

# Verificação à Fadiga de Revestimentos Asfálticos e Bases Cimentadas

## “Programa Pavimentos Asfálticos v. 1.0”

Andréa Arantes Severi<sup>1</sup>  
José Tadeu Balbo<sup>1</sup>  
Marcos Paulo Rodolfo<sup>1</sup>  
Valéria Maria Sestini<sup>2</sup>  
Valter Prieto<sup>3</sup>

### ABSTRACT

The software “Pavimentos Asfálticos” (Asphaltic Pavements) were developed by the Pavement Mechanics Laboratory of the University of Sao Paulo and the Sao Paulo State Department of Transportation to verify to the fatigue asphalt-coated pavement structures. The program can also be applied to analyze asphalt concrete reinforcement layers.

“Pavimentos Asfálticos” is based on the comparison of the designed number of load repetitions and the allowed one, applying the Miner’s Rule. The allowed number of load repetition is computed using uniquely Brazilian models and this numbers are corrected due to the not channelized traffic flow, temperature variation and range of resilient moduli in laboratory and field.

---

<sup>1</sup> Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
05508-900 – Cidade Universitária – SP – SP – Brasil  
Fax: +55 11 8185716  
Fone: +55 11 8185306  
e-mail: aseveri@usp.br

<sup>2</sup> Residência de Conservação de São Carlos – DR – 4 – DER/SP  
R. Aquidaban 1472; CEP 13560-120 – São Carlos – SP – Brasil  
Fone/Fax: +55 16 271 5346  
e-mail: sestini@sc.usp.br

<sup>3</sup> ACE – DE – DER/SP  
Av do Estado 777, 2º Andar, sala 2074  
CEP 01107-901 – SP – SP – Brasil  
Fone: +55 11 230 1531

## 1. Introdução

No decorrer dos anos foram observadas muitas mudanças e avanços na filosofia de projeto de pavimentos asfálticos, sendo que atualmente pode-se afirmar que os mesmos rompem por diversas causas e as que estão mais intimamente associadas à repetição de cargas sobre as estruturas de pavimentos são o fenômeno de fadiga, responsável pela fissuração de revestimentos betuminosos e de bases cimentadas e o acúmulo de deformações plásticas (permanentes) devido à ação das deformações cisalhantes que ocorrem em camadas granulares e no subleito.

Os métodos de projeto existentes foram, via de regra, concebidos de duas maneiras distintas: com base no desempenho ao longo do tempo, obtido através de experiências de campo (modelos empíricos) ou a partir de teoria elástica considerada adequada para a interpretação do fenômeno (modelos semi-teóricos). Alguns métodos apresentam ainda uma associação de modelos empíricos com modelos teóricos (semi-empíricos).

O programa “**Pavimentos Asfálticos**”, foi desenvolvido para o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) pelo Laboratório de Mecânica de Pavimentos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LMP-EPUSP) com a finalidade de verificar à fadiga quatro tipos de estrutura com revestimento asfáltico (pavimento flexível 3 camadas, pavimento semi-rígido 3 camadas, pavimento semi-rígido 4 camadas e pavimento semi-rígido 4 camadas invertido), não devendo nunca ser utilizado para o dimensionamento de pavimentos, aplicando-se apenas para verificações estruturais de pavimentos flexíveis e semi-rígidos.

Não obstante sua criação para análises de pavimentos novos, pode ser também empregado para a análise de camadas de reforços em CA, uma vez que permite a entrada de duas camadas asfálticas: binder e revestimento. Para o emprego em verificação estrutural de camadas de reforço, as camadas asfálticas do pavimento existente podem ser reduzidas a uma camada de binder, sendo que em conjunto com as demais camadas existentes deverão ser conhecidos os módulos resilientes, por retroanálise, para se exemplificar.

O programa, desenvolvido em *Visual Basic 5.0*, é fundamentado em uma comparação do número de repetições de carga proposto em projeto com o número de repetição de carga permissível por uma camada asfáltica ou cimentada na estrutura (regra de Miner). O valor de N permissível para uma camada é calculado por meio de modelos nacionais constitutivos para previsão de fadiga nos materiais cimentados, sendo que o número de repetições previsto por tais modelos são corrigidos tendo-se em conta fatores como fluxo não canalizado, variações de temperatura e módulos resilientes entre condições de laboratório e campo, o que é descrito em pormenores.

A partir dos modelos descritos neste artigo, todos baseados à luz da Teoria Elástica de Sistemas de Camadas, é possível computar as deformações, deflexões ou tensões nas diversas camadas da estrutura.

Como dados de entrada para estes modelos são necessárias as espessuras das camadas assentes sobre o subleito e parâmetros físicos e mecânicos dos materiais que compõem as camadas, como módulos de resiliência, resistências à compressão e à tração na flexão.

## **2. Modelos Elásticos Gerados a Partir do ELSYM – 5**

Por avaliação estrutural de um pavimento projetado pode-se entender uma verificação do modo pelo qual se procede a distribuição de deformações e tensões em suas diversas camadas, com o intuito de avaliar a compatibilidade entre as diversas características resistentes dos materiais e as solicitações sofridas pelos mesmos.

Modernamente, este tipo de análise estrutural é realizada através de programas computacionais que permitem com grande precisão a definição do estado de tensão em sistemas de camadas elásticas submetidos a esforços oriundos de rodas de veículos e, logicamente, sua aplicação exige o conhecimento dos parâmetros elásticos dos materiais que compõe as camadas dos pavimentos, que devem ser determinados em laboratório ou em campo, através de técnicas específicas (ensaios dinâmicos, ensaios estáticos, retroanálise de bacias de deformação, etc.).

Tais modelos, fundamentados em teoria elástica apropriada, utilizam-se de métodos indiretos para a solução de equações de equilíbrio e de compatibilidade entre tensões e deformações, geralmente aplicando conceitos de diferenças finitas ou elementos finitos, como o ELSYM – 5 desenvolvido originalmente no Instituto de Transportes e Engenharia de Tráfego da Universidade da Califórnia (*Berkeley*).

O procedimento de cálculo adotado pelo programa ELSYM – 5, na busca de solução a partir da Teoria Elástica de Sistemas de Camadas, idealiza o pavimento como um sistema elástico tridimensional de camadas sobrepostas, semi-infinito no plano horizontal. Os materiais são assumidos como sendo isotrópicos e homogêneos, com comportamento elástico-linear, obedecendo à lei de Hooke generalizada.

Para o cômputo de tensões e deformações ocasionadas por múltiplas rodas, é utilizado o princípio da superposição de efeitos, sendo que as cargas sobre a superfície do pavimento são admitidas como circulares.

## 2.1 Modelos para pavimentos semi-rígidos

Balbo (1993) propôs um modelo de quatro camadas para cálculo de tensões de tração na flexão na fibra inferior da camada cimentada (BGTC ou CCR):

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

onde:

$\sigma_t$  = tensão de tração na flexão na base (MPa)

$e_{CBUQ}$  = espessura de Concreto Asfáltico (CA) (mm)

$e_{BGTC}$  = espessura da base de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) (mm)

$e_{BGS}$  = espessura da sub-base de Brita Graduada Simples (BGS) (mm)

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

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

As faixas de variação dos parâmetros considerados para o modelo de Balbo (1993) são apresentados no Quadro 2.1.

**Quadro 2.1** Parâmetros considerados no modelo de Balbo, 1993.

Camada	E (MPa)	v	e (mm)
Revestimento (CA)	3.000	0,35	100, 125, 150
Base (BGTC)	15.000	0,25	200, 250, 300, 350, 400
Sub-base (BGS)	100	0,35	150, 200, 250
Subleito	25, 50, 75, 100, 125	0,40	semi infinito

O Laboratório de Mecânica de Pavimentos da EPUSP em 1998 desenvolveu, para base em solo-cimento, um modelo para o cálculo de tensões de tração na flexão na fibra inferior da camada cimentada, para eixos simples de rodas duplas com 80 kN e um modelo para o cálculo da deflexão (D) sobre a superfície da estrutura.

$$\sigma_t = 10^{2,053484} \cdot e_{CA}^{-0,390563} \cdot e_{SC}^{-0,959921} \cdot E_{CA}^{-0,141666} \cdot E_{SC}^{0,421768} \cdot E_{sub}^{-0,25802}$$

onde:

$\sigma_t$  = tensão de tração na flexão no SC (MPa)

$e_{CA}$  = espessura de CA (mm)

$e_{SC}$  = espessura da base de solo cimento (SC) (mm)

$E_{CA}$  = módulo de resiliência do concreto asfáltico (MPa)

$E_{SC}$  = módulo de resiliência do solo-cimento (MPa)

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

$$D = 10^{3,019694} \cdot e_{CA}^{-0,137129} \cdot e_{SC}^{-0,370613} \cdot E_{CA}^{-0,118338} \cdot E_{SC}^{-0,126027} \cdot E_{sub}^{-0,767296}$$

onde:

D = deflexão na superfície do pavimento (mm)

$e_{CA}$  = espessura de CA (mm)

$e_{SC}$  = espessura da base (mm)

$E_{CA}$  = módulo de resiliência do CA (MPa)

$E_{SC}$  = módulo de resiliência do solo-cimento (MPa)

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

As faixas de variação dos parâmetros considerados para os modelos do LMP são apresentados no Quadro 2.2.

**Quadro 2.2** Parâmetros considerados nos modelos do LMP

Camada	E (MPa)	v	e (mm)
revestimento (CA)	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

**2.2 Modelos para pavimentos semi-rígidos invertidos**

Suzuki apresentou em 1992 um modelo para cálculo de deformações na fibra inferior do CA em função da carga, tipo de eixo, espessuras e módulo de resiliência e um modelo para tensões de tração na flexão na sub-base cimentada.

$$\epsilon_t = 1,499 \times 10^{-2} \cdot e_{CA}^{-0,589} \cdot e_{BGS}^{-0,272} \cdot e_{BGTC}^{-0,070} \cdot E_{CA}^{-0,020} \cdot E_{BGS}^{-0,400} \cdot E_{BGTC}^{-0,040} \cdot E_{Sub}^{0,014}$$

$$\sigma_t = 4,313 \cdot e_{CA}^{-0,627} \cdot e_{BGS}^{-0,381} \cdot e_{BGTC}^{-0,553} \cdot E_{CA}^{0,019} \cdot E_{BGS}^{-0,040} \cdot E_{BGTC}^{0,557} \cdot E_{Sub}^{-0,279}$$

onde:

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

$\sigma_t$  = tensão de tração na flexão na sub-base cimentada (kgf/cm<sup>2</sup>)

$e_{CA}$  = espessura do revestimento de CA (cm)

$e_{BGS}$  = espessura da base (cm)

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

$E_{CA}$  = módulo de resiliência do revestimento de CA (kgf/cm<sup>2</sup>)

$E_{BGS}$  = módulo de resiliência da base (kgf/cm<sup>2</sup>)

$E_{BGTC}$  = módulo de resiliência da sub-base (kgf/cm<sup>2</sup>)

$E_{Sub}$  = módulo de resiliência do subleito (kgf/cm<sup>2</sup>)

As faixas de variação dos parâmetros considerados para os modelos de Suzuki (1992) são apresentados no Quadro 2.3.

**Quadro 2.3** Parâmetros considerados nos modelos de Suzuki (1992)

Camada	E (Kgf/cm2)	v	e (cm)
Revestimento (CA)	30.000 e 50.000	0,30	7, 10, 13, 16
Base (BGS)	1.000, 1.500, 3.000, 5.000, 7.000, 7.500	0,40	5, 10, 15, 20, 25
Sub-base (BGTC)	50.000 e 100.000	0,35	15, 20, 25
Subleito	1.000	0,40	semi-infinito

### 2.3 Modelos para pavimentos flexíveis

Rodolfo (1996) apresentou modelos para cálculo da deformação específica de tração na fibra inferior do concreto asfáltico que são apresentados a seguir. Os parâmetros e os modelos foram divididos em quatro lotes:

#### Lote 1

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

**Quadro 2.4** Parâmetros considerados para o Lote 1 (Rodolfo, 1996)

Camada	E (MPa)	e (mm)
revestimento (CA)	2.250 a 3.750	50 a 100
base (BGS)	100 e 300	100 a 300
subleito	25 a 125	semi infinito

#### Lote 2

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

**Quadro 2.5** Parâmetros considerados para o Lote 2 (Rodolfo, 1996)

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

#### Lote 3

$$\varepsilon_t = 10^{-3,74136} \cdot e_{CA}^{-0,742618} \cdot e_{BGS}^{-0,016173} \cdot E_{CA}^{-0,505633} \cdot E_{BGS}^{-0,336315} \cdot E_{sub}^{-0,137855} \cdot (Q_{ESRD})^{0,912476}$$

**Quadro 2.6** Parâmetros considerados para o Lote 3 (Rodolfo, 1996)

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

#### Lote 4

$$\varepsilon_t = 10^{-3,74136} \cdot e_{CA}^{-0,742618} \cdot e_{BGS}^{-0,016173} \cdot E_{CA}^{-0,505633} \cdot E_{BGS}^{-0,336315} \cdot E_{sub}^{-0,137855} \cdot (Q_{ESRD})^{0,912476}$$

**Quadro 2.7** Parâmetros considerados para o Lote 4 (Rodolfo, 1996)

Camada	E (MPa)	e (mm)
Revestimento (CA)	2.250 a 3.750	100 a 150
base (BGS)	100 e 300	100 a 300
Subleito	125 a 225	semi infinito

onde:

$\epsilon_t$  = deformação de tração na fibra inferior do CA (mm/mm)

$e_{CA}$  = espessura de CA (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)

### 3. Módulos de Resiliência

A característica fundamental de um material, do ponto de vista estrutural, é sua capacidade de armazenar energia de deformação, o que basicamente exige portanto o registro de deformações sofridas pelo material face a carregamentos impostos em um dado volume de contorno. O estado de tensões ao qual o material estará sujeito trata-se de uma condição relativa que dependerá muito das condições geométricas do elemento estrutural (na obra ou no experimento de laboratório) e ainda da própria geometria de aplicação da carga.

O módulo de deformabilidade (E) ou de elasticidade, como comumente é empregado, é um parâmetro dado pela relação entre a tensão sofrida pelo material ( $\sigma$ ), na zona em que é aferida, e a correspondente deformação ( $\epsilon$ ) relacionada a esta tensão em questão, conforme se expressa como  $E = \sigma / \epsilon$

A expressão módulo de elasticidade ou módulo de *Young* trata-se de uma expressão clássica empregada desde a consolidação da Teoria da Elasticidade, nos primórdios do século 19. Ocorre que tal terminologia foi empregada na resistência dos materiais durante anos, quando se tratava, por exemplo, na engenharia civil, de caracterização de aços e concretos, geralmente solicitados por carregamentos estáticos; observe-se que tais materiais apresentam características relacionadas à deformabilidade bastante

conhecidas e peculiares porquanto tais deformações são de magnitude muito pequena (por exemplo, a deformação de ruptura típica do concreto é de 2,5 ‰, ou seja, 0,0025 mm/mm).

O termo módulo de resiliência foi empregado originalmente pelo engenheiro F.N. Hveem, por considerar que as deformações medidas em materiais de pavimentação (exceção ao tradicional concreto de cimento Portland) eram de magnitudes muito superiores aos materiais convencionais (concreto, vidro e aço), fato que associado à sujeição das estruturas de pavimentos e de seus materiais a cargas repetitivas, induziriam um processo de fadiga em alguns materiais de pavimentação. Assim, da mesma forma o módulo de resiliência ( $M_r$ ) é descrito pela expressão:  $M_r = \sigma / \epsilon$

Note-se que o valor deste parâmetro é dependente da forma como a carga é aplicada relativamente ao formato da peça estrutural ou amostra laboratorial na qual se pretende estudar as características de deformabilidade. Assim, tipo de teste condicionará a resposta da deformação medida (à tração, à compressão, à flexão, à torção, cisalhante, etc.) devendo ser especificado o tipo de módulo de resiliência em questão, em função do tipo de medida.

É importante fixar que o módulo de resiliência refere-se estritamente a deformações de natureza elástica ou resiliente, não dizendo respeito à deformações plásticas sofridas por ações das cargas. Trata-se portanto a deformação resiliente de uma deformação recuperável após cessada a ação da carga, recuperação esta cujo tempo demandado poderá variar de material para material em função de suas propriedades visco-elásticas.

### **3.1 Comportamentos Resilientes Típicos**

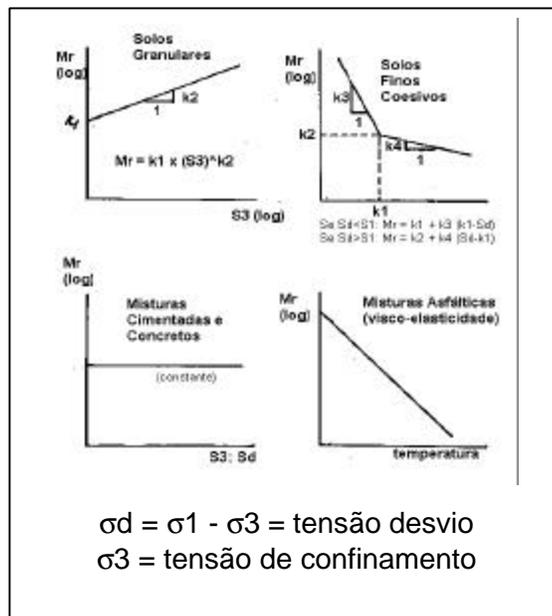
A descrição gráfica ou matemática do comportamento resiliente dos materiais de pavimentação é normalmente realizada, para os materiais não tratados (solos e agregados), relacionando-se o valor do módulo de resiliência com as tensões desvio ou confinantes sofridas pela amostra em questão.

As misturas estabilizadas com ligantes hidráulicos, empregadas como bases ou sub-

bases cimentadas, possuem a peculiaridade, em geral, de resultarem em módulos de resiliência constantes independentemente do nível de tensões aplicadas; como tais valores geralmente resultam bem mais elevados que outros materiais de pavimentação, não é incomum o emprego do termo módulo de elasticidade nestes casos.

Os concretos asfálticos (CA) como as demais misturas betuminosas usinadas, têm seus valores de módulos de resiliência muito afetados pela temperatura de serviço, pois tal sensibilidade à temperatura é herdada dos cimentos asfálticos empregados (termo-suscetíveis).

Na Figura 3.1 são apresentadas as formulações mais genéricas para descrição do comportamento resiliente dos materiais de pavimentação. Observe-se que no caso dos materiais granulares e solos finos coesivos o valor de  $M_r$  é diretamente dependente da tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) ou da tensão-desvio ( $\sigma_d$ ). Tais termos estão relacionados ao tipo de ensaio realizado para a aferição de tais propriedades, que é chamado de ensaio triaxial dinâmico (em laboratório).



**Figura 3.1** Comportamentos elásticos clássicos

Verifica-se que os materiais tipicamente granulares (britas graduadas, pedregulhos, bicas corridas, macadames hidráulicos, saibros, saprólitos, etc.), possuem módulo resiliente dependente da tensão de confinamento aplicada. Quanto mais confinados

encontra-se um material granular, maior seu módulo de resiliência, e portanto, menos deformação resultaria da aplicação de uma mesma carga.

Os solos finos apresentam contrariamente um comportamento resiliente dependente da tensão-desvio ( $\sigma_1-\sigma_3$ ). Este comportamento, descrito graficamente, é corriqueiramente chamado de bi-linear; normalmente, a partir de um dado valor da tensão-desvio, o valor do módulo de resiliência torna-se menos sensível a variações na tensão-desvio. O módulo de resiliência dos solos finos coesivos registra quedas de magnitude na medida que a tensão desvio aumenta, ou seja, para um valor fixo de tensão confinante, o módulo de resiliência diminuiria com o incremento da tensão vertical aplicada.

### 3.2 Valores Típicos de Módulos Resilientes

Na seqüência são apresentados, de modo sumariado, alguns valores típicos de módulos de resiliência aferidos através de ensaios laboratoriais ou de retroanálises de superfícies deformadas em campo encontrados em diversas fontes de pesquisa brasileiras.

#### 3.2.1 Solos

No que tange a materiais tipicamente granulares, como já se mencionou, o comportamento resiliente é basicamente dependente da tensão de confinamento ao qual o material ficará sujeito, pelo campo de tensões gerado pelas cargas dos veículos e até mesmo por disposições construtivas.

No Brasil, para agregados de natureza granítica (brita graduada simples) compactados na energia intermediária, dentre outros exemplos a seguinte relação foi obtida (ITA, 1985):

$$M_r = 6.900 \times \sigma_3^{0,7} \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

Valle e Balbo (1997) apontam modelos de comportamento resiliente típicos para material granular natural (saprólito de granito) e para brita graduada também de origem granítica, conforme apresentados no Quadro 3.1.

**Quadro 3.1** Modelos resilientes para alguns solos granulares de Santa Catarina

Tipo	Procedência	Modelo Resiliente (kgf/cm <sup>2</sup> )
Saprólito de granito	Jazida de Cedrinhos	$MR = 4.870 \times \sigma_3^{0,63}$
Saprólito de granito	Jazida São João Batista	$MR = 2.950 \times \sigma_3^{0,52}$
Brita graduada de granito	Pedreira em Navegantes	$MR = 4.572 \times \sigma_3^{0,42}$

Para solos lateríticos de subleitos e de bases de rodovias típicas do Estado de São Paulo, Alvarez Neto (1998) apresenta resultados obtidos a partir de retroanálises de superfícies deformadas com emprego de FWD. No Quadro 3.2 estão indicados os valores de módulos de resiliência para os solos de pavimentos analisados.

**Quadro 3.2** Valores de módulos de resiliência para os solos de pavimentos analisados

Local	Via	Camada	Grupo MCT	M <sub>r</sub> (MPa)
Araraquara	Aeroporto	Base	LA'	220
		Melhoria do subleito	LG'	160
	Bueno	Base	LA'	200
		Melhoria do subleito	LG'	200
São Carlos	Broa	Base	LA'	270
		Melhoria do subleito	LA'	160
Ourinhos	Jd. América	Base	LA'	220
		Melhoria do subleito	LG'	90
	Jd. Eldorado	Base	LA	240
		subleito	LG'	90
	Fatec	Base	LA'	270
		subleito	LA'	170
	V. São Luiz	Base	LG'	100
		Subleito	LG'	100
Ibaté-Usina	c/ recape	Base	LA'	230
		Melhoria do subleito	LA'	270
	s/recape	Base	LA'	300
		Melhoria do subleito	LA'	150
Paulínia	Centro Cultural	Base	LG'	220
	Jandaia	Base	LG'	110
	José Losano	Base	LA'	170
	Via F	Base	LA'	220
Catanduva	Solo Sagrado I	Base	NA'	150
		Subleito	NA'	120
	Solo Sagrado II	Base	NA'	160
		Subleito	NA'	120
	R. Platina	Base	NA'	130
		Subleito	NA'	110
	Pq. Iracema I	Base	NA'	240
		Subleito	NA'	110
Pq. Iracema II	Base	NA'	170	
	subleito	LA'	120	
São Paulo	Jaraguá	Base	NS'	70
	Brasília	Base	NS'	100

### 3.2.2 Concreto Compactado a Rolo

Trichês (1994) desenvolveu estudos laboratoriais para a caracterização das propriedades elásticas dos concretos compactados a rolo (CCR). No Quadro 3.3 são apresentados, de modo resumido, alguns valores de módulos de resiliência (módulos de deformabilidade estáticos) para CCR com consumo de cimento de 80, 120 e 160 kg/m<sup>3</sup>, compactados na energia modificada (após 28 dias de cura).

**Quadro 3.3** Valores de Módulo de resiliência para o CCR

Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)	M <sub>r</sub> (MPa)
80	5 a 7	0,6 a 1	7.400 a 12.600
120	10 a 15	1,2 a 2,2	17.100 a 21.900
160	16 a 23	2,0 a 2,8	20.600 a 24.900

### 3.2.3 Solo-Cimento

Ceratti (1991) estabeleceu valores de módulos de resiliência em flexão para algumas misturas típicas de solo cimento, inclusive empregando solos originários do Estado de São Paulo. Tais resultados indicaram por variabilidade em tais valores em função da natureza do solo estudado, conforme apresentado no Quadro 3.4.

Recorda-se que tais faixas de variação de módulos de resiliência foram encontradas para amostras bastante homogêneas, em laboratório. Normalmente valores inferiores são encontrados para misturas em campo, face aos processos construtivos de mistura e homogeneização.

**Quadro 3.4** Valores em função da natureza do solo estudado

Classificação		M <sub>r</sub> (MPa) - Faixa de variação
MCT	HRB	
NA	A-1-b	13.000 a 20.000
LA	A-2-4	8.000 a 16.500
LG'	A-7-5	5.000 a 11.000
NA'	A-6	7.500 a 11.000
LA'	A-2-6	7.000 a 15.500
NA'	A-2-6	4.400 a 16.800

### **3.2.4 Misturas Asfálticas Densas**

Existem vários trabalhos, sobretudo desenvolvidos no âmbito do DNER, relatando o comportamento resiliente de misturas asfálticas adotadas no Brasil. Um desses primeiros trabalhos, publicado por Queiroz e Visser (1978) apontava para os seguintes valores, obtidos a partir de amostras de revestimentos extraídos por sondagens rotativas em rodovias dos estados de São Paulo, Minas Gerais e Goiás:

- 85% das amostras ensaiadas a 30 °C apresentou  $M_r$  variando entre 1.000 e 4.000 MPa;
- a média dos valores apontou para 2.535 MPa, com desvio-padrão de 1.466 MPa;
- ensaios de amostras a 20 °C apresentaram  $M_r$  de 6.000 MPa.

Gontijo e Santana (1989) apontaram para variações do módulo de resiliência de concretos asfálticos entre 2.650 e 4.800 MPa (com emprego de CAP 50/60) e valores entre 1.865 a 2.945 MPa (com de CAP 85/100), valores obtidos a partir de ensaios laboratoriais.

## **4. Critérios de Fadiga**

### **4.1 Misturas Betuminosas**

Nos últimos anos, têm-se realizado vários estudos sobre comportamento à fadiga de misturas betuminosas. Para que possam ser aplicados programas computacionais, baseados na teoria de camadas elásticas, para analisar estruturas de pavimentos flexíveis, deve-se conhecer a vida de fadiga do revestimento betuminoso sob tensões repetidas.

Os ensaios que melhor poderiam reproduzir as condições de carregamento induzidas pelo tráfego, para estimar a vida de fadiga de misturas betuminosas, seriam os ensaios dinâmicos.

Os ensaios dinâmicos para determinar a vida de fadiga dos materiais são diferentes quanto ao processo empregado para desenvolver tensões e deformações repetidas e

também quanto a geometria das amostras ensaiadas.

No que diz respeito ao tipo de carregamento aplicado, que devem representar condições extremas que podem ocorrer em campo, os ensaios de fadiga podem ser de dois tipos:

- tensão controlada: aplicação constante de carga e deformações resultantes variando com o tempo;
- deformação controlada: aplicação de cargas repetidas que produzem uma deformação repetida constante ao longo do ensaio.

Para Monismith e Deacon (1969), os ensaios de deformação controlada aplicam-se melhor a pavimentos com camadas asfálticas fracas em relação ao seu suporte, pois deste modo o revestimento adiciona pouca rigidez à estrutura como um todo e quando a carga é aplicada a sua deformação é controlada pelas camadas subjacentes. Já os ensaios de tensão controlada aplicam-se a pavimentos com camadas asfálticas rígidas em relação ao seu suporte, pois ao resistirem à cargas aplicadas controlam a magnitude das deformações que podem ocorrer.

Preussler (1983) estudou várias misturas em diferentes temperaturas e estabeleceu uma correlação entre o número  $N$  e a deformação específica:

$$N = 2,99 \times 10^{-6} \cdot (1/\epsilon_t)^{2,153}$$

Preussler e Pinto (1984) apresentaram um procedimento para reforço de pavimentos flexíveis que permite considerar explicitamente as propriedades resilientes de solos e materiais que constituem a estrutura de pavimentos no Brasil.

Este procedimento está fundamentado em modelos de fadiga de misturas betuminosas e modelos mecanicistas de previsão de desempenho (em termos de deflexão) desenvolvido para pavimentos asfálticos em função da estrutura do pavimento, subleito e tráfego. O critério de fadiga apresentado foi (para  $N$  sendo o  $n^\circ$  de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra e  $D_0$  a deflexão, expressa em  $10^{-2}$  mm):

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

Pinto (1991) apresentou o seguinte modelo corresponde à vida de fadiga (N) pela deformação específica de tração ( $\epsilon_t$ ), no ensaio de deformação controlada:

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

## 4.2 Solo-cimento

Ceratti em 1991 desenvolveu um estudo de misturas compostas por solos de climas tropicais. Foram realizados, em laboratório, ensaios de fadiga à tensão controlada de misturas de solo-cimento devido ao modo de atuação das camadas destes materiais em estruturas de pavimentação e determinado o número de repetições até a ruptura.

Os modelos propostos por Ceratti (1991) para quatro tipos de solos do Estado de São Paulo foram (SR é a relação de tensões):

- solo 1 (solo NA segundo a classificação MCT): **N = 10** (SR - 125,63 / - 14,920)
- solo 2 (solo LG' segundo a classificação MCT): **N = 10** (SR - 64,01 / - 0,822)
- solo 3 (solo LA' segundo a classificação MCT): **N = 10** (SR - 94,76 / - 2,50)
- solo 4 (solo LG' segundo a classificação MCT): **N = 10** (SR - 67,59 / - 1,03)

## 4.3 Concreto Compactado a Rolo – CCR

O concreto compactado a rolo é um concreto onde o teor de cimento é menor que o usual para concreto para pavimentação, é seco, de consistência dura e sua trabalhabilidade permite compactação com rolo compressor vibratório.

Trichês (1994) verificou à fadiga o comportamento deste tipo de concreto utilizado como base em pavimentos realizando ensaios com carregamento senoidal a uma frequência de 5 Hz. A equação de fadiga proposta por Trichês foi a seguinte (SR é a

relação de tensões):

$$N_f = 10^{(14,911 - 15,074 \text{ SR})}$$

#### **4.4 Brita Graduada Tratada com Cimento – BGTC**

O modelo desenvolvido por Balbo (1993) para a BGTC balizou-se por ensaios dinâmicos de compressão diametral para amostras com as seguintes características: granulometria do agregado na faixa B do DER-SP; teor de cimento de 4% em peso; umidade de moldagem 1,5% abaixo da umidade ótima de compactação na energia modificada.

Os testes, realizados com nível de tensão controlado, resultaram no seguinte modelo experimental de fadiga da BGTC em tração (SR é a relação de tensões):

$$N_f = 10^{(17,137 - 19,608 \text{ SR})}$$

#### **5. Desenvolvimento do programa “Pavimentos Asfálticos”**

O programa contém os seguintes formulários: Identificação do Projeto; Cálculo do Número de Repetições de Carga (N); Pavimento em 3 Camadas - Flexível; Pavimento em 3 Camadas - Semi-rígido; Pavimento em 4 Camadas Semi-rígido; Pavimento em 4 Camadas - Semi-rígido Invertido; e Visualização de Resultados sob forma de relatório em tela ou impresso.

Ao entrar no programa, o primeiro formulário a ser preenchido é o de “Identificação do Projeto”, nele os dados de entrada são: número do processo, nome da rodovia, trecho analisado, nome do operador do programa, data da verificação, tipo de estrutura de pavimento (pavimento flexível em 3 camadas, pavimento semi-rígido em 3 camadas, pavimento semi-rígido em 4 camadas, pavimento semi-rígido invertido em 4 camadas) e o número do repetições do eixo padrão de 80 kN (o preenchimento deste campo é obrigatório).

Caso o usuário não possua o valor de N, o programa oferece um utilitário chamado “Cálculo de N”, que auxiliará o usuário no cálculo da estimativa do número de

repetições do eixo padrão de 80 kN. Entrando neste utilitário um novo formulário será aberto.

No formulário “Cálculo de N” o usuário deverá preencher os campos com os seguintes dados: horizonte de projeto; taxa de crescimento; volume diário médio (VDM); fator de frota, fator de sentido, fator de distribuição; amostragem de cargas por tipo de eixo ou emprego de fatores de veículo sugeridos na norma do DER/SP.

O número N é calculado no programa com base nos fatores de equivalência de cargas do *United States Army Corps of Engineers* e o fator de eixo é implicitamente calculado pela relação entre o número de eixos amostrados e o número de veículos componentes da amostra (sendo excluídos os eixos de rodagem simples), no caso da disponibilidade de dados de pesagem.

Na amostragem dos eixos, tanto para os eixos simples de rodas duplas quanto para os eixos tandem duplos e triplos, deve-se indicar, nos campos específicos, o número de eixos amostrados por classe de carga. Ao final o usuário visualizará o N calculado tão logo ele pressione o botão calcular e os dados do cálculo do número de repetições de carga poderão ser impressos. O valor de N vai automaticamente para o formulário “Identificação do Projeto”.

Tendo o usuário preenchido todos os campos do formulário “Identificação do Projeto”, pressiona-se o botão “continuar” para entrar no próximo formulário, que estará relacionado ao tipo de estrutura selecionada, que poderá ser:

- pavimento flexível em 3 camadas, composta de uma camada de revestimento asfáltico e base granular ou de solo apoiada sobre subleito;
- pavimento semi-rígido em 3 camadas, composta de revestimento asfáltico e base em solo cimento apoiada sobre subleito;
- pavimento semi-rígido em 4 camadas, composto de revestimento asfáltico, base cimentada (que pode ser BGTC ou CCR), sub-base granular e subleito;
- pavimento semi-rígido invertido em 4 camadas, formado por uma camada de revestimento asfáltico, base granular, sub-base cimentada (BGTC ou solo-cimento) e subleito.

Neste formulário os dados de entrada vão variar de acordo com o tipo de estrutura mas basicamente serão: espessura do revestimento, módulo de resiliência do revestimento, tipo de concreto asfáltico, presença de binder sob o revestimento, espessura de binder, módulo de resiliência do binder, espessura da base, módulo de resiliência da base, tipo de base, identificação do tipo de solo do subleito, módulo de resiliência do subleito, CBR, presença de reforço do subleito, espessura do reforço, módulo de resiliência do reforço, CBR do reforço do subleito. Para o caso de bases cimentadas o valor da resistência à compressão (campo de preenchimento obrigatório) e resistência à tração na flexão.

Após preenchidos todos os campos o usuário deverá pressionar o botão “continuar” para poder visualizar o formulário de “Visualização de Resultados”. Este formulário poderá ser salvo em arquivo texto e impresso.

O programa disponibiliza, para consulta on-line ou impressão, ajudas onde são apresentados o conteúdo do programa, uma apostila on-line, resistência de misturas cimentadas, módulos de resiliência e tabelas para dimensionamento.

## **6. Considerações Finais**

O desenvolvimento do programa “**Pavimentos Asfálticos**” pelo LMP – EPUSP possibilitou ao DER-SP a verificação de estruturas dimensionadas pelo Método do DER/SP para que possa ser feito um controle dos pavimentos novos ou reforços que serão executados, tanto pelo próprio DER/SP, quanto pelas concessionárias por ele fiscalizadas.

A finalidade exclusiva deste programa é a verificação à fadiga das estruturas descritas neste artigo, sendo enfatizado que o programa não deve ser empregado para o dimensionamento de pavimentos. É importante ressaltar que todos os modelos para o cômputo de deformações, deflexões ou tensões nas diversas camadas das estruturas, utilizados pelo programa, são modelos exclusivamente nacionais, fato válido também para os modelos de fadiga empregados e os valores de módulos de resiliência sugeridos pelo programa.

## **Agradecimentos**

Os autores expressam seus agradecimentos ao eng<sup>o</sup>. Sérgio Augusto de Arruda Camargo, superintendente do DER/SP, que envidou vários esforços para a viabilização dos trabalhos de desenvolvimento do programa bem como para a realização do curso e treinamento dos engenheiros de todas as Diretorias Regionais do DER/SP, realizado em dezembro de 1998.

## **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.
- Ceratti, J.A.P.(1991), “Estudo do Comportamento à Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos”, Tese (Doutorado), COPPE–UFRJ, Rio de Janeiro.
- Gontijo, P.R.A. e Santana, H. (1989), “Análise Tensional de Sistemas Multicamadas e Procedimento Metodológico para Dimensionamento de Reforço Estrutural de Pavimentos Flexíveis”, 2<sup>o</sup> SINAPPRE, ABPv, Vol.1, Rio de Janeiro.
- ITA (1985), “Ensaio de Laboratório Desenvolvidos pelo ITA. Obra: Via-Leste - São Paulo”, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- Monismith, C. L.; Deacon, J. A. (1969), “Fatigue of Asphalt Paving Mixtures”, Proceedings of the American Society of Civil Engineers.
- 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.
- Preussler, E. S. (1983), “Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço”, Tese (Doutorado), COPPE–UFRJ, Rio de Janeiro.
- Preussler, E.S.; Pinto,S.(1984), “Tecnologia Nacional para Restauração de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários - Programa TECNAPAV”, 19<sup>o</sup> RAPv, ABPv, Rio de Janeiro.

- Queiroz, C. A. V. e Visser, A. T. (1978), "Uma Investigação dos Módulos de Resiliência de Revestimentos Betuminosos Brasileiros", 14º RAPv, ABPv, João Pessoa.
- Rodolfo, M. P. (1996), "Análise Tensional de Estruturas de Pavimentos Flexíveis", Projeto de Iniciação Científica, Relatório Final. USP/CNPq/PIBIC, São Paulo.
- Suzuki, C. Y. (1992), "Contribuição ao Estudo de Pavimentos Rodoviários com Estrutura Invertida (Sub-base Cimentada)", Tese (Doutorado), EPUSP, São Paulo.
- Trichês, G. (1994), "Comportamento na Fadiga de Misturas de Concreto Compactado a Rolo para Pavimentação ", 28º RAPv, ABPv, Belo Horizonte.
- Triches, G. (1994), "Propriedades Mecânicas de Misturas de Concreto Compactado a Rolo", 28º RAPv, ABPv, Belo Horizonte.
- Valle, N. e Balbo, J. T. (1997), "Estudo Preliminar de Desempenho de Pavimentos com Solos Saprolíticos de Granito em Santa Catarina", 1º SINBATRA, ABPv, Rio de Janeiro.



## Advertência:

**Este programa foi desenvolvido para fins de verificação à fadiga de revestimentos asfálticos e bases cimentadas em pavimentos flexíveis e semi-rígidos. O prévio dimensionamento pelo critério do DER/SP é necessário. Aos usuários é recomendada a não utilização do programa sem tal dimensionamento.**

**Os autores se eximem de quaisquer responsabilidades pelo uso inadequado ou fora dos propósitos para os quais o programa foi desenvolvido.**

## Pavimentos Asfálticos

Verificação à fadiga de revestimentos asfálticos e bases cimentadas

Desenvolvido sob convênio DER-SP - FIPAI

### DER-SP

Eng. Sérgio Augusto de Arruda Camargo

Eng. Antonio da Silva Nunes

Eng. José Carlos de Moraes Rodrigues Alves

Eng. Pedro Ricardo Frissina Blassioli

Eng. Dagoberto Gonçalves

Adm. José Quaglio Netto

Adv. Carlos Willian de Azevedo Souza

Cont. Henrique Pinto Ferreira

### Equipe Técnica

(LMP-USP) Eng. Marcos Paulo Rodolfo

(LMP-USP) Eng. Andréa Arantes Severi

(LMP-USP) Eng. Eduardo Ioshimoto

(LMP-USP) Eng. José Tadeu Balbo

(FIPAI-USP) Eng. Douglas Fadul Villibor

(DER-SP) Eng. Valter Prieto

(DER-SP) Eng. Valéria Maria Sestini

[Clique para continuar](#)

© 1998 Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo - DER/SP

DER-SP Identificação do Projeto

Arquivo Utilitários Ajuda

### Identificação do Projeto

Processo nº

Rodovia

Trecho

Operador

Data de Verificação

Tipo de Estrutura de Pavimento

3 Camadas  Flexível  Semi-Rígido

Semi-Rígido 4 Camadas  Semi-Rígido  Semi-Rígido Invertido

Número de Repetições do Eixo Padrão  x 10 ^

.....

**DER-SP Cálculo do Número de Repetições de Carga**

Arquivo Utilitários Ajuda

## Cálculo do número de repetições de carga (N)

Horizonte de projeto:  anos

Taxa de crescimento:  % ao ano Tipo:

Volume diário médio (VDM):  Veículos

Fator de frota:  %

Fator de sentido:  %

Fator de distribuição:  %

Amostragem de cargas por tipo de eixos?  
 Número de caminhões amostrados:  Caminhões

Emprego dos fatores de veículo sugeridos pela norma DER/SP?  
 Porcentagem de caminhões médios entre veículos comerciais:  %

.....

**DER-SP Cálculo do Número de Repetições de Carga**

Arquivo Utilitários Ajuda

### Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD)

Classe de Carga (t)	Número de Ocorrências	Classe de Carga (t)	Número de Ocorrências
< 6	<input type="text"/>	13 - 14	<input type="text"/>
6 - 7	<input type="text"/>	14 - 15	<input type="text"/>
7 - 8	<input type="text"/>	15 - 16	<input type="text"/>
8 - 9	<input type="text"/>	16 - 17	<input type="text"/>
9 - 10	<input type="text"/>	17 - 18	<input type="text"/>
10 - 11	<input type="text"/>	18 - 19	<input type="text"/>
11 - 12	<input type="text"/>	19 - 20	<input type="text"/>
12 - 13	<input type="text"/>		

.....

**DER-SP Cálculo do Número de Repetições de Carga**

Arquivo Utilitários Ajuda

### Eixo Tandem Duplo (ETD)

Classe de Carga (t)	Número de Ocorrências	Classe de Carga (t)	Número de Ocorrências	Classe de Carga (t)	Número de Ocorrências
< 8	<input type="text"/>	15 - 16	<input type="text"/>	23 - 24	<input type="text"/>
8 - 9	<input type="text"/>	16 - 17	<input type="text"/>	24 - 25	<input type="text"/>
9 - 10	<input type="text"/>	17 - 18	<input type="text"/>	25 - 26	<input type="text"/>
10 - 11	<input type="text"/>	18 - 19	<input type="text"/>	26 - 27	<input type="text"/>
11 - 12	<input type="text"/>	19 - 20	<input type="text"/>	27 - 28	<input type="text"/>
12 - 13	<input type="text"/>	20 - 21	<input type="text"/>	28 - 29	<input type="text"/>
13 - 14	<input type="text"/>	21 - 22	<input type="text"/>	29 - 30	<input type="text"/>
14 - 15	<input type="text"/>	22 - 23	<input type="text"/>		

.....

**DER-SP Cálculo do Número de Repetições de Carga**

Arquivo Utilitários Ajuda

### Eixo Tandem Triplo (ETT)

Classe de Carga (t)	Número de Ocorrências	Classe de Carga (t)	Número de Ocorrências	Classe de Carga (t)	Número de Ocorrências
< 10	<input type="text"/>	20 - 21	<input type="text"/>	30 - 31	<input type="text"/>
10 - 11	<input type="text"/>	21 - 22	<input type="text"/>	31 - 32	<input type="text"/>
11 - 12	<input type="text"/>	22 - 23	<input type="text"/>	32 - 33	<input type="text"/>
12 - 13	<input type="text"/>	23 - 24	<input type="text"/>	33 - 34	<input type="text"/>
13 - 14	<input type="text"/>	24 - 25	<input type="text"/>	34 - 35	<input type="text"/>
14 - 15	<input type="text"/>	25 - 26	<input type="text"/>	35 - 36	<input type="text"/>
15 - 16	<input type="text"/>	26 - 27	<input type="text"/>	36 - 37	<input type="text"/>
16 - 17	<input type="text"/>	27 - 28	<input type="text"/>	37 - 38	<input type="text"/>
17 - 18	<input type="text"/>	28 - 29	<input type="text"/>	38 - 39	<input type="text"/>
18 - 19	<input type="text"/>	29 - 30	<input type="text"/>	39 - 40	<input type="text"/>
19 - 20	<input type="text"/>				

N Calculado:

.....

**DER-SP 3 Camadas - Flexível**

Arquivo Utilitários Ajuda

### Pavimento em 3 Camadas - Flexível

**Revestimento** Espessura  Unidade   Binder sob o revestimento?  
Módulo de Resiliência  Unidade  Espessura  Unidade   
Tipo de Concreto Asfáltico  Módulo de Resiliência  Unidade

**Base Granular** Espessura  Unidade  Tipo de Base   
Módulo de Resiliência  Unidade

**Subleito** Identificação (HRB, MCT)   Reforço do subleito?  
Módulo de Resiliência  Unidade  Espessura  Unidade   
CBR  % Módulo de Resiliência  Unidade   
CBR  %

Volta ..... Continua

**DER-SP 3 Camadas - Semi-Rígido**

Arquivo Utilitários Ajuda

### Pavimento em 3 Camadas - Semi-Rígido

**Revestimento** Espessura  Unidade   Binder sob o revestimento?  
Módulo de Resiliência  Unidade  Espessura  Unidade   
Tipo de Concreto Asfáltico  Módulo de Resiliência  Unidade

**Base Cimentada** Espessura  Unidade  Resistências aos 28 dias  
Módulo de Resiliência  Unidade  Compressão  Unidade   
Classificação do Solo  Tipo do solo  Tração na Flexão  Unidade

**Subleito** Identificação (HRB, MCT)   Reforço do subleito?  
Módulo de Resiliência  Unidade  Espessura  Unidade   
CBR  % Módulo de Resiliência  Unidade   
CBR  %

Volta ..... Continua

**DER-SP 4 Camadas - Semi-Rígido**

Arquivo Utilitários Ajuda

### Pavimento em 4 Camadas - Semi-Rígido

**Revestimento** Espessura  Unidade   Binder sob o revestimento?  
Módulo de Resiliência  3000 MPa  Espessura  Unidade   
Tipo de Concreto Asfáltico  Módulo de Resiliência  Unidade

**Base Cimentada** Espessura  Unidade  Resistências aos 28 dias  
Módulo de Elasticidade  15000 MPa  Compressão  Unidade   
Tipo  Tipo de Base Tração na Flexão  Unidade

**Sub-Base** Espessura  Unidade  Tipo de Sub-Base   
Módulo de Resiliência  100 MPa

**Subleito** Identificação (HRB, MCT)   Reforço do subleito?  
Módulo de Resiliência  Unidade  Espessura  Unidade   
CBR  % Módulo de Resiliência  Unidade   
CBR  %

**DER-SP 4 Camadas - Semi-Rígido Invertido**

Arquivo Utilitários Ajuda

### Pavimento em 4 Camadas - Semi-Rígido Invertido

**Revestimento** Espessura  Unidade   Binder sob o revestimento?  
Módulo de Resiliência  Unidade  Espessura  Unidade   
Tipo de Concreto Asfáltico  Módulo de Resiliência  Unidade

**Base Granular** Espessura  Unidade  Tipo de Base   
Módulo de Resiliência  Unidade

**Sub-Base Cimentada** Espessura  Unidade  Resistências aos 28 dias  
Módulo de Resiliência  Unidade  Compressão  Unidade   
Tipo  Tipo de Sub Base Tração na Flexão  Unidade

**Subleito** Identificação (HRB, MCT)   Reforço do subleito?  
Módulo de Resiliência  100 MPa  Espessura  Unidade   
CBR  % Módulo de Resiliência  Unidade   
CBR  %

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DER/SP

Processo Número: Teste de apresentação para a ABPv  
Rodovia: SP-999 Pavimentos Nacionais  
Trecho: Misturas Asfálticas e Cimentadas  
Operador: Andréa  
Data: 6/07/99

Número de Repetições de Carga: 6,00E+07

PAVIMENTO SEMI-RÍGIDO INVERTIDO

CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO

    Espessura: 40 mm  
    Módulo de Resiliência: 3900 MPa  
    Tipo de Concreto Asfáltico: CBUQ faixa C  
    Camada de Binder

        Espessura: 60 mm  
        Módulo de Resiliência: 3100 MPa

    Módulo Equivalente Inicial do Revestimento: 3405 MPa

CARACTERÍSTICAS DA BASE

    Espessura: 200 mm  
    Módulo de Resiliência: 450 MPa  
    Tipo de Base: Brita graduada simples

CARACTERÍSTICAS DA SUB BASE

    Espessura: 150 mm  
    Módulo de Resiliência: 10000 MPa  
    Resistência à Compressão: 5 MPa  
    Resistência à Tração: 1 MPa  
    Tipo de Sub Base: BGTC - Alto Desempenho

CARACTERÍSTICAS DO SUBLEITO

    Identificação: LG'  
    Módulo de Resiliência: 100 MPa  
    CBR: 8 %

VERIFICAÇÃO À FADIGA DA SUB BASE

Espessura da SubBase (mm)	Número de Repetições
150	1,64E+06
160	4,00E+06
170	8,97E+06
180	1,87E+07
190	3,68E+07
200	6,86E+07

VERIFICAÇÃO À FADIGA DO CONCRETO ASFÁLTICO

Espessura do CA (mm)	Espessura do Binder (mm)	Número de Repetições
040	060	6,93E+10