

COMPORTAMENTO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL RESTAURADO POR MÉTODOS DE PROJETO BRASILEIROS

Gianina S. R. Massenlli¹, Cassio E. L. de Paiva²

¹Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, FEC, Campinas, SP, Brasil

e-mail: gsrcmasse@gmail.com

² Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, FEC, Campinas, SP, Brasil

Sumário

No Brasil, os projetos de reforço estrutural para pavimentos flexíveis baseiam-se nos procedimentos vigentes nos organismos rodoviários. Estes métodos utilizam critérios e valores adequados aos momentos em que foram propostos, porém faz-se necessário analisar sua utilidade na atualidade. Para isto, imaginou-se um pavimento hipotético dimensionado conforme o Método do DNIT e sua estrutura verificada mecanisticamente. Este pavimento foi submetido a estágios de degradação. Esse trabalho analisa as exigências definidas nesses procedimentos, a fim de verificar o efeito da variação do módulo do revestimento nas respostas estruturais do pavimento e, conseqüentemente, no seu desempenho ao longo de sua vida em serviço.

Palavras-chave: Pavimento flexível; desempenho; avaliação estrutural.

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de pavimentos no Brasil, eminentemente flexíveis, é de natureza empírica, baseado no método do CBR e com vida útil prevista para 10 anos. Porém, nunca permanecem íntegros ao longo desse período. A partir da metade desse período se iniciam os defeitos visíveis na sua superfície e sua deflexão recuperável aumenta, assim como diminui sua capacidade estrutural como um todo.

Este trabalho foi desenvolvido adotando-se um pavimento hipotético dimensionado pelo método do DNER (atual DNIT) [1], o mais utilizado no Brasil, e, posteriormente, as espessuras definidas foram ajustadas por critérios mecanísticos através de equações de fadiga de uso consagrado no país.

Esse pavimento hipotético foi submetido a estágios de degradação que refletem a diminuição da sua capacidade estrutural como um todo.

Uma grande variedade de métodos e procedimentos para dimensionamento de reforços de pavimentos asfálticos foram desenvolvidos e são utilizados por vários órgãos rodoviários. Porém, ainda não existe até o momento um consenso sobre a metodologia mais adequada [2].

Este artigo atém-se à utilização de três procedimentos mantidos pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes): DNER-PRO 010/79 [3], DNER-PRO 011/79 [4] e DNER-PRO 269/94 [5] e, suplementarmente, desenvolve uma análise sobre as exigências definidas nesses procedimentos com o objetivo de verificar o efeito decorrente da variação do módulo do revestimento asfáltico nas respostas estruturais do pavimento e no seu desempenho ao longo de sua vida em serviço, voltado para a realidade brasileira.

2 ESTRUTURA DE PAVIMENTO ESTUDADO

2.1 Parâmetros Básicos

A estrutura de pavimento flexível estudada é constituída de revestimento asfáltico, base e sub-base granulares e reforço do subleito, apoiado em um substrato de solo com módulo de resiliência igual a 50 MPa recém construída e projetada para 10 anos, conforme preconiza o Método do DNIT [1].

No dimensionamento empírico, o tráfego é convertido em cargas equivalentes ao eixo padrão através do número equivalente de solicitações do eixo padrão de 80 kN, denominado número N, obtido pela metodologia USACE. É importante informar que os parâmetros bases para o cálculo foram arbitrados e são valores comumente utilizados na prática. Admitiu-se uma taxa de crescimento anual de tráfego igual a 3,5% com característica de crescimento exponencial, sendo o volume de projeto anual calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$N = 365 \times V_p \times FV \times FR \times FD \quad (1)$$

Sendo:

N = Número equivalente de solicitações do eixo padrão de 80KN;

V_p = Volume Diário Médio de veículos Comerciais;

FV = Fator de veículo (determinado em função da metodologia empregada);

FR e FD = Fator Regional e Fator Direcional;

O Quadro 1 apresenta os valores de Número N utilizados no dimensionamento e análises para o referido estudo.

Quadro 1. Fator de Veículo e Número N para 10 anos

V_p	Metodologia	FV	Número N (80 kN)
436	USACE	2,43	1,34E+07
	AASHTO	6,91	4,70E+06

A caracterização do subleito para um dimensionamento pode ser determinada por valores de CBR ou Módulos de Resiliência (E) obtidos por meio de ensaios laboratoriais ou *in situ*. No Brasil, dos estudos de Nogami e Villibor, surgiu a classificação MCT [1] que permite retratar as peculiaridades dos solos quanto ao comportamento laterítico ou saprolítico. Quanto ao comportamento mecânico em termos de deformabilidade elástica, a Classificação Resiliente [1] qualifica os solos, conforme apresenta o Quadro 2.

Quadro 2. Classificação dos solos finos quanto à resiliência

CBR (%)	Silte (%)		
	≤ 35	35 a 65	> 65
≥ 10	I	II	III
6 a 9	II	II	III
2 a 5	III	III	III

A classificação do solo finos quanto à resiliência é dividida em três tipos (I, II e III). Nota-se que para valores de CBR igual ou inferior a 5% o solo é classificado como tipo III, independente da porção de silte na amostra-

Para obtenção do módulo de resiliência (E) representativo do subleito, algumas Instruções de Projeto vigentes no Brasil [6] e [7] recomendam as seguintes correlações apresentadas, a seguir:

$$E_{SL} = 22 \times CBR^{0,8} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

$$E_{SL} = 18 \times CBR^{0,64} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

$$E_{SL} = 14 \times CBR^{0,7} \quad (\text{MPa}) \quad (4)$$

As utilizações das três expressões estão descritas no Quadro 3:

Quadro 3. Classificação dos solos finos tropicais quanto à resiliência

Classificação MCT do solo	Equações
Solos lateríticos arenosos (LA') e lateríticos argilosos (LG')	(2)
Solos não lateríticos siltosos (NS') e não lateríticos argilosos (NG')	(3)
Solos arenosos pouco ou não coesivos:	(4)

Nota-se que para um mesmo CBR pode-se obter três resultados, isto é, a classificação MCT determina o valor do módulo resultante do solo. Para esse trabalho, o substrato do subleito apresenta um CBR igual a 5% e o que corresponde a 50 MPa com um comportamento resiliente classificado como tipo III.

Conhecidos os parâmetros básicos, pode-se dimensionar empiricamente a estrutura de pavimento, como está apresentada no Quadro 4.

Quadro 4. Estrutura de pavimento inicial dimensionada empiricamente

Camada	Material	Esp. (m)	K	Esp. Equivalente (m)
Revestimento	Concreto Asfáltico (CA)	0,10	2,0	0,20
Base	Granular (BGS)	0,15	1,0	0,15
Sub-Base	Granular (Solo Brita)	0,20	1,0	0,20
Reforço	Solo selecionado (CBR ≥ 12%)	0,20	1,0	0,20
Subleito	Subleito existente (CBR ≥ 5%)	∞		
Total (Hm)				0,75

Verifica-se que o dimensionamento empírico preconizado pelo DNER [1] leva em consideração o conceito de equivalência estrutural estabelecido para as propriedades dos materiais constituintes do pavimento e seus parâmetros básicos definidos anteriormente.

Essa estrutura de pavimento foi submetida a análise mecânica onde o pavimento é considerado como um sistema multicamadas e se aplica os conceitos da Mecânica dos Pavimentos, determinando as tensões, deformações e deslocamentos decorrentes das cargas dos veículos, a fim de atender parâmetros de projeto pré-estabelecidos.

2.2 Parâmetros para Análise Mecânica

As características da estrutura do pavimento utilizado no estudo estão apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5. Parâmetros para verificação mecânica

Camada	Material	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coef. de Poisson (μ)
Revestimento	Concreto Asfáltico (CA)	3.500	0,3
Base	Granular (BGS)	300	0,35
Sub-Base	Granular (Solo Brita)	200	0,4
Reforço	Solo selecionado (CBR ≥ 12%)	100	0,4
Subleito	Subleito existente (CBR ≥ 5%)	50	0,45

Os valores dos módulos e coeficientes de Poisson admitidos são valores médios característicos dos materiais recomendados nos manuais e instruções de projeto brasileiros.

As equações de definição dos valores limites para deflexão na superfície, tensão horizontal na última fibra inferior na camada asfáltica e tensão vertical no subleito, são as seguintes:

$$\log D_{adm} = 3,148 - 0,188 \times \log N \quad (\text{DNER-PRO 269/94}) [4] \text{ e } [6] \quad (5)$$

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \times \log N \quad (\text{DNER-PRO 011/79}) [3] \text{ e } [6] \quad (6)$$

$$N_{AASHTO} = 2,85 - 10^{-7} \times \xi_t^{-3,69} \quad (\text{Pinto, 1980}) [6] \text{ e } [8] \quad (7)$$

$$N_{USACE} = 6,067 - 10^{-10} \times \xi_v^{-4,762} \quad (\text{Shell KSLA, Dorman e Metcalf}) [6] \quad (8)$$

Na verificação mecanística, com o auxílio do programa computacional de diferenças finitas, Elsym 5, foram determinadas tensões horizontais e verticais e deflexões das camadas constituintes do pavimento.

O Quadro 6 apresenta a verificação mecanística e os valores utilizados para o desenvolvimento do estudo.

Quadro 6. Verificação mecanística

Esforços	D_0 (0,01mm)	$\epsilon_t \times 10^{-4}$ (mm/mm)	$\epsilon_v \times 10^{-4}$ (mm/mm)
Equação	(5)	(7)	(8)
Admissível	64,31	2,62	3,70
Atuante	64,27	1,88	2,92
Verificação	ok	ok	ok

O ajuste mecanístico resultou num acréscimo de 0,03m na camada do revestimento com relação à estrutura inicial dimensionada pelo método empírico. A estrutura final é apresentada no Quadro 7.

Quadro 7. Estrutura final do pavimento

Camada	Material	Esp. (m)
Revestimento	Concreto Asfáltico (CA)	0,13
Base	Granular (BGS)	0,15
Sub-Base	Granular (Solo Brita)	0,20
Reforço	Solo selecionado (CBR \geq 12%)	0,20
Subleito	Subleito existente (CBR \geq 5%)	∞

A análise da sensibilidade do pavimento será realizada a partir dessa estrutura considerada como ideal em termos de dimensionamento e admitida como viável tecnicamente e economicamente.

2.3 Mudança de Parâmetros do Revestimento

A capa asfáltica em um pavimento flexível apresenta, quando nova, valor de módulo de resiliência relativamente alto em relação às demais camadas do pavimento.

Normalmente, a perda da sua capacidade estrutural se reflete na diminuição do seu módulo de resiliência ou da sua espessura efetiva equivalente. Para analisar a sensibilidade desses dois parâmetros foi desenvolvido um estudo de sensibilidade da camada de revestimento asfáltico, variando-se estes dois parâmetros e mantendo-se todos os parâmetros das outras camadas.

No Quadro 8 estão apresentadas as espessuras (H) e módulos (E) do concreto asfáltico, bem como das demais camadas.

Quadro 8. Plano de análise da sensibilidade dos parâmetros do revestimento

Camada	Material	Espessura - H (m)	Módulo de Resiliência - E (MPa)
Revestimento	Concreto Asfáltico (CA)	0,02 a 0,22	300, 500, 1.100, 1.500, 2.000, 2.500, 3.000, 3.500 e 5.000
Base	Granular (BGS)	0,15	300
Sub-Base	Granular (Solo Brita)	0,20	200
Reforço	Solo selecionado ($CBR \geq 12\%$)	0,20	100
Subleito	Subleito existente ($CBR \geq 5\%$)	∞	50

As análises foram realizadas a partir das respostas estruturais obtidas com o auxílio do programa computacional ELSYM 5, referentes às deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento (ϵ_t), às deformações verticais de compressão vertical no topo do subleito (ϵ_v) e a deflexão na superfície (D_0).

A variação desses esforços atuantes conforme os parâmetros modificados resultaram em pares de curvas que foram expressos em porcentagem como sugerido por Mallick [9], a fim de apresentar a evolução das condições do pavimento e a sensibilidade em relação às alterações de espessura e módulo de resiliência da camada de revestimento.

A figura Fig. 1 ilustra graficamente os três pares de curvas resultantes. A origem do sistema de coordenadas representa pavimento em condições estruturais íntegras, ou seja, pavimento novo, recém construído conforme estrutura apresentada no Quadro 7.

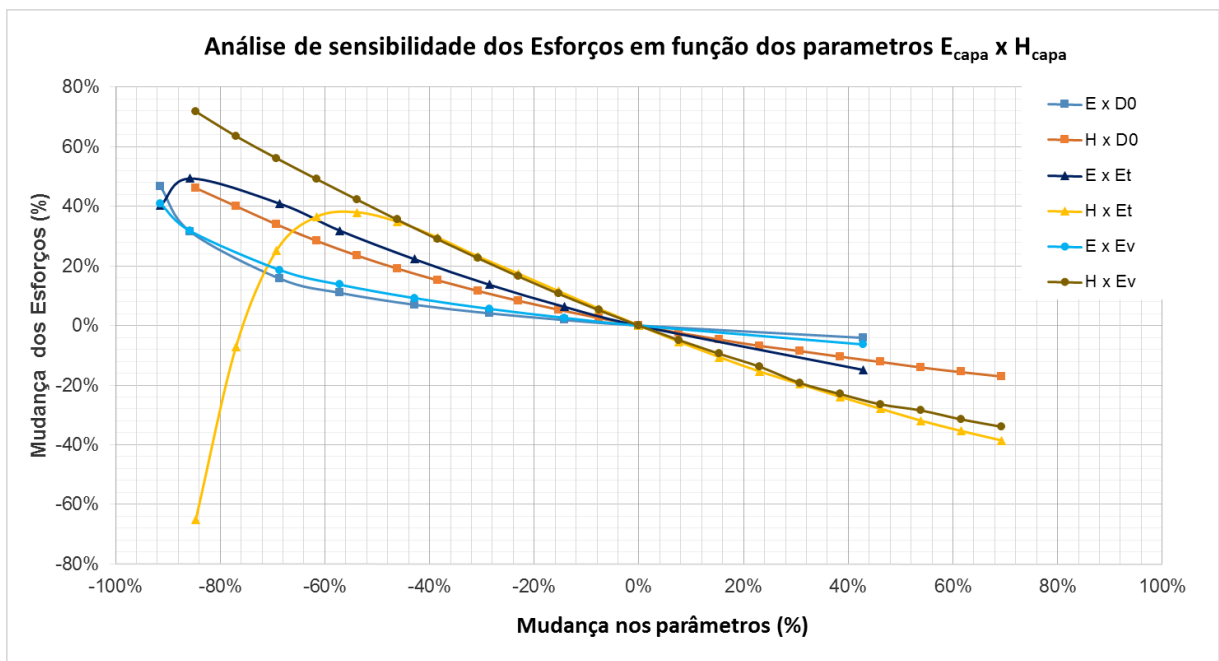


Fig.1. Sensibilidade dos esforços em função dos parâmetros do revestimento (E e H)

Observa-se que o lado esquerdo do gráfico (valores negativos na abscissa), representam a perda da integridade do pavimento e que entre os dois parâmetros analisados, Módulo de Elasticidade (E) e Espessura do Revestimento (H), o parâmetro H é o mais sensível no comportamento de um pavimento flexível, conforme ilustram os pares de curvas correspondentes para cada esforço avaliado. O lado direito do gráfico (valores positivos na abscissa), representam apenas espessuras e módulos maiores do que os valores propostos no dimensionamento.

A curva ($H \times \varepsilon_t$) demonstra que para espessuras superiores a 0,13 m, o valor de deformação ε_t reduz proporcionalmente. Para espessuras inferiores a 0,13 m, a deformação ε_t aumenta proporcionalmente até atingir a espessura de 0,06 m e configurar um pico. A partir desse ponto, a deformação ε_t diminui e observa-se que, para espessuras de 0,03 m e 0,02 m, os valores de deformação (ε_t) são inferiores ao de referência (espessura de 0,13 m). Essa situação foi observada por Santana [10], onde os revestimentos asfálticos resistem muito mais a compressão do que à tração.

Nota-se que a perda de H, principalmente para as curvas ($H \times \varepsilon_t$) e ($H \times \varepsilon_v$), são as mais expressivas em termos de evolução de esforço. Essas duas curvas crescem na mesma proporção.

O parâmetro E mostrou-se mais sensível na evolução do esforço ε_t . Verifica-se na curva ($E \times \varepsilon_t$) um declínio acentuado, a partir de valores de módulos inferiores a 500 MPa, situação que evidencia a perda da rigidez do revestimento asfáltico, isto é, o valor do módulo (E) se aproxima ao valor de uma camada granular.

Após o estudo de sensibilidade do revestimento asfáltico foram desenvolvidos outros estudos de degradação das demais camadas que constituem o pavimento estudado.

3 RESULTADOS OBTIDOS

A ação do carregamento induz tensões de tração e cisalhamento em todas as camadas do pavimento, provocando uma eventual perda de integridade estrutural em todas as camadas conforme sugerido por Bernucci [11].

A redução do desempenho de um pavimento, segundo Pinto [12], uma redução de módulo de rigidez ou resiliência, da ordem de 50%, define o fim da vida elástica, critério estabelecido em ensaios de tensão controlada em misturas asfálticas que permite uma avaliação máxima de vida de fadiga. O trincamento é o início de uma fase de deterioração estrutural que modifica o estado de tensões e deformações do sistema estratificado e, conseqüentemente, o seu desempenho. Define-se como vida elástica o lento crescimento das deflexões e fadiga como o momento a partir do qual as deflexões crescem de forma acelerada.

As fissuras por fadiga podem ser divididas em dois tipos: *bottom-up* e *top-down*, conforme Vidotto[13]. Para esse trabalho será abordada apenas as fissuras *bottom-up*, fissuras que surgem na parte inferior do revestimento e se propagam até a superfície devido ao efeito da ação de tensões de tração na fibra inferior do revestimento [13].

No Brasil, o parâmetro que comumente se associa à deflexão recuperável (D_0) é o raio de curvatura (Rc), valor indicativo do arqueamento da deformada na sua porção mais crítica. Em geral, considera-se a 0,25 m do centro da carga (D_{25}) que corresponde à Equação 9 apresentada a seguir.

$$R = \frac{6250}{2 \times (D_0 - D_{25})} \quad (9)$$

Sendo:

R, raio de curvatura da bacia de deformação, em m;

D_0 , deflexão recuperável no ponto de aplicação da carga, em 10^{-2} mm e

D_{25} , deflexão recuperável a 0,25 m do ponto de aplicação da carga em 10^{-2} mm.

O procedimento DNER-PRO-11/79 [4] leva em conta o raio de curvatura (Rc) em seus critérios para avaliação estrutural do pavimento como indicativo de um severo arqueamento da deformada, denotando uma condição estrutural crítica para valores inferiores a 100 m.

O Quadro 9, expõe os valores obtidos na simulação desenvolvida, onde os valores dos módulos para as camadas subjacentes do revestimento foram extrapolados e ajustados em função de duas situações pré-estabelecidas. A primeira, partiu da condição estrutural íntegra (Estágio 1), isto é, um pavimento recém construído e a segunda situação considerou o pavimento com uma condição estrutural comprometida (Estágio 8), isto é, deflexão (D_0) superior à deflexão admissível (D_{adm}) para um raio de curvatura (Rc) inferior a 100 m.

Quadro 9. Estágios de Degradação das Camadas

Módulo de Elasticidade (E) das Camadas	Estágios (perda de E)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Revestimento	3.500	3.000	2.500	2.000	1.500	1.100	600	500
Base	300	270	240	210	180	156	126	120
Sub-Base	200	183	167	150	133	120	103	100
Reforço do Subleito	100	97	93	90	87	84	81	80
Subleito	50	49	48	48	47	46	45	45

Observa-se que os valores dos módulos obtidos para as camadas subjacentes, dentro do universo analisado, variam de 300 a 120 MPa para base, 200 a 100 MPa para sub-base, 100 a 80 MPa para o reforço do subleito e, por fim, de 50 a 45 MPa para o subleito. Esses valores foram considerados representativos, uma vez que o pavimento sob a ação do tráfego induz a tensões de tração e cisalhamento em todas as camadas subjacentes ocasionando perdas da integridade estrutural do pavimento.

Os Estágios de 2 a 7 representam situações intermediárias entre as duas condições limites consideradas e a variação linear dos módulos são consideradas adequadas, ao representar a redução da vida de serviço do pavimento, para essa etapa da pesquisa.

A partir desses valores obtidos, as estruturas foram processadas com o auxílio do programa computacional Elsym 5, de maneira a obter os esforços nos pontos de análise considerados como críticos. Os resultados estão apresentados no Quadro 10.

Quadro 10. Situação Estrutural do Pavimento nos Estágios de Degradação

ESFORÇOS	Estágios (perda de E)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
DEFLEXÃO MÁXIMA - D0 (0,01 mm)	64,27	67,51	71,51	76,43	82,97	90,40	105,80	110,90
DEFORMAÇÃO HORIZONTAL - ϵ_t (10^{-4} mm/mm)	1,88	2,12	2,43	2,85	3,47	4,21	5,81	6,33
DEFORMAÇÃO VERTICAL - ϵ_v (10^{-4} mm/mm)	2,92	3,10	3,34	3,59	3,92	4,27	4,89	5,06
RAIO DE CURVATURA - Rc (m)	330	296	263	221	186	152	103	92

Observa-se a evolução da degradação do pavimento a partir das respostas dos esforços e assim pode-se destacar os valores acima dos limites estabelecidos anteriormente (Quadro 6).

Um estágio seguinte do Estágio 8, supostamente Estágio 9, representa uma condição estrutural muito ruim, onde a magnitude da deflexão é próxima de três vezes a deflexão admissível (192×10^{-2} mm), indicando a necessidade de reconstrução.

Os valores de variação do módulo de elasticidade (E) e deformações horizontal e vertical (ϵ_t e ϵ_v) em função do Raio de Curvatura (Rc) estão ilustrados na figura Fig. 2.

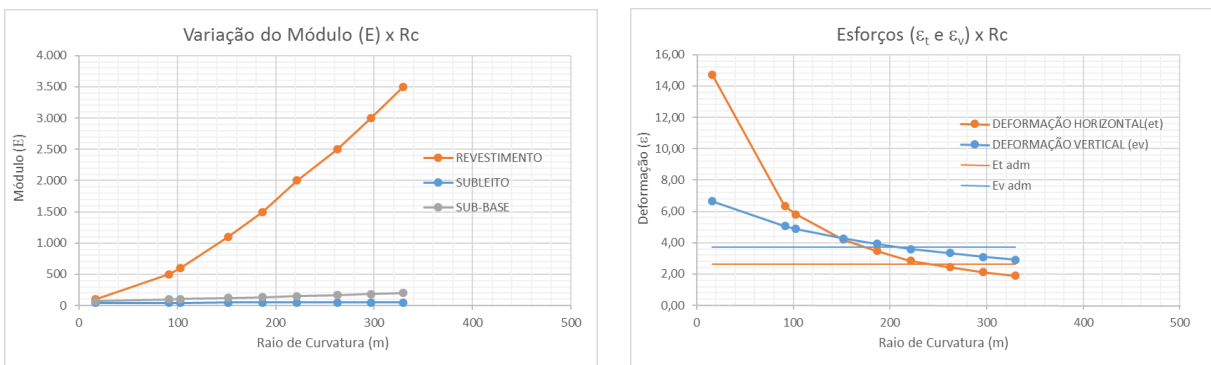


Fig.2. Gráficos de Variação do Módulo (E) e Esforços (ϵ_t e ϵ_v) em função do Raio de Curvatura (Rc)

Observa-se pelo gráfico que o indicador $R_c=100$ m, conforme preconiza o DNER-PRO 011/79 [4], é subestimado para o pavimento estudado, uma vez que corresponderia a $E=600$ MPa para o revestimento e $\epsilon_r=5,81 \times 10^{-2}$ e $\epsilon_v=4,89 \times 10^{-2}$ nos pontos críticos do pavimento.

4 ANÁLISES A PARTIR DOS RESULTADOS

Em relação aos procedimentos de avaliação estrutural e projeto de reforço de pavimentos flexíveis vigentes no Brasil, DNER PRO-010/79 [3], DNER PRO-011/79 [4] e DNER PRO-269/94 [5], preconizam que a execução do reforço deve ser executada quando os níveis de defeitos excederem os limites indicativos de comprometimento estrutural, valores como o trincamento por fadiga superior a 20% ou afundamento nas trilhas de roda superior a 0,012 m.

O que se busca é exclusivamente avaliar a contemporaneidade dos critérios de avaliação dos métodos, alguns deles propostos a mais de 30 anos em relação aos tempos atuais.

4.1 Procedimento DNER PRO-011/79

No procedimento DNER-PRO 011/79 [4], a hipótese II é a situação que o pavimento avaliado se encontra na fase elástica e apresentam característica com necessidade de reforço estrutural, conforme indica o Quadro 11.

Quadro 11. Critérios para Avaliação Estrutural, conforme [4]

Hipótese	Dados Deflectométricos Obtidos	Qualidade Estrutural	Necessidade de Estudos Complementares	Critério para Cálculo de Reforço	Medidas Corretivas
II	$D_0 > D_{adm}$	Se $D_0 \leq 3 D_{adm}$ REGULAR	NÃO	Deflectométrico	Reforço
	$R \geq 100$	Se $D_0 > 3 D_{adm}$ MÁ	SIM	Deflectométrico e Resistência	Reforço ou Reconstrução
IV	$D_0 > D_{adm}$	MÁ	SIM	Resistência	Reforço ou Reconstrução
	$R < 100$				

Note que o limite para admitir outras medidas corretivas é quando a deflexão é três vezes o admissível ou quando o $R_c < 100$ m. Para a estrutura estudada, isso significa que não seria necessária a reconstrução ou estudos complementares até o Estágio 7, conforme o Quadro 12.

Quadro 12. Avaliação Estrutural do Pavimento, segundo [4]

Estágios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
NÚMERO N (USACE)	1,34E+07	1,03E+07	7,60E+06	5,34E+06	3,45E+06	2,19E+06	9,47E+05	7,37E+05	3,92E+04	
Dp (0,01 mm)	64,27	67,51	71,51	76,43	82,97	90,40	105,80	110,90	192,50	
Rc (m)	330	296	263	221	186	152	103	92	16	
PRO11 (cm)	NOVO	Hipoteses II						Hipoteses IV		
		QUALIDADE ESTRUTURAL: REGULAR						MÁ		
		Não há necessidade de estudos complementares						SIM		
		Critério: Deflectométrico						Resistencia		
		Reforço						Reforço ou Reconstrução		
HR (cm)	2,00	3,00	4,00	5,00	7,00	8,00	11,00	12,00	21,00	

Porém, para esse procedimento deve ter cuidado com relação ao Raio de curvatura, pois para $R_c=103$ m representaria qualidade estrutural regular, quando na verdade já está na fase de fadiga e não mais na elástica, podendo ser necessária uma intervenção mais pesada como uma remoção total ou parcial do pavimento. Na situação estudada seria recomendável limitar o raio de curvatura entre 186 m e 152 m.

4.2 Procedimento DNER PRO-269/94

Para a avaliação do Procedimento DNER-PRO 269/94 [5], a situação foi avaliada considerando o Módulo efetivo que corresponderia à deflexão de projeto, conforme a equação:

$$\text{Log}M_{ref} = 11,19 - 2,753 \times \log D_c - 1,714 \times \log h_e - 0,0053 \times I_1 - 0,2766 \times I_2 \quad (10)$$

Sendo:

$M_{ef} \geq 100$ MPa;

D_c = Deflexão de projeto (0,01 mm);

$I_1 = 0$ e $I_2 = 1$: Índices de espessura da camada granular para o solo tipo III.

Esses valores foram comparados aos módulos definidos nos estágios de degradação apresentados na Quadro 13.

Quadro 13. Representatividade do Módulo Efetivo

COMPARAÇÃO	Estágios (perda de E)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dc (0,01 mm) Deflexão do projeto	64	68	72	76	83	90	106	111	193
E (MPa) Módulo admitido como perda de desempenho	3.500	3.000	2.500	2.000	1.500	1.100	600	500	100
Mef (MPa) Módulo efetivo PRO 269	3.500	3.320	2.833	2.359	1.882	1.486	964	847	186

Pode-se verificar que o reforço estrutural por recapeamento é uma solução viável quando aplicado para valores de deflexão abaixo de 83 (x 0,01 mm), que corresponde a Módulo 1.500 MPa.

Soluções com fresagem são interessantes para valores de deflexão entre 83 e 111 (x 0,01 mm), que correspondem a Módulos entre 1.500 e 500 MPa, solução aplicável desde que o grau de trincamento seja inferior ao limite recomendado pelo procedimento, $FC_2+FC_3 > 80\%$ e $FC_3 > 30\%$.

4.3 Procedimento DNER-PRO-010/79

Para o pavimento estudado, foi avaliado como se encaixaria nos critérios de trincamento do procedimento DNER-PRO 010/79 [3].

Para Condição de Fissuração tipo (a) do Revestimento do Pavimento, no que se refere a trincas interligadas, os valores estabelecidos são $FC_2+FC_3 \geq 80\%$ e $FC_3 < 20\%$, que equivale ao menor grau para intervenção deste procedimento.

Apenas para comparação considerou-se o critério de avaliação de pavimento definido pelo *Pavement Condition Evaluation Manual* [14], é largamente adotado na literatura internacional de pavimentação e sua condição deve estar associada a frequência e extensão desse tipo de defeito.

Fazendo uma analogia com o DNER-PRO 010/79 quanto ao trincamento, verifica-se que por este método pode-se executar o reforço nos seguintes casos indicados no Quadro 14.

Quadro 14. Aplicação do DRM System como reforço de pavimento, conforme nível de severidade e grau de trincamento

Nível de Severidade	Extensão		
	Ocasional (< 20%)	Frequente (20 a 50%)	Extensivo (> 50%)
Baixo (FC-1)	Ocasional (< 20%)	Frequente (20 a 50%)	Extensivo (> 50%)
Médio (FC-2)	Ocasional (< 20%)	Frequente (20 a 50%)	-
Alto (FC-3)	-	-	-

Portanto nesta situação, a condição proposta no procedimento DNER-PRO 010/79 [3], $FC_2+FC_3 > 80\%$, pode ser muito otimista e acarretar numa intervenção tardia, podendo representar a necessidade de um reforço mais oneroso, após a fase elástica da vida do pavimento.

5 CONCLUSÕES

As respostas estruturais evidenciaram que o momento mais oportuno para uma intervenção estrutural no pavimento flexível é quando o módulo do revestimento atinge uma redução de 50% do valor inicial, sendo este um indicativo do início da fase de fadiga (Estágio 5). Nesta fase, conforme os cálculos obtidos pelos procedimentos brasileiros, o reforço estrutural resulta em espessuras da ordem de 0,04 m a 0,07 m, espessuras consideradas ideais para um recapeamento.

Entre os Estágios 6 e 7 (módulos entre 1.100 MPa e 600 MPa), a solução utilizando o processo de corte ou fresagem se mostra mais interessante do que uma espessura maior de recapeamento, devido à remoção parcial da camada asfáltica deteriorada que apresenta módulo remanescente mais baixo.

No Estágio 8, onde o módulo de elasticidade atinge valores inferiores a 500 MPa, é necessária uma análise mais detalhada da frequência e severidade das trincas. O pavimento encontra-se na fase de fadiga e sua capacidade estrutural está comprometida, podendo ser necessário um reforço ou a reconstrução do pavimento.

Para a estrutura de pavimento estudada, recomenda-se o valor do raio de curvatura entre 186 e 152 m como indicativo da condição estrutural crítica.

O parâmetro $FC2 + FC3 > 80\%$ representa um elevado grau de trincamento, como podem ser verificados nos Estágios 7 e 8 e seu método de reparo deve ser a reconstrução do pavimento.

6 REFERÊNCIAS

1. Publicação IPR – 719, *Manual de pavimentação*, DNIT, Rio de Janeiro, 2006.
2. Publicação IPR – 720, *Manual de restauração de pavimentos asfálticos*, DNIT, Rio de Janeiro, 2006.
3. DNER-PRO 010/79, *Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis - Procedimento A*, DNIT, Rio de Janeiro, 1979.
4. DNER-PRO 011/79, *Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis - Procedimento B*, DNIT, Rio de Janeiro, 1979.
5. DNER-PRO 269/94, *Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis - TECNAPAV*, DNIT, Rio de Janeiro, 1994.
6. IP-DE-P00/001, *Projeto de Pavimentação*, DER/SP, São Paulo, 2006.
7. IP- 08, *Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento*, PMSP, São Paulo, 2004.
8. S. Pinto, E. S. Preussler, *Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos*, DNER, 1980.
9. R. B. Mallick, *Pavement Engineering Principles and Practice*, 2nd edition, CRC Press, 2012.
10. H. Santana, *Manual de Pré-misturados a Frio*, IBP, Rio de Janeiro, 1992.
11. L. B. Bernucci et al, *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros*, Petrobrás/ABEDA, Rio de Janeiro, 2006.
12. S. Pinto, *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.
13. J. P. Vidotto, *Efeito da Variação da Espessura do Revestimento nas Respostas Estruturais do Pavimento Flexível*, Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, 2013.
14. *Pavement Condition Evaluation Manual*, Highway Preservation Systems, Ltd., Hamilton, 2001.