



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

1. OBJETIVO

A presente Instrução de Projeto tem por objetivo indicar os procedimentos e recomendações fundamentais para a verificação estrutural de pavimentos dimensionados pelos métodos recomendados pela PMSP, buscando uma abordagem mecanicista para o dimensionamento das estruturas dos pavimentos da Prefeitura do Município de São Paulo. Tais avaliações não podem ser realizadas anteriormente ao dimensionamento do pavimento de acordo com a Instrução de Projeto adequada.

2. INTRODUÇÃO

Na presente instrução são indicados os procedimentos e conceitos básicos para a análise estrutural do potencial comportamento à fadiga de revestimentos asfálticos e de bases cimentadas de pavimentos, levando-se em consideração que os procedimentos tradicionais e normalizados para o dimensionamento de pavimentos asfálticos flexíveis e semi-rígidos não avaliam, nem mesmo implicitamente, a ocorrência de tais fenômenos nas estruturas de pavimentos.

Como regra geral para emprego de procedimentos que melhor possam avaliar tal comportamento de pavimentos a serem construídos (e dimensionados por métodos que mantêm como foco principal os critérios de ruptura tradicionais, quais sejam, por cisalhamento de camadas de solos e granulares inferiores), deverão ser seguidos os seguintes fundamentos:

- a) Verificação de deformações e de tensões em estruturas de pavimento asfáltico, por meio do emprego de teoria adequada, neste caso, a Teoria Elástica de Sistemas de Camadas proposta por Burmister na década de 1940. Tal teoria é de emprego bastante simplificado por meio de diversos programas de computador desenvolvidos desde a década de 1960;
- b) Seleção de modelos experimentais ou semi-empíricos descrevendo o comportamento à fadiga de dado material em função do número de solicitações de carga que causa determinado nível de deformação ou de tensão no material;



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

- c) Emprego de conhecimento crítico e detalhado sobre as diferenças entre processos mecânicos de degradação em pista comparados aos processos experimentais em laboratório. Tal consideração poderá ser realizada pelo projetista, tomando-se por base a variabilidade dos módulos de elasticidade dos materiais em função de condições climáticas, a variabilidade do posicionamento do tráfego em faixas de rolamento e de pressões de pneumáticos, só a título de exemplificação; isto, em geral, recai no emprego de um fator de correção do número de repetições toleráveis à fadiga para um dado material, cujo fenômeno tenha sido estudado primariamente apenas em laboratório;
- d) Com base nas deformações e tensões aferidas conforme item (a) acima, verificar a tolerância à fadiga da estrutura, com seus materiais e camadas individualizados quando for o caso (por exemplo, em pavimentos semi-rígidos duas verificações podem ser cabíveis: revestimento asfáltico e camada de base ou de sub-base cimentada), por comparação ao número de repetições de carga (padrão) conforme metodologia empregada para o dimensionamento da estrutura;
- e) As análises acima propostas deverão ser sucessivamente realizadas, com emprego da hipótese de dano contínuo e linear de Miner (em primeira aproximação), até que o número N de projeto seja atendido para todas as camadas sujeitas ao fenômeno da fadiga; isto é feito por meio do incremento de espessuras (nunca diminuição em relação ao pavimento projetado pela instrução pertinente) das camadas sujeitas ao fenômeno da fadiga ou outras.

3. PROCEDIMENTOS PARA PARAMETRIZAÇÃO ELÁSTICA DOS PAVIMENTOS

Após dimensionamento do pavimento pela instrução preconizada pela PMSP, o projetista fará as avaliações de deformações, de tensões e de deflexões na estrutura de pavimento. Tais avaliações deverão compreender os pontos de interesse em cada camada sujeita ao fenômeno da fadiga, na zona de solicitação mais crítica. O eixo padrão para avaliação será o eixo simples de rodas duplas, com as seguintes características médias:



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

- Distância entre o centro geométrico de duas rodas (roda dupla): 340 mm
- Distância entre os centros de gravidade dos pares de rodas: 1810 mm
- Carga sobre o eixo: 80 kN
- Pressão mínima de contato dos pneumáticos com a superfície do pavimento: 600 kPa.

Para a realização de tais avaliações, o projetista deverá informar as espessuras das camadas conforme dimensionamento básico bem como os valores de módulos de elasticidade (ou de resiliência) dos materiais que compõem as camadas, o que poderá ser realizado com auxílio do Quadro 8.1, não se abandonando novos resultados que a pesquisa e a experiência de obras e controle tecnológico possam futuramente trazer.

Quadro 8.1
Estimativas dos módulos de resiliência

CAMADAS	TIPOS	ESTIMATIVAS EM MPa
SUBLEITO	LATERÍTICO (LA' e LG')	$E_{SL} = 22,0 (CBR)^{0,8}$
	NÃO LATERÍTICO (NS' e NG')	$E_{SL} = 18,0 (CBR)^{0,64}$
	ARENOSO <i>POUCO</i> OU NÃO COESIVO (LA, NA e NA')	$E_{SL} = 14,0 (CBR)^{0,7}$
REFORÇO	LATERÍTICO (LA' e LG')	$E_{REF} = 22,0 (CBR)^{0,8}$
	NÃO LATERÍTICO (NA' e NG')	$E_{REF} = 18,0 (CBR_{REF})^{0,64} \times \sqrt[3]{\frac{3CBR_{SL}}{CBR_{REF}}}$
SUB-BASE	GRANULAR	$E_{REF} = 18,0 (CBR_{SB})^{0,64} \times \sqrt[3]{\frac{3CBR_{SL}}{CBR_{SB}}}$
BASE	GRANULAR	$100 \leq E_B \leq 500$
	BETUMINOSA	$800 \leq E_B \leq 1.000$
	CIMENTADA (BGTC)	$5.000 \leq E_B \leq 15.000$
MISTURAS BETUMINOSAS	CONCRETO ASFÁLTICO (C.A.)	$3.000 \leq E_{CA} \leq 5.000$
	PRÉ-MISTURADO A QUENTE (PMQ)	$2.000 \leq E_{PMQ} \leq 2.500$
	BINDER	$1.400 \leq E_{BD} \leq 1.800$
	PRÉ-MISTURADO A FRIO (PMF) OU MACADAME BETUMINOSO SELADO	$1.000 \leq E_{PMF} \leq 1.400$



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

Notas:

- (1) Estes valores fornecem indicadores para a adoção de módulos de resiliência para a verificação de comportamento elástico das estruturas do pavimento. Se forem disponíveis resultados de medidas diretas ou através de procedimentos especiais, devem os mesmos ser utilizados em substituições às estimativas.
- (2) No caso de adoção de bases mistas, deverá ser adotado o módulo de resiliência correspondente ao material de menor valor.

Para as misturas asfálticas, quando são disponíveis resultados do ensaio Marshall, pode ser estimado o valor de E pela correlação:

$$E = 340 \left(\frac{E_B}{F} \right)^{0,5}$$

onde E_B = Estabilidade (kgf); F = Fluência (1/100"); e E = Módulo de Elasticidade (MPa)

Para o caso de bases ou sub-bases cimentadas em BGTC, a resistência a tração na flexão, a menos de dosagem probatória, não poderá ser assumida como superior a 1,0 MPa para material com 4% de cimento em peso, brita graduada fechada (faixa B da ABNT) e de origem granito/gnaise, compactada na energia modificada e com teor de umidade em torno de 2% abaixo da umidade ótima (ramo seco).

Valores básicos para o coeficiente de Poisson para os materiais serão:

- CAUQ e PMQ: de 0,30 a 0,35;
- BGTC: de 0,2 a 0,25;
- Materiais Granulares: de 0,4 a 0,5;
- Solos: de 0,45 a 0,5;
- Bases Betuminosas rígidas: 0,25;
- CCR: 0,2.

4. MODELOS PARA VERIFICAÇÃO À FADIGA

Os modelos indicados na seqüência, para a verificação à fadiga dos materiais asfálticos densos e cimentados, foram extraídos da literatura técnica nacional, resultantes de pesquisas laboratoriais, com comprovada adequação metodológica, e devem ser empregados nas análises em questão. Quando um dado material requerer



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

o emprego de modelo estranho à presente instrução, desde que não existente para o material em questão, a justificativa de tal emprego ficará a cargo do projetista, que deverá apresentar as provas da adequação metodológica de tais modelos, bem como suas limitações e campo de validade.

4.1 CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE

Conhecida a deflexão (D_0) sofrida na superfície do concreto asfáltico, o número de repetições da carga à fadiga que causa tal deflexão será dado por:

- $N = 5,548 \times 10^{16} \times D_0^{-5,319}$ para espessura do revestimento < 100 mm
- $N = 3,036 \times 10^{13} \times D_0^{-3,922}$ para espessura do revestimento > 100 mm

Conhecida a deformação específica máxima de tração (ϵ_t) sofrida na região mais crítica da espessura do concreto asfáltico, o número de repetições da carga à fadiga que causa tal deformação será dado por:

$$N = 6,64 \times 10^{-7} \cdot (1/\epsilon_t)^{2,93}$$

4.2 BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

Conhecida a tensão máxima de tração na flexão sofrida na região mais crítica da espessura da base cimentada, o número de repetições da carga à fadiga que causa tal deformação será dado por:

$$N_f = 10^{(17,137 - 19,608 RT)}$$

sendo RT a relação entre tensões, ou seja a relação entre a tensão de tração na flexão sofrida na camada pela tensão de tração na flexão de ruptura característica do material em questão.

Tratando-se o Concreto Compactado a Rolo de um concreto de cimento Portland adensado por compactação, não deverá ser confundido com a BGTC. Na IP – 07 – Dimensionamento de Pavimentos de Concreto são indicados modelos de fadiga para concretos, incluindo o CCR, que poderão ser adotados em análises mecanicistas.



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

5. MODELOS FECHADOS PARA A AVALIAÇÃO MECANICISTA

Em substituição ao emprego de modelo elástico adequado, poderão ser empregados, dentro de suas respectivas faixas de validade, modelos fechados já desenvolvidos, com comprovada adequabilidade metodológica, para o cálculo de deflexões, deformações e de tensões em camadas, conforme se seguem.

5.1 Modelos para Pavimentos semi-rígidos convencionais

A tensão crítica de tração na flexão para a camada de BGTC em base de pavimento semi-rígido é calculada pela equação:

$$\sigma_t = 59,463847 \cdot e_{CAUQ}^{-0,323205} \cdot e_{BGTC}^{-1,178098} \cdot e_{BGS}^{-0,007887} \cdot E_{sub}^{-0,214274} \cdot (Q_{ESRD})^{0,970153}$$

onde:

σ_t = tensão de tração na flexão na base (MPa)

e_{CAUQ} = espessura de CAUQ (mm)

e_{BGTC} = espessura da base (mm)

e_{BGS} = espessura da subbase (mm)

E_{sub} = módulo de resiliência do subleito (MPa)

Q_{ESRD} = carga total sobre o eixo simples de rodas duplas (kN)

As faixas de variação dos parâmetros considerados para o desenvolvimento do modelo são apresentados no Quadro 8.2, não sendo recomendado o seu emprego além dos limites mencionados.

Quadro 8.2

Parâmetros considerados no modelo

Camada	E (MPa)	v	e (mm)
revestimento (CAUQ)	3.000	0,35	100 a 150
base (BGTC)	15.000	0,25	200 a 400
Sub-base (BGS)	100	0,35	150 a 250
subleito	25 a 125	0,40	Semi-infinito



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

Ainda para o caso de sistemas de três camadas com base cimentada, o seguinte modelo para cálculo da deflexão (D) sobre a superfície da estrutura poderá ser empregado:

$$D_0 = 10^{3,019694} \cdot e_{CAUQ}^{-0,137129} \cdot e_{BC}^{-0,370613} \cdot E_{CAUQ}^{-0,118338} \cdot E_{BC}^{-0,126027} \cdot E_{sub}^{-0,767296}$$

onde:

D_0 = deflexão na superfície do pavimento (mm)

e_{CAUQ} = espessura de CAUQ (mm)

e_{BC} = espessura da base cimentada (mm)

E_{CAUQ} = módulo de elasticidade do concreto asfáltico (MPa)

E_{BC} = módulo de elasticidade da base cimentada (MPa)

E_{sub} = módulo de elasticidade do subleito (MPa)

As faixas de variação dos parâmetros considerados para os modelos acima são apresentadas no Quadro 8.3.

Quadro 8.3

Parâmetros considerados nos modelos

Camada	E (MPa)	ν	e (mm)
revestimento (CAUQ)	1.500 a 4.500	0,35	50 a 150
base (SC)	2.500 a 7.500	0,25	150 a 300
subleito	20 a 250	0,40	Semi-infinito

5.2 Pavimentos Semi-rígidos Invertidos

Os modelos para cálculo de deformação específica máxima no concreto asfáltico do revestimento e de tensão máxima na base cimentada, em pavimentos invertidos, com base granular e sub-base em BGTC, são:



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

- deformações na fibra inferior do CA:

$$\varepsilon_t = 1,499 \times 10^{-2} \times e_{CAUQ}^{-0,589} \times e_{BGS}^{-0,272} \times e_{BGTC}^{-0,070} \times E_{CAUQ}^{-0,020} \times E_{BGS}^{-0,400} \times E_{BGTC}^{-0,040} \times E_{sub}^{0,014}$$

- tensões de tração na flexão na sub-base cimentada:

$$\sigma_t = 4,313 \times e_{CAUQ}^{-0,627} \times e_{BGS}^{-0,381} \times e_{BGTC}^{-0,553} \times E_{CAUQ}^{0,019} \times E_{BGS}^{-0,040} \times E_{BGTC}^{0,557} \times E_{sub}^{-0,279}$$

onde:

ε_t = deformação de tração na fibra inferior do CA (10^{-4} mm)

σ_t = tensão de tração na flexão na sub-base cimentada (kgf/cm^2)

e_{CAUQ} = espessura do revestimento (cm)

e_{BGS} = espessura da base (cm)

e_{BGTC} = espessura da sub-base (cm)

E_{CAUQ} = módulo de resiliência do revestimento (kgf/cm^2)

E_{BGS} = módulo de resiliência da base (kgf/cm^2)

E_{BGTC} = módulo de resiliência da sub-base (kgf/cm^2)

E_{sub} = módulo de resiliência do subleito (kgf/cm^2)

As faixas de variação dos parâmetros para os modelos acima são apresentados no Quadro 8.4.

Quadro 8.4

Parâmetros considerados nos modelos

Camada	E (Kgf/cm ²)	v	e (cm)
revestimento (CAUQ)	30.000 a 50.000	0,30	7 a 16
base (BGS)	1.000 a 7.500	0,40	5 a 25
Sub-base (BGTC)	50.000 a 100.000	0,35	15 a 25
subleito	1.000	0,40	semi-infinito



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

5.3 Pavimentos Flexíveis

Os parâmetros e os modelos para cálculo da deformação específica de tração na fibra inferior do concreto asfáltico em pavimentos flexíveis, são divididos em quatro lotes conforme as tabelas a seguir:

Lote 1

Camada	E (MPa)	e (mm)
revestimento (CAUQ)	2.250 a 3.750	50 a 100
base (granular)	100 e 300	100 a 300
subleito	25 a 125	Semi- infinito

$$\varepsilon_t = 10^{-1,955202} \cdot e_{CAUQ}^{-1,091635} \cdot e_{BGS}^{-0,015906} \cdot E_{CAUQ}^{-0,584777} \cdot E_{BGS}^{-0,308633} \cdot E_{sub}^{-0,084054} \cdot Q_{ESRD}^{0,701806}$$

onde:

ε_t = deformação de tração na fibra inferior do CA (mm/mm)

e_{CAUQ} = espessura de CAUQ (mm)

e_{BGS} = espessura da base (mm)

E_{BGS} = módulo de resiliência da base (MPa)

E_{sub} = módulo de resiliência do subleito (MPa)

Q_{ESRD} = carga total sobre o eixo considerado (kN)

Lote 2

Camada	E (MPa)	e (mm)
revestimento (CAUQ)	2.250 a 3.750	50 a 100
base (granular)	100 e 300	100 a 300
subleito	125 a 225	semi infinito

$$\varepsilon_t = 10^{-5,164279} \cdot e_{CAUQ}^{-0,151697} \cdot e_{BGS}^{-0,019947} \cdot E_{CAUQ}^{-0,318480} \cdot E_{BGS}^{-0,531454} \cdot E_{sbl}^{-0,121409} \cdot Q_{ESRD}^{0,915419}$$



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

Lote 3

Camada	E (MPa)	e (mm)
revestimento (CAUQ)	2.250 a 3.750	100 a 150
base (granular)	100 e 300	100 a 300
subleito	25 a 125	semi infinito

$$\varepsilon_t = 10^{-3,74136} \cdot e_{\text{CAUQ}}^{-0,742618} \cdot e_{\text{BGS}}^{-0,016173} \cdot E_{\text{CAUQ}}^{-0,505633} \cdot E_{\text{BGS}}^{-0,336315} \cdot E_{\text{sbl}}^{-0,137855} \cdot Q_{\text{ESRD}}^{0,912476}$$

Lote 4

Camada	E (MPa)	e (mm)
revestimento (CAUQ)	2.250 a 3.750	100 a 150
base (granular)	100 e 300	100 a 300
subleito	125 a 225	semi infinito

O modelo para o lote 4 é:

$$\varepsilon_t = 10^{-3,74136} \cdot e_{\text{CAUQ}}^{-0,742618} \cdot e_{\text{BGS}}^{-0,016173} \cdot E_{\text{CAUQ}}^{-0,505633} \cdot E_{\text{BGS}}^{-0,336315} \cdot E_{\text{sbl}}^{-0,137855} \cdot Q_{\text{ESRD}}^{0,912476}$$

6. ANÁLISE MECANICISTA PARA PROJETOS DE REFORÇO DE PAVIMENTOS

Da mesma maneira, por meio da Teoria Elástica de Sistemas de Camadas, é recomendável uma abordagem do processo de fadiga de novas camadas de reforço em concreto asfáltico, o que é possível diante das seguintes considerações:

- Determinação das espessuras das camadas do pavimento existente por método destrutivo;
- Determinação, por retroanálise, dos módulos resilientes em regime de trabalho das camadas do pavimento existente;
- Análise, com teoria adequada, de deformações, de deflexões e de tensões na nova camada de revestimento asfáltico, tendo em conta a estrutura de pavimento remanescente.



IP- 08 ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

O projetista deverá apresentar o relatório de análise mecanicista de soluções de reforço, com justificativa dos procedimentos adotados.

7. ANÁLISE MECANICISTA PARA PROJETOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO

A instrução de projeto para pavimentos de concreto, embora com viés já mecanicista, merecerá ser complementada por análise estrutural de placas de concreto, tendo em vista dimensões variáveis, dimensões e efeitos de barras de transferência de carga e de ligação, bem como de regimes de diferenciais térmicos. Para tanto, o projetista deverá empregar modelagem por elementos finitos, em duas ou três dimensões, sendo o programa empregado de conhecimento do meio de Engenharia, seja tal programa do tipo aberto ou dedicado (exclusivamente para placas de concreto de pavimentos).

8. CALIBRAÇÃO ENTRE MODELOS DE FADIGA DO FATOR CAMPO-LABORATÓRIO

Uma vez que os modelos de fadiga construídos por meio de experimentos laboratoriais, em muitos casos podem afastar-se bastante do comportamento real em pista de rolamento, no que tange à fissuração por fadiga dos materiais de pavimentação, fatores de calibração campo-laboratório poderão ser empregados pelo projetista, desde que definidos comprovadamente por meio de metodologia científica, para a correção do número N estimado a partir dos modelos experimentais (de laboratório).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balbo, J. T. (1993) Estudo das Propriedades Mecânicas das Misturas de Brita e Cimento e sua Aplicação aos Pavimentos Semi-Rígidos. Tese (Doutorado), EPUSP, São Paulo.
- Pinto S. (1991) Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos". Tese (Doutorado), COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro.
- Severi, Andréa Arantes; Rodolfo, Marcos Paulo; Balbo, José Tadeu; Sestini, Valéria ; Prieto, Walter (1999) Verificação à Fadiga dos Revestimentos Asfálticos e Bases Cimentadas – Programa Pavimentos Asfálticos v.1.0. In: Anais do 3º. Simpósio Internacional sobre Avaliação e Projeto de Reforço, Associação Brasileira de Pavimentação, pp.105-115, Belém.
- Suzuki, C. Y. (1992) Contribuição ao Estudo de Pavimentos Rodoviários com Estrutura Invertida (Sub-base Cimentada). Tese (Doutorado), EPUSP, São Paulo.