

**ROTEIRO DE ENSAIOS PARA OBTENÇÃO
DE PARÂMETROS DE ENTRADA DOS
PROGRAMAS DO MEDINA**

BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2026

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA-GERAL
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

PRIMEIRA EDIÇÃO – Brasília, 2025

EQUIPE TÉCNICA:

Eng.^o Márcio Muniz de Farias, PhD. – UnB

Eng.^o Raul Tadeu Lobato Ferreira, MsC. – UnB

Eng.^a Andrea Cardona Pérez, DsC. – UnB

Eng.^a Letícia Nunes Lopes, DsC. – UnB

Brasília
Março/2026

APRESENTAÇÃO

O Instituto de Pesquisas em Transportes (IPR), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em parceria com o Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB) da Universidade de Brasília (UnB), apresenta à comunidade rodoviária a primeira edição do Roteiro de Ensaios Necessários para Obtenção dos Parâmetros de Entrada dos Programas do MeDiNa.

Esse programa é fruto do Termo de Execução Descentralizada (TED) celebrado de 2015 a 2018 entre o IPR e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), bem como da colaboração do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e de diversas Universidades do Brasil participantes da Rede Temática de Asfalto.

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), implantado pelo DNIT em 2025, tem uma abordagem mecanístico-empírica que se diferencia em muitos aspectos da abordagem empírica adotada pelo Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis (DNER, 1981). Este documento é o resultado do aperfeiçoamento do método e do programa e integra o TED celebrado entre o IPR e o INFRALAB/UnB com período de vigência entre 2020 e 2025.

Diante do cenário de implementação do MeDiNa, torna-se imprescindível disseminar no meio técnico rodoviário a sua apropriada utilização, os ensaios necessários, os principais parâmetros de dimensionamento e os respectivos métodos de determinação. Espera-se que o presente roteiro contribua com esse propósito.

Eng.º Luiz Heleno Albuquerque Filho

Coordenador-Geral do Instituto de Pesquisa em Transportes - IPR

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

% RF	Razão entre a tensão de tração aplicada e a resistência à tração por compressão diametral do material
ψ_1, ψ_2, ψ_3 e ψ_4	Parâmetros de regressão
ΔH	Deslocamento horizontal elástico
A e B	Parâmetros experimentais
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
Def_i	Valor de deflexão calculado na posição i
def_i	Valor de deflexão medido na posição i
DER – SP	DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO
D_i	Consumo de vida de fadiga acumulado no mês i
DNER	Departamento Nacional de Estradas De Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura da Universidade de Brasília
ISC	Índice de Suporte Califórnia
k_1, k_2, k_3 e k_4	Parâmetros de regressão
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos
MR	Módulo de Resiliência
MR_{max}	Módulo de resiliência máximo (no início da vida de fadiga)
MR_{min}	Módulo de resiliência mínimo (no final da vida de fadiga)
n	Número de sensores (leituras de deslocamento na bacia deflectométrica)
N	Número de ciclos de aplicação de carga
N_{fad}	Número de ciclos necessários para ruptura do corpo de prova (vida de fadiga)
P	Carga cíclica

RMS	Raiz do valor quadrático médio das diferenças (<i>Root Mean Square</i> , em inglês)
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
TED	Termo de Execução Descentralizada
UnB	Universidade de Brasília
ϵ_p	Deformação permanente específica
ϵ_r	Deformação recuperável
ϵ_t	Deformação resiliente de tração
ϵ_x	Deformação lateral (ou radial)
ϵ_z	Deformação vertical
ν	Coefficiente de Poisson
σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão desvio
t	Espessura (altura) do corpo de prova
θ	Primeiro invariante de tensões (somatório das tensões normais)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Roteiro de obtenção dos parâmetros de entrada para o dimensionamento de estruturas novas utilizando o programa MeDiNa29

PROJETO DE MANUAL

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conceitos Fundamentais Associados ao Módulo de Resiliência e ao Coeficiente de Poisson	10
Tabela 2 – Coeficiente de Poisson para diferentes materiais	11
Tabela 3 – Obtenção dos Parâmetros de Misturas Asfálticas.....	13
Tabela 4 – Obtenção dos Parâmetros de Camadas Granulares e Subleito.....	16
Tabela 5 – Sequência de tensões para fase de condicionamento	18
Tabela 6 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência.....	18
Tabela 7 – Procedimento inicial.....	19
Tabela 8 – Estados de tensões indicados para determinação da deformação permanente.....	19
Tabela 9 – Obtenção dos Parâmetros De Materiais Estabilizados Quimicamente.....	21
Tabela 10 – Tensões desvio para determinação do módulo de resiliência.....	23
Tabela 11 – Obtenção dos módulos de resiliência por retroanálise.....	25
Tabela 12 – Módulo de elasticidade para diferentes materiais	26
Tabela 13 – Quadro resumo dos parâmetros necessários para o dimensionamento de pavimentos pelo MeDiNa	30

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	3
1 INTRODUÇÃO	9
2 DEFINIÇÕES.....	10
3 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE CAMADAS GRANULARES E SUBLEITO.....	15
4 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE MATERIAIS ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE	19
5 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE MATERIAIS TRATADOS COM CAL ...	24
6 DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA POR RETROANÁLISE	25
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

PROJETO DE MANUAL

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de pavimentos pelo Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos Asfálticos (MeDiNa), implantado pelo DNIT em 2025, requer parâmetros distintos daqueles requeridos pelo tradicional Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis (DNER, 1981). Apesar de os parâmetros requeridos pelo programa MeDiNa serem amplamente estudados no meio acadêmico, ainda se mostra necessária a sua disseminação no meio técnico.

O presente roteiro é produto integrante do Termo de Execução Descentralizada celebrado entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e o Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB) da Universidade de Brasília (UnB), e tem como intuito apresentar de forma objetiva os ensaios necessários para obtenção dos parâmetros para o dimensionamento de estruturas de pavimento pelo programa MeDiNa. Neste sentido, é importante observar que este é um documento complementar ao Roteiro de Utilização do Programa MeDiNa.

Essa ferramenta está em constante aprimoramento e as considerações apresentadas se referem às versões 2.0.0 do MeDiNa, 2.4.6 do AEMC e 1.3.0 do BackMeDiNa.

2 DEFINIÇÕES

A Tabela 1 apresenta os conceitos de módulo de resiliência e coeficiente de Poisson, que são parâmetros comumente necessários em análises mecanicistas.

Tabela 1 – Conceitos fundamentais associados ao módulo de resiliência e ao coeficiente de Poisson

Item	Módulo de Resiliência (MR)	Coeficiente de Poisson (ν)
Definição	Parâmetro que representa a rigidez elástica recuperável do material quando submetido a carregamentos repetitivos.	Razão entre a deformação lateral (ou radial) e a deformação vertical quando o corpo de prova é solicitado verticalmente.
Equação	$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$ (1)	$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}$ (2)
Variáveis	<ul style="list-style-type: none"> • σ_d: tensão desvio (MPa) • ε_r: deformação recuperável (adimensional) 	<ul style="list-style-type: none"> • ε_x: deformação lateral (adimensional) • ε_z: deformação vertical (adimensional)
Formas de determinação	<p>Laboratório: obtido por meio da relação entre a tensão desvio aplicada repetidamente e a deformação vertical recuperável correspondente</p> <p>Campo: interpretação/retroanálise de deslocamentos recuperáveis de provas de carga, viga Benkelman ou FWD.</p>	Determinado a partir da medição simultânea das deformações laterais e verticais em ensaios de MR; contudo, usualmente apenas a deformação vertical é medida.
Observações técnicas	<ul style="list-style-type: none"> • Correlações entre MR e o índice de Suporte Califórnia (ISC) não são recomendadas devido à baixa consistência entre os parâmetros (Bernucci et al., 2022). • Parâmetro essencial em métodos mecanicistas e mecanicista-empíricos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Devido à baixa sensibilidade do pavimento a variações do ν, valores típicos são frequentemente adotados (Huang, 2004). • Valores usuais encontram-se na Tabela 2.

A Tabela 2 apresenta valores usuais do coeficiente de Poisson para diferentes materiais.

Tabela 2 – Coeficiente de Poisson para diferentes materiais

Material	Intervalo	Valor Típico
Concreto asfáltico	0,30-0,40	0,30
Materiais granulares	0,30-0,40	0,35
Materiais granulares tratados com cimento	0,10-0,20	0,15
Solos finos tratados com cimento	0,15-0,35	0,25
Materiais estabilizados com cal	0,10-0,25	0,20
Areia fofa ou areia siltosa	0,20-0,40	0,30
Areia densa	0,30-0,45	0,35
Solos de granulação fina	0,30-0,50	0,40

Fonte: Adaptado de Huang (2004)

3 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas consistem em uma mistura de agregados minerais e materiais betuminosos, que podem ser classificadas quanto ao processo de fabricação e o tipo de ligante, em:

- misturas asfálticas usinadas a quente, ou;
- misturas usinadas a frio.

As misturas usinadas a quente com uso de cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou asfaltos modificados são as mais recomendadas e utilizadas na execução da camada de revestimento de rodovias de tráfego moderado a elevado (Pinto & Preussler, 2010; Bernucci *et al.*, 2022).

No programa MeDiNa, as misturas asfálticas são divididas em três grupos, apenas para fins de organização da base de dados:

- concreto asfáltico tradicional (CA);
- concreto asfáltico com ligante modificado por polímero;
- concreto asfáltico com asfalto-borracha.

Esses materiais são representados por seus parâmetros de módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e pelos coeficientes do modelo de fadiga. A Tabela 3 apresenta as características gerais de como esses parâmetros são obtidos. Apesar da possibilidade de determinação em laboratório, a medida do coeficiente de Poisson não é usual. No banco de dados brasileiros, correntemente é adotado o valor de 0,30, para ensaios a 25 °C.

Tabela 3 – Obtenção dos parâmetros de misturas asfálticas

Item	Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)	Módulo de Resiliência (MR)	Parâmetros de Fadiga
Norma aplicável	Determinada conforme DNIT 136/2018 – ME.	Determinado conforme DNIT 135/2018 – ME.	Determinados conforme DNIT 183/2018 – ME.
Descrição geral do ensaio	Ensaio de compressão diametral com aplicação progressiva de carga vertical até a ruptura completa no plano diametral vertical.	Ensaio de compressão diametral de carga repetida, realizado geralmente a 25 °C ± 0,5 °C, para determinação do MR linear elástico das misturas asfálticas.	Ensaio cíclico em compressão diametral, aplicando diferentes níveis de tensão a 25 °C para avaliar o comportamento à fadiga da mistura.
Procedimento de ensaio	Aplicação progressiva da carga até ruptura; cálculo da RT pela média de três determinações.	A carga do ensaio deve estar entre 5 % e 25 % da RT média da mistura. Ensaio realizado com condicionamento inicial de 50 ciclos e medição dos deslocamentos em três etapas sucessivas de 15 ciclos com incrementos de carga de 5 % da carga inicial.	Definição de quatro níveis de tensão entre 5 % e 40 % da RT média. Aplicação de 5–10 ciclos para acomodação, 60 ciclos com medição de deslocamentos, retirada do sensor e continuação do carregamento até ruptura.
Equações	$RT = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad (3)$	$MR = \frac{P}{ \Delta H _t} (0,2692 + 0,9976\nu) \quad (4)$	$N_{fad} = k_1 \cdot \varepsilon_t^{k_2} \quad (5)$
Variáveis	<ul style="list-style-type: none"> • F: carga de ruptura (N) • D: diâmetro (mm) • H: altura (mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • P: carga cíclica (N) • ΔH: deslocamento horizontal (mm) • t: altura (mm) • ν: coeficiente de Poisson 	<ul style="list-style-type: none"> • N_{fad}: ciclos até ruptura • k_1 e k_2: parâmetros de regressão • ε_t: deformação resiliente de tração

Item	Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)	Módulo de Resiliência (MR)	Parâmetros de Fadiga
Relação com outros parâmetros	A RT define o nível de carregamento a ser utilizado nos ensaios de MR e fadiga.	O MR caracteriza a rigidez elástica da mistura e é utilizado na classificação das misturas no MeDiNa.	Os parâmetros (k_1), (k_2) definem Fator de Fadiga da Mistura (FFM) que juntamente com o MR define a classe de fadiga no MeDiNa.
Classificação / Aplicação no MeDiNa	Não utilizada diretamente no dimensionamento.	Misturas classificadas segundo MR e parâmetros de fadiga.	Misturas classificadas em quatro classes de fadiga, correspondentes a faixas de repetições do eixo padrão (Classe 1: $4,5 \times 10^6$ a $6,0 \times 10^6$; Classe 2: $6,0 \times 10^6$ e $7,5 \times 10^6$; Classe 3: $7,5 \times 10^6$ e $1,0 \times 10^7$; Classe 4: $> 1,0 \times 10^7$).
Observações técnicas	Ensaio obrigatório, deve ser conduzido em triplicata, tendo em vista que essa propriedade define o nível do carregamento aplicado nos ensaios para determinação do módulo de resiliência e dos parâmetros de fadiga.	Ensaio deve ser conduzido em triplicata; variações maiores que 5 % entre valores médios são inadmissíveis.	Ensaio em triplicata para cada nível de tensão; resultados devem gerar modelos matemáticos por regressão. A escolha prévia de classes é permitida em anteprojetos.

Nota: as aplicações dos parâmetros necessários no dimensionamento de uma estrutura são detalhadas no manual “MeDiNa – VOLUME 1 Roteiro de Utilização do Programa”

3 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE CAMADAS GRANULARES E SUBLEITO

As camadas granulares são aquelas compostas por materiais que recebem estabilização exclusivamente por processos mecânicos, sem adição de agentes cimentantes ou aglutinadores. Essas camadas normalmente ocorrem em bases, sub-bases e reforço de subleito, sendo constituídas por agregados, solos, ou ainda, pela mistura de ambos. Quando esses materiais passam por um processo de seleção granulométrica para atender requisitos específicos, se diz que foram estabilizados granulometricamente (Balbo, 2007; Bernucci *et al.*, 2022).

O subleito é a fundação do sistema de camadas que compõe a estrutura do pavimento. Nos cortes do corpo estradal, o subleito normalmente é composto de material natural compactado, ou por um material transportado e compactado, no caso de aterros.

No programa MeDiNa, os materiais granulares e solos finos, siltosos ou argilosos são representados por seus parâmetros de coeficiente de Poisson, módulo de resiliência e de deformação permanente, e não são avaliados quanto ao dano por fadiga. A Tabela 4 apresenta as características gerais de como esses parâmetros são obtidos. Quanto ao coeficiente de Poisson de materiais granulares e solos finos, valem as considerações feitas na sessão 2. Assume-se um valor razoável para o desenvolvimento do projeto, em vez de determiná-lo por meio de ensaios laboratoriais (ver Tabela 2).

Tabela 4 – Obtenção dos parâmetros de camadas granulares e subleito

Item	Módulo de Resiliência (MR)	Parâmetros de Deformação Permanente
Norma Aplicável	DNIT 134/2018 – ME (triaxial de carga repetida).	DNIT 179/2018 – IE (triaxial de carga repetida).
Descrição geral do ensaio	Ensaio triaxial de carga repetida para determinação do MR sob diversas combinações de tensões, utilizando níveis baixos de tensões de cisalhamento.	Ensaio triaxial para determinação da deformação plástica acumulada sob longos ciclos de carregamento, considerando diferentes estados de tensão.
Procedimento de ensaio	<ul style="list-style-type: none"> • Carga vertical semissenoidal a 1 Hz. • Corpo de prova compactado nas condições representativas do projeto e da obra. • Etapa de condicionamento: 500 repetições de cada tensão desvio correspondente aos pares da Tabela 5 (para subleito, apenas o primeiro par). • Determinação do MR: sequência dos 18 pares de tensões indicados na Tabela 6; para cada par, aplica-se ao menos 10 ciclos de carga e se faz aquisição de pelo menos 5 repetições de carga. • Ensaio em triplicata. 	<ul style="list-style-type: none"> • Condicionamento inicial: 50 ciclos de carga do par de tensões apresentado na Tabela 7. • Ensaio principal: pelo menos 150.000 ciclos com um par de tensões escolhido da Tabela 8. • Preferencialmente 9 corpos de prova; mínimo de 6 CP se os níveis de tensão forem amplamente distribuídos. • Ensaio obrigatório no MeDiNa para estimar afundamento de trilha de roda (ATR).
Equações	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \cdot \theta^{k_4} \quad (6)$	$\varepsilon_p = \psi_1 \cdot \sigma_3^{\psi_2} \cdot \sigma_d^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (7)$
Variáveis	<ul style="list-style-type: none"> • MR: módulo de resiliência • σ_3: tensão confinante (MPa) • σ_d: tensão desvio (MPa) • θ: primeiro invariante de tensões (MPa) 	<ul style="list-style-type: none"> • ε_p: deformação permanente (%) • σ_3: tensão confinante (MPa) • σ_d: tensão desvio (MPa)

Item	Módulo de Resiliência (MR)	Parâmetros de Deformação Permanente
	<ul style="list-style-type: none"> • k_1, k_2, k_3 e k_4: parâmetros de regressão 	<ul style="list-style-type: none"> • N: número de ciclos • ψ_1, ψ_2, ψ_3 e ψ_4: parâmetros de regressão
Modelagem admitida pelo MeDiNa	<p>Permite caracterização por MR constante (modelo elástico linear) ou por modelo constitutivo não linear.</p> <p>O cálculo é iterativo: assume-se MR inicial, calcula-se tensões pelo modelo de Burmister (1943) e atualiza-se MR até convergência.</p>	<p>Modelo de Guimarães (2009), utilizado para prever deformação permanente no subleito e em camadas granulares. Parâmetros obtidos via regressão não linear múltipla.</p>
Interpretação / Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • Dependência do MR de acordo com os parâmetros: <ul style="list-style-type: none"> – dependente de σ_3 se ($k_3 = k_4 = 0$); – dependente de σ_d se ($k_2 = k_4 = 0$); – dependente de θ se ($k_2 = k_3 = 0$); – modelo composto se ($k_4 = 0$); – constante se ($k_2 = k_3 = k_4 = 0$). 	<ul style="list-style-type: none"> • Fundamenta o cálculo do ATR no MeDiNa. • Permite prever afundamento nas trilhas de roda considerando efeitos de tensão confinante, tensão desvio e número de ciclos de carga.
Observações técnicas	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios em triplicata. • Projetista pode adotar apenas 12 pares de tensão para solos de subleito. • MR final utilizado no MeDiNa representa o valor convergente no centro da camada após iterações. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios devem contemplar ampla faixa de tensões. • Parâmetros obrigatórios para dimensionamento mecanicista-empírico. • A deformação específica permanente é adimensional, expressa em porcentagem.
<p>Nota: as aplicações dos parâmetros necessários no dimensionamento de uma estrutura são detalhadas no manual “MeDiNa – VOLUME 1 Roteiro de Utilização do Programa”</p>		

Tabela 5 – Sequência de tensões para fase de condicionamento na determinação do módulo de resiliência

Tensão Confinante σ_3 (MPa)	Tensão Desvio σ_d (MPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
0,070	0,070	2
0,070	0,210	4
0,105	0,315	4

Tabela 6 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência

Tensão Confinante σ_3 (MPa)	Tensão Desvio σ_d (MPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Tabela 7 – Procedimento inicial para determinação da deformação permanente

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
30	30	2

Tabela 8 – Estados de tensões indicados para determinação da deformação permanente

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
40	40	2
	80	3
	120	4
80	80	2
	160	3
	240	4
120	120	2
	240	3
	360	4

4 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE MATERIAIS ESTABILIZADOS QUIMICAMENTE

As camadas estabilizadas quimicamente são aquelas compostas por materiais granulares ou solos que, além da estabilização por processos mecânicos, são estabilizados pela adição de agentes cimentantes, como cimento Portland, cal ou outro aditivo. Essas camadas normalmente são utilizadas em pavimentos em regiões com carência de materiais granulares, ou em vias com alto volume de tráfego.

Na versão 2.0.0 do programa MeDiNa, são considerados materiais estabilizados quimicamente:

- solo-cimento;
- brita graduada tratada com cimento (BGTC);
- concreto compactado com rolo (CCR).

Esses materiais são representados por seus parâmetros de módulo de resiliência, coeficiente de Poisson, e constantes do modelo de fadiga, e não são avaliados quanto à deformação permanente. A Tabela 9 apresenta as características gerais de como o módulo de resiliência e as constantes do modelo de fadiga são obtidos. Quanto ao

coeficiente de Poisson de materiais tratados com cimento, valem as considerações feitas na sessão 2. Assume-se um valor razoável para o desenvolvimento do projeto, em vez de determiná-lo por meio de ensaios laboratoriais (ver Tabela 2).

A resistência à tração por compressão diametral (RT) dos materiais estabilizados quimicamente deve ser obtida pelo mesmo método de ensaio proposto para misturas asfálticas descrito na norma DNIT 136/2018 – ME (ou norma DNIT que venha a substituí-la). Ver item 3.

Tabela 9 – Obtenção Dos Parâmetros De Materiais Estabilizados Quimicamente

Item	Módulo de Resiliência (MR)	Parâmetros de Fadiga
Norma aplicável	Determinação do MR inicial conforme a norma DNIT 181/2018 – ME; modelo de degradação sigmoidal empregado no MeDiNa.	Ensaio de fadiga regulamentado pela DNIT 434/2022 – ME.
Descrição geral	No MeDiNa, o MR de camadas cimentadas varia no tempo (por mês) segundo modelo sigmoidal que simula a perda progressiva de rigidez devido ao acúmulo de dano.	Materiais cimentados apresentam fragilidade progressiva decorrente da microfissuração dos cristais de hidratação; o modelo do MeDiNa relaciona a tensão de tração na fibra inferior da camada e a resistência à tração por compressão diametral do material.
Modelagem / Equação	$MR = MR_{min} + \frac{MR_{max} - MR_{min}}{1 + e^{-4 + 14 \cdot Di}} \quad (8)$	$N_{fad} = 10^{(k_1 + k_2 \cdot \%RF)} \quad (9) \quad \%RF = \frac{\sigma_t}{RT} \quad (10)$
Variáveis	<ul style="list-style-type: none"> • MR_{min}: módulo final (MPa) • MR_{max}: módulo inicial (MPa) • Di: consumo relativo de vida (0 a 1), expressa consumo de vida de fadiga acumulado no mês i. • MR inicial obtido com ensaio triaxial sem confinamento 	<ul style="list-style-type: none"> • N_{fad}: ciclos até ruptura • k_1 e k_2: parâmetros de regressão • σ_t: tensão de tração (MPa) • RT: resistência à tração por compressão diametral do material (MPa) • % RT: razão entre σ_t e RT

Item	Módulo de Resiliência (MR)	Parâmetros de Fadiga
Procedimento de ensaio	<ul style="list-style-type: none"> • CP submetidos a 50 ciclos para cada tensão desvio da Tabela 10. • Cálculo do MR para cada nível considerando o valor médio do deslocamento resiliente dos últimos 5 ciclos. • Ensaio em triplicata. • MR final (limite inferior) inferido pelo projetista, recomendando-se utilizar o MR do material sem estabilizante químico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definir quatro níveis de tensão entre 50 % e 90 % da RT do material (ver item 3) • Ensaio em tensão controlada até ruptura, registrando ciclos de carregamento. • Ensaio em triplicata para cada nível de tensão (12 CP). • Determinação dos parâmetros k_1 e k_2, via regressão numérica.
Interpretação / aplicação no MeDiNa	<ul style="list-style-type: none"> • MR varia entre MR_{max} (início da vida) e MR_{min} (fim da vida). • MR mensal depende do consumo de fadiga Di. 	<ul style="list-style-type: none"> • A vida de fadiga depende diretamente da relação $\frac{\sigma_t}{RT}$. • N_{fad} define o número admissível de ciclos ao longo da vida.
Observações técnicas	<ul style="list-style-type: none"> • MR inicial obtido sem confinamento. • Recomenda-se que o MR final seja o do material sem estabilizante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaios simulam carregamento cíclico compatível com condições de campo. • Modelos clássicos no Brasil incluem Ceratti (1991) e Balbo (1993).

Item	Módulo de Resiliência (MR)	Parâmetros de Fadiga
Nota: as aplicações dos parâmetros necessários no dimensionamento de uma estrutura são detalhadas no manual "MeDiNa – VOLUME 1 Roteiro de Utilização do Programaz"		

Tabela 10 – Tensões desvio para determinação do módulo de resiliência

Sequência	Tensão Desvio σ_d (MPa)	Número de aplicações de cargas
1	0,1	50
2	0,2	50
3	0,3	50
4	0,4	50
5	0,5	50

5 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE MATERIAIS TRATADOS COM CAL

No programa MeDiNa, os solos melhorados ou estabilizados com cal são representados por seus parâmetros de módulo de resiliência e coeficiente de Poisson, e não são avaliados quanto ao dano por fadiga nem quanto à deformação permanente. Quando, pelo teor de cal utilizado, predominam modificações no solo, referentes à sua plasticidade e sensibilidade à água, tem-se um solo melhorado com cal. Quando predominam as reações de cimentação (carbonatação e pozolanização), tem-se as misturas solo-cal (DNIT, 2006).

Quanto ao coeficiente de Poisson de materiais tratados com cal, valem as considerações feitas na sessão 2. Assume-se um valor razoável para o desenvolvimento do projeto, em vez de determiná-lo por meio de ensaios laboratoriais (ver Tabela 2).

Quanto ao módulo de resiliência, o projetista pode optar por caracterizar esses materiais com um valor de módulo constante, ou seja, comportamento elástico linear, ou pelo modelo constitutivo que melhor represente o comportamento do material, conforme:

- Para solos melhorados com cal o módulo de resiliência deve ser obtido pelo procedimento descrito na norma DNIT 134/2018 – ME (ou norma DNIT que venha a substituí-la, ver sessão 4).
- Para misturas solo-cal o módulo de resiliência deve ser obtido pelo método de ensaio prescrito na norma DNIT 181/2018 – ME (ou norma DNIT que venha a substituí-la, ver sessão 5).

6 DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS DE RESILIÊNCIA POR RETROANÁLISE

Em campo, os deslocamentos verticais recuperáveis da estrutura (deflexões), podem ser obtidos por meio de levantamentos não destrutivos com viga Benkelman ou deflectômetros de impacto (*Falling Weight Deflectometer* - FWD). A Tabela 11 apresenta as informações técnicas sobre a obtenção do módulo de resiliência por meio da retroanálise.

Tabela 11 – Obtenção dos módulos de resiliência por retroanálise

Item	Descrição Técnica
Normas aplicáveis	<ul style="list-style-type: none"> • Determinação das deflexões com viga Benkelman conforme a norma DNIT – ME 133/2025. • Determinação das deflexões com FWD conforme DNER – PRO 273/96.
Fundamento do método	A partir das bacias de deflexão medidas em campo, obtêm-se os módulos de resiliência das camadas por retroanálise, ajustando os valores de módulo até que as deflexões calculadas se aproximem das medidas. Procedimento amplamente utilizado em projetos de reforço e no controle de qualidade de pavimentos novos.
Valores iniciais (Seed Values)	Devem ser atribuídos valores iniciais aos módulos das camadas com base em literatura, banco de dados ou faixas típicas (Tabela 12). Esses valores servem como ponto de partida para o processo iterativo de ajuste.
Processo de retroanálise	<ul style="list-style-type: none"> • Atribuição dos módulos iniciais. • Cálculo dos deslocamentos verticais recuperáveis teóricos. • Comparação entre deslocamentos calculados e medidas. • Atualização dos módulos até que a diferença entre as bacias seja minimizada. • Processo iterativo típico de análise inversa, podendo apresentar múltiplas soluções satisfatórias.
Ferramenta do MeDiNa	O módulo BackMeDiNa realiza a retroanálise automática a partir das bacias medidas com FWD, permitindo alterar: número de camadas, espessuras, materiais, módulos iniciais, coeficiente de Poisson e condições de interface.
Critério de ajuste (RMS)	O ajuste entre bacias é calculado pela equação: $RMS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Def_i - def_i}{def_i} \right)^2 \quad (11)$

Item	Descrição Técnica
	<p>onde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>RMS</i>: raiz do valor quadrático médio das diferenças, adimensional • <i>Def_i</i>: deflexão calculada (centésimos de mm) • <i>def_i</i>: deflexão medida (centésimos de mm) • <i>n</i>: número de sensores.
Classificação da correlação no BackMeDiNa	<ul style="list-style-type: none"> • Boa correlação: $RMS < 5 \%$ • Correlação razoável: $5 \% \leq RMS < 10 \%$ • Correlação insatisfatória: $RMS \geq 10 \%$
Requisitos para execução da retroanálise	O projetista deve importar o arquivo de bacias e ajustar a estrutura conforme a seção-tipo existente, definindo: número de camadas, espessuras, materiais, módulos iniciais, coeficientes de Poisson e condições de interface.
Considerações sobre problemas inversos	A retroanálise é um caso típico de <i>Inverse Problem</i> , podendo ser um problema linear ou não-linear (Aster, Borchers & Thurber, 2018). A depender do número de propriedades a serem obtidas e do número de medições realizadas, não é possível se garantir a unicidade de solução em problemas inversos. Diferentes conjuntos de módulos podem gerar bacias igualmente aderentes ao ensaio em campo.
Importância do julgamento de engenharia	É essencial alimentar o procedimento com valores iniciais coerentes e manter fixos os valores mais confiáveis para reduzir ambiguidades. A decisão final sobre aceitar ou rejeitar um conjunto de módulos depende do julgamento técnico do analista.

Na Tabela 12 são apresentados os intervalos de valores de módulo de elasticidade para diferentes materiais.

Tabela 12 – Módulo de elasticidade para diferentes materiais

Material	Intervalo (MPa)
Concretos Asfálticos	2000 – 12000
Materiais Granulares	100 – 500
Brita Graduada Tratada com Cimento	5000 – 15000
Solos finos em base e sub-base	150 – 300
Solos finos em subleito e reforço de subleito	25 – 200

Nota: o módulo resiliente de um material é análogo ao módulo de elasticidade (módulo de Young) para materiais com comportamento linear elástico.

Fonte: Adaptado de Prefeitura Municipal de São Paulo (2004), DER – SP (2006) e Bernucci *et al.* (2022).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente roteiro foi elaborado buscando apresentar os ensaios necessários para obtenção dos parâmetros de entrada para o dimensionamento de pavimentos no programa MeDiNa (versão 2.0.0). Vale ressaltar que, na elaboração de um projeto, ao alimentar a base de dados com novos materiais, outras características, não abordadas nesse roteiro, serão requeridas. Apesar de essas características não influenciarem o dimensionamento da estrutura de forma direta, são indispensáveis para a caracterização dos materiais e controle de qualidade da obra (parâmetros de compactação, índices volumétricos de misturas asfálticas, *Flow Number*, etc.).

Em resumo, para os materiais granulares de camadas de subleito, reforço de subleito, sub-base e base, o programa MeDiNa requer 9 parâmetros, sendo 5 parâmetros de deformabilidade elástica e 4 de deformação permanente.

Os parâmetros de deformabilidade elástica são: o coeficiente de Poisson (ν) e os coeficientes de regressão (k_1 , k_2 , k_3 e k_4) do modelo de Módulo de Resiliência da Equação 6. Um ou mais destes parâmetros (k_i) podem ser nulos, a depender do tipo de solo. Eventualmente, pode-se arbitrar um valor constante para o Módulo de Resiliência, o que teoricamente equivale a fazer $k_2=k_3=k_4=0$ na Equação 6 e, portanto, ter $MR = k_1$ (constante). Os parâmetros de deformação permanente são os coeficientes ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4 da Equação 7.

Para camadas francamente coesivas estabilizadas com cimento, caso existam na estrutura do pavimento, são necessários 6 parâmetros, sendo 3 relativos à deformabilidade elástica (ν , MR_{max} , MR_{min}) e três relativos ao modelo de vida de fadiga (RT , k_1 e k_2) da Equação 9. Camadas de materiais melhorados ou estabilizados com cal, não são avaliadas quanto à fadiga nem quanto à deformação permanente. Para essas camadas são necessários apenas os parâmetros de deformabilidade elástica: o coeficiente de Poisson (ν) e o Módulo de Resiliência, que pode ser representado por um valor constante ou pelos coeficientes de regressão do modelo da Equação 6.

Para as camadas coesivas de revestimento asfáltico são necessários 5 (cinco) parâmetros, sendo um deles a resistência à tração por compressão diametral (RT), dois de deformabilidade elástica (ν , MR) e dois (k_1 e k_2) para o modelo de vida de fadiga da Equação 5. Eventualmente, para análise de pré-projetos, o usuário pode apenas escolher uma “Classe de Fadiga” e selecionar uma das misturas que constam na base de dados interna do programa.

A obtenção rigorosa de todos os parâmetros listados anteriormente requer uma quantidade significativa de ensaios de laboratório com as devidas réplicas. Na Tabela 13 mostra-se um quadro resumo com todos os parâmetros, normas de ensaio e números de corpos de prova para cada camada do pavimento.

Exemplificando, para uma estrutura simples composta apenas por camada de revestimento e base granular sobre o subleito, são necessários 12 corpos de prova para obtenção dos parâmetros do subleito, 12 corpos de prova para obtenção dos parâmetros da base e 18 corpos de prova para obtenção dos parâmetros da mistura asfáltica.

Na Figura 1 é apresentado um organograma com um roteiro para a obtenção dos parâmetros necessários para o dimensionamento de estruturas novas utilizando o programa MeDiNa.

O roteiro proposto se inicia com a obtenção dos parâmetros do subleito e das camadas granulares, no entanto, a ordem de caracterização dos materiais das camadas pode ser outra. No caso de dimensionamento de reforço, são necessários os parâmetros de deformabilidade da estrutura existente (módulos de resiliência obtidos por retroanálise) e os parâmetros da mistura asfáltica que irá compor a camada de reforço, que são os mesmos requeridos para a camada de revestimento no dimensionamento de uma estrutura nova.

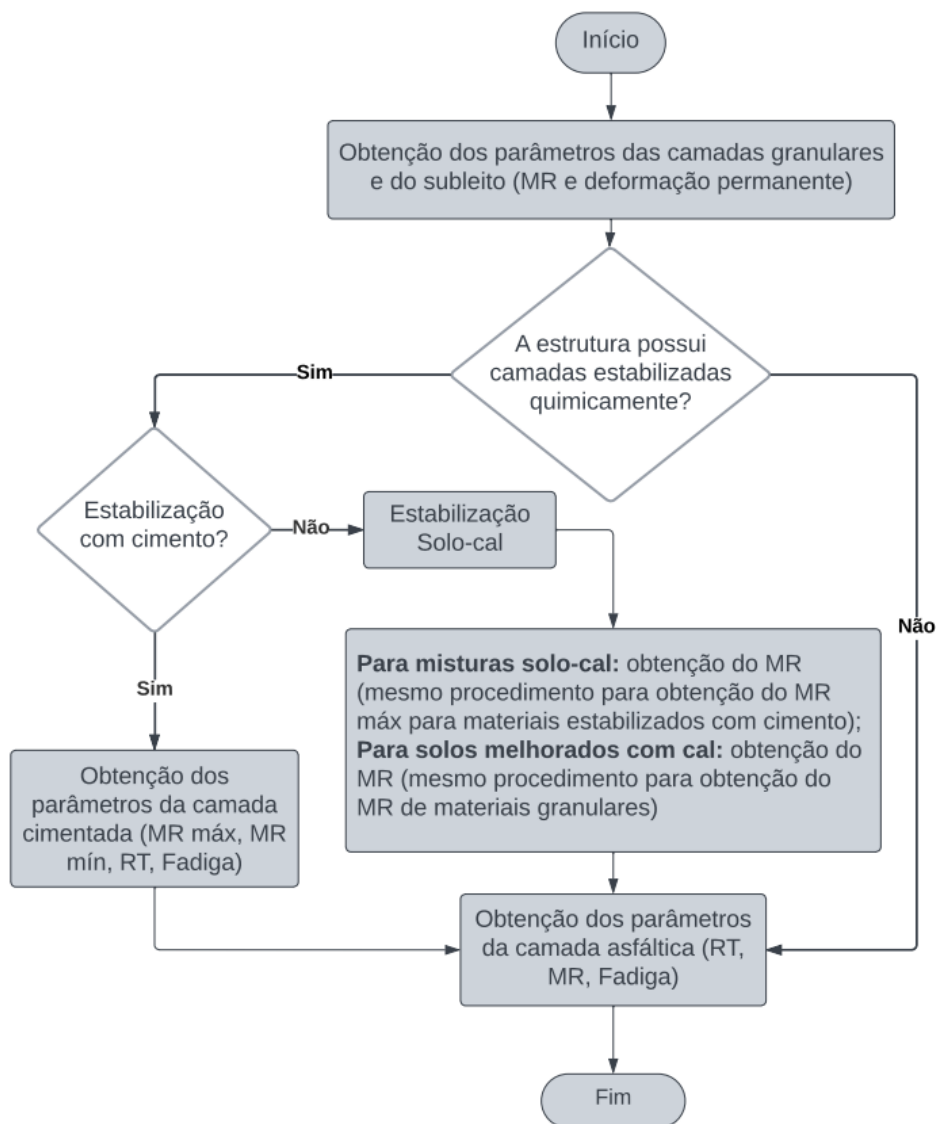


Figura 1 – Roteiro de obtenção dos parâmetros de entrada para o dimensionamento de estruturas novas utilizando o programa MeDiNa

Tabela 13 – Quadro resumo dos parâmetros necessários para o dimensionamento de pavimentos pelo MeDiNa

Camada	Propriedades	Parâmetros	Norma	Quantidade de corpos de prova
Camadas granulares e subleito	Deformabilidade elástica	coeficiente de Poisson (ν)	(arbitrado, ver Tabela 1)	-
		$k_1, k_2, k_3, e k_4$ (6) ou MR = cte	DNIT 134/2018 – ME	3
	Deformação permanente	$\psi_1, \psi_2, \psi_3, e \psi_4$ (7)	DNIT 179/2018 – IE	Preferencialmente 9, no mínimo 6
Camadas estabilizadas quimicamente	Deformabilidade elástica	coeficiente de Poisson (ν)	(arbitrado, ver Tabela 1)	-
		MRmin ¹	DNIT 134/2018 – ME	3
		MRmax	DNIT 181/2018 – ME	3
	Fadiga	RT	DNIT 136/2018 – ME	3
		$k_1 e k_2$ (9)	DNIT 434/2022 – ME	12
Solos melhorados com cal	Deformabilidade elástica	coeficiente de Poisson (ν)	(arbitrado, ver Tabela 1)	-
		MR	DNIT 134/2018 – ME (solo melhorado com cal)	3
			DNIT 181/2018 – ME (solo-cal)	3
Misturas asfálticas	Deformabilidade elástica	coeficiente de Poisson (ν)	(arbitrado, ver Tabela 1)	-
		MR ²	DNIT 135/2018 – ME	3
	Fadiga	RT	DNIT 136/2018 – ME	3
		$k_1 e k_2$ (5)	DNIT 183/2018 – ME	12

Notas: ¹ Sugere-se que o valor do módulo final seja correspondente ao MR do material sem estabilização química; ² Para a determinação do MR de misturas asfálticas é necessário determinar sua resistência à tração (RT).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTER, R.; BORCHERS, B.; THURBER, C. Parameter Estimation and Inverse Problems. Elsevier, 2018. 392 p.

BALBO, J. T. Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1993, 181 p.

_____. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022. 756 p.

CERATTI, J. A. P. Estudo do comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991, 314 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – PRO 273/96. Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”. Rio de Janeiro/RJ, 1996.

_____. Publicação IPR 667 – Método de projeto de pavimentos flexíveis. 3ª ed. Rio de Janeiro, 1981, 34 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 133/2025 – ME. Pavimentação – Determinação das deflexões pela Viga Benkelman – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2025.

_____. DNIT 134/2018 – ME. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

_____. DNIT 135/2018 – ME. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas –

Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

_____. DNIT 136/2018 – ME. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

_____. DNIT 179/2018 – IE. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

_____. DNIT 181/2018 – ME. Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

_____. DNIT 183/2018 – ME. Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2018.

_____. DNIT 434/2022 – ME. Pavimentação – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada em camadas estabilizadas quimicamente – Método de ensaio. Rio de Janeiro/RJ, 2022.

_____. Publicação IPR 719 – Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro/RJ, 2006.

BURMISTER, D. M. The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways. Proceedings, Highway Research Board, v. 23, p. 126-144, 1943.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. IP – DE – P00/001: Projeto de Pavimentação. São Paulo: Secretaria dos Transportes. 2006. 53 p.

GUIMARÃES, A. C. R. Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2009, 353 p.

HUANG, Y. H. Pavement analysis and design. New Jersey: Pearson Education, 2004.

775 p.

PINTO, S.; PREUSSLER. E. S. Pavimentação Rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro: Synergia, 2010. 220 p.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. IP – 08/2004: Análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura Urbana e Obras. 2004. 12 p.