dos testes não destrutivos de avaliação de espessura de camadas e bacias de deflexão, que são importantes para análise estrutural do pavimento asfáltico, suas correlações de dados e metodologias de execução.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Pavimento

No Brasil, de acordo com a pesquisa CNT (2018), os pavimentos são superestruturas complexas, formadas por camadas finitas de diferentes resistências e deformabilidades, que devem resistir às ações de tráfego e intempéries de acordo com o ciclo de vida previsto no projeto de maneira conforto de rolamento e segurança aos usuários. Tal estrutura apresenta um processo de degradação progressivo e para garantir a sua funcionalidade, demanda contínuas práticas de inspeção e manutenção de modo a atingir um bom desempenho estrutural ao longo de todo o ciclo de vida (BALBO, 2007).

De acordo com o DNIT - IPR 719 (2006), os pavimentos podem ser classificados de acordo com a interação estrutural do conjunto em três categorias, rígidos, semi-rígidos e flexíveis. Como ilustra a Figura 1, define-se como pavimento rígido, aquele que possui um revestimento de alta rigidez em relação às camadas inferiores, que tem função de absorver grande parte dos esforços aplicados e são constituídos por placas de cimento Portland sob o subleito (Figura 1 (a)). Define-se como pavimento semi-rígido, aquele que apresenta uma base cimentada que fornece propriedades de deformação intermediárias entre rígida e flexível (Figura 1 (b)). Define-se o pavimento flexível aquele em que todas as camadas sofrem deformações elásticas significativas quando submetidas a algum esforço (Figura 1 (c)). Desta forma, a carga aplicada é distribuída, de maneira gradativa, entre as camadas.



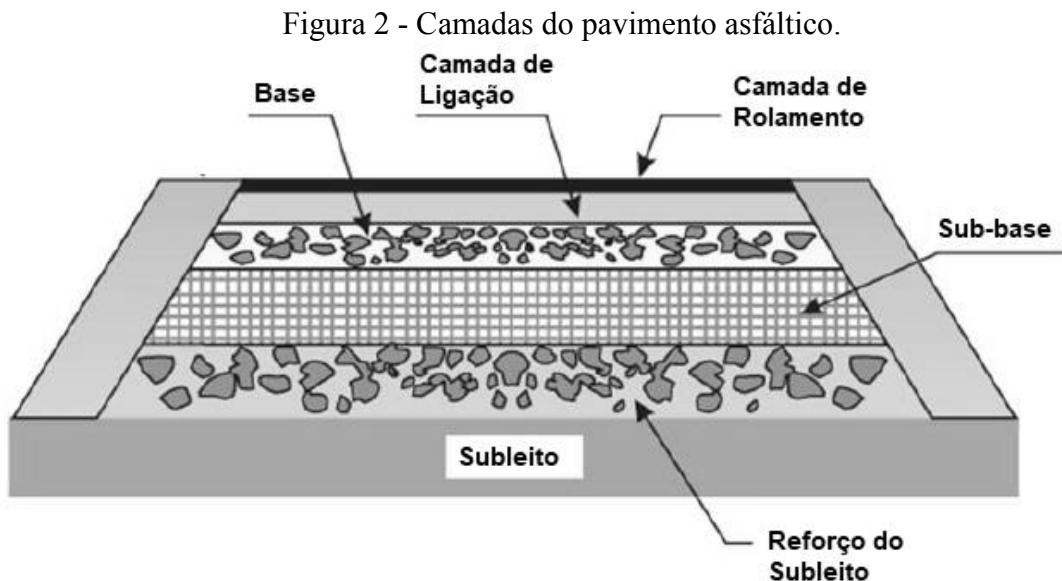
Fonte: Adaptado de Neto (2019).

No Brasil os pavimentos flexíveis, são a parcela mais expressiva da malha rodoviária, e o principal fator dessa predominância é por já possuir uma tecnologia consolidada no mercado técnico Brasileiro. Esse tipo de pavimentação é constituído de material betuminoso na camada superior e dependendo dos esforços solicitantes e materiais disponíveis, podem dispor de diferentes configurações das camadas granulares inferiores, compostas de diferentes materiais de acordo com a necessidade de suporte (BALBO, 2007).

2.2. Pavimento asfáltico

O pavimento asfáltico é considerado um pavimento flexível e apresenta a camada de revestimento composta por mistura asfáltica. Tal convenção caracteriza a estrutura visível sem inferir uma classificação estrutural do conjunto como um todo, visto que as funções de cada camada na composição da estrutura do pavimento são diferentes (BALBO, 2007).

A estrutura do pavimento asfáltico apresenta camadas granulares e betuminosas, construídas sobre um subleito, como exposto na Figura 2. As camadas granulares podem ter diferentes divisões, de maneira simplificada são: sub-base (camada inferior), base (camada intermediária). As camadas betuminosas são compostas por uma camada de ligação às camadas granulares (*binder*) e camada revestimento (camada superior) (MOREIRA, 2017).



Fonte: Bernucci et al. (2010).

2.2.1. Estrutura do pavimento asfáltico

A estrutura de um pavimento flexível é composta por camadas que possuem capacidades de carga diferentes. As camadas de um pavimento flexível são responsáveis por absorver parte da carga vertical a qual a estrutura foi submetida e transmitir para camada à qual está apoiada uma fração dessa pressão. O revestimento, conhecido também como camada de rolamento, tem como principal função receber as cargas aplicadas na estrutura e sem sofrer grandes deformações ou desagregação, transmiti-las para as camadas subsequentes de maneira atenuada, evitando movimentações horizontais e mantendo suas características acima dos limites admissíveis frente às ações ambientais diretas. A camada de revestimento asfáltico é a primeira que sofre com os efeitos da deterioração, apresentando visivelmente os sinais de desgaste e arrancamento do material, transmitindo diretamente as consequências estruturais às próximas camadas (RODRÍGUEZ, 2008).

A função principal das camadas intermediárias é aliviar de maneira gradual as pressões que chegarão finalmente ao subleito. Tais camadas tem característica granular, possuem espessuras robustas e por questões econômicas de acordo com a solicitação estrutural de projeto podem ser consolidadas em uma única camada ou subdivididas em base e subbase, apresentando composições diferentes. De maneira a empregar materiais mais resistentes e consequentemente mais onerosos na porção superior e reduzir os custos das camadas inferiores com materiais de menor resistência, mas que ainda atenda às necessidades de projeto (BALBO, 2007).

De acordo com o DNIT - IPR 719, (2006) o pavimento é dimensionado como função do número de carregamentos de eixo padrão (eixo simples com carga de 8,2 t), a um dado ciclo de vida do projeto, geralmente são adotados ciclos de vida de 10 a 15 anos para pavimentos asfálticos.

As espessuras de cada camada são determinadas em projeto de dimensionamento, de acordo com a solicitação a qual a estrutura deverá suportar para aquele ciclo de vida. O dimensionamento das camadas se baseia na capacidade de suporte do subleito e dos materiais que constituirão as camadas. A espessura calculada da camada superior depende do suporte que a camada inferior proporcionará. Para que os efeitos do carregamento sejam distribuídos e suportados de maneira gradativa nas camadas. Vista a dependência das espessuras das camadas é necessário que o projeto especifique procedimentos de construção, compactação e verificação, de modo a garantir que a camada possua a espessura calculada.

As camadas intermediárias são construídas por meio da compactação do material granular a fim de atingir os parâmetros previstos em projeto como a espessura final, teor de umidade, massa específica aparente “in situ” e grau de compactação. O processo de construção prevê o controle tecnológico, para que os dados de projeto sejam reproduzidos de maneira fiel, resultando em uma estrutura que atenda as solicitações de carregamento previstas. Tal controle tecnológico é feito de maneira pontual e considerado para o trecho representativo, assumindo que os valores de projeto são verdadeiros para toda a extensão do trecho (DNIT - IPR 719, 2006).

2.2.2. Deterioração e defeitos do pavimento asfáltico

A deterioração do pavimento ocorre com o decréscimo das condições estruturais, devido às ações de tráfego e intempéries que agem sobre o pavimento. O projeto de pavimentação é elaborado para que atenda a um ciclo de vida da estrutura, que se inicia em condições ótimas após a construção ou projetos de manutenção e reabilitação. O ciclo de vida da estrutura chega ao fim quando o desempenho da estrutura decresce, após surgimento de defeitos estruturais e de superfície, a ponto de não atender aos critérios de utilização (DNIT - IPR 720, 2006).

De acordo com o DNIT - IPR 720 (2006), os defeitos que a estrutura apresenta quando há o início da deterioração afetam diretamente a funcionalidade do pavimento. O defeito de trincamento é muito comum e facilmente identificável em pavimentos asfálticos, ocorre na camada de revestimento e causa um enfraquecimento que se perpetua nas camadas inferiores devido a entrada de água na estrutura. O trincamento pode ser de vários tipos como fadiga, causado pelo carregamento sucessivo da estrutura, envelhecimento, causado pelo endurecimento do asfalto, reflexão, causada pela movimentação dos materiais granulares de base e retração, causada pela variação térmica.

A irregularidade longitudinal também afeta a funcionalidade do pavimento e ocorre com o surgimento de deformações permanentes, outro defeito observável nos pavimentos asfálticos. Diversas são as causas de seu surgimento, entre elas, carregamentos concentrados e excessivos, carregamentos estáticos de longa duração e carregamentos sucessivos de curta duração. Os mecanismos pelo qual a deformação acontece são: a densificação da estrutura, onde o grau de compactação previsto em projeto não é atingido e o constante carregamento da estrutura provoca a compactação restante das camadas granulares, causando a diminuição do volume e consequentemente um afundamento na região do carregamento; e a fluência plástica, onde os esforços aplicados na estrutura ultrapassam a resistência ao cisalhamento do material e

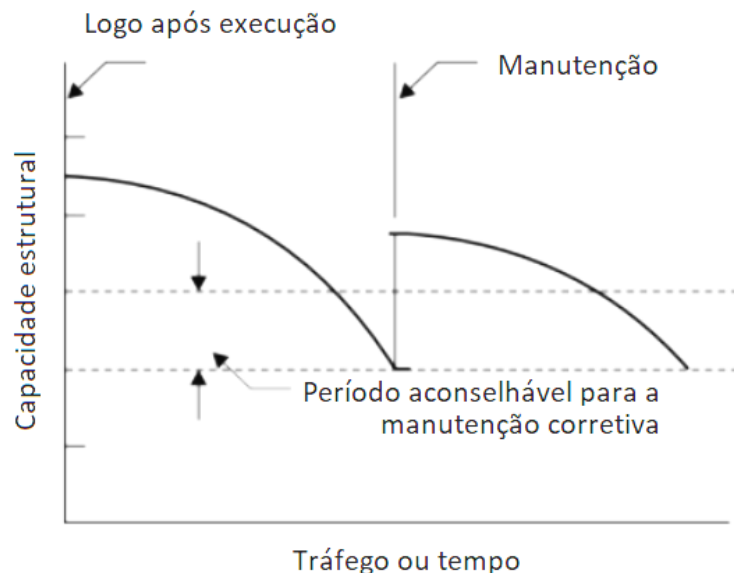
provocam o recalque na estrutura. A deformação permite um acúmulo de água na camada de rolamento, que pode chegar às camadas inferiores, causando instabilidade na estrutura. Além disso, gera riscos à segurança da via e aumento do custo operacional da frota (RODRÍGUEZ, 2008).

Outro defeito frequente é a desagregação, perda do agregado superficial após a fratura mecânica do ligante que o envolve. Pode ser causada por erros de execução da mistura asfáltica, seleção de materiais que não atendem a adesividade necessária com o ligante asfáltico, longa exposição a temperaturas ambientais e forças de contato dos pneus que excedem a resistência à fratura do ligante. Este defeito está diretamente ligado a diminuição da espessura da camada asfáltica de rolamento da estrutura (DNIT - IPR 720, 2006).

2.3. Manutenção do pavimento

A evolução da deterioração do pavimento e a interação entre os defeitos acontece com o tempo e a atuação do tráfego causando a perda de capacidade estrutural, como ilustrado na Figura 3. A inspeção periódica das condições em que a estrutura se encontra deve ser feita para que a manutenção corretiva do pavimento seja realizada no momento ideal, antes do indesejado colapso da estrutura. Permitindo a identificação dos defeitos em sua fase inicial e tornando a determinação das técnicas de manutenção e o projeto de reabilitação mais simples (CAUSIM, 2001).

Figura 3 - Período recomendável para a manutenção dos pavimentos.



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008).

A manutenção do pavimento asfáltico não deve ser feita somente como correção funcional ou estrutural. É aconselhado a criação de um plano estratégico de intervenções periódicas, envolvendo também manutenção preventiva, de modo a garantir uma desaceleração da degradação da superfície de rolamento (BERNUCCI, et al., 2008).

2.4. Sistema de gerenciamento de pavimentos

Segundo o DNIT - IPR 745 (2011), o Sistema de Gerenciamento de Pavimentos (SGP) é uma importante ferramenta utilizada pelo setor, nas atividades que envolvem planejamento, projeto e construção de novas vias. Tem forte atuação na manutenção e na avaliação estrutural dos pavimentos. É um conjunto de informações, métodos e estratégias que tem por objetivo nortear a melhor aplicação de recursos públicos disponíveis, para construir, avaliar e manter os pavimentos em uma condição funcional aceitável, segura e econômica, durante o período de tempo previsto no projeto.

A implementação de um sistema de gerenciamento de pavimentos é considerada uma ferramenta importante e confiável para a tomada de decisões, previsão de condições estruturais, orçamento necessário e cronograma de atividades para manutenção de rodovias. Fornecendo informações sobre capacidade de carga, tempo remanescente de serviço e condições das camadas do pavimento. Tal compilado de informações é ainda um recurso para a descoberta das causas de deterioração do pavimento, padrões de propagação dos defeitos em relação ao tempo e desenvolvimento de métodos de desaceleração da deterioração (FAKHRI; DEZFOULIAN, 2019).

2.5. Avaliação estrutural do pavimento

A avaliação estrutural do pavimento asfáltico indica a capacidade de carga da estrutura e é utilizada para o monitoramento preventivo. A deterioração estrutural do pavimento acontece de forma cumulativa, devido às cargas repetitivas aplicadas, desde o início do tráfego, estão ligadas às deformações elásticas ou recuperáveis e plásticas ou permanentes (BALBO, 2007).

As deformações plásticas têm caráter residual, não cessam após a aplicação da carga. São caracterizadas pelo seu efeito permanente de ruptura por cisalhamento, são exemplos os afundamentos nas trilhas de roda. As deformações ou deflexões elásticas tem caráter transitório, cessam após a aplicação da carga, no entanto a constante deflexão plástica é responsável pelo fenômeno de fadiga do material. O estudo da deformabilidade do pavimento asfáltico e da

deflexão sofrida após aplicação de carga indica as condições estruturais das diversas camadas e do subleito (DNIT - IPR 719, 2006).

Os métodos de análise empíricos, são baseados em observações e correlações de experimentos que seguem apenas critérios de ruptura por deformações permanentes. Quando utilizados no dimensionamento da estrutura não são contemplados os efeitos de fadiga do revestimento asfáltico. Já a análise mecanística-empírica se revela mais apropriada para o dimensionamento da estrutura e de reforços, pois contempla as propriedades mecânicas dos materiais e o comportamento da estrutura ao carregamento do tráfego. O uso de métodos mecanísticos de dimensionamento preveem a interação tensão-deformação da estrutura frente ao carregamento e fatores externos, como a temperatura. As grandes vantagens do uso de análises mecânico-empíricas é a maior confiabilidade na previsão do desempenho, além do uso mais eficiente e econômico dos materiais. (DNIT - IPR 719, 2006).

É possível avaliar a estrutura do pavimento de maneira destrutiva e não destrutiva. Os métodos destrutivos consistem em retiradas de amostras “in situ” para a realização de ensaios de capacidade de carga em laboratório. Tal método fornece diversas informações sobre o pavimento, natureza dos materiais e capacidade de suporte. Porém o método destrutivo apresenta a limitação de ser empregado apenas em alguns pontos que serão considerados representativos de todo o segmento. A retirada de amostras é inconveniente do ponto de vista logístico e econômico, sendo realizada apenas em casos pontuais onde há necessidade de caracterização mais específica do pavimento (BERNUCCI et al., 2008).

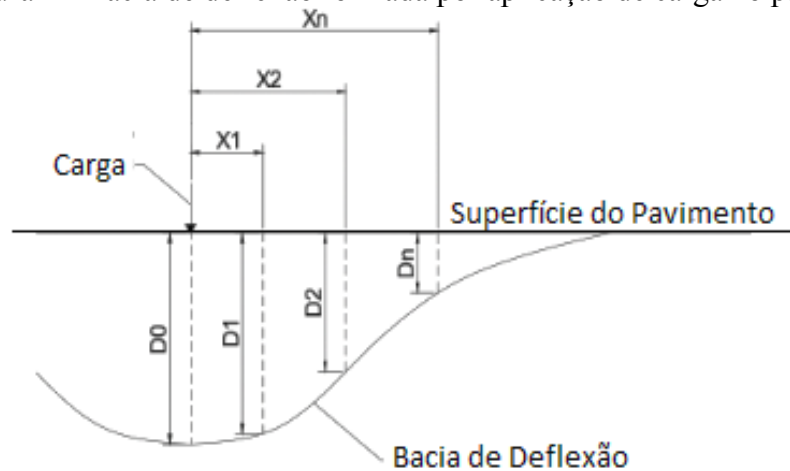
O método não destrutivo de avaliação é ideal para longos segmentos, permite a repetição da análise e é considerado mais adequado para pavimentos com grande demanda. As medidas não destrutivas que embasam a avaliação são medidas de deflexão. Esse tipo de avaliação permite a aquisição da resposta mecânica imediata. Fornece informações sobre as reais condições “in situ” do pavimento. Sendo possível determinar as variações das camadas em toda extensão do segmento analisado, permitindo ainda um controle construtivo (BALBO, 2007).

2.5.1. Parâmetros deflectométricos

A medida da deflexão do pavimento representa a resposta estrutural das camadas. A área de superfície que sofre deformação recuperável devido a aplicação de carga recebe o nome de bacia de deflexão (FIGURA 4). A magnitude da deflexão diminui com a profundidade e

depende do tipo e valor da carga, geometria do carregamento, distância em relação ao ponto de aplicação da carga e do módulo de elasticidade de cada camada (DNIT - IPR 720, 2006).

Figura 4 - Bacia de deflexão formada por aplicação de carga no pavimento.



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2008).

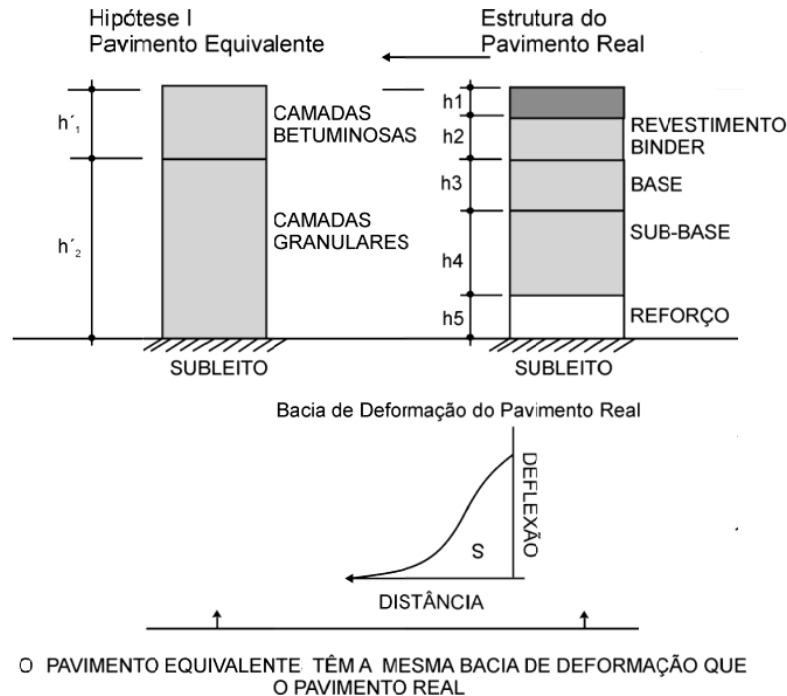
Os Deflectômetros são aparelhos que medem a deflexão vertical do pavimento. São usados para a avaliação dinâmica do pavimento "in situ". É um teste não destrutivo, em que o equipamento solta um peso a uma certa altura, que aplica uma carga de impulso ao pavimento através da pista de rolamento. A carga de impulso é medida usando células de carga, e as deflexões da superfície são medidas com acelerômetros. O objetivo do teste é medir a resposta do pavimento à aplicação de uma carga conhecida, fornecendo dados de bacias de deflexão (TANG; STOFFELS; PALOMINO, 2013).

A deflexão recuperável máxima é um dos parâmetros utilizados para a caracterização do comportamento global da estrutura. É obtida pela seção longitudinal da bacia de deflexão no sentido do tráfego. E tem relação com o suporte do subleito e o módulo resiliente das camadas. Projetos de reabilitação seguem métodos que delimitam uma deflexão admissível da estrutura, que se relacione diretamente com um número de carregamentos previsto para o novo ciclo de vida do pavimento. Então correlacionam a deflexão admissível com valores de deflexão recuperável máxima do pavimento em uso para dimensionar o reforço necessário (DNIT - IPR 720, 2006).

Para efeitos de análise deflectométrica a estrutura real do pavimento pode ser transformada em um pavimento equivalente, como ilustra a figura 5. O comportamento da estrutura é o mesmo para as duas representações, mas na hipótese de pavimento equivalente é necessária a definição de apenas duas espessuras de camada. O agrupamento das camadas para

análise não prejudica a precisão dos resultados pois as camadas são agrupadas de acordo com comportamentos estruturais similares (DNIT-IPR 720, 2006).

Figura 5 - Transformação teórica de pavimento real para pavimento equivalente.



Fonte: Adaptado de DNIT - IPR 720 (2006).

2.5.2. Comportamento tensão deformação

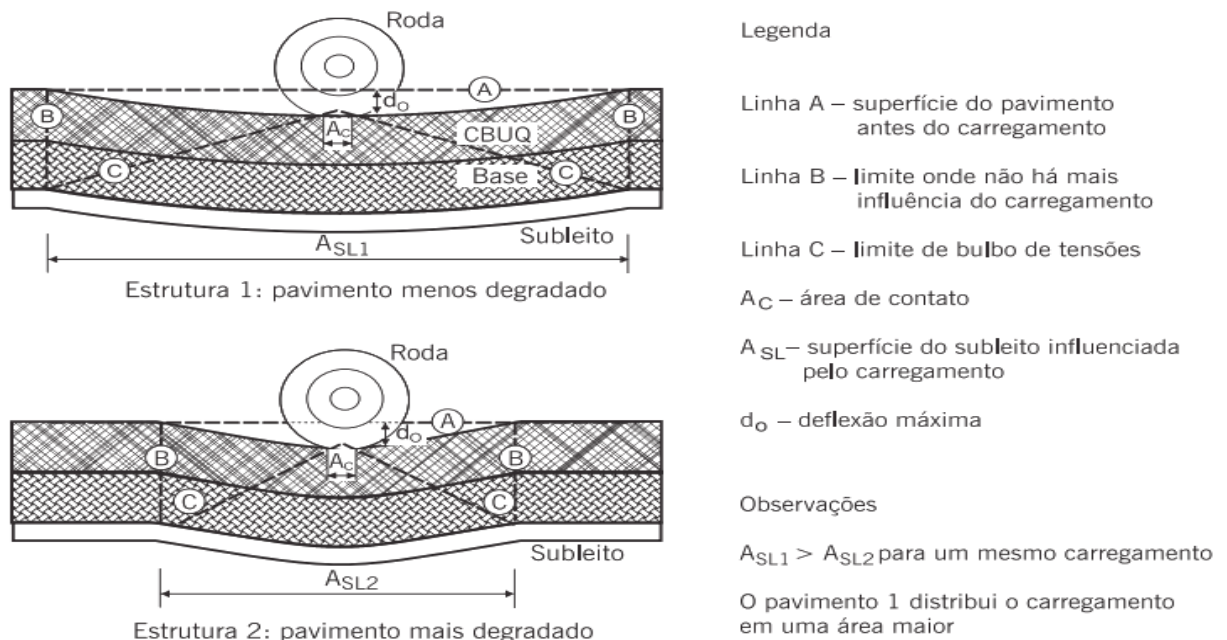
O parâmetro que permite a caracterização da estrutura quanto ao comportamento tensão-deformação é denominado módulo de elasticidade. Tal parâmetro é obtido pela relação entre a carga aplicada na estrutura e a deformação sofrida na região. A caracterização adequada da estrutura sob efeitos das cargas do tráfego é necessária para a construção de modelos empíricos mecanísticos de dimensionamento de pavimentos. Tais modelos levam em consideração as propriedades mecânicas dos materiais que constituem as camadas, as respostas geradas na estrutura e a propagação dos defeitos devido a deterioração (BALBO, 2007).

O módulo de elasticidade pode ser compreendido de duas maneiras de acordo com a maneira de obtenção, o módulo resiliente e o módulo de elasticidade. O módulo de deformação resiliente é obtido a partir de ensaios laboratoriais de carga repetidas e se refere às condições de compactação do corpo de prova e a solitação do ensaio. Projetos de novos pavimentos dispõem apenas deste parâmetro. O módulo de elasticidade efetivo “in situ”, é obtido através da retroanálise da bacia de deflexão e sintetiza o estado de tensões, a compactação das camadas

e o efeito de confinamento que existe na estrutura do pavimento, frente a aplicação de carga real de tráfego. Somente pode ser obtido em pavimentos já existentes e é o parâmetro de maior relevância em projetos de reabilitação. Por convenção é correto utilizar o termo módulo resiliente para a caracterização do estado tensão-deformação da estrutura “in situ” (DNIT - IPR 719, 2006).

A figura 6 exhibe a interação tensão-deformação de acordo com a capacidade de carga do pavimento em campo. Para uma mesma deflexão máxima podem haver diferentes bacias de deflexão. A diferença da amplitude das bacias representa o efeito do módulo resiliente das camadas frente a aplicação de carga. Quanto maior o módulo resiliente mais distribuído é o carregamento (estrutura 1). Quanto menor o módulo resiliente, mais tensão é concentrada em uma menor região do pavimento (estrutura 2). A estrutura do pavimento sofre deformações mais agressivas quando a capacidade de carga está comprometida em relação a um pavimento sadio. A boa capacidade estrutural permite a distribuição do carregamento de maneira menos agressiva à estrutura (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 6 - Diferentes formas de bacias de deflexão indicando as diferentes capacidades de carga.



Fonte: Bernucci et al. (2008).

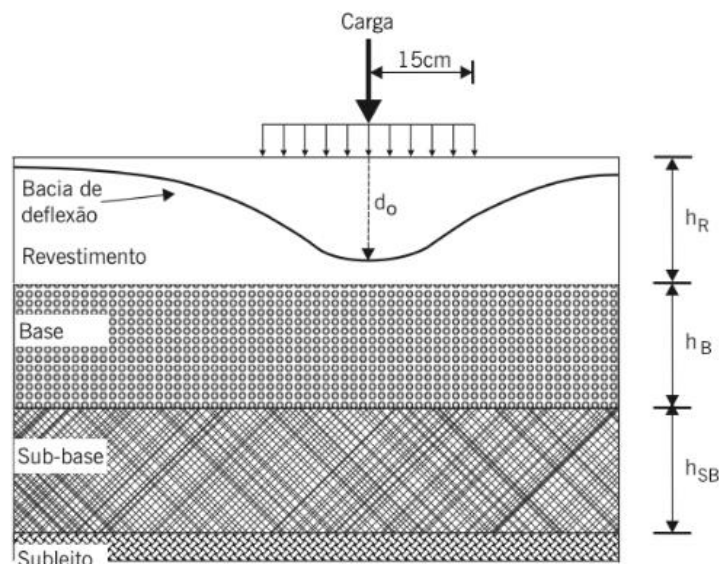
A avaliação da capacidade de carga remanescente na estrutura, por meio da caracterização estrutural do módulo resiliente, é importante para a realização de projetos de reabilitação e reforço. Para determinar os valores de módulo resiliente das camadas de

pavimentos asfálticos, vários estudos utilizam de diferentes métodos iterativos de cálculo que utilizam como parâmetros de entrada dados da bacia de deflexão e as espessuras das camadas da superfície do pavimento (BERNUCCI et al., 2008).

2.5.3. Noções de retroanálise

De acordo com Villela e Marcon (2001), o cálculo retroativo é feito de modo a fazer a bacia teórica calculada coincidir com o valor da bacia de campo determinada, que pode ser obtida a partir de ensaios não-destrutivos. Para o melhor entendimento do conceito do método de retroanálise, a figura 7 indica como se dispõe os elementos necessários para o cálculo. De acordo com Bernucci et al. (2008), é possível inferir os módulos de resiliência da estrutura conhecendo a carga externa aplicada para a qual foi obtida a bacia de deflexão e tendo acesso as características básicas dos tipos de materiais presentes em cada camada e suas espessuras.

Figura 7 - Elementos necessários para o cálculo de retroanálise do módulo resiliente.

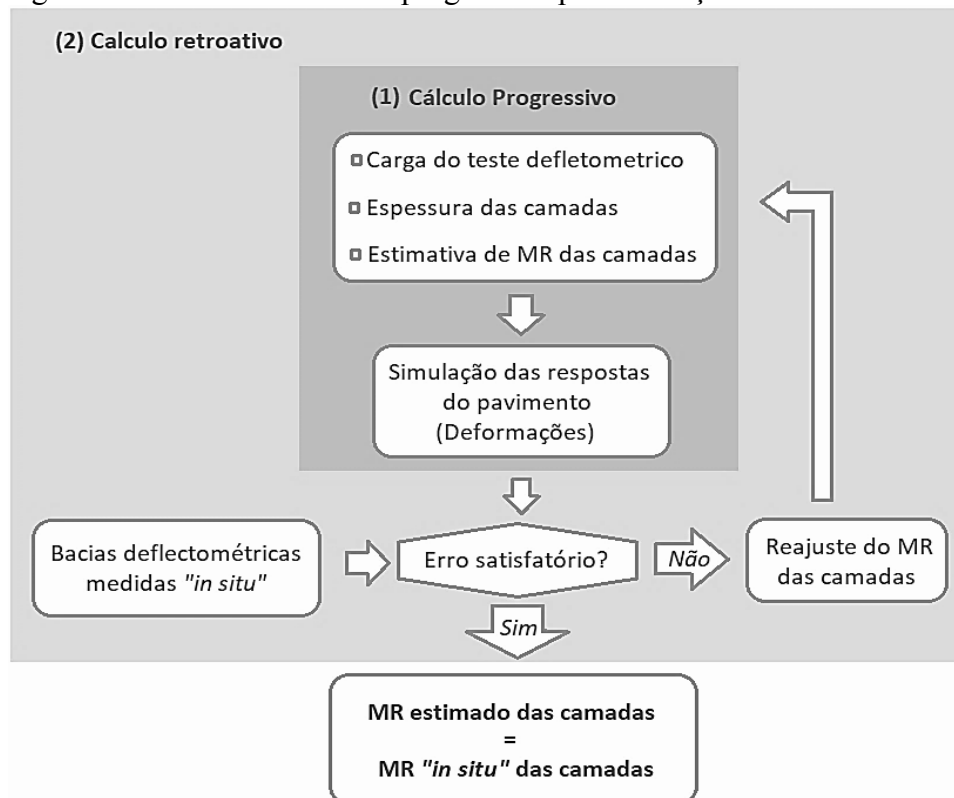


Fonte: Adaptado de Nóbrega (2003).

A retroanálise é um método de cálculo mecanístico empírico que permite a determinação dos módulos de resiliência das camadas do pavimento, por processos de cálculo iterativo das respostas do pavimento a aplicação de carga e correlação com as bacias de deformação medidas “in situ”. É um método iterativo composto por duas etapas de cálculo interligadas, o cálculo retroativo e o cálculo progressivo. Sendo assim, é comum o uso da definição cálculo retroativo do módulo resiliente (PANDOLFO, 2016).

Como esquematizado na Figura 8, o cálculo progressivo (Figura 8 (1)), consiste na simulação da resposta estrutural de um pavimento a um dado carregamento. São parâmetros de entrada do cálculo: a seção tipo deste pavimento, materiais constituintes, espessuras das camadas, características mecânicas de comportamento, e módulo resiliente (MR) estimado de cada camada. O cálculo retroativo (Figura 8 (2)) engloba o cálculo progressivo no seu processo de iteração. O processo consiste na estimativa de um conjunto de valores de módulo resiliente (MR) para as camadas do pavimento analisado, que serão introduzidos na simulação do cálculo progressivo para a obtenção do comportamento de deflexão do pavimento. Os valores de módulo resiliente estimados são então reajustados a cada procedimento de simulação para a comparação das respostas simuladas com os valores de bacias de deflexão medidas em campo. O processo iterativo de reajuste do módulo resiliente é encerrado quando o erro entre os valores de deflexão simulados e os valores de deflexão medidos esteja entre limites aceitáveis definidos para cada algoritmo. Tais limites são obtidos pelo método da raiz média quadrática. Então o conjunto de módulo resiliente das camadas estimadas é adotado como o sendo o conjunto de módulo resiliente correspondente ao pavimento analisado (TANG; STOFFELS; PALOMINO, 2013).

Figura 8 - Cálculo retroativo e progressivo para obtenção do módulo resiliente.



Fonte: Adaptado de Tang, Stoffels e Palomino (2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho foi elaborado a partir de uma revisão da literatura nas bases de dados bibliográficos “*Researchgate*”, “*Web of Science*”, “*ACADEMIA*” e “*Science Direct*”. Para a busca foi delimitado artigos publicados no período entre 1990 e 2021. As palavras-chave utilizadas foram “*Non destructive testing*”; “*Pavement lifecycle*”; “*Pavement moduli*”; “*Road Performance*”; “*Structural health monitoring*”; “*Backcalculation Modulus*”; “*Road Pavement diagnostics*”; “*Road maintenance*”; “*Pavement structural Damage*”, sendo as aspas utilizadas apenas no corpo do texto para atender requisitos de formatação deste trabalho, porém não foram incluídas no momento da pesquisa nas bases de dados, de modo a não restringir as buscas a combinação exata destas palavras-chaves nos artigos encontrados.

Foram critérios de exclusão dos artigos após a leitura do resumo, aqueles que se referiam a análise estrutural utilizando testes destrutivos, aqueles que a análise estrutural foi feita em alguma estrutura diferente de pavimento asfáltico e aqueles que se repetiam entre as bases de dados utilizadas. Contudo, foram selecionados e lidos na íntegra 22 artigos que preenchiam os critérios inicialmente propostos. Além dos artigos, foram utilizados o Manual de Manutenção de Pavimentos Asfálticos (DNIT - IPR 720, 2006) e o Manual de Pavimentação (DNIT - IPR 719, 2006), para identificar as técnicas de avaliação de pavimentos e metodologias de cálculo e análise utilizadas pelo órgão rodoviário no Brasil.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação estrutural de pavimentos fornece informações sobre as condições de serviço da estrutura e é a ferramenta utilizada para a seleção de medidas de manutenção e reabilitação, sendo que, vários estudos procuram inovar a maneira como realizar tal avaliação. Portanto, são abordados nesse trabalho a utilização de diferentes testes não-destrutivos, para obtenção de parâmetros importantes para a análise estrutural, considerando: a espessura da camada e as bacias de deflexão do pavimento.

4.1. Espessura das camadas

As espessuras das camadas são informações importantes na análise estrutural do pavimento, utilizadas como parâmetro de entrada para o cálculo do módulo resiliente, por meio da retroanálise. De acordo com o estudo de Wu et al. (2020), pequenas variações nos valores de espessura da camada asfáltica resultaram em grandes variações no resultado final do cálculo retroativo do seu módulo resiliente. Ainda segundo DNIT-IPR 720 (2006), no Brasil, a obtenção das informações sobre a espessura das camadas, é comumente feita por meio de pesquisa dos dados histórico-cadastrais, ou em casos mais específicos, são utilizados testes destrutivos, como as sondagens diretas.

Com avanços nas tecnologias, equipamentos de testes não-destrutivos como "*Ground Penetration Radar*" (GPR) (MARECOS et al., 2017) (Figura 9) e "*3D Ground Penetrating Radar*" (GPR 3D) (ZHAO; AL-QADI, 2016) (Figura 10) são empregados em diversos estudos para a aferição de tais informações.

Na Tabela 1, estão organizadas maneiras de aquisição das espessuras das camadas constituintes do pavimento. Os métodos mais comumente utilizados pelos órgãos rodoviários no Brasil são o histórico-cadastral e sondagem direta. Os dados históricos-cadastrais são obtidos a partir do banco de dados de projetos de pavimentação e reabilitação das vias, onde podem ser obtidas as espessuras de projeto e os materiais constituintes. A sondagem direta, é realizada quando prevista no projeto de reabilitação, consiste na retirada de amostra do solo, permitindo o acesso à espessura da camada de revestimento e ao material constituinte da base (DNIT - IPR 720, 2006).

Figura 9 - "Ground Penetration Radar"



Fonte: Marecos et al. (2017)

Figura 10 - "3D Ground Penetrating Radar" (GPR 3D)



Fonte: Adaptado de Zhao e Al-Qadi (2016).

Tecnologias mais recentes permitiram a utilização de equipamentos de sondagem de solo não destrutivos para a avaliação da espessura das camadas, um exemplo deste equipamento é o GPR. O GPR opera transmitindo um pulso eletromagnético de alta frequência que percorre as camadas do pavimento. O sinal transmitido, ao atingir o limite de uma camada devido a diferença de propriedades elétricas de cada material, é refletido de volta. O equipamento ao

receber este sinal refletido, amplifica, digitaliza e o converte em uma imagem chamada radargrama, que fornece informações para traçar o perfil das diferentes camadas da estrutura (CÉSAR MASCARENHAS AGUIAR, 2005; FARIA, 2010).

Tabela 1 - Maneiras de aquisição da espessura das camadas.

Método	Obtenção	Execução	Fontes
Histórico-cadastral	Pesquisa em banco de dados.	Identificação das espessuras dimensionadas em projeto.	DNIT - IPR 720 (2006); Bernucci et al. (2008).
Sondagem direta	Destrutiva.	Retirada de amostras.	DNIT - IPR 720 (2006).
GPR	Não-destrutiva.	Emissão de um pulso de onda eletromagnético.	Marecos et al. (2017); Zhao e Al-Qadi (2016).

Fonte: Das autoras (2022).

Na Tabela 2 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens dos métodos de aquisição analisados. Os dados históricos cadastrais, contam com a vantagem de não precisarem de testes de campo, entretanto muito dos registros sobre os projetos da via são indisponíveis ou incompletos. Além disso, como afirma Marecos et al. (2017), quando existem os dados, a confiabilidade é baixa, pois mesmo com o controle tecnológico após a construção é comum se observar diferença entre o projeto e a estrutura construída.

Outro problema da utilização que afeta a confiabilidade deste método é que com o passar dos anos a estrutura do pavimento sofre alterações devido a degradação contínua gerada pelos carregamentos do tráfego. O surgimento dos defeitos tem impacto na espessura, tanto na camada asfáltica, quanto nas camadas granulares. As deformações permanentes causadas pela compactação ou o rearranjo do material das camadas granulares, resultam na diminuição da espessura dessas camadas. Já os defeitos de desagregação causados pelo arrancamento do revestimento asfáltico, resultam na diminuição da espessura das camadas betuminosas (BERNUCCI et al. 2008).

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos métodos de aquisição das espessuras das camadas.

Método	Vantagens	Desvantagens	Fontes
Histórico-cadastral	i. Não é necessária a realização de testes em campo.	i. Dados indisponíveis ou incompletos; ii. Baixa confiabilidade.	Bernucci et al. (2008).
Sondagem direta	i. Caracterização dos materiais e das espessuras das camadas.	i. Informações locais pontuais; ii. Teste destrutivo; iv. Interrupção do tráfego.	Zhao e Al-Qadi (2016).
GPR	i. Perfil longitudinal das espessuras; ii. Sem interrupção do tráfego; iii. Não-destrutivo; iv. Inspeção de defeitos; v. Controle de qualidade.	i. Maior custo.	Al-Qadi e Lahouar (2005); Saarenketo (2006); Noureldin et al. (2005).

Fonte: Das autoras (2022).

A sondagem direta é o recurso utilizado pelos órgãos rodoviários quando não é possível obter dados históricos-cadastrais ou quando prevista em projeto de reabilitação. A sondagem direta permite a obtenção da espessura da camada que caracteriza a real situação da estrutura no momento da amostragem. Esse método por ser destrutivo, gera transtornos com a interrupção do tráfego para aquisição pontual de amostra retirada do pavimento. Além disso, uma amostragem pontual de acordo com segmentos considerados homogêneos, fornece uma caracterização limitada das espessuras das camadas para toda a extensão daquele segmento a ser analisado (ZHAO; AL-QADI, 2016).

Com intuito de contornar as desvantagens dos métodos mais utilizados no Brasil (histórico-cadastral e sondagem direta), o GPR é uma ferramenta alternativa de obtenção da espessura das camadas que apesar do seu maior custo de aplicação, apresenta vantagens. Além do seu caráter não destrutivo, o GPR oferece resultados contínuos ao longo da estrutura analisada, por isso pode ser usado para traçar o perfil de seções homogêneas do pavimento (AL-QADI; LAHOUAR, 2005; SAARENKETO, 2006).

De acordo com Noureldin et al. (2005), a tecnologia GPR provê aos órgãos rodoviários uma ferramenta de análise que permite a caracterização da espessura das camadas de maneira rápida, contínua e sem interrupção do tráfego, visto que, a retirada de amostras por sondagem direta se torna impraticável para análise em longas extensões, além de fornecer menos

informações sobre a estrutura. Com isso o GPR se torna a opção mais atrativa para ser aplicada a nível de rede.

Noureldin et al. (2005) cita outras aplicações para o teste GPR, a localização de potenciais defeitos da estrutura do pavimento e o controle da qualidade de execução da espessura de camada asfáltica em relação ao projeto. O estudo de Marecos et al. (2017) mostrou uma alta variabilidade da espessura das camadas “in situ” obtidas através do teste GPR em comparação ao projeto da via, fato que desencadeou trincas após um ano da realização do reforço. Desta forma é possível observar que o uso do GPR para o controle de construção da espessura das camadas, pode evitar defeitos precoces advindos da execução incorreta do projeto.

Outra análise possível em relação aos testes é a facilidade e segurança de execução. O GPR permite a realização do teste na velocidade da via, sem interrupção do tráfego. Contrário as sondagens diretas que demandam procedimentos de logística, coleta de amostras e posteriores concertos, tornando a execução menos ágil e segura.

Novas tecnologias de avanço do teste GPR vem sendo lançadas e disseminadas no mercado. Um dos exemplos desses avanços é o GPR 3D. O aparelho possui o método de execução para obtenção da espessura de camada semelhante ao do GPR, porém o GPR 3D apresenta algumas diferenças na concepção do teste, apresentadas na Tabela 3.

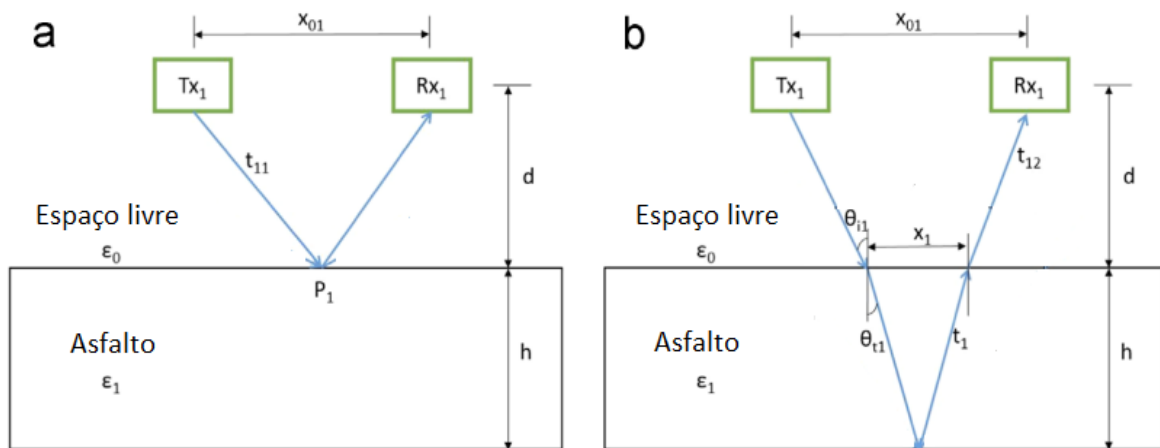
Tabela 3 - Diferenças na concepção e execução do GPR e GPR 3D.

Equipamento	Quantidade de antenas (Emissora-receptora)	Modo de reflexão	Fontes
GPR	1 par de antenas	Método de deslocamento comum.	Marecos et al. (2017); Kheradmandi e Modarres (2018).
GPR 3D	11 pares de antenas.	Método do ponto médio comum estendido (PMCE).	Zhao e Al-qadi (2016).

Fonte: Das autoras (2022).

A primeira está relacionada a quantidade de antenas. O GPR opera por meio de um par de antenas, uma emissora (Tx) e uma receptora (Rx), permitindo apenas a reflexão de deslocamento comum do pulso eletromagnético, de Tx para Rx como apresentado na Figura 11.

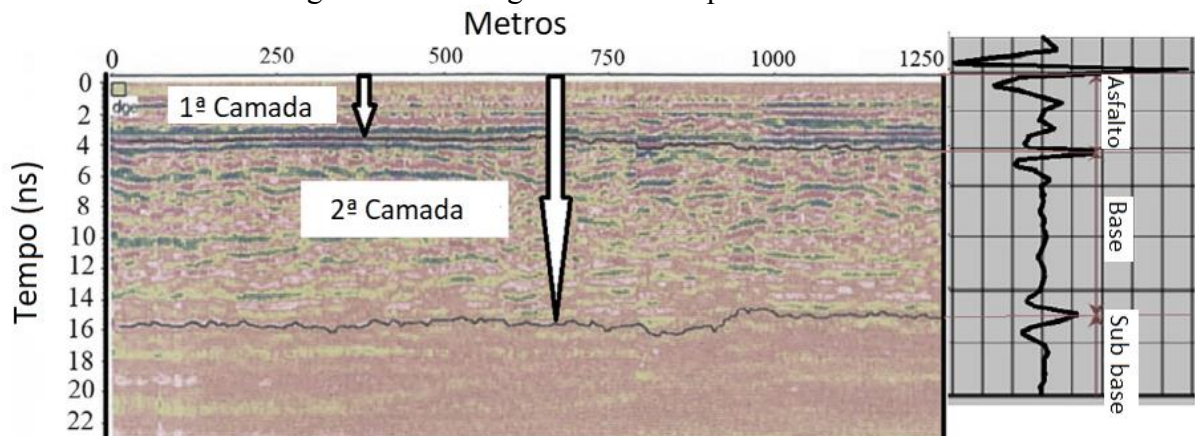
Figura 11 - Modo de reflexão dos pulsos gerados pelo GPR (a) reflexão da superfície superior da camada asfáltica e (b) reflexão da superfície inferior da camada asfáltica.



Fonte: Adaptado de Zhao e Al-Qadi (2016).

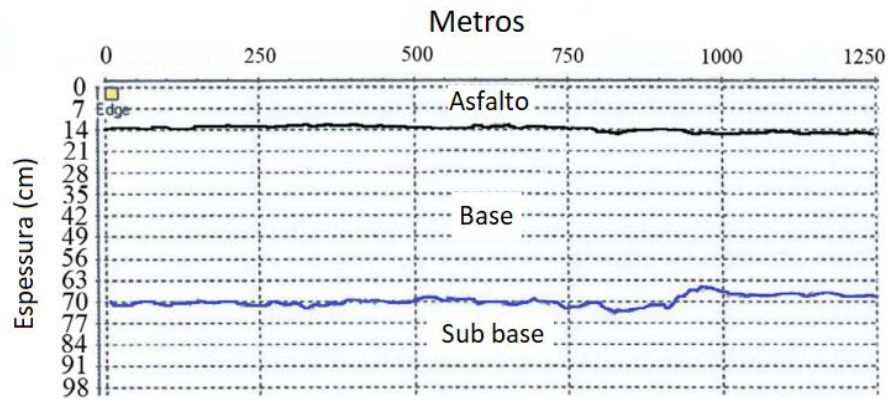
O processamento dos dados, como explica Kheradmandi e Modarres (2018), demanda a calibração da constante dielétrica do asfalto, velocidade em que a onda eletromagnética percorre o material. Para então transformar o Radargrama (Figura 12), que expõe o tempo que a onda percorreu a estrutura até ser refletida, em um Diagrama de Espessuras, como exposto na Figura 13.

Figura 12 - Radargrama obtido a partir de ensaio GPR.



Fonte: Adaptado de Kheradmandi e Modarres (2018).

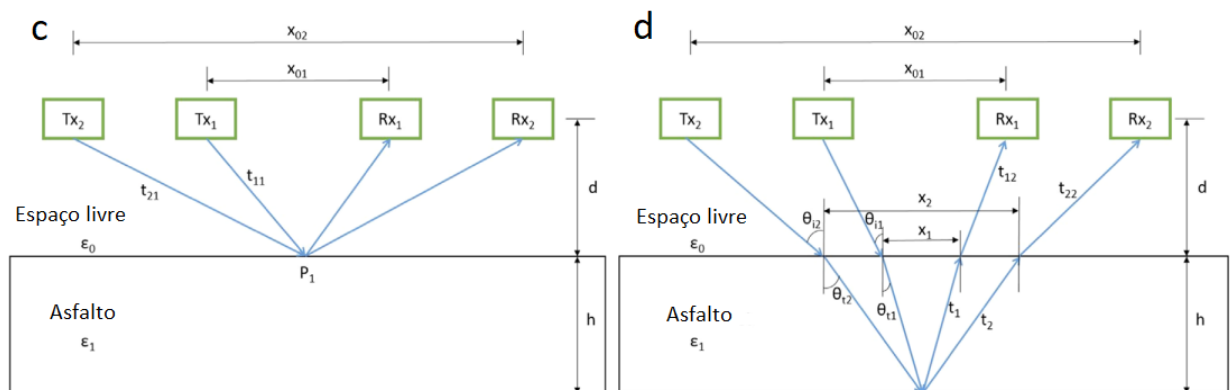
Figura 13 - Diagrama de espessuras obtido após a interpretação dos sinais.



Fonte: Adaptado de Kheradmandi e Modarres (2018).

O GPR 3D por sua vez, possui um arranjo de 11 pares de antenas emissora-receptora ($(TX_{1-11})(RX_{1-11})$). Tal arranjo permite a combinação de diferentes padrões de escaneamento, para encontrar a melhor resolução do sinal. A combinação dos sinais é baseada na geometria dos pulsos de duas antenas emisoras, que utiliza a configuração de reflexão do ponto médio comum entendido (PMCE), como apresentado na Figura 14.

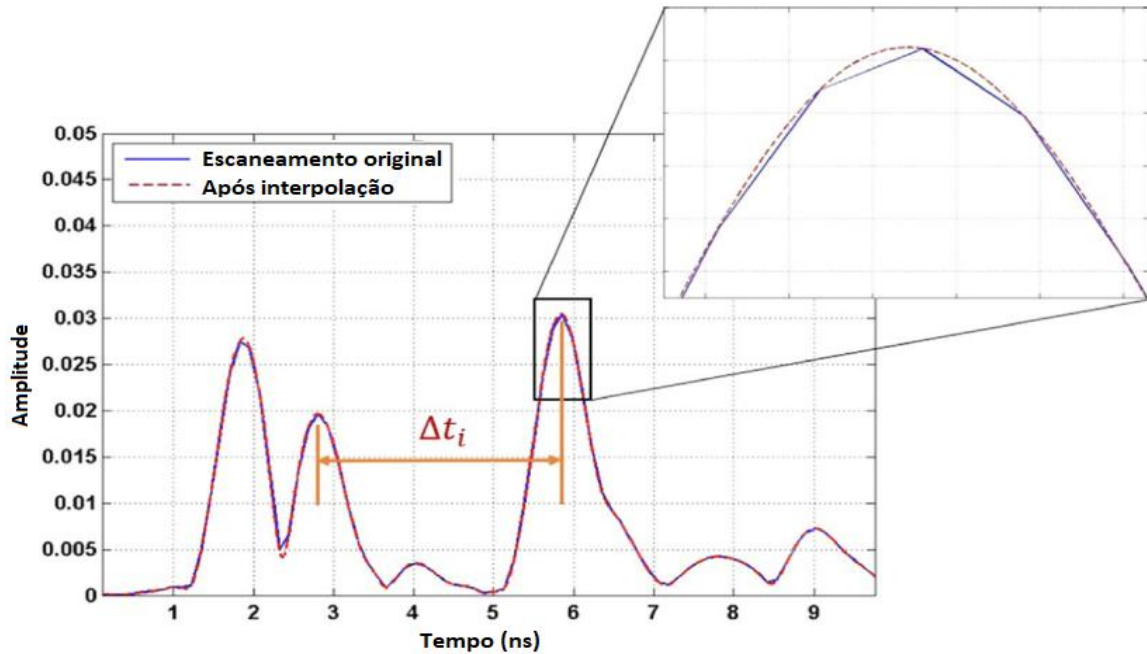
Figura 14 - Modo de reflexão dos pulsos gerados pelo GPR 3D (c) reflexão da superfície superior da camada asfáltica e (d) reflexão da superfície inferior da camada asfáltica.



Fonte: Adaptado de Zhao e Al-Qadi (2016).

Então a interpolação dos sinais para obtenção da variação de tempo entre os pulsos, como apresentado na Figura 15, permite a solução direta das equações, utilizando apenas a constante dielétrica do ar. Por fim o radargrama é convertido em diagrama de espessuras (ZHAO; AL-QADI, 2016).

Figura 15 - Interpolação do sinal de pulsos gerados pelo GPR 3D.



Fonte: Adaptado de Zhao e Al-Qadi (2016).

Visto o modo de execução semelhante dos dois aparelhos, a Tabela 4, contempla as vantagens e desvantagens relacionadas a implementação de tais testes pelos órgãos responsáveis pelas rodovias brasileiras.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens entre o GPR e GPR 3D.

Equipamento	Vantagens	Desvantagens	Fontes
GPR	<ul style="list-style-type: none"> i. Processamento de dados mais simples; ii. Normalização em outros países. 	<ul style="list-style-type: none"> i. Necessita calibração da constante dielétrica através da retirada de amostra. 	Marecos et al. (2017); Kheradmandi e Modarres (2018).
GPR 3D	<ul style="list-style-type: none"> i. Maior produtividade a nível de rede; ii. Não demanda processo de amostragem. 	<ul style="list-style-type: none"> i. Placas de metal embutidas no pavimento; ii. Aparelho mais complexo; iii. Processamento complexo para camadas mais finas. 	Zhao e Al-qadi (2016).

Fonte: Das autoras (2022).

A diferença significativa entre os dois métodos é o procedimento de cada equipamento para a interpretação dos sinais. O GPR é considerado um teste não destrutivo pois a aquisição das espessuras ao longo da extensão da via não requer retirada de amostras. Porém para a

interpretação dos sinais de forma mais precisa é necessária a calibração do teste de acordo com a via analisada. Como explicam Kheradmandi e Modarres (2018) o processo de calibração consiste na retirada de um número reduzido de amostras, para a definição da constante dielétrica média do asfalto. Este inconveniente é solucionado pelo GPR 3D que não necessita da constante dielétrica média do asfalto para sua calibração.

Em contrapartida, para a interpretação dos sinais obtidos com o GPR 3D, devido a implementação do modo de reflexão PMCE, é necessária a resolução das equações obtidas geometricamente do pulso. No estudo realizado por Zhao e Al-Qadi (2015) foi identificada que a leitura da variação do tempo (Δt) entre os pulsos lidos provocavam uma grande variação dos resultados finais. Portanto é necessária a interpolação de Whittaker-Shannon dos dados dos pulsos para um melhor ajuste da curva, de maneira a obter um resultado final mais preciso da solução das equações.

Nota-se que o processamento dos dados é o ponto crucial para o procedimento executado pelo GPR 3D, necessitando de mais recursos computacionais, que o GPR comum. Além disso, devido a sensibilidade do diagrama de espessuras do GRR 3D à variação de tempo de leitura entre os pulsos, camadas mais finas demandam um processo adicional de classificação de múltiplos sinais Zhao e Al-Qadi (2018). Em contrapartida, o GPR 3D evita a necessidade de análise amostral que o GPR comum utiliza, tornando mais ágil a execução do teste em campo.

Outro fator a se levar em consideração é a popularização e o resguardo normativo do GPR em relação ao GPR 3D. O GPR é normatizado pela “*American Association of State Highway and Transportation Officials*” AASHTO R 37-04 (2004) e pela “*American Society for Testing and Materials*” ASTM D4748 (2020), tem ampla aplicação nos países estrangeiros e já é utilizado no Brasil, enquanto o GPR 3D não apresenta nenhuma normatização por órgão federal. Isso demonstra que a aplicação do GPR 3D tem um longo caminho a percorrer para que sua prática alcance a alta escala, enquanto o uso do GPR comum é algo mais acessível no país e está mais próximo da normatização.

Analisando a Tabela 4 é possível observar que o GPR 3D possui mais vantagens em relação ao GRP comum, porém também mais desvantagens. A maior produtividade de rede do GPR 3D pode trazer benefícios de agilidade significativos ao teste, porém o processamento dos sinais obtidos demanda maior complexidade computacional. O investimento na consolidação do GPR comum no Brasil, se revela mais próxima da realidade, para que no futuro a do GPR 3D aconteça mais facilmente.

4.2. Bacias de deflexão

As bacias de deflexão são parâmetros deflectométricos que representam a resposta da estrutura ao carregamento e permitem o entendimento da capacidade de carga global da estrutura.

É o parâmetro principal para o cálculo do módulo resiliente e sua obtenção se dá por meio de equipamentos que medem os deslocamentos verticais do pavimento, frente ao carregamento. Há no mercado diversos tipos de equipamentos que se diferenciam entre si pelo tipo de carregamento empregado no teste não-destrutivo apresentado na Tabela 5 como sendo de carregamento quase-estático como a viga Benkelman (BERNUCCI et al., 2008) e os de carregamento dinâmico como: o "*Falling Weight Deflectometer*" (FWD) (ZHANG; OTTO; OESER, 2021; MARECOS et al., 2017) (Figura 16), o "*Traffic Speed Deflectometer*" (TSD) (WU et al., 2020) (Figura 17) e o "*Light Weight Deflectometer*" (LWD) (TANG; STOFFELS; PALOMINO, 2013) (Figura 18).

Figura 16 - "Falling Weight Deflectometer"



Fonte: Marecos et al. (2017)

Figura 17 - "Traffic Speed Deflectometer"



Fonte: LIU, Pengfei et al. (2018).

Figura 18 - "Light Weight Deflectometer"



Fonte: Tang, Stoffels e Palomino (2013).

Na Tabela 5 estão descritos os diferentes equipamentos de aferição das bacias de deflexão do pavimento perante aplicação de carga e eles se diferem entre si pelo método de execução do teste. A viga Benkelman consiste em um equipamento de aplicação de carga de um caminhão de eixo padrão movendo-se em baixa velocidade, a aferição das medidas é realizada com o auxílio de um extensômetro e é feita manualmente (BERNUCCI et al., 2008).

Tabela 5 - Métodos de execução e tipos de carregamentos dos testes.

Equipamento	Método de Execução	Estrutura do equipamento	Tipo de Carregamento	Fontes
Viga Benkelman	Caminhão de eixo padrão movendo-se em baixa velocidade.	Acoplado a veículo e leitura manual.	Carregamento quase-estático em verdadeira grandeza.	Bernucci et al. (2008).
FWD	Aplicação de um pulso de carga.	Acoplado a veículo e leitura automática.	Carregamento dinâmico com carga pontual de impacto.	Zhang, Otto e Oeser (2021); Marecos et al. (2017).
TSD	Caminhão de eixo padrão com velocidade variável.	Acoplado a veículo e leitura automática.	Carregamento dinâmico com carga móvel em verdadeira grandeza.	Wu et al. (2020).
LWD	Aplicação de um pulso de carga.	Transporte manual e leitura automática.	Carregamento dinâmico com carga pontual de impacto.	Tang, Stoffels e Palomino (2013).

Fonte: Das autoras (2022).

O TSD utiliza a mesma estruturação, consiste em um equipamento acoplado a um caminhão de eixo padrão que aplica uma carga de verdadeira grandeza, porém permite a variação da velocidade de execução do teste, usualmente realizado com uma na velocidade média da via e utiliza sensores que realizam a leitura automática das deformações provocadas (WU et al., 2020).

Em contrapartida, o carregamento dos testes FWD e LWD são realizados por meio da aplicação de um pulso de carga, onde uma massa é solta a uma certa altura e seu peso é transmitido ao pavimento por uma placa de metal circular, e sensores medem a bacia de deformação gerada pela carga. O LWD é um equipamento pequeno e leve o suficiente para transporte manual e lança uma massa que varia entre 10 e 15 kg. Já o FWD é acoplado a um veículo e a massa utilizada varia de 50 a 300 kg (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994; TANG; STOFFELS; PALOMINO, 2013).

Os equipamentos são caracterizados pelo seu tipo de carregamento realizado no teste, como é possível observar na Tabela 5. A viga Benkelman realiza a aquisição de baias de deflexão causadas por um carregamento quase-estático, onde o caminhão de eixo em que o equipamento está instalado se move em baixa velocidade até atingir o próximo ponto de medição da deflexão. Os equipamentos FWD e LWD, são caracterizados por um carregamento dinâmico de impacto, onde o equipamento provoca uma aplicação de carga quase instantânea

no pavimento para a aquisição das bacias de deflexão. Já o TSD se caracteriza por apresentar um carregamento dinâmico móvel de verdadeira grandeza, onde a aquisição das bacias acontece junto a passagem de um caminhão de eixo padrão na via analisada (CHEN et al., 2018; MARECOS et al., 2017).

A Tabela 6 apresenta as vantagens e desvantagens observadas entre a viga Benkelman e os aparelhos dinâmicos. Os aparelhos dinâmicos apresentam diversas características em comum e por isso foram agrupados para primeira análise. A viga Benkelman é atualmente o aparelho mais utilizado para a aquisição das medidas de deflexão do pavimento pelos órgãos rodoviários brasileiros. O equipamento, além de possuir norma vigente assegurada pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) desde 1994 através da DNER-ME 24/94 e DNER-PRO 175/94, possui fácil calibração e execução.

Entretanto, os únicos dados que a execução do teste com a viga Benkelman fornece são as deflexões máximas do pavimento à aplicação de carga. A deflexão máxima não permite o entendimento completo da capacidade de carga da estrutura, por não aferir diretamente o valor do seu raio de curvatura (DNIT - IPR 719, 2006). Assim, o teste da viga Benkelman ainda demanda o processo de cálculo do raio de curvatura para o traçado da bacia de deflexão, feito empiricamente através de uma expressão matemática que considera a deflexão em dois pontos diferentes.

Tabela 6 - Comparativo de vantagens e desvantagens da viga Benkelman e os aparelhos dinâmicos

Equipamentos	Vantagens	Desvantagens	Fontes
Viga Benkelman	i. Fácil Calibração e utilização; ii. Baixo custo.	i. Fornece somente a deflexão máxima; ii. Processo lento.	DNIT - IPR 719 (2006); Bernucci et al. (2008).
Aparelhos Dinâmicos (FWD, LWD e TSD)	i. Rápida reprodução; ii. Fornece diretamente as bacias de deflexão; iii. Leitura automática.	i. Necessitam de calibração mais complexa.	Marecos et al. (2017); Wu et al. (2020); Tang, Stoffels e Palomino (2013).

Fonte: Das autoras (2022).

Nota-se que a viga Benkelman é o único equipamento entre os quatro analisados que utiliza um método de leitura dos dados feita manualmente, provocando maior probabilidade de erro. Além disso, a leitura manual é feita ponto a ponto e a aplicação de carga quase-estática torna o processo de execução lento. Consequentemente, os aparelhos dinâmicos apresentam-se

mais vantajosos em relação a velocidade de execução e automatização da aquisição de dados, perante a viga Benkelman.

De acordo com WU et al., (2020) a automatização da aquisição das bacias de deflexão presente nos equipamentos FWD, LWD e TSD torna mais favorável à aplicação destes testes a nível de rede. A maior produtividade de tais testes ocorre devido ao arranjo de múltiplos sensores, que conseguem medir a deformação a diferentes distâncias da aplicação da carga simultaneamente. Tal arranjo permite o levantamento de mais pontos em menos tempo, cobrindo uma maior extensão de análise, evitando ainda, erros por não-simultaneidade. (TANG; STOFFELS; PALOMINO, 2013; WU et al., 2020). Além disso, os equipamentos dinâmicos medem o valor da temperatura de superfície no momento da aferição das deformações, dado importante para a determinação do módulo resiliente das camadas por retroanálise devido às propriedades viscoelásticas do revestimento asfáltico. Em contrapartida, no teste da viga Benkelman, para a aferição da temperatura é necessário que haja um equipamento extra que realize essa medição e registro dos dados (DNIT IPR 719, 2006).

Os equipamentos dinâmicos por serem mais sofisticados em relação a viga Benkelman, necessitam de calibrações periódicas e especializadas, além da necessidade de treinamento específico para a sua execução. Tais necessidades descritas representam desvantagens, que explicam a dificuldade de inserção destes aparelhos no mercado brasileiro. Porém tendem a ser solucionadas com a ampla utilização e difusão dos testes, impulsionando mais estudos e qualificações sobre seu uso, além da instalação de novos postos de calibração destes equipamentos (FONTUL, 2004; BERNUCCI et al., 2008; MARECOS et al., 2017).

Dentre os aparelhos dinâmicos, é possível destacar diferentes vantagens e desvantagens de execução advindos das adaptações feitas nos novos testes. Tal comparativo é descrito na Tabela 7.

De acordo com Chen et al. (2018), o FWD é considerado um dos mais efetivos métodos de aferição da deflexão do pavimento, por sua consolidada utilização no mercado mundial há décadas. O FWD vem ganhando espaço no cenário brasileiro e já possui regulamentação pela norma técnica DNER-PRO 273/96. Os testes TSD e LWD, são variações do FWD e foram lançados no mercado mais recentemente, por isso ainda não apresentam a mesma visibilidade do FWD.

Tabela 7 - Comparativo de vantagens e desvantagens dos testes FWD, LWD e TSD.

Equipamento	Vantagens	Desvantagens	Fontes
FWD	i. Possui normatização; ii. Consolidada Utilização.	i. Interrupção do tráfego para sua realização.	Fontul (2004); Chen et al. (2018).
LWD	i. Fácil transporte que permite aplicação em locais de difícil acesso.	i. Menor bulbo de tensões gerado;	Tang, Stoffels e Palomino (2013).
TSD	i. Real interação pneu-pavimento; ii. Não necessidade de interrupção do tráfego.	i. Necessidade de padronização da execução do teste.	Wu et al. (2020).

Fonte: Das autoras (2022).

Os equipamentos FWD e LWD possuem o princípio de execução parecidos, pois permitem a análise do pavimento por meio de um impacto de carregamento quase instantâneo. O LWD é um equipamento mais compacto, podendo atingir um valor de peso 30 vezes menor que o do FWD. Essa leveza e tamanho, facilita o transporte e o seu uso em locais de difícil acesso. Entretanto, o fator de redução de massa lançada do LWD diminui também o alcance de análise, pois o bulbo de tensões gerado não atinge camadas muito profundas.

Marecos et al. (2017) revela que tanto a extensão horizontal quanto a vertical da superfície deformada gerada pelo LWD são inferiores em relação ao FWD. Isso implica em um maior número de pontos a ser levantado, para cobrir toda a área a ser analisada. Além disso, não permite a completa análise de pavimentos com camadas muito robustas, pois a bacia de deformação criada por este aparelho não alcança camadas mais profundas.

A estruturação do TSD permite a simulação completa do que acontece no tráfego para análise das deflexões, diferente dos testes FWD e LWD que utilizam de uma carga pontual. O TSD é realizado por um carregamento móvel em verdadeira grandeza. A aquisição das bacias de deflexão é feita de forma automática e instantânea no momento da passagem do veículo. Tal natureza de aplicação de carga reflete nos dados aferidos a interação das forças do tráfego atuantes no pavimento, o que não é possível nos testes FWD e LWD. Além disso, o teste TSD, elimina a necessidade de interrupção completa do tráfego para sua realização, solucionando problemas de segurança de operação, custos adicionais de logística e controle de tráfego que a execução dos testes FWD e LWD demandam.

Porém os dados de bacias de deflexão do TSD podem apresentar interferências devido a carregamentos em faixas adjacentes à faixa analisada. Os autores Wu et al. (2020) recomendam a padronização de execução do teste, mantendo as faixas adjacentes livres.

Eliminando assim a necessidade da inclusão de princípios de superposição das forças para a retroanálise, de modo a não aumentar o tempo computacional necessário para encontrar a solução do MR.

O uso mais expressivo dos parâmetros deflectômetros em projetos de reabilitação é a avaliação dos valores de MR das camadas do pavimento. Os testes FWD, TSD e LWD, para obtenção desses parâmetros deflectométricos, apresentam diferentes aplicações de carga dinâmica, que geram diferentes interações de força na estrutura.

Sendo assim, as bacias de deformação geradas por esses testes não possuem correlação direta entre os dados, para serem usadas nas modelagens de simulação da mesma maneira. Isso traz a necessidade de adaptação dos algoritmos de cálculo de acordo com os diferentes testes utilizados (BERNUCCI et al., 2008; TANG; STOFFELS; PALOMINO, 2013).

Para a inserção de um aparelho no mercado que possa superar a utilização da viga Benkelman, é importante a análise e escolha de um equipamento que atenda às necessidades das vias brasileiras, permitindo assim a consolidação de um banco de dados, de um único tipo de teste, a respeito dos resultados obtidos de bacias de deflexão. Dessa forma, o SGP se torna uma ferramenta que auxilia na tomada de decisão sobre inspeção e manutenção de pavimentos de modo eficiente, podendo ainda ser utilizado como fonte de pesquisa para a identificação de padrões de propagação, estudo de melhorias e criação de um plano de ações de destinação de recursos a nível de rede.

5. CONCLUSÃO

Através da revisão de literatura feita em busca de informações sobre equipamentos e aplicações dos testes não destrutivos de avaliação de parâmetros importantes para análise estrutural do pavimento asfáltico, suas correlações de dados e metodologias de execução, foi possível a conclusão de algumas análises e discussões feitas. Considerando os dados levantados sobre as maneiras de obtenção da espessura das camadas, conclui-se que os métodos utilizados atualmente no Brasil, (histórico-cadastral e de sondagem direta) estão defasados em comparação ao GPR e GPR 3D. Vários estudos demonstram que a utilização de dados histórico-cadastrais não possui confiabilidade por não representar a real espessura da camada no momento da análise e por sua vez, a sondagem direta tem o fator limitante de fornecer uma caracterização pontual e destrutiva, inviabilizando o seu uso para análise de malhas rodoviárias extensas.

Ainda sobre os métodos de obtenção da espessura de camada, O GPR e o GPR 3D em comparação ao histórico-cadastral e à sondagem direta, se provaram eficazes por aferir o valor das espessuras de camada no momento analisado de forma contínua, não destrutiva e sem interrupção do tráfego. Já o comparativo entre o GPR comum e o GPR 3D apresentou pontos favoráveis e desfavoráveis para ambos. Porém a utilização do GPR comum mostrou-se mais palpável por necessitar de menos recursos computacionais e já ser normatizado em países estrangeiros. Sendo assim o GPR apresenta a melhor opção para substituir os atuais métodos de análise de espessura das camadas utilizadas no Brasil.

Em relação a análise feita sobre os equipamentos não destrutivos utilizados para aferir as bacias de deflexão, foi possível concluir que os equipamentos dinâmicos (FWD, LWD e TSD) possuem uma maior produtividade, facilitando sua aplicação a nível de rede em comparação a viga Benkelman. Contudo, os equipamentos dinâmicos possuem particularidades entre si, sendo o LWD uma opção para vias onde a utilização do FWD não é de fácil execução porém não possui eficiência a nível de rede. O TSD apesar de apresentar resultados positivos nas pesquisas, ainda necessita de mais estudos para padronização de execução e normalização.

Por fim, considerando as conclusões pontuadas em relação aos equipamentos de aferição das bacias de deflexão, o FWD se mostrou uma opção interessante para substituir a viga Benkelman, com grandes chances de aplicação no mercado brasileiro, por já possuir normalização vigente no país, ser um aparelho de aquisição de dados automática e eficiente em análises a nível de rede. Além disso, foi possível inferir que a ampla difusão do FWD no país

será de grande relevância para a consolidação de um banco de dados homogêneo para o SGP, pois o equipamento já possui diversas pesquisas que trazem a compatibilização dos dados obtidos com o FWD para metodologias de cálculo, inicialmente desenvolvidas utilizando a viga Benkelman, facilitando sua utilização.

REFERÊNCIAS

- AL-QADI, Imad L.; LAHOUAR, S. Measuring layer thicknesses with GPR—Theory to practice. **Construction and building materials**, v. 19, n. 10, p. 763-772, 2005.
- AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials. **Application of ground penetration radar (GPR) to highways**. AASHTO Designation R37, 2004.
- ASTM D4748-10. **Standard test method for determining the thickness of bound pavement layers using short-pulse radar**. 5ª Edição, 2010.
- BALBO, José Tadeu. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. **Oficina de Textos**, 2007.
- BERNUCCI, Liedi B.; MOTTA, Laura M. G.; CERATTI, Jorge Augusto P.; SOARES, Jorge B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2007.
- CAUSIM, Patrícia Bolsonaro. Estudo de um sistema de gerência de pavimentos para cidades de pequeno e médio porte. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- CÉSAR MASCARENHAS AGUIAR, Júlio. **Radar de penetração no Solo (GPR): Aspectos geofísicos e geodésicos, processamento e análise em pavimento flexível**. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- CHEN, Can et al. Non-destructive modulus testing and performance evaluation for asphalt pavement reflective cracking mitigation treatments. **The baltic journal of road and bridge engineering**, v. 13, n. 1, p. 46-53, 2018.
- CNT, Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2018**. Brasília: CNT, 2018. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>. Acesso em: 15 jan 2022
- CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Plano CNT de transporte e logística 2018**. Brasília: CNT, 2018. Disponível em: <https://planotransporte.cnt.org.br/>. Acesso em: 15 jan 2022
- DNER - ME 024/94 - Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Determinação das deflexões no pavimento pela viga Benkelman. **Norma rodoviária**. Rio de Janeiro, 1994
- DNER - PRO 273/96 - Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”: procedimento. **Norma rodoviária**. Rio de Janeiro, 2006.
- DNER - PRO 175/94. Aferição de viga Benkelman. **Norma Rodoviária**. Rio de Janeiro, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – IPR 719. **Manual de pavimentação**. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – IPR 720. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – IPR 745. **Manual de gerência de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2011.

- FAKHRI, Mansour; DEZFOULIAN, Reza Shahni. Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model. **Construction and building materials**, v. 204, p. 768-780, 2019.
- FARIA, Sandro Henrique de. **O uso do georadar na determinação de parâmetros da estrutura de pavimentos flexíveis**. 2010.
- FONTUL, Simona. **Structural evaluation of flexible pavements using non-destructive tests**. 2004. Tese de Doutorado.
- HAAS, Ralph; HUDSON, W. Ronald; ZANIEWSKI, John P. **Modern pavement management**. 1994.
- HOU, Yue et al. The state-of-the-art review on applications of intrusive sensing, image processing techniques, and machine learning methods in pavement monitoring and analysis. **Engineering**, 2021.
- KHERADMANDI, Narges; MODARRES, Amir. Precision of back-calculation analysis and independent parameters-based models in estimating the pavement layers modulus-Field and experimental study. **Construction and building materials**, v. 171, p. 598-610, 2018.
- MARECOS, Vania et al. Evaluation of a highway pavement using non-destructive tests: Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar. **Construction and building materials**, v. 154, p. 1164-1172, 2017.
- MOREIRA, Eclesielter Batista. EFEITO DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO EM REVESTIMENTO ASFÁLTICO DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO. In: **II Simpósio de métodos numéricos em engenharia**. 2017.
- TORRES NETO, Edgar de Castro. Execução e avaliação dos ensaios de índice de suporte califórnia (ISC) do subleito e dimensionamento do pavimento utilizados na pavimentação da pista de rolamento do BRT Norte-Sul de Goiânia – trecho Avenida Goiás Norte. 2019. 104 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, **Departamento de áreas acadêmicas Iii, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás**. Goiânia, 2019.
- NÓBREGA, E. S. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro, 2003.
- NOURELDIN, Samy et al. Non-destructive estimation of pavement thickness, structural number and subgrade resilience along indot highways. **Joint transportation research program**, p. 158, 2005.
- PANDOLFO, Daniel Koscrevic; ECHEVERRIA, Jose Antônio Santana; SPECHT, Luciano Pivoto. Análise mecânica de um pavimento flexível restaurado a partir do MR obtido em diferentes softwares de retroanálise com dados de viga Benkelman. **Revista de engenharia Civil IMED**, v. 3, n. 2, p. 71-86, 2016.
- RODRÍGUEZ, V. F. Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero. **Valdivia-Chile: Universidad Austral de Chile**, v. 16, 2008.
- SAARENKETO, Timo. **Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys**. 2006.
- TANG, Xiaochao; STOFFELS, Shelley M.; PALOMINO, Angelica M. Evaluation of Pavement Layer Moduli using Instrumentation Measurements. **International journal of pavement research & technology**, v. 6, n. 6, 2013.

VILLELA, A.R.A.; MARCON, A.F. Avaliação estrutural de pavimentos utilizando um método simplificado de retroanálise – Retran-2CL. In: **Reunião anual de pavimentação**, 33, 2001, Florianópolis. Anais... p. 622-33.

WU, Chaoyang et al. Asphalt pavement modulus backcalculation using surface deflections under moving loads. **Computer-aided civil and infrastructure engineering**, v. 35, n. 11, p. 1246-1260, 2020.

ZHANG, Xiaorui; OTTO, Frédéric; OESER, Markus. Pavement moduli back-calculation using artificial neural network and genetic algorithms. **Construction and building materials**, v. 287, p. 123026, 2021.

ZHAO, Shan; AL-QADI, Imad L. Development of an analytic approach utilizing the extended common midpoint method to estimate asphalt pavement thickness with 3-D ground-penetrating radar. **NDT & E International**, v. 78, p. 29-36, 2016.

ZHAO, Shan; AL-QADI, Imad L. Super-resolution of 3-D GPR signals to estimate thin asphalt overlay thickness using the XCMP method. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 57, n. 2, p. 893-901, 2018.