

PTR 3521

Avaliação e Reabilitação de Pavimentos

Prof. José Tadeu Balbo
Laboratório de Mecânica de Pavimentos
Universidade de São Paulo



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Reforços Estruturais em Pavimentos Asfálticos (Recapeamentos)



REFORÇO ESTRUTURAL OU RECAPEAMENTO

Reforço do pavimento é o nome dado à nova camada de rolamento aplicada sobre a superfície de um pavimento existente, quando o mesmo necessita de serviços de restauração ou de reabilitação (é comum sua designação popular por *recapeamento*).

Este novo revestimento proporciona uma melhora estrutural e também devolve aos usuários uma condição satisfatória de rolamento (serventia). Por se tratarem de camadas estruturais, os reforços de pavimentos asfálticos são compostos por misturas asfálticas, devendo ser dimensionados tendo em vista a expectativa de tráfego para um dado horizonte de projeto.

REFORÇO ESTRUTURAL OU RECAPEAMENTO

O conceito básico dos **critérios de deformabilidade** reside na definição de uma **deflexão de projeto ou deflexão admissível**, ou seja, em se *obter um nível de deformabilidade associado a uma espessura de reforço requisitada, tendo em vista o número de solicitações previsto para o tráfego*. A espessura de reforço a ser aplicada no pavimento existente é então definida através de dois passos básicos:

Verificação da espessura necessária para esta camada, de forma a trazer a deflexão atualmente existente aos níveis da deflexão admissível, através de uma equação de redução de deflexão.



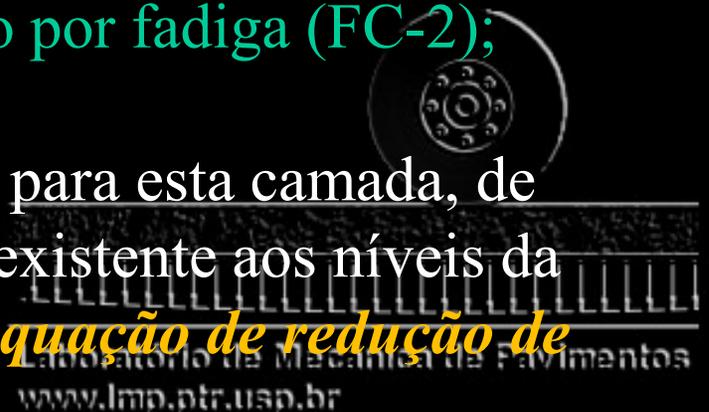
Verificação do nível de deflexão admissível para a nova camada de revestimento, tendo em vista o tráfego previsto, para que, limitando-se tal nível de deflexão **seja possível atingir um determinado nível de serviço final (serventia) para tal tráfego;**

ou

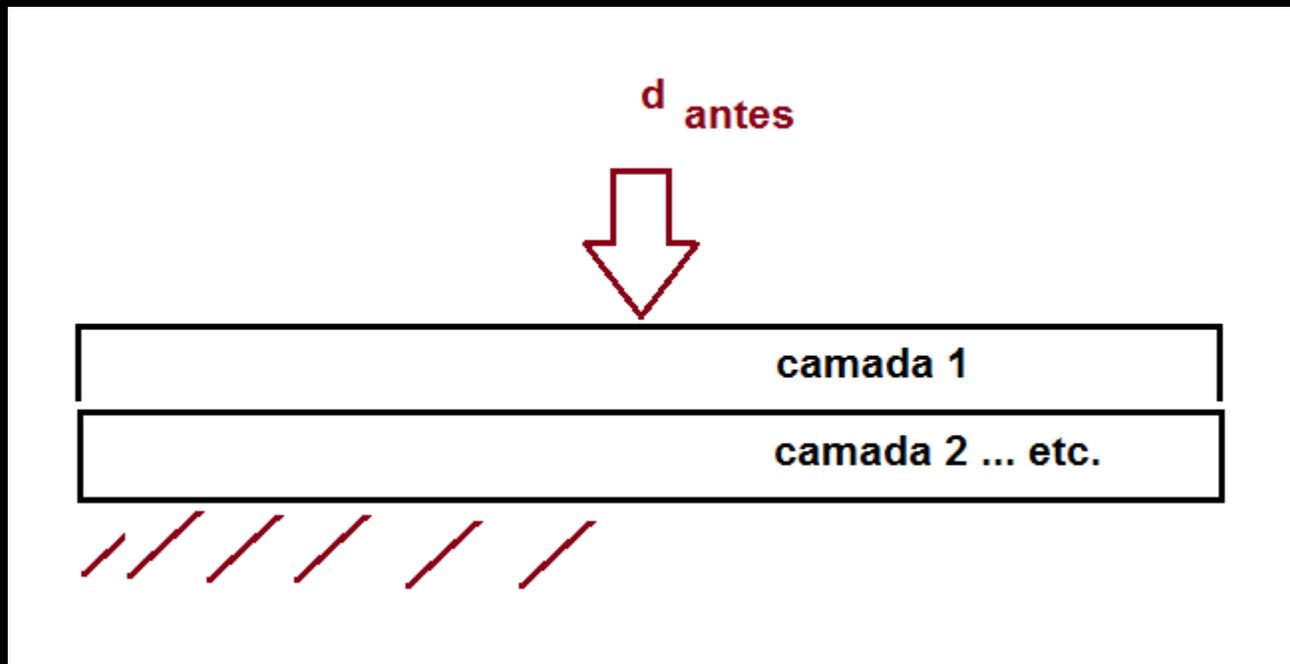
Verificação do nível de deflexão admissível para a nova camada de revestimento, tendo em vista o tráfego previsto, para que, limitando-se tal nível de deflexão seja possível atingir um determinado horizonte de projeto **sem ocorrência precoce de determinados padrões de fissuração por fadiga (FC-2);**

e

Verificação da espessura necessária para esta camada, de forma a trazer a deflexão atualmente existente aos níveis da deflexão admissível, através de uma **equação de redução de deflexão.**



redução de deflexão



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

redução de deflexão

$d_{\text{depois}} < d_{\text{antes}}$



camada de reforço



camada 1



camada 2 ... etc.

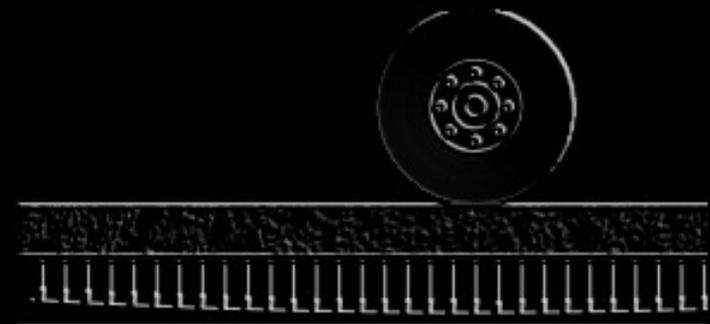
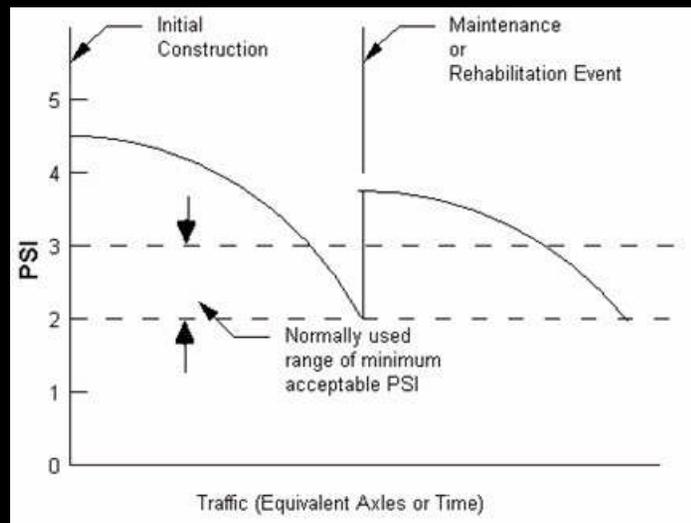


Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto de Camadas Asfálticas de Reforço

Desempenho quanto à Serventia com base na Deflexão do Pavimento

Serventia final (p_t)	Estação em clima temperado	Modelo de ruptura por serventia baseado em deflexão	Observações
2,5	PRIMAVERA	$\log_{10} N_{2,5} = 9,40 + 1,32 \times \log_{10} L_1 - 3,25 \times \log_{10} D_{adm}$	D_{adm} em 0,001 polegadas L_1 é a carga do eixo simples em 10^3 libras
	OUTONO	$\log_{10} N_{2,5} = 7,98 + 1,72 \times \log_{10} L_1 - 3,07 \times \log_{10} D_{adm}$	
1,5	PRIMAVERA	$\log_{10} N_{1,5} = 10,18 + 1,36 \times \log_{10} L_1 - 3,64 \times \log_{10} D_{adm}$	
	OUTONO	$\log_{10} N_{1,5} = 8,48 + 1,76 \times \log_{10} L_1 - 3,32 \times \log_{10} D_{adm}$	

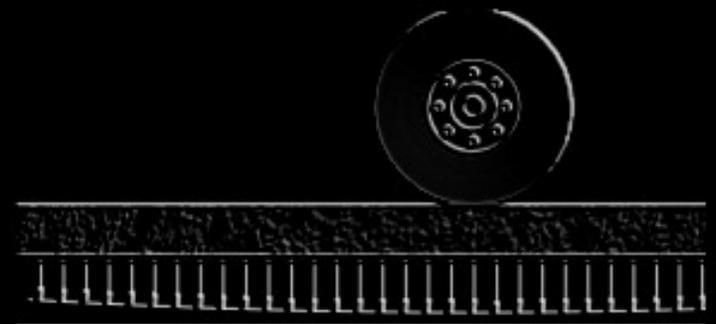
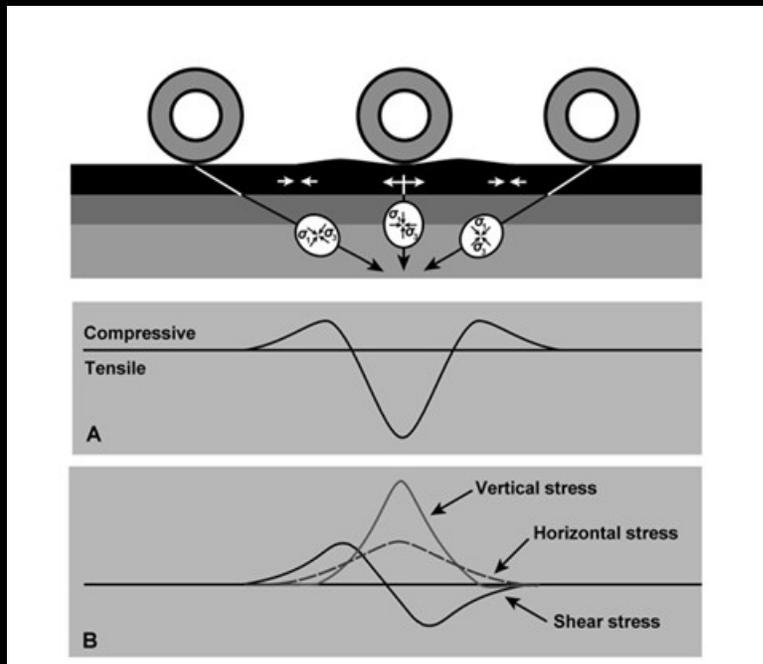


Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto de Camadas Asfálticas de Reforço

Desempenho quanto à Fadiga com base na Deformação da Mistura Asfáltica

$$\log_{10} N_f = 15,947 - 3,291 \times \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_t}{10^{-6}} \right) - 0,854 \times \log_{10} (0,142232 \times M_r)$$



<http://www.roadex.org>

Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto de Camadas Asfálticas de Reforço

Desempenho quanto à Fadiga com base na Deflexão do Pavimento

Para espessura do revestimento < 100 mm:

$$N = 5,548 \times 10^{16} \times d_0^{-5,319}$$

Para espessura do revestimento > 100 mm:

$$N = 3,036 \times 10^{13} \times d_0^{-3,922}$$

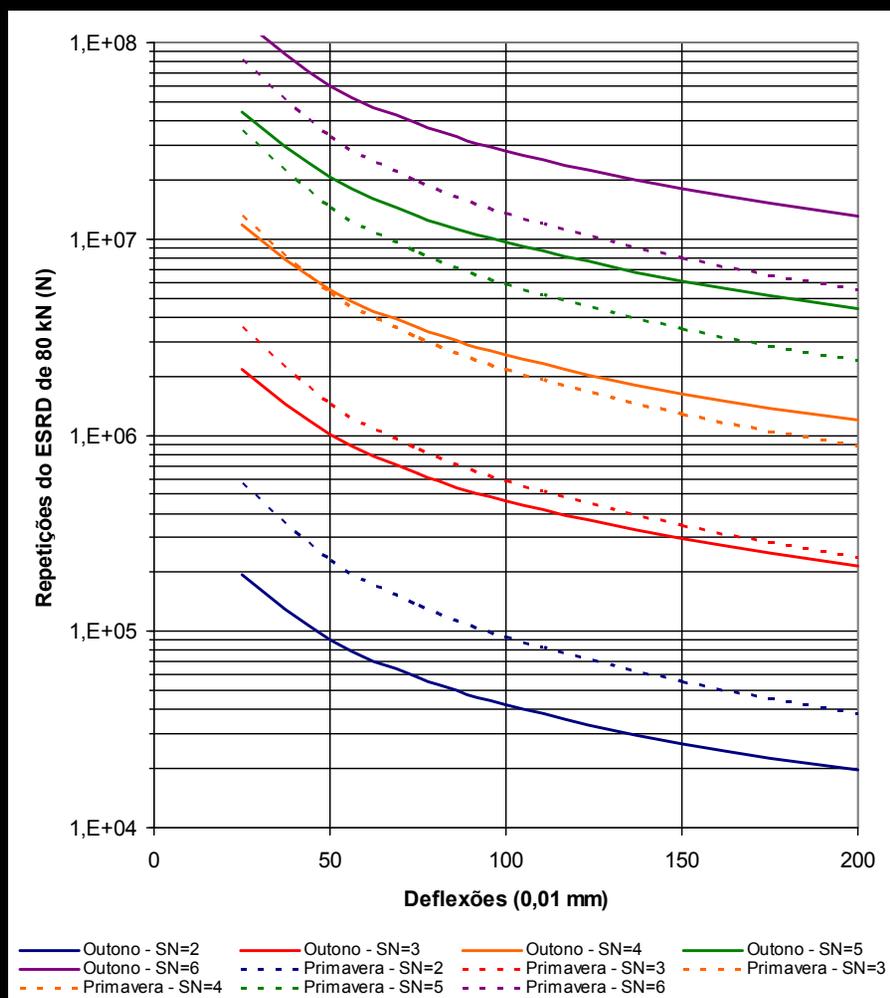
onde d_0 é a deflexão esperada expressa em 10-2 mm.



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto de Camadas Asfálticas de Reforço

Desempenho quanto à formação de Fissuras no CAUQ



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

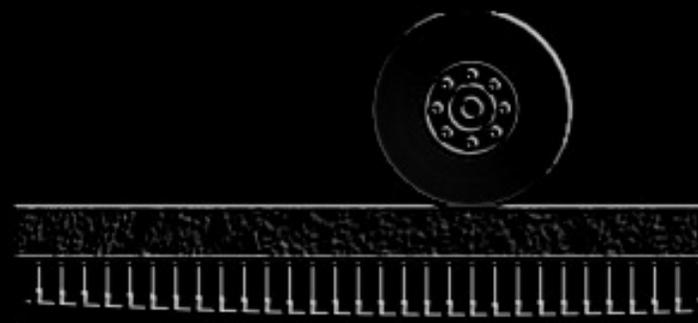
Critérios de Projeto de Camadas Asfálticas de Reforço

Desempenho quanto à formação de Fissuras no CAUQ

$$\ln TR = -3,994 + 3,102 \cdot \ln IRI + 0,354 \cdot D \cdot \ln N$$



www.espinapaving.com



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto de Camadas Asfálticas de Reforço

Desempenho quanto ao incremento da Irregularidade Longitudinal

$$IRI = \frac{1}{[0,497 + 0,086 \cdot REF - 7,8 \cdot 10^{-9} \cdot D \cdot N]}$$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Critérios de Projeto de Camadas Asfálticas de Reforço

Métodos de Dimensionamento de Reforços no Brasil

Método	Fundamento	Origem
Resistência (extinto DNER) (ou método do CBR)	Resistência do subleito	USACE
DNER-PRO-11/79-B	Deflexões e defeitos	Ruiz (Argentina) Pensilvânia DOT
DNER-PRO-10/79-A	Deflexões, defeitos e CBR de camadas de base	Método CDH
DNER-PRO-159/85	Evolução de trincas e de irregularidades	Nacional (César Queiróz)
DNER-PRO-269/94	Deflexões e fadiga do revestimento	Nacional (COPPE)

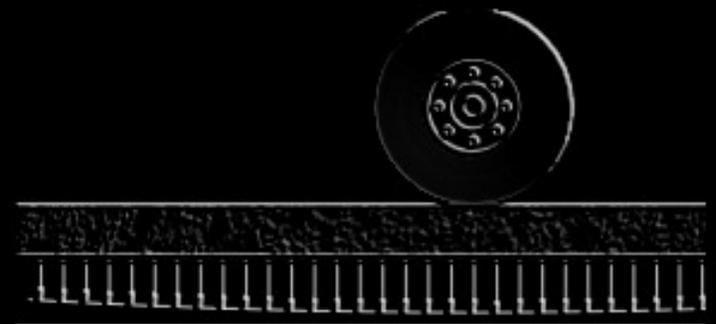


Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método de Resistência (ou método do CBR)

Esclarecimento com Exemplo

Após dois anos de sua construção e utilização, uma rodovia vicinal deve ser restaurada para suportar um novo tráfego de $N = 5 \times 10^6$. Estudos de campo e laboratório forneceram as estatísticas apresentadas abaixo para o pavimento existente. Com base no critério de resistência do DNER (1981), redimensionar o pavimento para suportar o tráfego previsto, definindo a espessura de reforço necessária.



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método de Resistência (ou método do CBR)

Esclarecimento com Exemplo

Após dois anos de sua construção e utilização, uma rodovia vicinal deve ser restaurada para suportar um novo tráfego de $N = 5 \times 10^6$. Estudos de campo e laboratório forneceram as estatísticas apresentadas abaixo para o pavimento existente. Com base no critério de resistência do DNER (1981), redimensionar o pavimento para suportar o tráfego previsto, definindo a espessura de reforço necessária.

Camadas originais	Material	Espessura (cm)	CBR (%)	R _c (MPa)	Avaliação visual
revestimento	TSD	1,5	-	-	Falta de ligante
base	SC	20	-	3,5	Pouco trincado
subleito	LG'	-	10	-	-



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

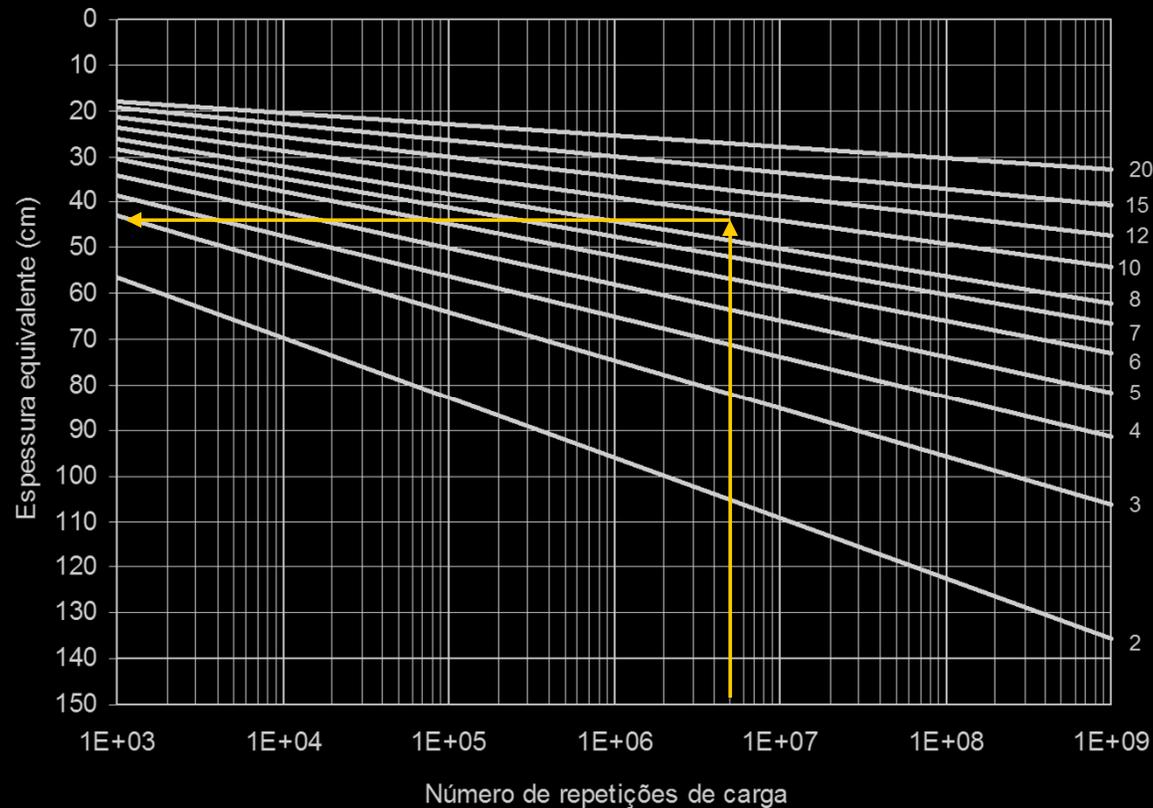
Métodos de Dimensionamento de Reforços

Primeiramente, deve-se observar que o método de projeto de pavimentos flexíveis do DNER (1981) recomenda revestimentos betuminosos com espessura mínima de 5 cm para $N = 5 \times 10^6$. A avaliação subjetiva oferecida indica que o TSD se apresenta com pouco ligante asfáltico; em outras palavras, o material original já perde muito em qualidade e inclusive, apresenta-se com espessura reduzida em torno de 1,0 cm, com evidente desagregação e desgaste.

Quanto à base cimentada, não foi verificada fissuração excessiva, permitindo inclusive a retirada de corpos de prova para ensaios de compressão, sendo indicativo de que apresenta desempenho satisfatório, possuindo em média uma resistência à compressão que sugere que o material ainda se comporta como mistura cimentada.

Consultando o método do DNER, pode-se admitir um coeficiente de equivalência estrutural de 1,4 para o solo-cimento, dado o valor de sua resistência à compressão. Quanto ao TSD não se admite que possua funções estruturais, pesando ainda as restrições apontadas

Métodos de Dimensionamento de Reforços



$H_{eq} = 42 \text{ cm}$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Métodos de Dimensionamento de Reforços

A espessura de reforço em concreto betuminoso (H_{ref}) necessária será calculada pela inequação:

$$H_{ref} \cdot K_{ref} + R \cdot K_r + B \cdot K_b \geq H_m$$

na qual $K_{ref} = 2,0$ (reforço em CAUQ), R = espessura de TSD (desprezada), K_r = desprezado, $B = 20,0$ (espessura da base) e $K_b = 1,4$. A espessura de reforço em CBUQ necessária para o pavimento em questão será então de 7,0 cm, tendo em conta as hipóteses assumidas.

Caso se opte por uma solução mista em CBUQ + PMQ, basta que se realize a conversão de parte da espessura de reforço encontrada utilizando-se o coeficiente de equivalência estrutural para o PMQ fornecido pelo método do DNER.



Métodos de Dimensionamento de Reforços

A espessura de reforço em concreto betuminoso (H_{ref}) necessária será calculada pela inequação:

$$H_{ref} \cdot K_{ref} + R \cdot K_r + B \cdot K_b \geq H_m$$

na qual $K_{ref} = 2,0$ (reforço em CAUQ), R = espessura de TSD (desprezada), K_r = desprezado, $B = 20,0$ (espessura da base) e $K_b = 1,4$. A espessura de reforço em CBUQ necessária para o pavimento em questão será então de 7,0 cm, tendo em conta as hipóteses assumidas.

Caso se opte por uma solução mista em CBUQ + PMQ, basta que se realize a conversão de parte da espessura de reforço encontrada utilizando-se o coeficiente de equivalência estrutural para o PMQ fornecido pelo método do DNER.

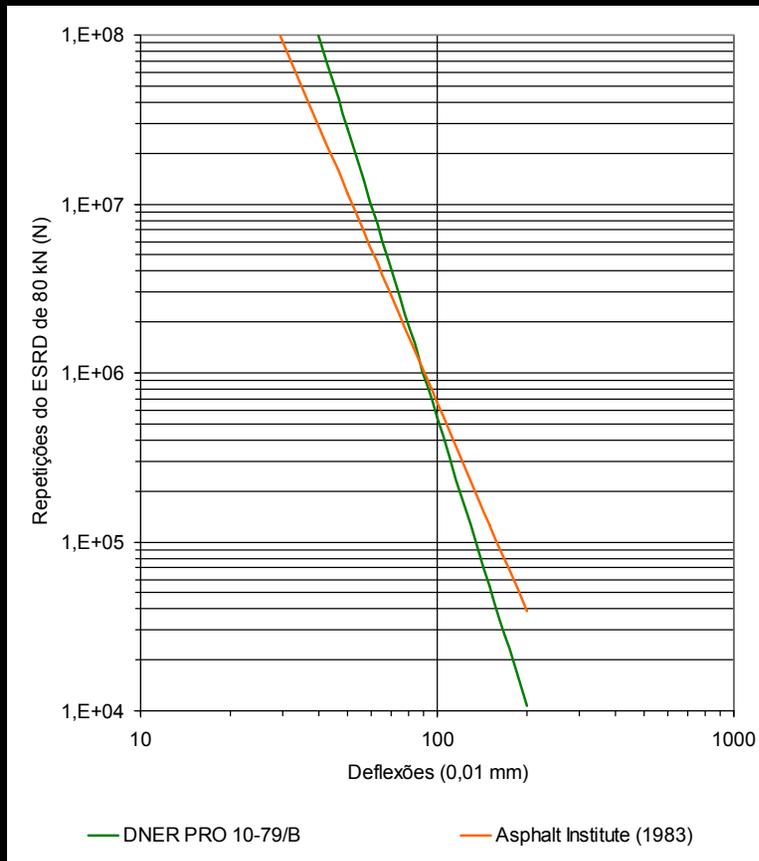


Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

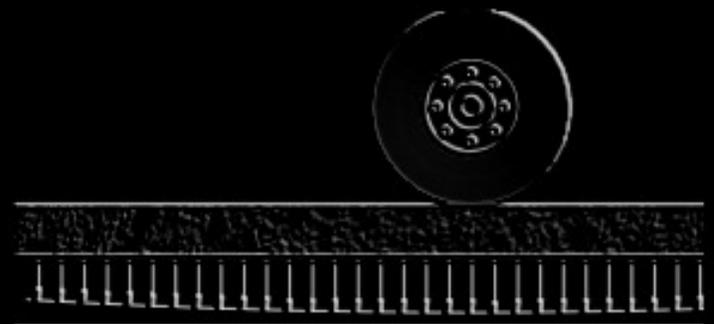
Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B

o critério de deflexão admissível empregado no método “foi extraído do *Asphalt Institute*, para pavimentos flexíveis constituídos de base granular e revestidos com concreto betuminoso”.



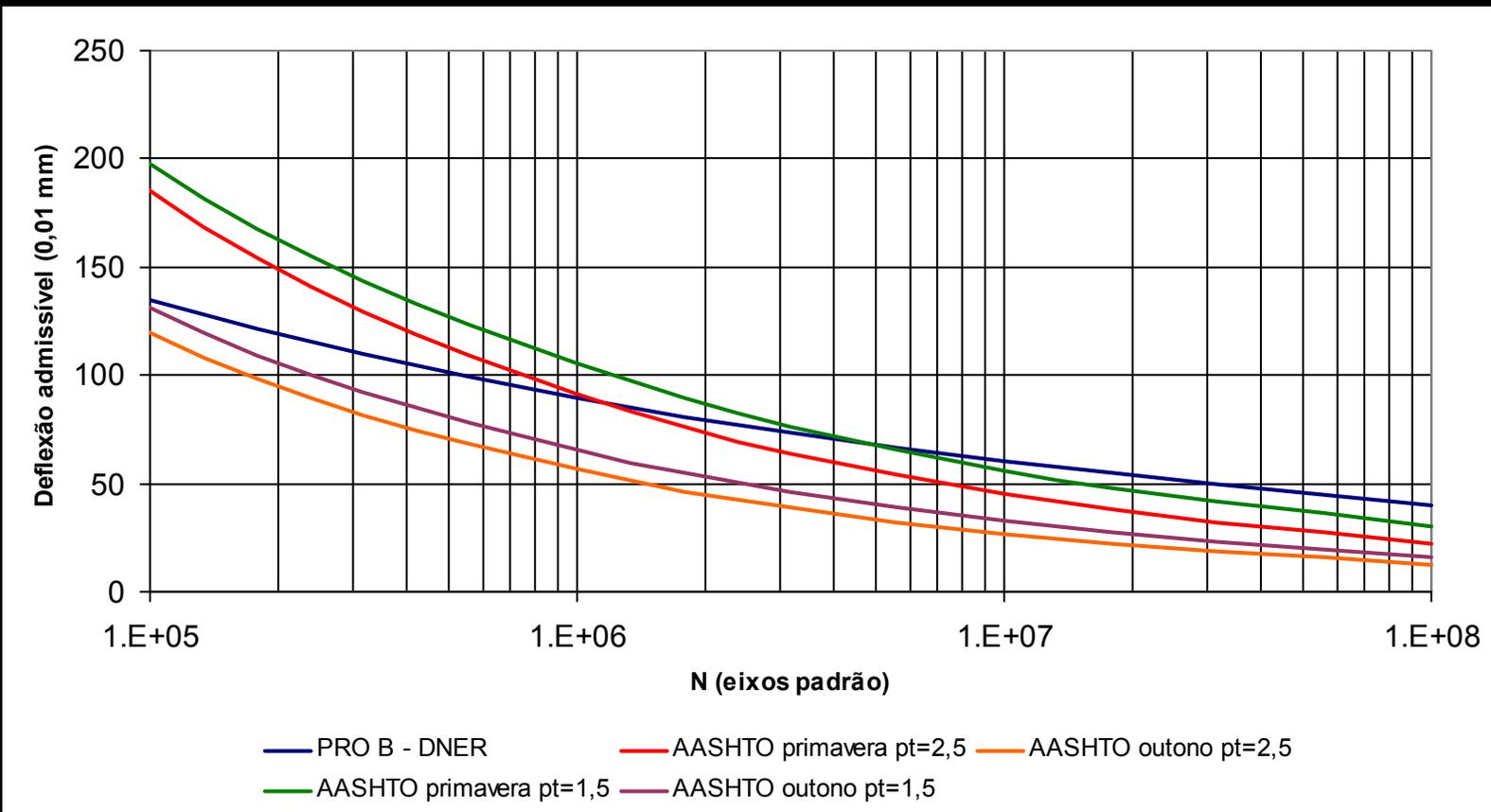
$$d_{adm} = 10^{(3,01 - 0,176 \times \log_{10} N)}$$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B



Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B

Equação de Redução de Deflexões

$$\Delta(\%) = \frac{d_c}{d_{adm}} = 10 \left(\frac{h_r}{K} \right)$$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B

A equação de redução de deflexão do PRO-B tem sua origem, conforme esclarecimentos magistrais de Medina e Motta (1995), em uma digressão do Dr. Celestino Ruiz, engenheiro argentino que acumulou grande experiência com medidas em pavimentos de rodovias próximas à Província de Buenos Aires, Argentina.

A formulação analítica original de Ruiz consistia em uma elaboração apoiada no fato que existia uma relação entre a espessura de reforço e a variação (redução) na deflexão existente, representada pela equação:



Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B

$$\frac{dD}{dh} = \frac{D}{R}$$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B

sendo D a função “deflexão” sobre a superfície do pavimento e R uma constante congregando propriedades de deformabilidade implícitas da mistura asfáltica de reforço e do próprio pavimento existente, justificando-se o sinal negativo na taxa de variação pois na medida que h aumenta D diminui. Invertendo-se a equação acima e integrando-a em relação a D e h , obtém-se:

$$-\ln D + C = \frac{h}{R}$$

sendo C a constante de integração para a integral indefinida.



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B

Nesta equação, sabe-se que quando $h = 0$ (espessura de reforço nula) a deflexão D é a própria deflexão característica d_c do pavimento existente. Substituindo-se tal condição de contorno na equação, obtém-se:

$$C = \ln d_c$$

o que permite escrever:

$$-\ln D + \ln d_c = \frac{h}{R}$$
$$\ln \frac{d_c}{D} = \frac{h}{R}$$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B

A equação acima, expressa em termos de logaritmo de base dez no lugar do logaritmo natural, resulta em:

$$h = \frac{R}{0,4343} \times \log_{10} \frac{d_c}{D}$$

Observe que o denominador $R/0,4343$ pode ser substituído por uma constante K e D pode ser tomada como deflexão admissível (após reforço, ou seja, a deflexão de projeto), sendo h a espessura de reforço, o que nos leva à equação de redução de deflexão do PRO-B do DNER. R é chamado na literatura de *fator de redução de deflexão*.



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B

Celestino Ruiz (segundo Medina e Motta, 1995), no início da década de 1960, avaliando em campo pavimentos com revestimentos asfálticos, bases asfálticas e sub-bases em solo-cimento chegou experimentalmente a valores de R em média de 12. Ainda com base em outros dados estrangeiros, *nuestro hermano* observou o valor de R variando na faixa de 10 a 49, o que foi bem consistente com outros estudos. Engenheiros do *Pennsylvania Department of Transportation*, também nos anos de 1960, chegaram a valor de $R = 18$, sempre para espessura do reforço em centímetros e deflexões em centésimos de milímetros. O valor de $k = 40$ adotado pelo DNER reflete um valor de $R = 17$.



Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B

Critérios para a análise de necessidades de reforço e manutenção dos pavimentos asfálticos

Situação	Deflexões	Qualidade estrutural	Realizar estudos complementares ?	Critério de determinação de h_r	Medidas corretivas
I	$d_c \leq d_{adm}$ $R \geq 100$ m	Boa	Não	dispensável	Melhorias superficiais
II	$d_c > d_{adm}$ $R \geq 100$ m	Regular caso $d_c \leq 3 \times d_{adm}$	Não	Deflectométrico	Reforço
		Má caso $d_c > 3 \times d_{adm}$	Sim	Deflectométrico e resistência (CBR)	Reforço ou reconstrução
III	$d_c \leq d_{adm}$ $R < 100$ m	Regular para Má	Sim	Deflectométrico e resistência (CBR)	Reforço ou reconstrução
IV	$d_c > d_{adm}$ $R < 100$ m	Má	Sim	Resistência (CBR)	Reforço ou reconstrução
V	-	Má se IGG > 180	Sim	Resistência (CBR)	Reconstrução

Métodos de Dimensionamento de Reforços

EXERCÍCIO 1 - Método DNER-PRO-11/79-B

Determine o valor de K a ser empregado em projeto, na equação de redução de deflexão do método DNER-PRO 11/79-B. Para tanto, cinco trechos de segmentos restaurados, na mesma obra, em semanas imediatamente anteriores, apresentaram os seguintes valores de deflexões antes e após execução da camada de reforço.

Segmento experimental	Deflexão antes do reforço (0,01 mm)	Deflexão após reforço (0,01 mm)	Espessura de reforço empregada (cm)
1	75	60	4
2	89	67	5,5
3	66	55	4
4	95	70	7
5	75	50	6,5



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Métodos de Dimensionamento de Reforços

Método DNER-PRO-11/79-B

Solução

Os valores de K para cada trecho experimental podem ser obtidos pela equação:

$$K = \frac{h_r}{\log_{10} \frac{d_c}{d_{adm}}}$$

Sendo d_{adm} tomada como a deflexão resultante após o reforço, a média dos valores de K calculados pela expressão acima resulta em $K = 45,2$ (com $s = 6,5$ e $CV = 14,4\%$). Este é o valor de K a ser empregado para o dimensionamento do reforço para o restante da obra, mantidas demais condições de subleito similares.

Métodos de Dimensionamento de Reforços

EXERCÍCIO 2 - Método DNER-PRO-11/79-B

Estudar as possíveis soluções de reforço para um segmento homogêneo constituído de pavimento flexível com revestimento em CAUQ que apresenta deflexão característica de 82 (0.01 mm). O tráfego previsto para o horizonte de projeto é $N = 108$. Apresentar soluções em duas camadas considerando os materiais indicados, adotando-se o valor de 7 cm como espessura mínima de CAUQ. Use o valor de K calibrado no exercício acima para os cálculos.

Material	Coef. Equiv. Est. (DNER)
CAUQ	2,0
PMQ	1,7
PMF	1,4
MB	1,2



Métodos de Dimensionamento de Reforços

Exemplo com o Método do DNER

Solução

A deflexão admissível sobre o reforço será:

$$d_{adm} = 10 (3,01 - 0,176 \cdot 8 \cdot \log_{10} 10) = 40 (0,01 \text{ mm})$$

A espessura de reforço para a redução da deflexão existente ao nível desejado será:

$$h = 45,2 \times \log_{10} (82 / 40) = 14,1 \text{ cm}$$



Laboratório de Mecânica de Pavimentos
www.lmp.ptr.usp.br

Métodos de Dimensionamento de Reforços

Exemplo com o Método do DNER

As soluções alternativas são obtidas adotando-se 7 cm em CAUQ e definindo-se as espessuras equivalentes aos 5,5 cm restantes, tendo em vista o material desejado como camada de ligação. Note bem que, as diversas soluções de reforço possuem diferentes e progressivas implicações na alteração do nível do greide da pista de rolamento, com inevitáveis interferências com calçamentos, soleiras, canteiros centrais, gabaritos de túneis, pontes e viadutos, passarelas, sinalização suspensa vertical, e daí afora. Muitas vezes, por tais razões, além dos custos envolvidos, administrações municipais atuam com soluções de reforços, em termos de espessuras, muito aquém do necessário conforme os critérios vigentes.

Alternativas	CAUQ	PMQ	PMF	MB	Total (cm)
1	14,5	-	-	-	14,5
2	7	9	-	-	16
3	7	-	11	-	18
4	7	-	-	12,5	19,5



Métodos de Dimensionamento de Reforços

Críticas ao Método de Reduções de Deflexões

- (1) Equação necessita calibração
- (2) Rigidez da base pode impedir redução; equação se torna inservível
- (3) Método não leva em consideração a reflexão de fissuras do revestimento existente para o reforço (recape)

Métodos de Dimensionamento de Reforços

Críticas ao Método de Reduções de Deflexões

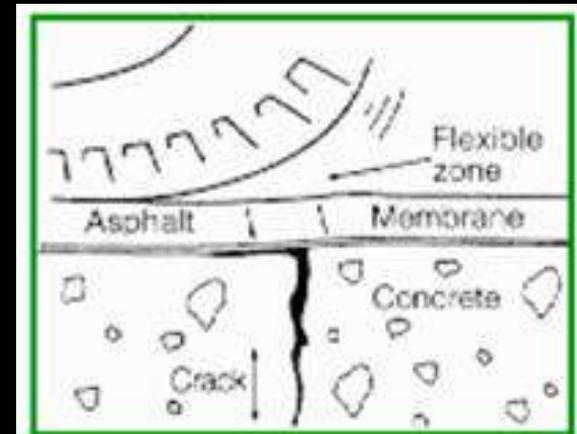


Figure 1 - Possible mechanism for crack propagation delay due to a membrane layer.