

PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO ATRAVÉS DE AVALIAÇÃO ESTRUTURAL COMPARADO AO MÉTODO DNER PARA PAVIMENTOS FLEXÍVEIS, APLICADO A UM TRECHO EM GUARAMIRIM/SC

BECKER, Geovane Buguiski ¹
FARIA, Msc. Michela Steluti Poleti³

RESUMO

O estudo realizado neste artigo propôs um método diferente de dimensionamento de pavimentos flexíveis, onde foi explorada a norma de avaliação estrutural do DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem) PRO 011/79, procedimento B, para a avaliação de uma pista toda em seixo rolado compactado, que se encontra na camada de reforço de subleito. Para afirmar a viabilidade do emprego de um reforço estrutural baseado na DNER PRO 011/79, como substituição ao dimensionamento pelo método DNER, presente no manual de pavimentações do DNIT, foi realizado teste de deflexão ao longo de toda a pista em estudo, com o equipamento de Viga Benkelman. Com as leituras calculadas nas fórmulas da norma de avaliação estrutural citada, obteve-se os valores de dimensionamento para todo o trecho e a cada estaca deste. Enfim foram comparados aos resultados aqueles feitos através do método DNER, que é fundamentado no *CBR (California Bearing Ratio)* do subleito. A pista escolhida para o estudo tinha uma estrutura que apresentou diferentes resultados em vários pontos, com leituras de deflexão muito altas, assim como leituras baixas. Em certos pontos a deflexão encontrada era inferior à deflexão admissível da camada final. Sendo assim, através da média de deflexões presente na norma DNER PRO 011/79, o trecho escolhido se deu insatisfatório, já que o reforço calculado ficou maior que o dimensionamento existente, mas caso o trecho fosse dividido em mais partes, devido à variação de deflexões, a aplicação do reforço seria algo satisfatório na questão de economia de materiais do pavimento flexível. O método de dimensionamento por reforço estrutural pode ser algo útil quando o estudo do comportamento da estrutura é bem elaborado e a amostragem do trecho bem dividida, respeitando o greide da pista de acordo com o levantamento de deflexões.

Palavras-chave: Dimensionamento; Pavimentos Flexíveis; Reforço Estrutural; Deflexão de pavimentos; Viga Benkelman; Estrutura de um pavimento.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo de todo pavimento é, através de sua estrutura composta por camadas limitadas que visam resistir aos impactos causados pelo tráfego e desgaste do tempo, proporcionar para seus usuários comodidade e segurança em

¹Graduando do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário UNISOCIESC, gebbecker@hotmail.com; ²Professor orientador: Msc. Michela Stelutti Poleti Faria, Centro Universitário UNISOCIESC, michela.steluti@unisociesc.com.br.

boas condições de fluxo nas vias (SENÇO, 2007). Para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, o método mais empregado no Brasil é o especificado pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem) que tem como base o volume de tráfego de veículos numa determinada pista e o Índice de Suporte Califórnia (ou *California Bearing Ratio – CBR*) do subleito para seu projeto. (DNIT, 2006)

Muitas obras rodoviárias realizadas em nosso país são reconstruções de pistas existentes, com a finalidade de adequá-las a um novo tráfego ou devido à vida útil do pavimento. É muito comum estas rodovias possuírem estruturas muito boas, se tratando de deflexão, que podem ser aproveitadas para economia financeira e de tempo na execução (AZOIA, 2014).

A sondagem representativa aplicada para os ensaios de caracterização do subleito é normalmente realizada de 100 a 200 metros ao longo da extensão da dimensão longitudinal das vias, segundo o dimensionamento pelo método do DNER (DNIT, 2006). Já os ensaios de deflexão são realizados a cada estaca da pista, e estas estacas são geralmente separadas de 10 a 20 metros uma da outra em obras rodoviárias no nosso país, sendo uma amostragem consideravelmente menor. Para as leituras de deflexão, são usados equipamentos como, por exemplo, FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e Viga Benkelman (PINTO, 2016).

O objetivo deste estudo é propor um dimensionamento através da norma de avaliação estrutural DNER PRO 011/79, comparando ao método DNER presente no manual de pavimentações do DNIT para pavimentos flexíveis, em um determinado trecho de uma via marginal da BR-280 em Guaramirim/SC. Através do estudo da deflexão detalhado, aplicado às fórmulas presentes na norma do DNER 011/79 (Reforço de pavimento), realiza-se uma avaliação da estrutura presente, aplicando-se os cálculos de reforço para comparar com o levantamento já realizado pelo método DNER, através do *CBR*, presente no Manual de pavimentação do DNIT. Este estudo de deflexão visa justificar se a amostragem realizada por Viga Benkelman é mais viável para o dimensionamento de uma pista, em comparação com o *CBR*, objetivando a economia de tempo e materiais na execução de um pavimento flexível, de acordo com as dimensões das camadas calculadas por cada método.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como finalidade o embasamento técnico e teórico referente ao tema proposto, dessa maneira orientando o procedimento para chegar aos resultados fundamentais e conclusão do estudo.

2.1 ESTRUTURA E DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Gonçalves (1999, p. 15) explica que “um pavimento flexível é aquele que tem revestimento asfáltico e camada granular”. Os pavimentos flexíveis tem estrutura composta por camada de revestimento asfáltico, de base, de sub-base e reforço de subleito, de forma geral. (BERNUCCI et. al., 2010). Senço (2007) indica detalhando que o pavimento pode ser formado apenas pela combinação da camada de base com um revestimento asfáltico, onde não há necessidade de implantação de sub-base e reforço de subleito para a estrutura final, quando o subleito for de propriedades satisfatórias.

A função de cada camada fica como:

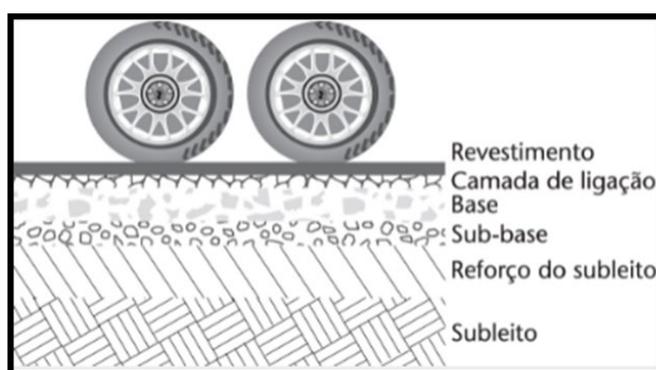
- Subleito: O DNIT (2006) cita que o subleito “é o terreno de fundação do pavimento”, e completa que é a análise primordial do solo natural localizado neste que irá qualificá-lo para o dimensionamento do pavimento. O Subleito é, sempre que plausível, complementado com uma camada de regularização, também chamada de preparo do subleito, onde o objetivo é que a camada de subleito fique de acordo com o projeto, em termos geométricos (SENÇO, 2007);
- Reforço de Subleito: Esta camada tem a finalidade de aliviar as tensões que chegam ao subleito, quando este não tem resistência adequada. É realizada com solos cujas propriedades são indiscutivelmente superiores às do subleito (BALDO, 2007).
- Sub-Base e Base: Ambas camadas de Sub-Base e Base são granulares e de propriedades mecânicas superiores à camada de reforço do subleito, em que a camada de base é superior à de sub-base. Estas camadas têm objetivo geral de receber todas as cargas externas provenientes da superfície devido

ao trânsito e propagá-las de modo reduzido ao subleito do pavimento (GONÇALVES, 1999).

- **Revestimento Asfáltico:** O revestimento asfáltico é a última camada de um pavimento flexível, a qual tem contato direto com as cargas externas oriundas do tráfego, sendo seu comportamento resultante da estrutura do subleito. É a camada formada com material de desempenho superior a todas as outras, então o dimensionamento de sua altura tem que ser cauteloso a ponto de esta não ser menor que o recomendado para certificar a competência do revestimento em resistir as tensões a que é submetida. Pode ser dividido em camada de rolamento e de ligação (*binder*), sendo a primeira a que terá contato direto com o fluxo dos veículos e a segunda que fará a ligação desta com a base do pavimento (SENÇO, 2007; BERNUCCI et. al., 2010).

O dimensionamento de todas as camadas de um pavimento visa encarregá-las de fornecer, dentro de seja qual for as condições meteorológicas, situação de fluxo do tráfego com suporte apropriado. Sendo assim, cada camada deve ter uma estrutura suficiente para que, individualmente e em grupo, tenha desempenho aceitável quando atribuídas pelas cargas externas, evitando rupturas ou outras patologias nos materiais que as integram. A Figura 1 mostra como são divididas as camadas de um pavimento flexível. (BALDO, 2007).

Figura 1 – Estrutura comum de pavimentos flexíveis.



Fonte: Baldo, 2007

2.2 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS PELO MÉTODO DNER

Elaborado pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza, no ano de 1966, a norma de avaliação estrutural DNER-PRO 011/79 foi fundamentada principalmente no

trabalho do corpo de bombeiros do exército dos Estados Unidos, intitulado como “*Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*” (BATISTA E MOTA, 2019). O método completo de dimensionamento do DNER se encontra no Manual de Pavimentação do DNIT, do ano de 2006.

O dimensionamento de pavimentos flexíveis parte do conhecimento da capacidade de suporte através da metodologia *CBR* do subleito de um determinado trecho e também do levantamento do estudo de tráfego, onde estima-se um número equivalente (N) que se refere as operações de um eixo padrão, no decorrer do período de projeto definido nesse mesmo levantamento. Além do Subleito, os valores de *CBR* (em porcentagem) de todas as camadas constituintes na estrutura do pavimento devem ser conhecidos, onde, quando compactadas, nenhuma fique com grau de compactação menor que 100% (BALDO, 2007; PINTO E PREUSSLER, 2002).

A escolha dos materiais que vão compor a estrutura do pavimento tem que respeitar as seguintes propriedades: Subleito com *CBR* superior ou igual a 2%, e expansão menor que 2%; Reforço de Subleito com *CBR* superior ao do subleito e expansão menor que 1%; Sub-base com *CBR* superior ou igual a 20%, expansão menor que 1% e Índice de Grupo igual a zero; Base com *CBR* superior ou igual a 80%, com expansão menor que 0,5%, Limite de Liquidez inferior ou igual a 25% e Índice de Plasticidade inferior ou igual a 6%. Quando o número (N) for menor ou igual a 5×10^6 , pode ser empregado material com *CBR* inferior à 60% e tendo sua composição granulométrica obedecendo as faixas E e F. As demais devem se enquadrar em uma destas apresentadas no Quadro 1 (DNIT, 2006; NETO, 2004):

Quadro 1 – Base Estabilizada Granulometricamente

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
N° 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
N° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
N° 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
N° 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT, 2010

Para a definição do número equivalente (N), deve ser empregada a Equação 1, conforme reforça Máximo e Lima (2018, p. 20);

$$N = 365 \times V_m \times P \times F_v \times F_r \quad \dots (1)$$

Onde:

N= Número de operações do eixo padrão;

P= Período de projeto (em anos);

V_m= Volume médio diário de tráfego durante a vida de projeto;

F_v= Fator de veículo da frota;

F_r= Fator climático regional.

Segundo DNIT (2006, p. 144), FC é um número que quando multiplicado pelo número de eixos que trafegam na rodovia, resulta na quantidade de eixos equivalente ao padrão, e FV é um número que quando multiplicado pelo número de veículos que trafegam na rodovia, gera o número de eixos equivalentes ao padrão.

As espessuras de revestimento asfáltico que vão compor a última camada da estrutura de um pavimento flexível são selecionadas de acordo com o número equivalente (N), e, segundo o que recomenda DNIT (2006, p. 147), devem ser de acordo com o Quadro 2:

Quadro 2 – Espessura Mínima do Revestimento Betuminoso

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^5$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^5 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

Fonte: DNIT, 2006

Neto (2004, p. 38) enfatiza o que o DNIT (2006, p. 149) determina pelo Apêndice A, quanto a espessura total do pavimento, se tratando apenas do material granular a ser dimensionado de acordo com o CBR do subleito e número equivalente (N).

Para o dimensionamento individual das camadas granulares, deve-se respeitar o coeficiente de equivalência estrutural de cada uma, conforme define o DNIT (2006, p. 146) no Quadro de número 3:

Quadro 3 – Coeficiente de equivalência estrutural das camadas de um pavimento flexível.

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

Fonte: DNIT, 2006

Com o coeficiente de equivalência estrutural, podem ser dimensionadas as camadas, conforme Figura 2, respeitando as Equações 2, 3 e 4 que Máximo e Lima (2018, p. 22) apresentam:

$$(R \times Kr) + (B \times Kb) \geq H20 \quad \dots(2)$$

$$(R \times Kr) + (B \times Kb) + (h20 \times Ks) \geq Hn \quad \dots(3)$$

$$(R \times Kr) + (B \times Kb) + (h20 \times Ks) + (hn \times KRef) \geq Hm \quad \dots(4)$$

Onde:

R= Espessura do revestimento em centímetros;

B = espessura da base em centímetros;

h20 = espessura da sub-base em centímetros;

hn = espessura do reforço de subleito em centímetros;

H20 = espessura de pavimento necessária para proteger a sub-base em centímetros;

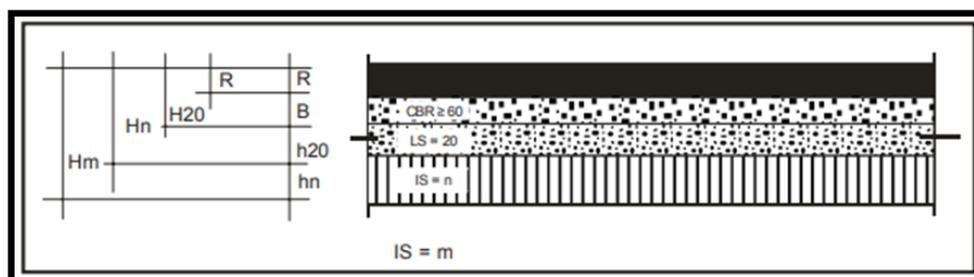
Hn = espessura de revestimento necessária para proteger o reforço de subleito em centímetros;

Hm = espessura total do pavimento em centímetros;

KR = coeficiente de equivalência estrutural do pavimento em centímetros;

KB = coeficiente de equivalência estrutural da base em centímetros;
 KS = coeficiente de equivalência estrutural da sub-base em centímetros;
 KRef = coeficiente de equivalência estrutural do reforço de subleito.

Figura 2 – Dimensionamento do Pavimento Flexível.



Fonte: DNIT, 2006

2.3 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

A norma DNER-PRO 011/79, procedimento B, tem sua metodologia estabelecida pelo engenheiro argentino Celestino Ruiz, que defende que a deflexão máxima admissível se dá por um determinado período de tempo onde o revestimento asfáltico é submetido a cargas externas repetidas. A norma mostra todos os métodos necessário para a revitalização de um pavimento existente, onde através do estudo de suas insuficiências e patologias são calculados novos valores para sua vida restante e reforço para a readequação da via para um novo tráfego (NETO, 2017; BALDO, 2007). Para a avaliação estrutural de um pavimento existente, três etapas devem ser seguidas para catalogar a situação da superfície do pavimento, além dos ensaios de deflexão: levantamento histórico (projetos, métodos construtivos), análise preliminar e análise definitiva (PINTO E PREUSSLER, 2002).

Sobre os métodos para a avaliação estrutural, Bernucci et. at. (2010, p. 443) cita que pode ser realizado por: ensaios destrutivos, semi-destrutivos e não-destrutivo, onde:

- Destrutivos: São os ensaios realizados *in situ*, onde a averiguação se dá por recolhimento de amostras até a camada subleito, onde são abertas cavidades com picaretas, sondas, pás, na via para o estudo de cada camada;
- Semi-destrutivos: Recebe o nome pois, diferente do método destrutivo, esse usa um equipamento menor e uma abertura mais discreta para os ensaios,

onde geralmente é usado um equipamento penetrômetro que tem seus resultados fazendo correlação com valores de *CBR*;

- Não destrutivos: É o método definido por levantamentos de deflexões na pista, onde este é muito mais indicado em grandes trechos de estudo. As deflexões de um pavimento podem ser divididas em deflexões elásticas e permanentes, no qual a primeira é usada para a avaliação estrutural e a segunda por seu levantamento de vida útil e avaliação funcional.

2.3.1 Estudo das Deflexões

Para a realização dos ensaios de deflexão, a norma DNER-PRO 011/79 (1979, p. 7 e 8) define que para o estudo estatístico de um trecho homogêneo considerados para a avaliação estrutural, devem ser levantadas as medidas de deflexões nos trilhos de roda para obter a média aritmética destes valores individuais, assim como seu desvio padrão, e, conseqüentemente, o valor da deflexão característica do trecho, pelas Equações 5, 6 e 7, respectivamente:

$$D = \frac{\sum D_i}{n} \quad \dots(5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (D_i - D)^2}{n-1}} \quad \dots(6)$$

$$D_c = D + \sigma \quad \dots(7)$$

Onde:

D = Média aritmética dos valores de deflexão em centésimo de milímetros;

D_i = Deflexões individuais a ser somadas em centésimo de milímetros;

D_c = Deflexão Característica em centésimo de milímetros;

n = número total de deflexões individuais levantadas;

σ = Desvio padrão da média.

Ainda se tratando do valor de D, a norma do DNER-PRO 011/79 (1979, p. 8) apresenta, através do Quadro 4, parâmetros para aceitar os valores individuais apresentados de acordo com um valor de Z que será definido de acordo com o número total de deflexões individuais (valor de n), aplicado na fórmula $D \pm Z \times \sigma$.

Quadro 4 – Intervalo de aceitação dos valores individuais de acordo com coeficiente Z.

n	Z
3	1
4	1,5
5 - 6	2
7 - 19	2,5
≥ 20	3

Fonte: DNER-PRO 011/79, 1979.

Para a deflexão de projeto a ser utilizada no cálculo de reforço do pavimento, deve se levar em conta a época em que o ensaio de deflexão vai ser realizado assim como o tipo de solo, respeitando-se os valores de correção sazonal do Quadro 5, onde preferencialmente o solo deve estar com a umidade o mais elevada possível, considerando assim o pior caso para o cálculo, em questões de segurança (DNER-PRO 011/79, 1979; AZOIA, 2014).

Quadro 5 – Intervalo de aceitação dos valores individuais de acordo com coeficiente Z.

Natureza do Subleito	Fator de Correção Sazonal - F_s	
	Estação Seca	Estação Chuvosa
Arenoso e Permeável	1,10 - 1,30	1,00
Argiloso e Sensível à Umidade	1,20 - 1,40	1,00

Fonte: DNER-PRO 011/79, 1979.

Com estes valores definidos, a deflexão de projeto e a deflexão admissível da pista em questão serão definidas por duas equações, em que considera-se a deflexão característica e fatos de correção sazonal encontrados, e para a outra principalmente o número equivalente (N) derivado do estudo de tráfego que leva em consideração o número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t. A definição das Equações 8 e 9 fica:

$$D_p = D_c \times F_s \quad \dots(8)$$

$$\text{LogDadm} = 3,01 - 0,176 \times \text{LogN} \quad \dots(9)$$

Onde:

Dp = Deflexão de Projeto em centésimo de milímetros;

Dadm = Deflexão Admissível do trecho em centésimo de milímetros;

N = número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 8,2 t.

2.3.2 Dimensionamento de Reforço do Pavimento

Adotando todas as deflexões calculadas, usa-se Dp e Dadm para o cálculo do reforço, definindo então a espessura da camada de revestimento asfáltico que precisa ter para que suporte o novo tráfego de acordo as estrutura atual do pavimento existente (PINTO E PREUSSLER, 2002). A Equação 10 é a proposta pelo Eng. Celestino Ruiz:

$$h = K \times \text{Log} \frac{Dp}{Dadm} \quad \dots(10)$$

Sendo:

h = Espessura do reforço de revestimento asfáltico;

K = Fator de redução da deflexão, considerado como 40 para revestimento asfáltico.

A norma DNER-PRO 011/1979 (1979, p. 16) ainda deixa claro que, se segundo cálculo com a Equação 10 a espessura de reforço tiver seu valor superior à 5,0 centímetros, para a composição das camadas inferiores, deve se adotar os valores de coeficiente de equivalência estrutural, apresentados no Quadro de número 3. Com isto, para troca de concreto asfáltico por outra camada, deve adotar-se a Equação 11:

$$\frac{2,00}{\text{Coeficiente equivalente estrutural do material utilizado para substituir}} \quad \dots(11)$$

2.4 VIGA BENKELMAN

De modo simples, Vellasco (2018, p. 45) define a Viga Benkelman como sendo “um equipamento mecânico portátil capaz de registrar, de forma não destrutiva, as deflexões de diferentes pontos do pavimento decorrentes da carga estática das rodas duplas de um caminhão carregado”. É um equipamento de fácil

manuseamento e compreendimento, sendo talvez o mais usado entre os profissionais da infraestrutura rodoviária no nosso país (BORGES, 2001).

O aparelho é basicamente separado em duas partes, sendo uma parte que fica imóvel durante todo os levantamentos, presa ao chão por um suporte regulável e dois pés de apoio, a qual será equipada com um vibrador que tem como utilidade principal limitar qualquer inação da parte móvel quando parada, promovendo o trabalho adequado de um extensômetro, que é a outra parte indispensável, sendo que este extensômetro que irá ter as leituras de deflexões quando em contato com a parte móvel devido a ação de deslocamento vertical. A parte móvel é a parte mais comprida, a qual será conectada junto à parte imóvel, mas possibilitando seu movimento vertical, tendo uma de suas pontas ligadas ao extensômetro e a outra ao ponto onde será aplicada a carga e obter a deflexão. A parte imóvel ainda tem uma trava que impossibilita o movimento da parte móvel para transporte. O Apêndice B representa a divisão do equipamento. (CORRÊA E SANTOS, 2016; BORGES, 2001).

Para a execução do ensaio, além do aparelho de Viga Benkelman, se faz necessário de um caminhão com um peso total bruto de 8,2tf equivalentes em todo seu eixo traseiro(simples), que deve ser munido de rodas duplas. Sempre antes de todo ensaio, um calibrador deve estar disposto de modo a verificar a pressão dos pneus do caminhão, os quais devem respeitar 80 lb/pol² de pressão (DNER, 1994).

A escolha do local para posicionamento da viga para leitura deverá obedecer ao critério estabelecido na mesma norma que rege o ensaio, apresentando pelo Quadro 6 como:

Quadro 6 – Posição dos pontos de leitura

Largura da faixa de tráfego (m)	Distância da borda do revestimento (m)
2,70	0,45
3,00	0,60
3,30	0,75
3,50 ou mais	0,90

Fonte: DNER-ME 024/94, 1994

Para obter cada leitura de deflexão, deve-se seguir o seguinte procedimento: Posicionar o caminhão de modo que o local definido fique centralizado entre os

pneus da roda dupla, onde neste local definido central ficará a ponta da viga que irá trabalhar. Estando a viga adequadamente alinhada junto ao caminhão, a trava que é utilizada para transporte do equipamento deve ser solta para possibilitar o movimento da ponta entre os pneus, e os suportes da parte imóvel devem ser acertados de modo que a outra ponta da parte móvel acione o extensômetro para as leituras, onde, com o vibrador ligado, deve-se definir a leitura inicial, devendo ter uma precisão de 0,01mm/minuto ou menos de velocidade de deformação, ou após 3 minutos da ação do vibrador. Já com a leitura inicial estabilizada de acordo com o vibrador, para realizar a leitura final do ponto o caminhão se move devagar até chegar a marca de dez metros do ponto de leitura inicial, quando deve-se ter a leitura final respeitando novamente a precisão indicada na leitura inicial. (DNER, 1994 ; ZANETTI, 2008).

Vargas (2019, p.27) reforça que a Viga Benkelman deve ter o valor de sua constante definido de acordo com a calibração do equipamento, respeitando a norma DNER PRO 175/94.

Para os valores de deflexão a cada ponto, todos serão definidos em centésimos de milímetros, tendo a norma DNER-ME 024/94 estabelecido conforme a Equação 12:

$$D_0 = (L_0 - L_f)x\frac{a}{b} \quad \dots (12)$$

Onde:

D_0 = deflexão real ou verdadeira

L_0 = Leitura Inicial

L_f = Leitura Final

a/b = Dimensões da Viga Benkelman (Constante do equipamento)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo ficará registrada toda a estrutura de pesquisa elaborada para este trabalho, apresentando todos os passos seguidos para sua conclusão.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Com o objetivo de explorar de forma mais ampla a norma de Avaliação Estrutural de Pavimento Flexíveis, esta pesquisa se caracteriza como um estudo de caso, visto que foi realizado a partir de um projeto já existente em uma obra que ainda está em execução, em um trecho específico.

3.2 AMBIENTE DA PESQUISA

O local escolhido para ser realizado o estudo foi uma via marginal da BR-280, que liga a cidade de Jaraguá do Sul à cidade de Guaramirim, no estado de Santa Catarina. A marginal é uma das vias contempladas no projeto de dimensionamento realizado para a duplicação da BR-280. Atualmente, a rodovia está em obras para melhorar o tráfego e evitar os congestionamentos recorrentes durante o dia. Este trajeto é um dos principais acessos às cidades de Jaraguá do Sul e Guaramirim, e também abrange linhas de ônibus e a passagem de pedestres e ciclistas.

A via marginal estudada tem um comprimento total de 560 metros, sendo compreendida em um trecho que parte da estaca 308 + 00 metros até a 336 + 00 metros da obra em questão, na cidade de Guaramirim. A Figura 3 identifica a visão aérea do trecho. A via encontra-se toda em uma camada de seixo rolado, material ali disposto há anos com a finalidade de reforçar o sub-leito existente, localizada do lado direito da BR-280, conforme projeto geométrico desta.

Tal via foi definida para o estudo em questão devido ao longo tempo que ficou submetida ao trânsito local para acesso às residências, posto de combustível e comércio local, onde se pretendia analisar a situação estrutural deste seixo rolado presente através de estudo de deflexão a fim de comparar com o que a norma DNER PRO 011/79 propões para reforços em cima de pavimentos flexíveis.

Figura 3 – Ambiente de Pesquisa

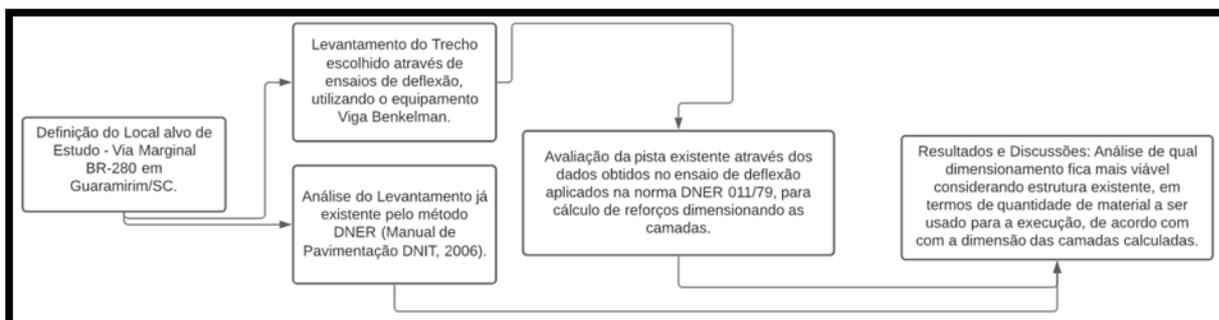


Fonte: Adaptado do Google Earth (2021)

3.3 ETAPAS DA PESQUISA

Partindo de um estudo prévio focado nas normas vigentes de cada dimensionamento, assim como no ensaio de deflexão, foi elaborado um modelo a se seguir para o desenvolvimento deste estudo. Todas as etapas foram organizadas de modo a se obter os resultados esperados, de acordo com a Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma abrangendo a estrutura da pesquisa.



Fonte: O Autor (2021)

3.3.1 Análise do projeto de dimensionamento existente

Como indicado, a obra de duplicação da BR-280 já tem um projeto com parâmetros que já estão sendo obedecidos pela empresa executora. Para as vias principais e marginais (laterais) ao longo de toda a obra, o projeto de dimensionamento de pavimentos flexíveis realizado conforme método DNER foi calculado em cima de um *CBR* representativo do subleito de 7% de valor de suporte,

que resultou em valor total de 47 centímetros para as vias principais e 43 centímetros para as vias marginais, se dividindo da seguinte maneira:

- Sub-base de Macadame Seco: 18,0 centímetros para vias principais e marginais;
- Base de Brita Graduada: 15 centímetros para vias principais e marginais;
- Camada de ligação do revestimento asfáltico: 6,0 centímetros de P.M.Q. (Pré Misturado à Quente) para vias principais e marginais e 4,0 centímetros de C.B.U.Q. (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) para as vias principais;
- Camada de rolamento do revestimento asfáltico: 4,0 centímetros de C.B.U.Q. (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) para vias principais e marginais;

Para a marginal objetivo de estudo, a Tabela 1 mostra como ficou a divisão do dimensionamento:

Tabela 1 – Estrutura de pavimento flexível projetada para as marginais da rodovia BR - 280.

Camada de Rolamento com C.B.U.Q	KR = 2,00	R =	4,0 cm
Camada de Ligação com P.M.Q.	KR = 2,00	R =	6,0 cm
Base de Brita Graduada	KB = 1,00	B =	15,0 cm
Sub-Base de Macadame Seco	KS = 1,00	h ₂₀ =	18,0 cm
Subleito natural do terreno	CBR (representativo) = 7%	h total =	43,0 cm

Fonte: O Autor (2021)

O Estudo de tráfego foi realizado em três pontos da rodovia, onde, para um período de projeto de dez anos, calculou-se o volume médio através de contagens de veículos e classificação por eixo, em dias determinados das semanas do estudo, cada um contendo 14 horas diárias de leitura, obtendo-se os resultados usados para considerar o número equivalente (N) por via. Como o trânsito é diferente para ambos tipos de pista, finalizado o estudo de tráfego foi definido $N = 6,0 \times 10^7$ para as vias principais da rodovia e $N = 5,0 \times 10^6$ para as marginais, valor esse último que será utilizado para o trecho escolhido.

3.3.2 Ensaio de deflexão

Respeitando o método de ensaios proposto na norma DNER-ME 024/94 para ensaios de deflexão pela viga Benkelman, foram levantados os valores de deflexão do trecho em questão em cada estaca, partindo da estaca 308 + 00 metros até a 336 + 00 metros. O estaqueamento no trecho se dá de 20 em 20 metros, e como o comprimento total do trecho tem 560 metros, obteve-se então um total de 58 leituras de deflexão medidos em centésimos de milímetros (0,01mm) dividido em 29 leituras para o lado direito e mais 29 leituras para o lado esquerdo da via marginal, partindo do ponto zero do trecho, que é a estaca 308 + 00. A Figura 5 mostra a execução de um dos pontos de leitura.

Figura 5 – Ensaio de Viga Benkelman.



Fonte: O Autor (2021)

3.3.3 Avaliação da estrutura existente

Todo o trecho ensaiado foi submetido à avaliação estral pelo que rege a norma DNER PRO 011/79, e, no que se refere a ensaios não destrutivos através das deflexões obtidas, estas leituras foram submetidas às equações de deflexão e reforço estrutural desta norma, de forma a respeitar o que ela propõe. No entanto, o objetivo deste estudo se trata de uma proposta para dimensionamento aproveitando a estrutura local, os resultados apresentados além de serem expressos de acordo

com as médias que a norma propõe para os trechos homogêneos, respeitando o desvio padrão, também serão feitos de forma individual, calculando reforço estrutural na deflexão local presente em cada estaca, visto as discrepantes leituras recolhidas de campo, visando separar cada caso não incluindo numa média final pontos cuja deflexão já está muito próxima ou inferior à deflexão admissível admitida para o trecho de acordo com o estudo de tráfego, mesmo sendo uma camada de reforço de subleito.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os resultados atingidos se encontram neste capítulo, onde são exibidos de acordo com a ordem da metodologia apresentada. Para melhor detalhar o estudo aplicado ao trecho escolhido, já que a avaliação estrutural não é aplicada a uma camada de revestimento asfáltico com patologias evidentes, o intervalo de aceitação dos valores individuais presente no Quadro 4 não foi aplicado as leituras obtidas através do ensaio de Viga Benkelman, aproveitando todas então para objeto de comparação.

4.1 LEITURAS DE DEFLEXÃO ATRAVÉS DA VIGA BENKELMAN

Todos as deflexões levantadas de estaca em estaca, em ambos lados da via, estão apresentados no Apêndice C, onde todas as leituras de deflexão devem ser interpretadas em centésimos de milímetros, sendo as leituras iniciais de cada ponto igual a 500×10^{-2} mm. O equipamento utilizado tem uma constante igual a 1,963, que foi utilizada nos cálculos de acordo com a Equação de número 12. Para o ensaio, o caminhão utilizado atendia todas as exigências da norma DNER-ME 024/94, onde sua posição referente ao bordo ficou a 0,75 metros, de acordo com a largura da via de aproximadamente 3,3 metros. As Figuras número 6 e 7 mostram o gráfico com as leituras de ambos lados da via.

Figura 6 – Deflexões no lado esquerdo da pista.



Fonte: O Autor (2021)

Figura 7 – Deflexões no lado direito da pista.



Fonte: O Autor (2021)

Usando a leitura da estaca 328 + 00 como exemplo do cálculo com a Equação 12, temos:

$$D0 = (L0 - Lf)x\frac{a}{b}$$

$$D0 = (500 - 420)x1,963$$

$$D0 = 157,04x10^{-2}\text{mm}$$

4.2 DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO ESTRUTURAL DNER-PRO B 011/79

Os ensaios foram realizados no mês de março, num período muito chuvoso nas cidades de Joinville, Guaramirim e Jaraguá do Sul, algo que é comum. Através

do estudo das deflexões no trecho homogêneo escolhido o valor para correção sazonal admitido foi de 1,00, de acordo com os parâmetros apresentados no Quadro de número 6. As médias calculadas, assim como os valores de desvio padrão, Deflexões Característica e de Projeto respeitaram as equações de número 5, 6, 7 e 8, respectivamente, obtendo-se os valores discriminados na Tabela de número 2.

Tabela 2 – Características das deflexões obtidas pela norma DNER-PRO B 011/79

Lado Esquerdo		Lado Direito	
Média das Deflexões:	184,79	Média das Deflexões:	221,28
Desvio Padrão:	114,26	Desvio Padrão:	145,49
Deflexão Característica (Dc):	299,05	Deflexão Característica:	366,76
Deflexão de Projeto (Dp)	299,05	Deflexão de Projeto (Dp)	366,76

Fonte: O Autor (2021)

A deflexão admissível se deu pela Equação de número 9. Aplicando o valor resultado do estudo de tráfego, o número equivalente N que é igual a 5×10^6 obteve-se:

$$\begin{aligned} \log D_{adm} &= 3,01 - 0,176 \times \log N \\ \log D_{adm} &= 3,01 - 0,176 \times \log(5000000) \\ \log D_{adm} &= 3,01 - 0,176 \times \log N \\ D_{adm} &= 10^{1,8310} \\ D_{adm} &= 67,76 \times 10^{-2} \text{ mm} \end{aligned}$$

O valor desta, obviamente, se dá para as duas faixas de rolamento da via.

Com todos os valores calculados, incluindo a deflexão admissível que o novo pavimento deve suportar através do novo tráfego, o cálculo da altura da camada de reforço se dá pela Equação de número 10, respeitando a constante $K = 40$ para concreto betuminoso.

Lado Esquerdo:

$$\begin{aligned} h &= K \times \log \frac{D_p}{D_{adm}} \\ h &= 40 \times \log \frac{299,05}{67,76} \\ h &= 25,76 \text{ cm} \end{aligned}$$

Lado Direito:

$$h = 40 \times \text{Log} \frac{366,76}{67,76}$$

$$h = 29,34 \text{ cm}$$

As análises das deflexões de ambas faixas de rolamento de uma via devem ser interpretadas como se fossem de apenas uma, mas, dependendo do que for levantado pelo projetista no estudo de avaliação estrutural de acordo com os demais itens da norma DNER-PRO 011/79, elas podem ser consideradas por cada faixa de rolamento, se assim for mais viável, onde cada um teria seu estudo de tráfego, inclusive. Para este caso, o valor N já foi considerado para ambas faixas de rolamento da pista simples projetada para a marginal, e os valores de cálculo de reforço se manterão por faixa para melhor visualizar o objetivo do estudo.

O valor da camada de reforço do lado esquerdo será arredondado para 25,80 centímetros, conseqüentemente, devido a inviabilidade de aplicar uma camada de 25,76 cm e, considerando a mesma explicação do lado esquerdo, para o lado direito este será arredondado para 29,40, de acordo com a análise deste acadêmico.

Considerando que para o número equivalente (N) tem-se o valor de 5×10^{-2} , a norma do DNIT exige, pelo Quadro 2, que a espessura mínima de revestimento asfáltico seja de 5,0 centímetros. Se tratando de reforço, a norma DNER-PRO 011/79 diz que caso o reforço seja maior que 5,0 centímetros, a diferença deve ser substituída por camadas granulares, e essa substituição deve ser calculada pelos valores de coeficiente estrutural presentes no Quadro 3, onde se apresenta que o valor do coeficiente estrutural do concreto betuminoso é o dobro do coeficiente das camadas de base e sub-base (que é igual), onde são 2,00 e 1,00, respectivamente.

Sendo assim, para a pista do lado esquerdo, cujo reforço é de 25,80 centímetros, esta teria 5,00 centímetros de concreto betuminoso, e os 20,80 centímetros que sobram, aplicados a Equação de número 11, poderiam ser divididos em camadas de base e sub-base, onde estas teriam valores de 20,80 centímetros cada uma, totalizando, junto com o concreto betuminoso, um valor de 46,6 centímetros. Já para o lado direito, com seu reforço estimado em 29,40, o concreto betuminoso teria 5,00 centímetros também, mas suas camadas de base e sub-base se dividiriam em duas de 24,40 centímetros, totalizando 53,8 centímetros. As

Tabelas 3 e 4 mostram como ficou o dimensionamento final por reforço estrutural para as duas faixas.

Tabela 3 – Dimensionamento de reforço estrutural da pista do lado esquerdo.

Camada de Rolamento com C.B.U.Q	KR = 2,00	R =	5,0 cm
Base de Brita Graduada	KB = 1,00	B =	20,80 cm
Sub-Base de Macadame Seco	KS = 1,00	h ₂₀ =	20,80 cm
Reforço de subleito existente em seixo rolado			h total = 46,6 cm

Fonte: O Autor (2021)

Tabela 4 – Dimensionamento de reforço estrutural da pista do lado direito.

Camada de Rolamento com C.B.U.Q	KR = 2,00	R =	5,0 cm
Base de Brita Graduada	KB = 1,00	B =	24,40 cm
Sub-Base de Macadame Seco	KS = 1,00	h ₂₀ =	24,40 cm
Reforço de subleito existente em seixo rolado			h total = 53,8 cm

Fonte: O Autor (2021)

Este cálculo de reforço mostra o contrário do objetivo do estudo, sendo para este caso inviável considerar o dimensionamento por reforço estrutural para o trecho em estudo, visto que o dimensionamento feito pelo método DNER tem uma espessura total de 43,00 centímetros, tendo conseqüentemente menos materiais usados no pavimento para atingir a deflexão admissível para o trecho de acordo com o estudo de tráfego.

4.3 DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO ESTRUTURAL POR ESTACA

A proposta aqui se dá pelo cálculo de reforço a cada estaca, onde irá partir direto para o valor de deflexão por ponto coletado, de acordo com o ensaio de Viga

Benkelman, usando estes como deflexão de projeto, calculando direto o reforço a cada ponto sem tirar a média ou desvio padrão de todas as amostras do trecho. Ainda respeitando o valor de 5,00 centímetros como camada de concreto betuminoso, e o restante do reforço dividido em camadas granulares de base e sub-base, o dimensionamento ficou conforme mostra o Apêndice D. Foi considerado, além do mesmo valor de 40 para K de acordo com a norma DNER-PRO 011/79, o mesmo número de N para este trecho, adotando assim a mesma deflexão admissível adotada no item anterior, de $67,76 \times 10^{-2}$. A aplicação dos valores de leitura de deflexão real do Apêndice C na Equação 10 resulta conforme mostra o Apêndice D.

Calculando o reforço individualmente para cada estaca, notou-se valores negativos, que representam que para o ponto em questão um reforço seria desnecessário, caso este já estivesse com revestimento asfáltico, devendo apenas através de outros estudos realizar uma regularização na superfície, de acordo com a norma de avaliação estrutural. Como no caso dessa pesquisa trata-se de dimensionamento de pavimento novo através de reforço em cima de uma camada de reforço de subleito, para os casos em que o reforço ficou negativo será adotado apenas uma camada de 5 centímetros de CBUQ, acompanhados de 15 centímetros de base, já que um pavimento deve ser composto no mínimo por estas duas camadas, e, segundo o tráfego desse trecho, 5 centímetros seria o mínimo para o revestimento de concreto betuminoso, e para a base, o valor de 15 centímetros mínimos é referente ao manual de pavimentações do DNIT, que normatiza o dimensionamento pelo método DNER.

Nos Apêndices E e F mostra como fica dividido, como foi no item anterior, o reforço em concreto betuminoso, base e sub-base, só que aqui para cada estaca, de acordo com o equivalente estrutural de cada material, arredondando os valores de reforço para que fique plausível com a execução dessas camadas.

Comparando com o dimensionamento feito pelo método DNER, que apresenta um valor total da estrutura do pavimento flexível igual à 43 centímetros, neste caso muitos pontos se descaram positivamente quanto ao cálculo de reforço, onde nos Apêndices E e F foram separados em laranja as linhas cujo reforço é maior que o dimensionamento pelo método DNER e as linhas em azul as que ficaram abaixo do valor de 43 centímetros.

A Figura de número 8 mostra como ficou o gráfico do reforço de cada estaca para ambos os lados da pista.

Figura 8 – Gráfico do dimensionamento de reforço estrutural.



Fonte: O Autor (2021)

Fica visível o comportamento da estrutural através do ensaio de deflexão, evidenciando seus dados individuais de deflexão e cálculo de reforço, como mostra na Figura 8, onde para um trecho relativamente pequeno, o material local se comporta de modo muito diferente em vários pontos, onde deixa aberto para a interpretação do projetista para a solução plausível, diferente do que mostra na etapa onde o cálculo é feito todo obedecendo a média do trecho e seu desvio padrão das leituras.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o dimensionamento da estrutura de um pavimento flexível, acima de um reforço de subleito em seixo rolado, através de uma avaliação estrutural com cálculo de reforço aplicado, o trecho escolhido resultou, de acordo com seu valor de deflexão de projeto, insatisfatório a ser submetido a este tipo de dimensionamento, visto que, para ambos os lados da pista simples, a espessura total ficou maior que a definida pelo dimensionamento pelo método DNER (elaborado para a obra em questão), indo contra a proposta deste trabalho, que visava elaborar uma estrutura menor que a do primeiro dimensionamento e que suporte do mesmo modo o tráfego

ao qual é submetida, com camadas menores que aproveitassem a deflexão da estrutura local para economia de materiais e tempo na execução de rodovias.

Mesmo este sendo o resultado final, fica evidenciado no capítulo 4.2 que caso o projetista divida o trecho em duas ou mais partes, respeitando o que diz a norma DNER-PRO 011/79, o dimensionamento por reforço estrutural pode funcionar, e os cálculos usados nessa norma, que tem como objetivo geral a avaliação estrutural de ruas com revestimento asfáltico (com patologias presentes), podem ser usados para dimensionamento de estrutura de um pavimento flexível desde a camada de subleito, quando possível e viável.

O levantamento por reforço a cada estaca também foi algo muito interessante para aproveitando da estrutura, onde pontos com deflexões muito altas eram acompanhadas já por pontos com deflexão muito mais baixa.

A proposta deste trabalho concluiu apresentando os resultados do dimensionamento de um pavimento flexível por reforço estrutural utilizando os parâmetros apresentado na norma DNER-PRO 011/79, mas muito se aproveitou ainda do que está presente no Manual de Pavimentação do DNIT, do ano de 2006.

Ainda sim parecendo ser algo muito viável a questão da redução das camadas estaca por estaca, tendo uma estrutura igualmente necessária para a atuação do tráfego, fatores como o greide da via devem ser levados em consideração, já que em muitos pontos, como evidenciado na Figura de número 8, tem altos e baixos que tornam alguns pontos de reforço baixo próximos a pontos de reforço grande inviáveis para aplicação. Mesmo assim, não deveria ser descartado a aplicação dos dois dimensionamentos em conjunto para uma via, onde para os pontos com reforço maior que o dimensionamento do DNER se adotaria este último, e, conseqüentemente, para os pontos com reforço pequeno se adotaria as camadas levantadas pelos cálculos de reforço estrutural.

AGRADECIMENTOS

Muitas foram as pessoas que contribuíram na minha jornada até aqui, e certamente estarei sendo injusto com alguns por não os mencionar, mas todos têm o meu mais sincero muito obrigado por ter participado de tantos momentos.

Para meus pais, não há palavras suficientes ou expressões necessárias para mostrar minha gratidão, pois sempre estiveram comigo, incentivando, educando e orientando para me tornar o homem e profissional que sou hoje. Tudo, eu devo a eles.

Para minhas irmãs, que além de me manterem motivado a acompanhá-las na jornada da vida, por serem mulheres incríveis e inteligentes, sempre se mostraram dóceis e prestativas, mesmo seguindo por áreas diferentes.

Para minha amada Anna Julia Dias, a quem devo muito, pois além de ser minha companheira também é uma das minhas grandes inspirações, por ser o ser humano, profissional e amiga que é. Eu te amo.

Para meu compadre e colega engenheiro Adriano Schmidt, amigo para todas as horas, que deu a ideia deste trabalho através de suas inúmeras pesquisas e trabalhos. Profissional modelo para muitos outros.

Para todos os professores que participaram da minha jornada na faculdade, em especial para a minha orientadora professora mestra Michela Steluti Poleti Faria, profissional a qual me baseei em todo meu tempo no curso de engenharia civil, com sua dedicação ao ensino e domínio na engenharia de estradas.

REFERÊNCIAS

AZOIA, W. G. **Avaliação do Pavimento Flexível e cálculo do reforço pelos métodos DNER-PRO 11/79 e 269/94**. 2014. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFP. Campo Mourão, 2014.

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

BATISTA, H. R. C.; MOTA, L. N. **Análise qualitativa do dimensionamento de pavimentos asfálticos pelo método DNER e o método mecanístico-empírico**. 2019. Trabalho de conclusão de curso – Centro Universitário Cesmac. Maceió, 2019.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Petrobrás e Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto. Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

BORGES, C.B.S. **Correlações entre Medidas de Deflexão com Viga Benkelman e FWD para os Pavimentos Rodoviários do estado de Santa Catarina.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2001.

DNER-PRO 011/79. **Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B.** 1979.

DNER-ME 024/94. **Pavimento – determinação das deflexões pela viga Benkelman.** 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de Pavimentação.** Publicação IPR-719. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

MÁXIMO, L. S.; LIMA, S. T. P. **Análise de dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando o método DNIT.** 2018. Trabalho de conclusão de curso – Centro Universitário Cesmac. Maceió, 2018.

NETO, R. S. B. **Análise comparativa de Pavimentos dimensionados através de métodos empírico do DNER e Mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo– USP. São Carlos, 2004.

NETO, R. V. **Comparação entre métodos de dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis.** 2017. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2017.

PINTO, R. L. **Comparação entre o dimensionamento de reforço de pavimentos asfálticos pelo método mecanístico-empírico e os métodos DNER-PRO 11/79 e DNER-PRO 269/94 para um segmento homogêneo da br-222/ce e análise de sensibilidade do programa SisPavBR.** 2016. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2016.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis.** 2a ed., Rio de Janeiro: Copiarte Copiadora e Artes Gráficas Ltda, 2002.

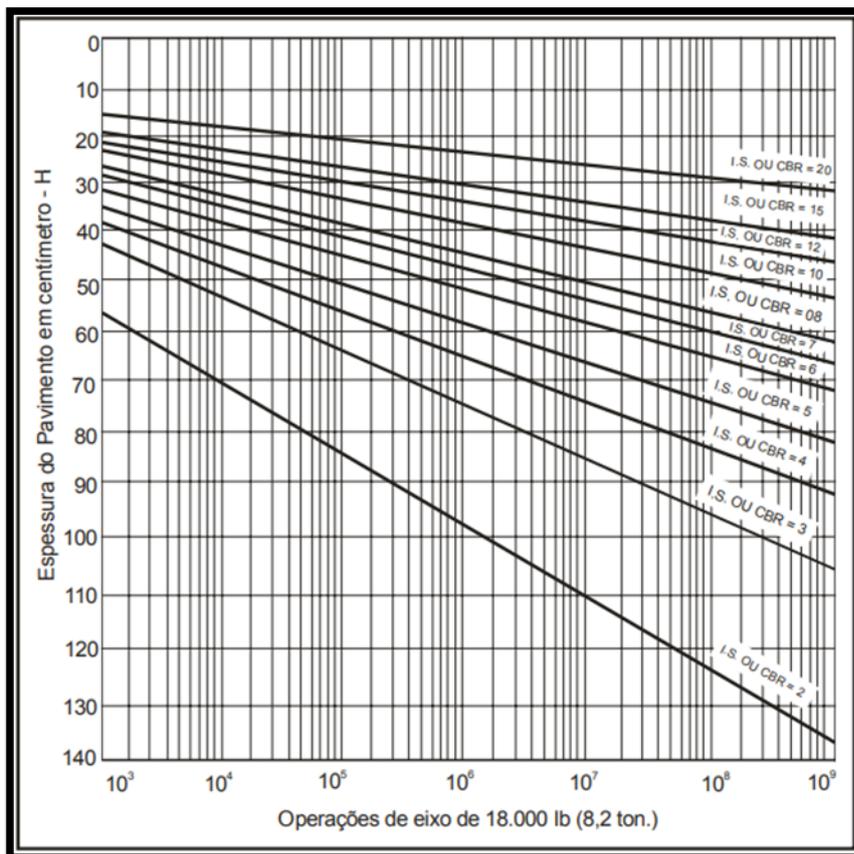
SENÇO, Wlastermiller. **Manual de técnicas de pavimentação.** São Paulo: Pini, 2007. v. 2.

VARGAS, E. G. Avaliação Estrutural e Retroanálise de um trecho de pavimento da avenida Tiajarú no município de Alegrete – RS com a utilização de Viga Benkelman. 2019. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2019.

VELLASCO, B. Q. Análise crítica do controle construtivo de pavimentos com a viga benkelman: aplicação ao caso da implantação do Aeroporto Internacional Tom Jobim no Rio de Janeiro. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Mauá de Tecnologia. Rio de Janeiro, 2012.

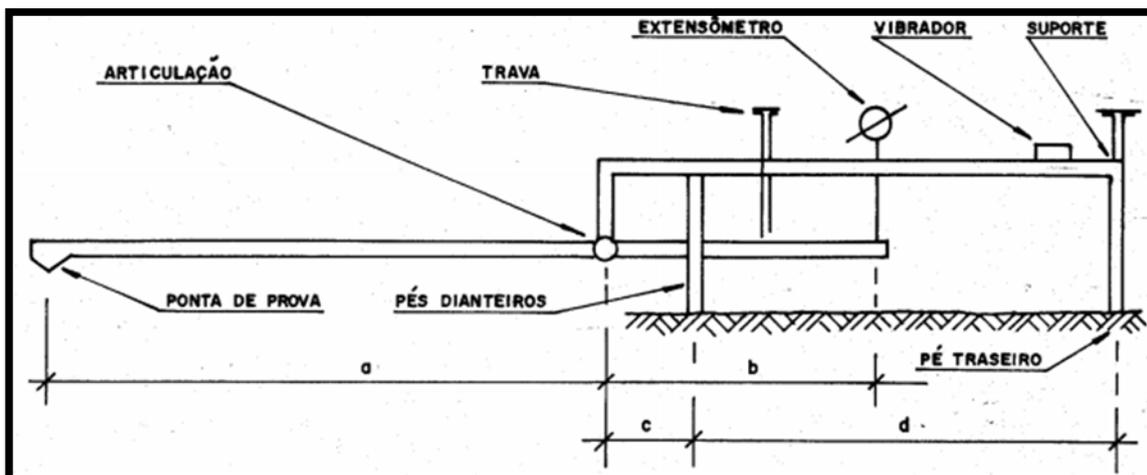
ZANETTI, F.S. O uso de redes neurais artificiais como ferramenta para auxiliar na determinação da vida útil de pavimentos flexíveis. 2008. Dissertação (Mestrado em Infra-Estrutura de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP - São Carlos, 2008.

Apêndice A – Ábaco para determinação de espessuras do pavimento



Fonte: DNIT, 2006

Apêndice B – Aparelho de Viga Benkelman



Fonte: DNER-ME 024/94, 1994

Apêndice C – Leituras do Ensaio de Viga Benkelman

Lado Esquerdo (a/b = 1,963)				Lado Direito (a/b = 1,963)			
Estaca	Leitura (0,01mm)		Deflexão Real (0,01mm)	Estaca	Leitura (0,01mm)		Deflexão Real (0,01mm)
	Leitura Inicial	Leitura Final	(Li - Lf)* a/b		Leitura Inicial	Leitura Final	(Li - Lf)* a/b
308 + 00	500	330	333,71	308 + 00	500	318	357,27
309 + 00	500	395	206,12	309 + 00	500	384	227,71
310 + 00	500	360	274,82	310 + 00	500	349	296,41
311 + 00	500	397	202,19	311 + 00	500	370	255,19
312 + 00	500	320	353,34	312 + 00	500	240	510,38
313 + 00	500	285	422,05	313 + 00	500	236	518,23
314 + 00	500	344	306,23	314 + 00	500	320	353,34
315 + 00	500	371	253,23	315 + 00	500	342	310,15
316 + 00	500	350	294,45	316 + 00	500	330	333,71
317 + 00	500	361	272,86	317 + 00	500	435	127,60
318 + 00	500	371	253,23	318 + 00	500	359	276,78
319 + 00	500	432	133,48	319 + 00	500	420	157,04
320 + 00	500	440	117,78	320 + 00	500	422	153,11
321 + 00	500	420	157,04	321 + 00	500	335	323,90
322 + 00	500	435	127,60	322 + 00	500	440	117,78
323 + 00	500	440	117,78	323 + 00	500	434	129,56
324 + 00	500	415	166,86	324 + 00	500	320	353,34
325 + 00	500	380	235,56	325 + 00	500	325	343,53
326 + 00	500	315	363,16	326 + 00	500	270	451,49
327 + 00	500	383	229,67	327 + 00	500	400	196,30
328 + 00	500	420	157,04	328 + 00	500	415	166,86
329 + 00	500	465	68,71	329 + 00	500	467	64,78
330 + 00	500	486	27,48	330 + 00	500	457	84,41
331 + 00	500	484	31,41	331 + 00	500	465	68,71
332 + 00	500	482	35,33	332 + 00	500	480	39,26
333 + 00	500	484	31,41	333 + 00	500	490	19,63
334 + 00	500	467	64,78	334 + 00	500	475	49,08
335 + 00	500	468	62,82	335 + 00	500	465	68,71
336 + 00	500	470	58,89	336 + 00	500	468	62,82

Fonte: O Autor (2021)

Apêndice D – Dimensionamento de reforço estrutural por estaca.

Lado Esquerdo			Lado Direito		
Estaca	Deflexão real (Dp)	Espessura do reforço h (cm)	Estaca	Deflexão real (Dp)	Espessura do reforço h (cm)
308 + 00	333,71	27,70	308 + 00	357,27	28,88
309 + 00	206,12	19,33	309 + 00	227,71	21,06
310 + 00	274,82	24,32	310 + 00	296,41	25,64
311 + 00	202,19	18,99	311 + 00	255,19	23,04
312 + 00	353,34	28,69	312 + 00	510,38	35,08
313 + 00	422,05	31,78	313 + 00	518,23	35,34
314 + 00	306,23	26,20	314 + 00	353,34	28,69
315 + 00	253,23	22,90	315 + 00	310,15	26,42
316 + 00	294,45	25,52	316 + 00	333,71	27,70
317 + 00	272,86	24,20	317 + 00	127,60	10,99
318 + 00	253,23	22,90	318 + 00	276,78	24,45
319 + 00	133,48	11,78	319 + 00	157,04	14,60
320 + 00	117,78	9,60	320 + 00	153,11	14,16
321 + 00	157,04	14,60	321 + 00	323,90	27,18
322 + 00	127,60	10,99	322 + 00	117,78	9,60
323 + 00	117,78	9,60	323 + 00	129,56	11,26
324 + 00	166,86	15,65	324 + 00	353,34	28,69
325 + 00	235,56	21,64	325 + 00	343,53	28,20
326 + 00	363,16	29,16	326 + 00	451,49	32,95
327 + 00	229,67	21,20	327 + 00	196,30	18,48
328 + 00	157,04	14,60	328 + 00	166,86	15,65
329 + 00	68,71	0,24	329 + 00	64,78	-0,78
330 + 00	27,48	-15,68	330 + 00	84,41	3,82
331 + 00	31,41	-13,36	331 + 00	68,71	0,24
332 + 00	35,33	-11,31	332 + 00	39,26	-9,48
333 + 00	31,41	-13,36	333 + 00	19,63	-21,52
334 + 00	64,78	-0,78	334 + 00	49,08	-5,60
335 + 00	62,82	-1,32	335 + 00	68,71	0,24
336 + 00	58,89	-2,44	336 + 00	62,82	-1,32

Fonte: O Autor (2021)

Apêndice E – Dimensionamento de reforço estrutural por estaca na pista esquerda.

Lado Esquerdo					
Estaca	Espessura do reforço h (cm)	Camada de Rolamento C.B.U.Q. (cm)	Base de Brita Graduada (cm)	Sub-Base de Macadame Seco (cm)	Espessura total da Estrutura
308 + 00	27,70	5,00	22,70	22,70	50,40
309 + 00	19,40	5,00	14,40	14,40	33,80
310 + 00	24,40	5,00	19,40	19,40	43,80
311 + 00	19,00	5,00	14,00	14,00	33,00
312 + 00	28,70	5,00	23,70	23,70	52,40
313 + 00	31,80	5,00	26,80	26,80	58,60
314 + 00	26,20	5,00	21,20	21,20	47,40
315 + 00	22,90	5,00	17,90	17,90	40,80
316 + 00	25,60	5,00	20,60	20,60	46,20
317 + 00	24,20	5,00	19,20	19,20	43,40
318 + 00	22,90	5,00	17,90	17,90	40,80
319 + 00	11,80	5,00	15,00	0,00	20,00
320 + 00	9,60	5,00	15,00	0,00	20,00
321 + 00	14,60	5,00	9,60	9,60	24,20
322 + 00	11,00	5,00	15,00	0,00	20,00
323 + 00	9,60	5,00	15,00	0,00	20,00
324 + 00	15,70	5,00	10,70	10,70	26,40
325 + 00	21,70	5,00	16,70	16,70	38,40
326 + 00	29,20	5,00	24,20	24,20	53,40
327 + 00	21,20	5,00	16,20	16,20	37,40
328 + 00	14,60	5,00	9,60	9,60	24,20
329 + 00	0,30	5,00	15,00	0,00	20,00
330 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
331 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
332 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
333 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
334 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
335 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
336 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00

Fonte: O Autor (2021)

Apêndice F – Dimensionamento de reforço estrutural por estaca na pista direita.

Lado Direito					
Estaca	Espessura do reforço h (cm)	Camada de Rolamento C.B.U.Q.	Base de Brita Graduada	Sub-Base de Macadame Seco	Espessura total da Estrutura
308 + 00	28,90	5,00	23,90	23,90	52,80
309 + 00	21,10	5,00	16,10	16,10	37,20
310 + 00	25,70	5,00	20,70	20,70	46,40
311 + 00	23,10	5,00	18,10	18,10	41,20
312 + 00	35,10	5,00	30,10	30,10	65,20
313 + 00	35,40	5,00	30,40	30,40	65,80
314 + 00	28,70	5,00	23,70	23,70	52,40
315 + 00	26,50	5,00	21,50	21,50	48,00
316 + 00	27,70	5,00	22,70	22,70	50,40
317 + 00	11,00	5,00	15,00	0,00	20,00
318 + 00	24,50	5,00	19,50	19,50	44,00
319 + 00	14,60	5,00	9,60	9,60	24,20
320 + 00	14,20	5,00	9,20	9,20	23,40
321 + 00	27,20	5,00	22,20	22,20	49,40
322 + 00	9,60	5,00	15,00	0,00	20,00
323 + 00	11,30	5,00	15,00	0,00	20,00
324 + 00	28,70	5,00	23,70	23,70	52,40
325 + 00	28,20	5,00	23,20	23,20	51,40
326 + 00	33,00	5,00	28,00	28,00	61,00
327 + 00	18,50	5,00	13,50	13,50	32,00
328 + 00	15,70	5,00	10,70	10,70	26,40
329 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
330 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
331 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
332 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
333 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
334 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
335 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00
336 + 00	0,00	5,00	15,00	0,00	20,00

Fonte: O Autor (2021)