



Reabilitação de Pavimentos Rodoviários: Tecnologias e avaliação estrutural

Conteúdo Programático [14 h]:

- Conceção de Pavimentos Flexíveis e seu Dimensionamento Empírico-Mecanicista:
 - princípios e orgânica do dimensionamento [1,5 h]
- Técnicas de Reabilitação Estrutural de Pavimentos Rodoviários [2 h]
- Observação das Características Estruturais dos Pavimentos
 - observação de patologias [0,5 h];
 - auscultação de pavimentos [2 h]
 - Interpretação de ensaios de carga [1 h]
- Casos práticos de avaliação da capacidade de carga e dimensionamento do reforço [7 h]

1



Reabilitação de Pavimentos Rodoviários: Tecnologias e avaliação estrutural

- Conceção de Pavimentos Flexíveis e seu Dimensionamento Empírico-Mecanicista (revisão)

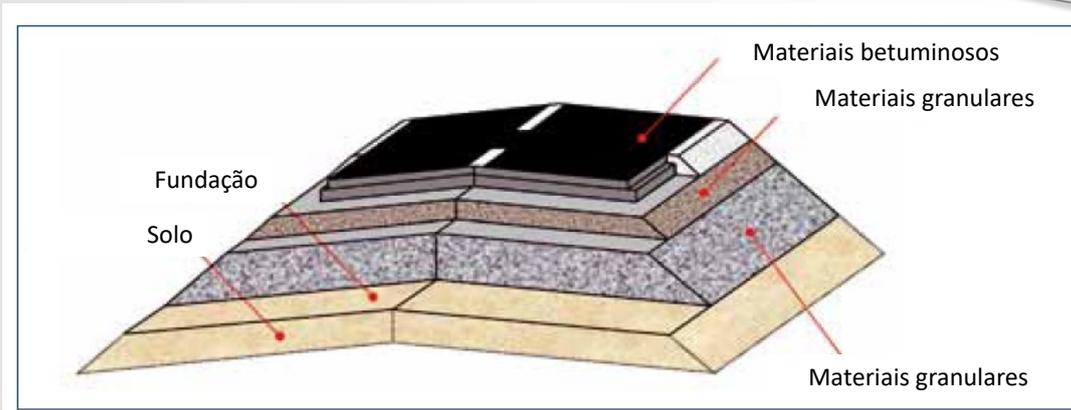
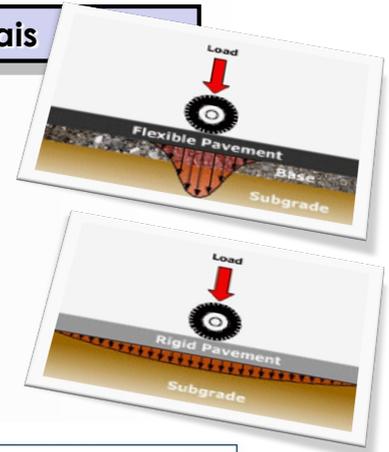
2



Comportamento dos Diferentes Materiais

As camadas dos pavimentos têm funções específicas e são formadas por materiais bastante diferentes entre si

- Solos
- Materiais granulares
- Solos tratados | estabilizados
- Materiais granulares estabilizados
- Betão de cimento
- Materiais betuminosos



Comportamento dos Diferentes Materiais

Materiais não ligados (solos e granulares):

Construção de camada granular



Construção de camada de solo





Comportamento dos Diferentes Materiais

Materiais não ligados (solos e granulares):

Construção de camada granular



<http://www.nortejuvil.pt>

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Solos para Camadas de Pavimento: solos estabilizados



Rotor que faz a mistura

Equipamento específico de mistura in situ

Tanque de água para alimentação da zona de mistura



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Comportamento dos Diferentes Materiais

In Thom, 2008

Materiais ligados com ligantes hidráulicos:

Laje de um pavimento rígido (betão de cimento)



<http://training.ce.washington.edu/PGI/>

Camada de betão pobre



<http://www.boards.ie/vbulletin/showthread.php?t=2055535436>

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



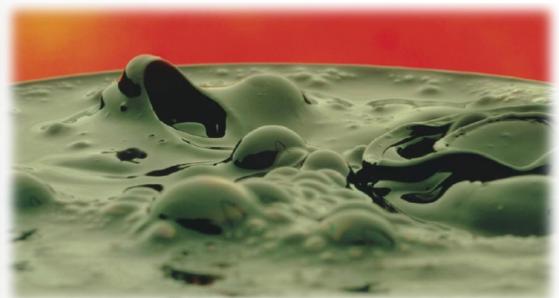
Comportamento dos Diferentes Materiais

Materiais ligados com ligantes betuminosos

Construção de camada betuminosa



Betume asfáltico quente



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

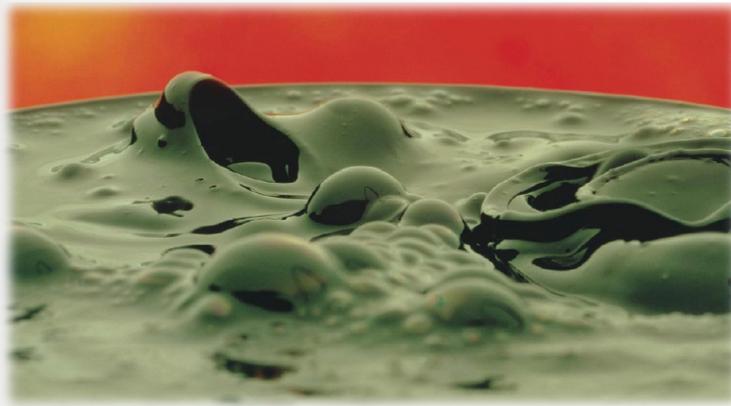
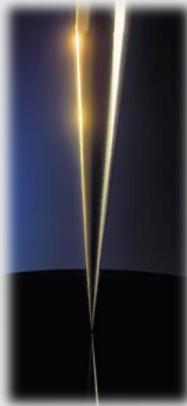


Betume asfáltico [EN 12591]: betumes de pavimentação mais comuns em Portugal

Classificados com base em Pen₂₅

	20/30	35/50	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Pen ₂₅ [0,1 mm]		35-50	50-70				
Tab [°C]		50-58	46-54			35-43	
Visc. Cinemática [mm ² /s]		min. 370	min. 295			min. 135	
Temp. inflamação [°C]		min. 240	min. 230			min. 220	
Aumento Tab após RTFOT [°C]		Máx. 11	Máx. 11			Máx. 12	

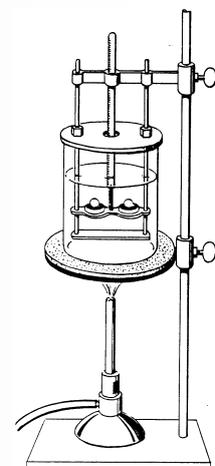
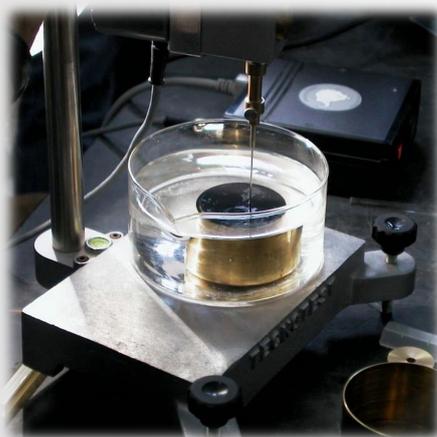
Silvino Capitão, Prof. do ISEC



Betume asfáltico: propriedades

Penetração (100 gf, 25°C, 5s):

Temperatura de amolecimento [anel e bola]:



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



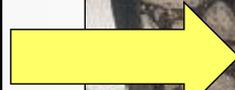
Misturas Betuminosas a Quente: Misturas correntes em Portugal

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

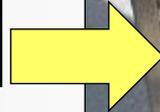
Dmax: 10 / 14 mm	% pass. 63µm: 5 - 8 %	V_v: 3 - 5 %	P_b: 5 - 6 %
Dmax: 20 mm	% pass. 63µm: 5 - 9 %	V_v: 3 - 6 %	P_b: > 5 %
Dmax: 20 mm	% pass. 63µm: 2 - 7 %	V_v: 3 - 6 %	P_b: 4 - 5 %
Dmax: 32 mm	% pass. 63µm: 2 - 7 %	V_v: 4 - 8 %	P_b: 4 - 5 %



Betão betuminoso
Ex: AC 14 surf 35/50



Mistura betuminosa densa
Ex: AC 20 bin 50/70



Macadame betuminoso
Ex: AC 20 base 50/70

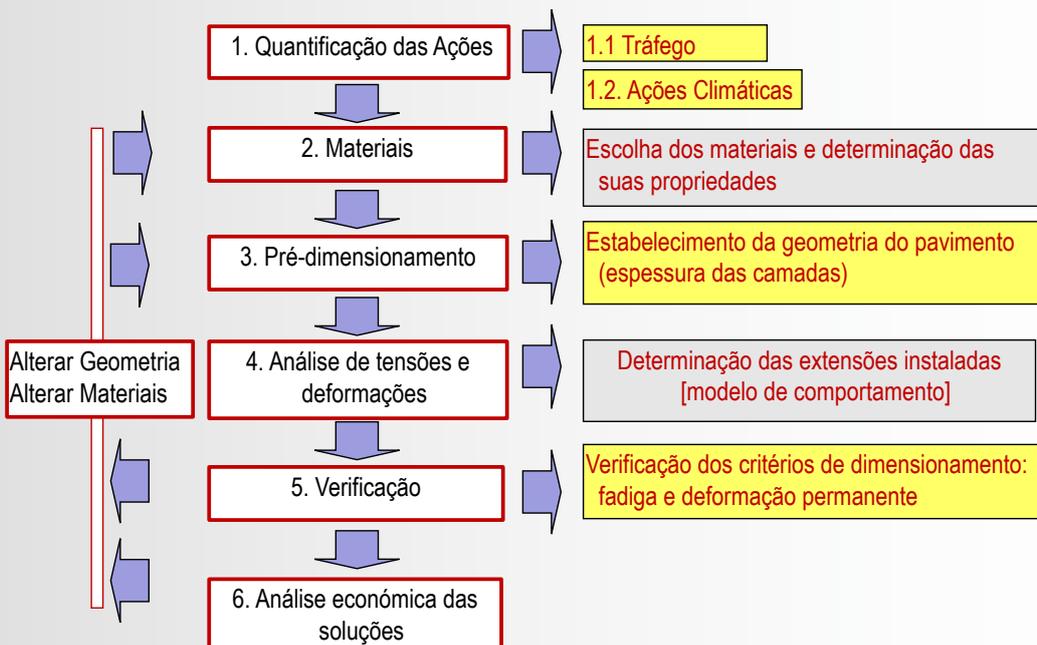


Macadamebetuminoso
Ex: AC 32 base 50/70



Dimensionamento de pavimentos: Passos do problema

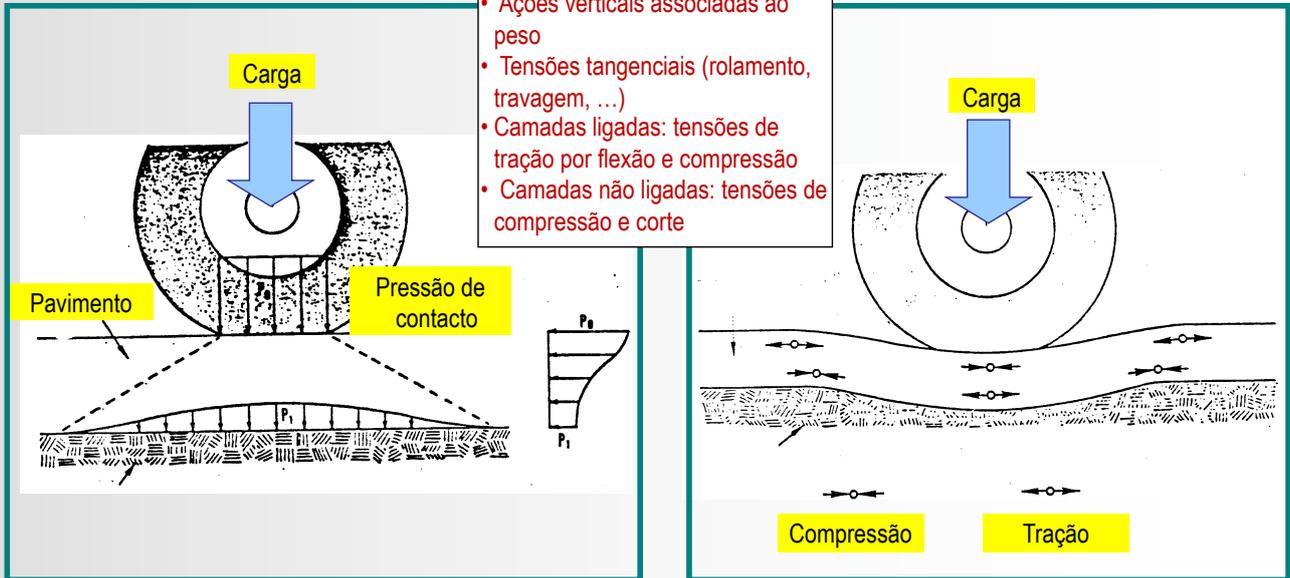
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)





Dimensionamento de pavimentos: Princípios

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Dimensionamento de pavimentos: Princípios

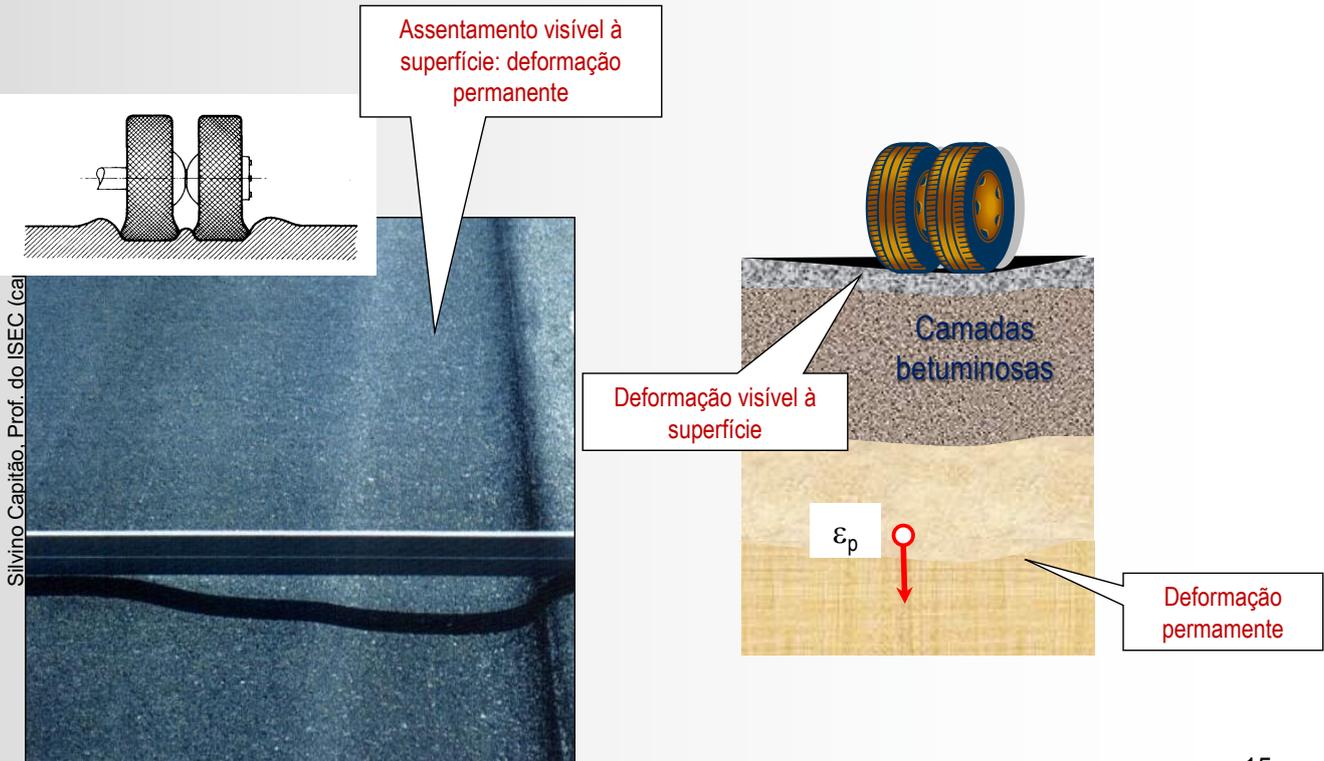
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Dimensionamento de pavimentos: Princípios



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (ca

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Ação do tráfego

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

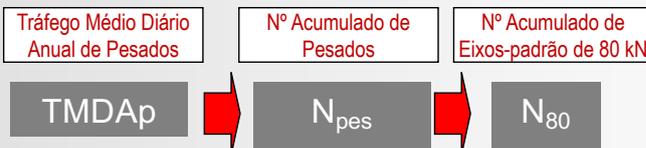


α: ?? Expoente: 5??

LEI DE POTENCIAÇÃO À QUARTA (pavimentos flexíveis)

$$N_{80} = \alpha \times n_p$$

$$N_p = \left(\frac{P}{80}\right)^4$$



Eixo-padrão



Ação do tráfego

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Como se calcula o Número acumulado de repetições de carga ao longo do período de vida do pavimento?

N_80 = N_p * alpha = 365 * TMD_0 * ((1+t)^n - 1) / t * alpha

n - vida do pavimento (20 anos: Pav. Flexíveis; 30 anos: Pav. Rígidos)
t - taxa de crescimentos anual
alpha - façor de agressividade

Table with columns CAT, SILHUETAS, and DESCRIÇÃO. It lists various vehicle categories (f, g, h, i) with their respective silhouettes and descriptions, including trucks, tractors, and buses.



Ação do tráfego

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Tráfego na via mais solicitada

Table with 2 columns: N° de vias and Via mais solicitada. It shows that for 2 lanes, the most solicited lane is 90, and for 3 or more lanes, it is 80.

Classes de Tráfego (Manual da ex-JAE)

N_80 = N_p * alpha = 365 * TMD_0 * ((1+t)^n - 1) / t * alpha

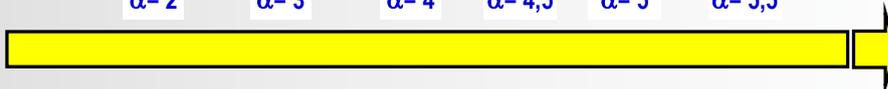
Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional



CLASSES DE TRÁFEGO

0,5x10^6 x alpha, 1,5x10^6 x alpha, 2,9x10^6 x alpha, 5,4x10^6 x alpha, 8,7x10^6 x alpha, 14,5x10^6 x alpha, 24,1x10^6 x alpha Veículos Pesados x alpha

alpha = 2, alpha = 3, alpha = 4, alpha = 4,5, alpha = 5, alpha = 5,5





Ação do tráfego

Classes de Tráfego (Manual da ex-JAE)

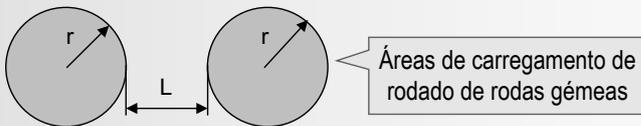
	TMD ₀ (pes)		t [%]	N _{pes} ²⁰		Pav. Flexíveis		Pav. Semi-rígidos			Pav. Rígidos	
	(min.)	(máx.)		(min.)	(máx.)	α	N ₈₀ ^{Dim}		α	N ₁₃₀ ^{Dim}		N _{pes} ³⁰
							(min.)	(máx.)		(min.)	(máx.)	
T7	< 50		Estudo específico									
T6	50	150	3	4,9E+05	1,5E+06	2	9,8E+05	2,9E+06	0,5	2,5E+05	7,4E+05	2,6E+06
T5	150	300	3	1,5E+06	2,9E+06	3	4,4E+06	8,8E+06	0,6	8,8E+05	1,8E+06	5,2E+06
T4	300	500	4	3,3E+06	5,4E+06	4	1,3E+07	2,2E+07	0,7	2,3E+06	3,8E+06	1,0E+07
T3	500	800	4	5,4E+06	8,7E+06	4,5	2,4E+07	3,9E+07	0,8	4,3E+06	7,0E+06	1,6E+07
T2	800	1200	5	9,7E+06	1,4E+07	5	4,8E+07	7,2E+07	0,9	8,7E+06	1,3E+07	2,9E+07
T1	1200	2000	5	1,4E+07	2,4E+07	5,5	8,0E+07	1,3E+08	1	1,4E+07	2,4E+07	4,9E+07
T0	> 2000		Estudo específico									

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



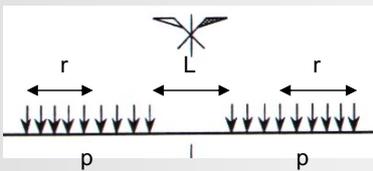
Ação do tráfego

Dimensões do Carregamento

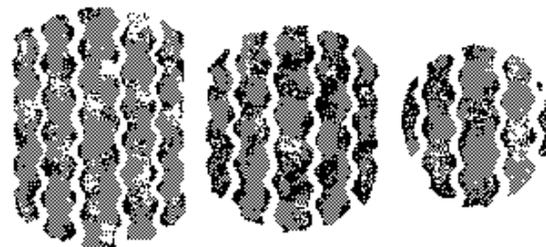
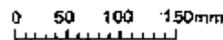


Velocidade do Carregamento

$t = 1/v$
 Normal: 50 km/h
 Congestionado: 1 a 10 km/h
 Parq. Estacionam: 1min a 10 h



Exemplos de áreas de contacto pneu - pavimento



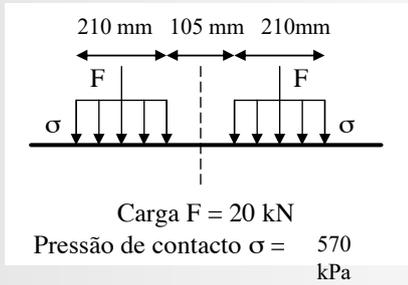
Eixo	L (mm)	r (mm)	p (kPa)
Shell	105	105	570
Nottingham	150	113	500

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

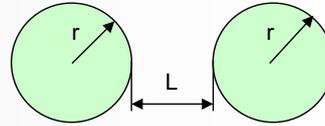


Ação do tráfego

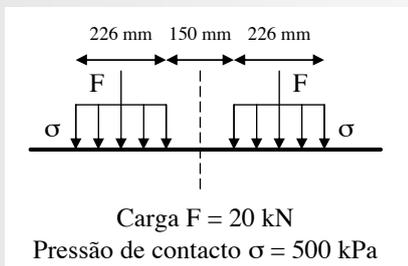
Eixo-padrão de 80 kN (Shell)



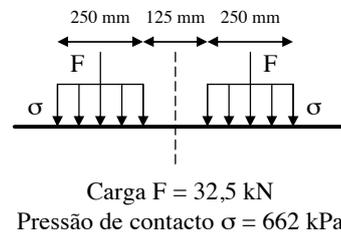
Áreas de carregamento de rodado de rodas gêmeas



Eixo-padrão de 80 kN (U. Nottingham)



Eixo-padrão de 130 kN



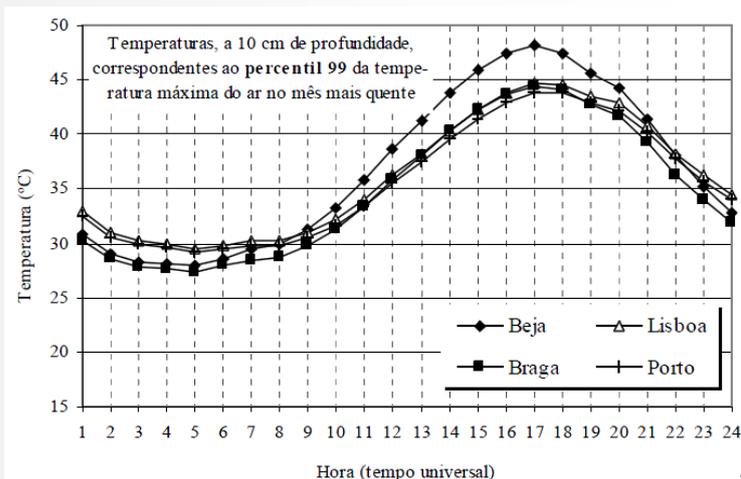
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Ações Climáticas

A TEMPERATURA DE SERVIÇO do pavimento para Portugal Continental é em geral entre 22 e 31°C.

Previsão pelo modelo Picado-Santos (1988): Modelação dum dia representativo de cada mês, para as condições mais severas da temperatura nas camadas betuminosas [corresponde à modelação da temperatura do ar para um dia em que há apenas radiação solar direta].



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

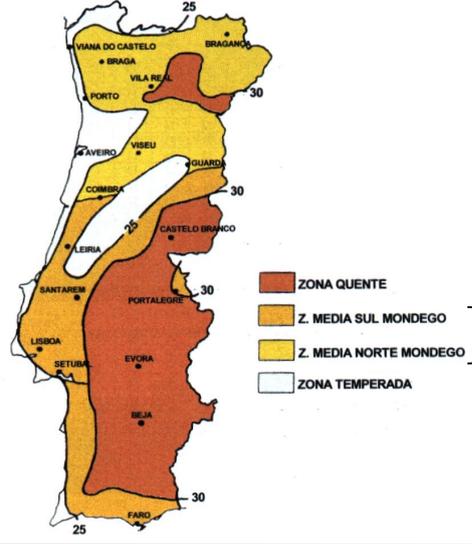


Ações Climáticas

Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

Temperatura ponderada do ar de 17°C, a qual corresponde a uma temperatura nos materiais betuminosos entre 24 e 26°C.

A ação da temperatura não é explicitamente considerada quando se utiliza o MACOPAV (método expedito de dimensionamento)



No MACOPAV é considerada apenas uma zona média

MACOPAV: Recomendações

Zona Quente e Classe de Tráfego T1 e T2: utilizar betume mais duro

Zona Média e Classe de Tráfego T1: utilizar betume mais duro

Zonamento obtido a partir do dano calculado em pavimentos flexíveis, em função da temperatura de serviço

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Ações: temperatura

Cálculo aproximado da ação da temperatura (tabelas)

Localização	Classe de Tráfego					
	T6	T5	T4	T3	T2	T1
S. Jacinto	24,4	24,8	24,8	24,7	24,6	24,7
Braga	26,6	27,3	26,9	26,5	26,6	26,4
Coimbra	27,5	28,2	27,7	27,3	27,4	27,1



Temperatura de serviço : 24,7 °C

Estrutura do pavimento

Tráfego T3



F2

Nota: se houver variações significativas da espessura do pavimento ao longo do processo de dimensionamento, devem corrigir-se os valores da temperatura de serviço a utilizar

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Ações Climáticas

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

O Estado hídrico das camadas do pavimento afeta muito a sua capacidade de carga. Este aspeto é considerado de forma indireta no dimensionamento:

- caracterizando os materiais sensíveis à água de modo conservador (considerando um estado hídrico desfavorável);
- admitindo a existência de órgãos de drenagem que assegurem um estado hídrico razoavelmente baixo ao longo do tempo.



A Fundação dos Pavimentos

Funções

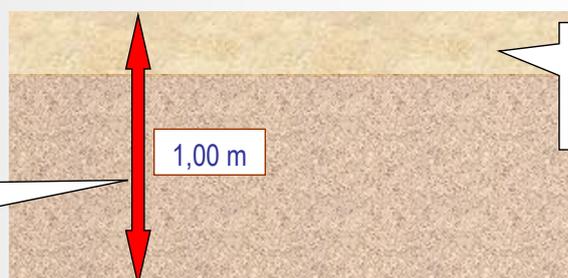
- ▶ Oferecer uma **superfície regular e desempenada**
- ▶ Garantir uma **capacidade de suporte uniforme** (*permitir a compactação da camada subjacente e garantir um bom funcionamento do pavimento*)
- ▶ Assegurar a **circulação do equipamento de construção** (especialmente o mais ligeiro)

Leito do Pavimento

- ▶ Construída com solos provenientes de zonas de escavação ou empréstimo (solos seleccionados) ou com solos "tratados"
- ▶ Em geral, as espessuras variam de 20 cm (estradas de tráfego leve) a 60 cm (estradas importantes)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Fundação
(aplica-se a situações de aterro ou de escavação)



Leito do Pavimento
(aplica-se a situações de aterro ou de escavação)

A Fundação dos Pavimentos



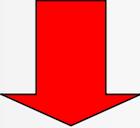
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Leito do Pavimento

Leito do Pavimento

► Para pavimentos com base e sub-base granulares (com CBR mínimo de 20 – 30%), bastará um leito homogêneo que mobilize (a curto e a longo prazo) um CBR mínimo da ordem de 5 a 10%.



► Em geral:
Solo **A-1**
A-2-4
A-2-5

A Fundação dos Pavimentos



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Classificação de solos segundo o Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

Solo de pior capacidade de carga

Classificação adoptada pelo MACOPAV

Classificação unificada de solos (norma ASTM D 2487)

Solo de melhor capacidade de carga

Classe	CBR (%)	Tipo de solo	Descrição	Reutilização		
				Aterro (corpo)	Leito	Sub-base
S ₀	< 3	OL	siltos orgânicos e siltos argilosos orgânicos de baixa plasticidade. (1)	N	N	N
		OH	argilas orgânicas de plasticidade média a elevada; siltos orgânicos. (2)	P	N	N
		CH	argilas inorgânicas de plasticidade elevada; argilas gordas. (3)	P	N	N
		MH	siltos inorgânicos; areias finas micáceas; siltos micáceos. (4)	P	N	N
S ₁	≥ 3 a < 5	OL	idem (1)	S	N	N
		OH	idem (2)	S	N	N
		CH	idem (3)	S	N	N
		MH	idem (4)	S	N	N
S ₂	≥ 5 a < 10	CH	idem (3)	S	N	N
		MH	idem (4)	S	N	N
		CL	argilas inorgânicas de plasticidade baixa a média; argilas com seixo, argilas arenosas, argilas siltosas e argilas magras.	S	N	N
		ML	siltos inorgânicos e areias muito finas; areias finas, siltosas ou argilosas; siltos argilosos de baixa plasticidade.	S	N	N
S ₃	≥ 10 a < 20	SC	areia argilosa; areia argilosa com cascalho. (5)	S	P	N
		SC	idem (5)	S	S	N
		SM	areia siltosa; areia siltosa com cascalho.	S	S	N
		SP	areias mal graduadas; areias mal graduadas com cascalho.	S	S	N
S ₄	≥ 20	SW	areias bem graduadas; areias bem graduadas com cascalho.	S	S	P
		GC	cascalho argiloso; cascalho argiloso com areia.	S	S	P
		GM-u	cascalho siltoso; cascalho siltoso com areia. (6)	S	S	P
		GP	cascalho mal graduado; cascalho mal graduado com areia. (7)	S	S	P
S ₅	≥ 40	GM-d	idem (6)	S	S	S
		GP	idem (7)	S	S	S
		GW	cascalho bem graduado; cascalho bem graduado com areia.	S	S	S



A Fundação dos Pavimentos

Classe de solo	Tipo de material	Características
ST ₁	solo tratado com cal	CBR imediato > 8 %
ST ₂	solo tratado com cimento (eventualmente também com cal)	CBR imediato > 15 % R _{cd} (28 dias) > 0,2 MPa (2)

R_{cd}(28 dias) resistência à tracção em compressão diametral aos 28 dias
 (1) tratamento *in situ*
 (2) valor que pode ser obtido em diversos casos com 1 a 2 % de cal e 4 a 6% de cimento

Tipo de solo	Permeabilidade				Comprezibilidade / expansibilidade				Massa volúmica aparente seca (g/cm ³)
	Imper-meavel	Má	Média	Exce-lente	Nula	Praca	Média	Elevada	
OH	x							x	1,30-1,75
CH	x							x	1,45-1,85
MH		x	x					x	1,30-1,70
OL		x					x	x	1,45-1,70
CL	x						x		1,45-2,10
ML		x	x			x	x		1,60-2,15
SC	x	x				x	x		1,60-2,15
SM-u	x	x				x	x		1,60-2,10
SM-d		x			x				1,90-2,15
SP				x	x	x			1,70-2,15
SW				x	x	x			1,75-2,10
GC	x	x				x			2,10-2,35
GM-u	x	x				x			1,85-2,15
GM-l		x			x				2,00-2,35
GP				x	x				1,75-2,25
GW				x	x				2,00-2,25

Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

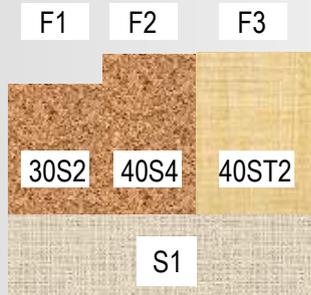


A Fundação dos Pavimentos

Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional

Capacidade de carga da fundação

Exemplo



Solo		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
existente	E _f (MPa)	30 < E _f ≤ 50	50 < E _f ≤ 80	80 < E _f ≤ 150	E _f > 150
S ₀	CBR < 3	estudo especial			(2)
S ₁	3 ≤ CBR < 5	30 S ₂ 20 S ₃	60 S ₃ 40 S ₄ 40 ST ₁ 25 ST ₂	40 ST ₂	(2)
S ₂	5 ≤ CBR < 10	(1)	30 S ₃ 15 S ₄	60 S ₃ 30 S ₄ 40 ST ₁ 25 ST ₂	40 ST ₂ (2)
S ₃	10 ≤ CBR < 20	---	(1)	20 S ₄	25 ST ₂ (2)
S ₄ ; S ₅	CBR ≥ 20	---	---	(1)	(2)

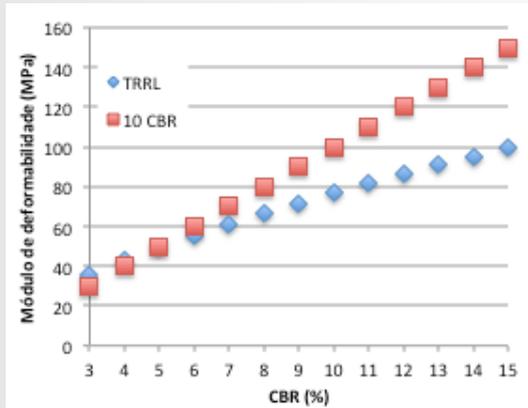
- (1) em escavação deve ser escarificado e recompactado na profundidade necessária à garantia de uma espessura final de 30 cm bem compactada; em aterro as condições de fundação estão garantidas.
- (2) situação especial em pedraplenos.

ST1 - solo tratado com cal (CBR imediato > 8 %; valor determinado em laboratório, s/ sobrecargas e sem embebição).
ST2 - solo tratado com cimento ou cal (CBR imediato > 15 %; resistência à tracção por compressão diametral aos 28 dias > 0,2 MPa).

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Fundações de Pavimentos



Módulo de deformabilidade:
Esf (MPa) = 10 x CBR(%) mais corrente
Esf = 17,6 x CBR^{0,64} Expressão do TRRL

Coefficiente de Poisson:
0,35 (valor típico)

Tensão induzida pelas cargas, varia com a profundidade

(embora seja geralmente dispensável, podem considerar-se várias subcamadas com módulos diferentes, para atender à não linearidade do material)

Tensão de compressão

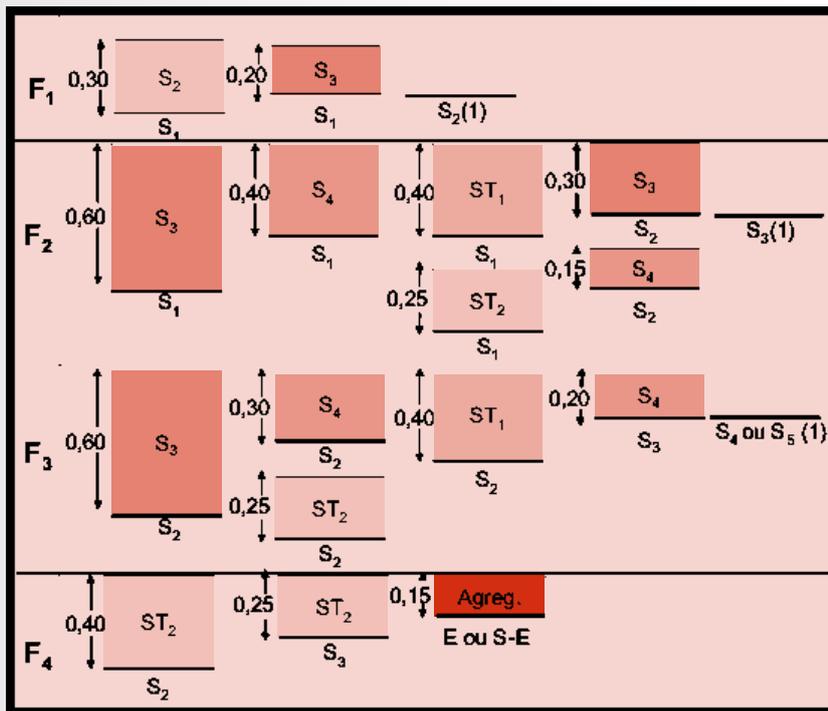


Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



A Fundação dos Pavimentos

Material a aplicar no leito do pavimento e classes de resistência resultantes (espessuras em m) (JAE, 1995)



E – Enrocamento (aterro); SE – Solo-enrocamento (aterro)
 (1) Em escavação, o solo deve ser escarificado e recompatado, por forma a garantir uma espessura final de 0,30 m bem compactada

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Pré-dimensionamento de pavimentos

Exemplo: Norma 6.1 IC secciones de firme (Espanha, 2003)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T31	T32	T41	T42
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1				
	E2				
	E3				

Espesores mínimos en cm

MB Mezclas bituminosas HF Hormigón de firme SC Suelocemento ZA Zajorra artificial

(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente muy flexibles, gravaemulsión sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.

Nota 1: Para las categorías de tráfico pesado T3 (T31 y T32) las capas tratadas con cemento deberán prefisurarse con espaciamentos de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).

Nota 2: En la categoría de tráfico pesado T42 con tráficos de intensidad reducida (menor que 100 vehículos/carril/día) podrá disponerse un riego con gravilla bicapa como sustitución de los 5 cm de mezcla bituminosa.



Materiais

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Símbolo	Material	Principais características ^(b)	E (MPa)	∇
MB ^(a)	Betão Betuminoso (desgaste)	Dim. máx. do agregado: 14 mm % de betume: 5,0 a 5,6%(c) Porosidade: 3 a 5% Espessura recomendável: 4 a 6 cm	4 000 ^(d)	0,35
	Macadame Betuminoso A (regularização ou base)	Dim. máx. do agregado: 25 mm % de betume: 4,3 a 5,0%(3) Porosidade: 4 a 6% Espessura recomendável: 6 a 12 cm		
	Macadame Betuminoso B (base)	Dim. máx do agregado: 37,5 mm % de betume mínima: 4,3% Porosidade: 4 a 8% Espessura recomendável: 9 a 15 cm		
BG	Agregado Britado de Granulometria Extensa recomposto em central (base)	Dim. máx. do agregado: 37,5mm Equivalente de areia mínimo: 50% Desgaste (Los Angeles) máximo: 40%:	2,5 x Ei	0,35
	Agregado Britado de Granulometria Extensa sem recomposição (base)	Dim. máx. do agregado: 37,5mm Equivalente de areia mínimo: 50% Desgaste (Los Angeles) máximo: 40%:	2 x Ei	0,35
SbG	Agregado Britado de Granulometria Extensa sem recomposição (sub-base)	Dim. máx. do agregado: 37,5mm Equivalente de areia mínimo: 45% Desgaste (Los Angeles) máximo: 45%:	2 x Ei	0,35
BC	Betão de Cimento	Resistência à tracção em flexão: 4,5 MPa	30 000	0,20
BP1	Betão Pobre de reduzida erodibilidade	Resistência à tracção em compressão diametral: ≥ 1,2 MPa Teor em ligante: 140kg/m3 de mistura	20 000	0,25
BP2	Betão Pobre (agregado recomposto em central)	Resistência à tracção em compressão diametral: ≥ 1,0 MPa Teor em ligante: ≥ 100kg/m3 de mistura	20 000	0,25
Sc	Solo-cimento fabricado em central	Resistência à tracção em compressão diametral: ≥ 0,3 MPa	2 000	0,30



Materiais

Principais tipos de misturas betuminosas a quente aplicadas em Portugal

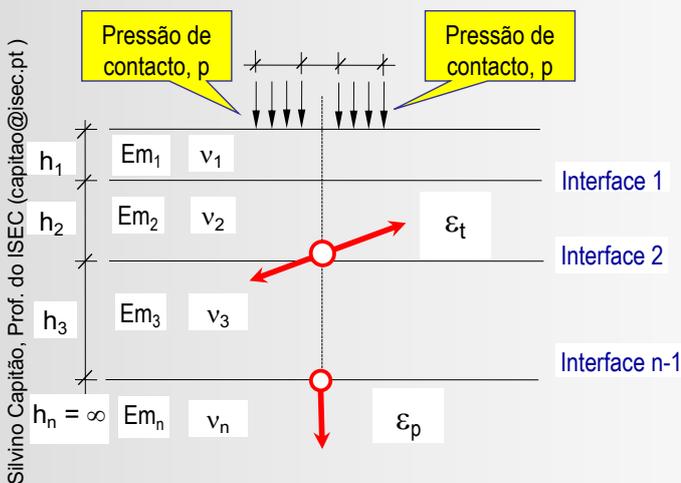
Table with 3 columns: Camada, Tipo de misturas, Observações. Rows include Base (MB, MAM), Regularização (MB, MBD, MAM, AB, BBs), and Desgaste (BB, BBR, MBBR, BBD).

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Análise de tensões e deformações

Modelo de Burmister



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Para os materiais escolhidos para a estrutura do pavimento:

Análise com base na teoria da elasticidade

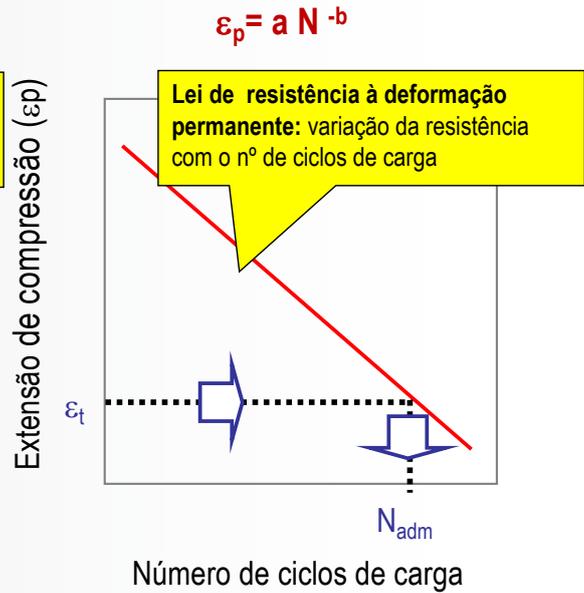
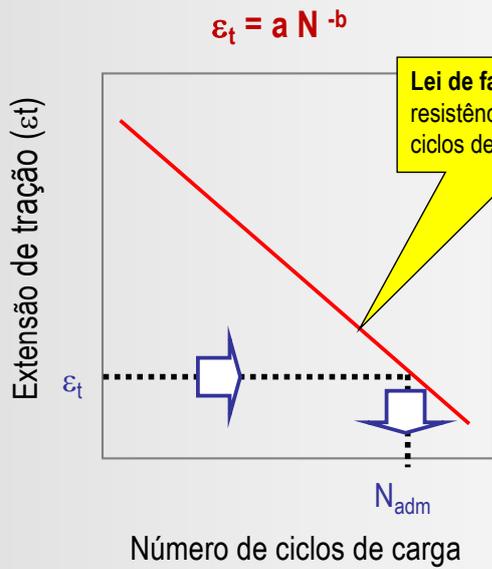
- Propriedades do material de cada camada homogéneas e camada considerada como isotrópica
- Espessura finita das camadas, exceptuando a última
- Dimensão infinita das camadas na direção lateral
- Camadas solidárias entre si (fricção total) ou não
- Propriedades mecânicas dos materiais das camadas caracterizado por:

Módulo de deformabilidade, Em
Coeficiente de Poisson, vi



Verificação dos critérios de dimensionamento

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



$$D_f = \frac{N_{80}}{N_{adm}}$$

Se a ruína por fadiga for o critério condicionante, procura-se que $80\% < D_f < 100\%$

$$D_{dp} = \frac{N_{80}}{N_{adm}}$$

Se a ruína por deformação permanente for o critério condicionante, procura-se que $80\% < D_{dp} < 100\%$ ³⁷

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Verificação dos critérios de dimensionamento

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Leis de fadiga adoptadas no Manual de Concepção de Pavimentos (JAE, 1995)

Material	Lei de fadiga	Parâmetros da lei de fadiga
Misturas betuminosas	$\epsilon = a \times N^b$	$a = 3 \times 10^{-3}$ a $3,5 \times 10^{-3}$ $b = -0,2$
Materiais com ligantes hidráulicos	$\frac{\sigma_t}{\sigma_r} = 1 + a \times \log N$	$a = -0,1$ a $-0,06$

ϵ – Extensão máxima de tracção na base das camadas betuminosas;
 σ_t – Tensão máxima de tracção na base das camadas com ligantes hidráulicos;
 σ_r – Resistência à tracção tracção em flexão das camadas com ligantes hidráulicos;
 N – Número admissível de aplicações de carga.



Dimensionamento Expedito de Pavimentos

Manual da ex-JAE (1995):

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

- 1 Introdução**
Objectivo do manual
Âmbito de aplicação
Organização do manual
- 2 Tráfego**
Tráfego médio diário anual de veículos pesados
Distribuição do tráfego pesado pelas vias
Período de dimensionamento
Taxa média de crescimento anual
Factor de agressividade
Número acumulado de eixos padrão
- 3 Condições climáticas**
Influência das condições hídricas
Influência das condições térmicas
- 4 Fundação do pavimento**
Classes de fundação
Classes de terrenos
Materiais para a camada de leito do pavimento
Constituição da plataforma
- 5 Materiais de pavimentação**
Materiais granulares
Misturas betuminosas fabricadas a quente
Misturas com ligantes hidrúlicos

- 6 Estruturas de pavimento**
Aspectos conceptuais
Espessuras das camadas betuminosas
Exemplos de utilização
Estruturas tipo
- 7 Perfis transversais**
Variações de espessura
Sobrelargura das camadas

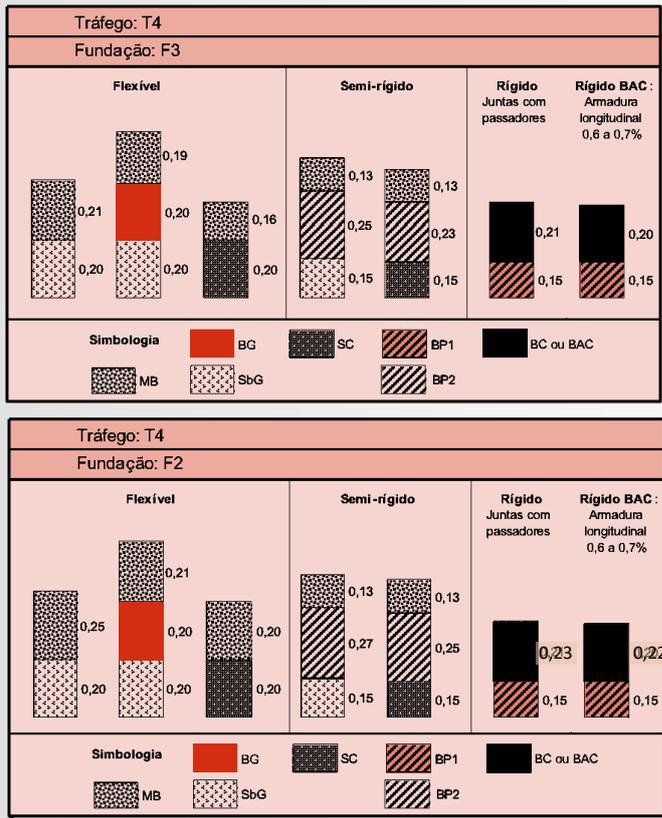
MANUAL DE CONCEPÇÃO DE PAVIMENTOS PARA A REDE RODOVIÁRIA NACIONAL

JULHO 95



Dimensionamento Expedito de Pavimentos

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

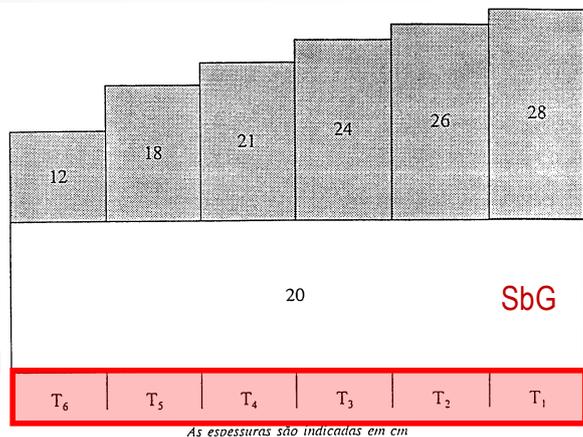


Exemplos:



Fundação: F3

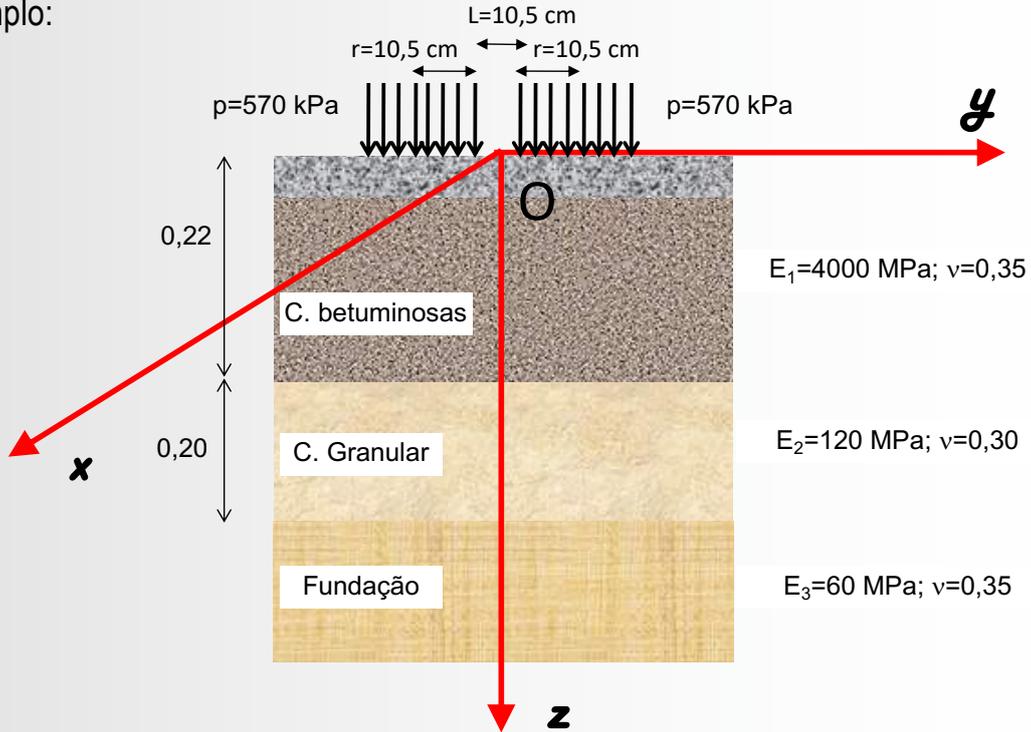
Para Fundação:
F1: não adequado
F2: + 4 cm
F4: - 2 cm





Modelo estrutural

Exemplo:



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Modelo estrutural

The screenshot shows the BISAR 3.0 software interface. The main window is titled "Aula Exemplo". The "Number of Systems (1-10)" is set to 1. The "System Description" is "Aula exemplo". The "Use Standard Dual Wheel?" checkbox is unchecked. The "Mode of Load" is set to "1 - Stress and Load". The "No of Circular Loads (1-10)" is set to 2. A table displays the load configuration:

Load Number	Vertical Stress (kPa)	Vertical Load (kN)	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Horizontal Stress (kPa)	Shear Direction (degr.)
1	570.000	20.000	0.0000	-0.1575	0.000	0.0
2	570.000	20.000	0.0000	0.1575	0.000	0.0

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Modelo estrutural

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Number of Systems (1-10): 1

System Description: Aula exemplo

Positions

Select Positions for Standard Dual Wheel

No of Position Entries (1-10): 4

Position Number	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Z (depth) Coordinate (m)	Layer No
1	0.0000	-0.1575	0.2200	1
2	0.0000	0.0000	0.2200	1
3	0.0000	-0.1575	0.4210	3
4	0.0000	0.0000	0.4210	3

Select Layer
Select Layer

43

Modelo estrutural

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Number of Systems (1-10): 1

System Description: Aula exemplo

Layers

Full Friction Between Layers?

No of Layers (1-10): 3

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio
1	0.220	4.00E+03	0.35
2	0.200	1.20E+02	0.30
3		6.00E+01	0.35

44



Propriedades dos materiais das camadas

Expressões de Previsão

Módulo de deformabilidade:

$$E_{cg} = k \times E_{sf} \text{ (mm)}$$

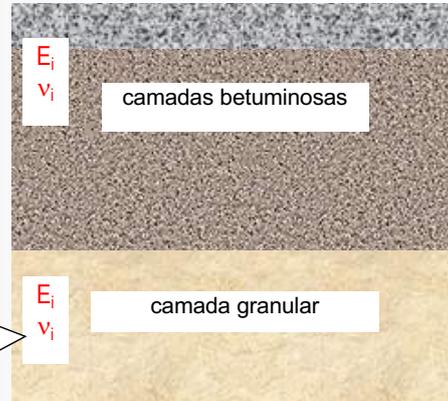
Kmáx: 4 (impossível assegurar condições de execução acima disso)

Kmin: 1,5 (abaixo disso a camada não é suficientemente resistente, pelo que não deve ser executada)

$$K = 0,2 \times h_{cg}^{0,45}$$

Coefficiente de Poisson:

0,30 (valor típico)



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



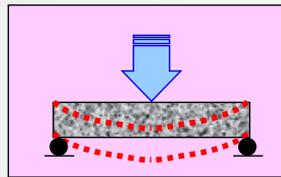
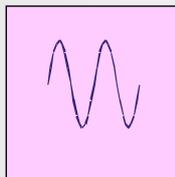
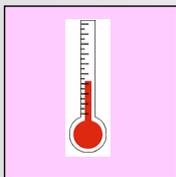
Propriedades dos materiais das camadas

Determinação **experimental** em ensaios de cargas repetidas ou com base em **expressões de previsão**

Temperatura?

Frequência?

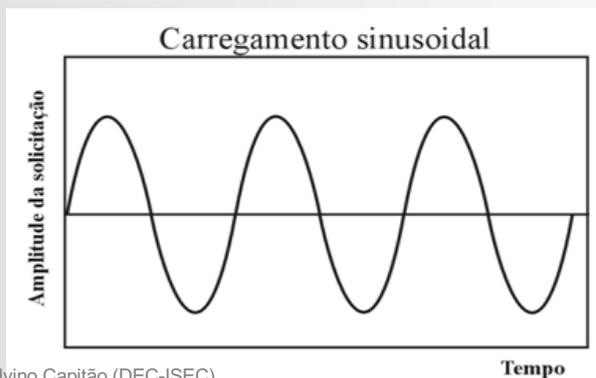
Extensão?



Localização geográfica?

Velocidade dos veículos?

Nível de carga dos eixos?



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DAS CAMADAS

Expressões para Utilização Prática (Ullidtz & Peattie)

Rigidez do betume

$$S_b = 1,157 \times 10^{-7} \times t^{-0,368} \times 2,718^{-IP} \times (Tab - T)^5$$

Validade das expressões

$$20 \text{ °C} \leq Tab - T \leq 60 \text{ °C}$$

$$0,01 \text{ s} \leq t \leq 0,1 \text{ s}$$

$$\text{(ou } 10 \text{ km/h} \leq V \leq 100 \text{ km/h)}$$

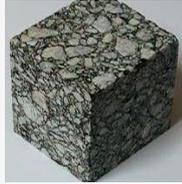
t – tempo de carregamento (s)

IP – índice de penetração

t – tempo de carregamento (s)

T – temperatura de serviço do material (°C)

Exemplos



Módulo de deformabilidade das camadas betuminosas

$$E_m = S_b \left[1 + \frac{257,5 - 2,5 \cdot VMA}{n (VMA - 3)} \right]^n$$

$$n = 0,83 \cdot \log \left[\frac{4 \times 10^4}{S_b} \right]$$

VMA – volume de vazios no esqueleto de agregado da mistura (%)
S_b – rigidez do betume (MPa)

O módulo das camadas betuminosas é função de:

- Rigidez do ligante
- Temperatura a que se encontra o material
- Composição da misturas
- Velocidade de carregamento
- Nível de carga



Propriedades dos materiais das camadas

Expressões de Previsão do Módulo de Deformabilidade das Misturas Betuminosas

Método da Universidade de Nottingham

$$E_m = S_b \left[1 + \frac{257,5 - 2,5 \cdot VMA}{n (VMA - 3)} \right]^n$$

$$n = 0,83 \cdot \log \left[\frac{4 \times 10^4}{S_b} \right]$$

VMA – volume de vazios no esqueleto de agregado da mistura (%)

S_b – rigidez do betume (MPa)

Método da Shell

$$5 \text{ MPa} < S_b < 1000 \text{ MPa}$$

$$A = \frac{S89 + S68}{2} \cdot (\log S_b - 8) + \frac{S89 - S68}{2} \cdot |\log S_b - 8| + S108$$

$$E_m = 10^A$$

$$1000 \text{ MPa} < S_b < 3000 \text{ MPa}$$

$$B = (S3109 - S108 - S89) \cdot \frac{\log S_b - 9}{\log 3} + S108 + S89$$

$$E_m = 10^B$$



Propriedades dos materiais das camadas

Expressões de Previsão do Módulo de Deformabilidade das Misturas Betuminosas

Método da Shell

$$S68 = 0,6 \cdot \log \left(\frac{1,37 \cdot V_b^2 - 1}{1,33 \cdot V_b - 1} \right)$$

$$S89 = 1,12 \cdot \frac{Sm3109 - Sm108}{\log 30}$$

$$Sm3109 = 10,82 - \frac{1,342 \cdot (100 - V_a)}{V_a + V_b}$$

$$Sm108 = 8 + 5,68 \times 10^{-3} \cdot V_a + 2,135 \times 10^{-4} \cdot V_a^2$$

Va – percentagem volumétrica de agregado (%)
Vb – percentagem volumétrica de betume (%)
Em – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa)
Sb – rigidez do betume (Pa)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Análise estrutural

Resumo dos dados

Resultados

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
5	System: 1: Aula exemplo													
6														
7			Modulus				Vertical	Vertical	Horz. (Shea	Horz. (Shear)				
8	Layer	Thickness	Elasticity	Poisson's		Load	Load	Stress	Load	Stress	Radius	X-Coordinate	Y-Coordinate	Shear
9	Number	(m)	(MPa)	Ratio		Number	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(m)	(m)	(m)	(Degrees)
10	1	0.22	4.00E+03	0.35		1	2.00E+01	5.70E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.06E-01	0.00E+00	-1.58E-01	0.00E+00
11	2	0.2	1.20E+02	0.3		2	2.00E+01	5.70E-01	0.00E+00	0.00E+00	1.06E-01	0.00E+00	1.58E-01	0.00E+00
12	3		6.00E+01	0.35										
13														
14						Stress	Stress	Stress	Strain	Strain	Strain	Displacement	Displacement	Displacement
15	Position	Layer	X-Coordinate	Y-Coordinate	Depth	XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
16	Number	Number	(m)	(m)	(m)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	µstrain	µstrain	µstrain	(µm)	(µm)	(µm)
17	1	1	0.00E+00	-1.58E-01	2.20E-01	6.55E-01	5.52E-01	-3.42E-02	1.19E+02	8.36E+01	-1.14E+02	0.00E+00	-1.23E+01	3.78E+02
18	2	1	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-01	6.58E-01	4.99E-01	-3.40E-02	1.24E+02	7.01E+01	-1.10E+02	0.00E+00	0.00E+00	3.87E+02
19	3	3	0.00E+00	-1.58E-01	4.21E-01	-4.94E-05	-1.01E-03	-1.84E-02	1.12E+02	9.09E+01	-3.01E+02	0.00E+00	-1.54E+01	3.31E+02
20	4	3	0.00E+00	0.00E+00	4.21E-01	8.85E-06	-7.48E-04	-1.94E-02	1.18E+02	1.01E+02	-3.20E+02	0.00E+00	0.00E+00	3.38E+02

Pontos para os quais se calcularam os esforços

Tensões calculadas

Extensões calculadas

Deslocamentos calculados



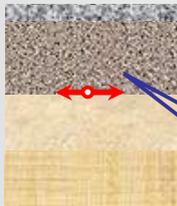
Análise estrutural

Resultados (exemplos)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

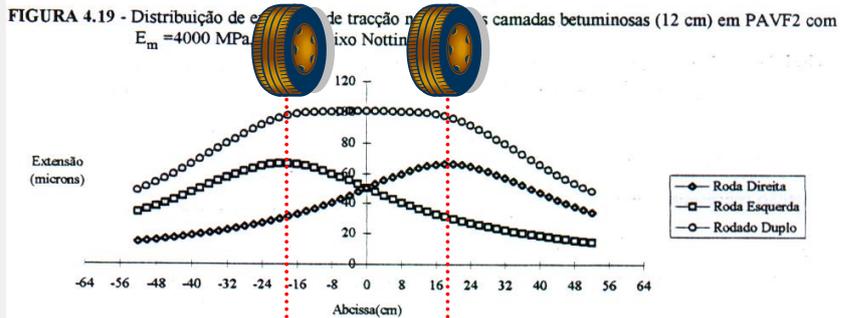
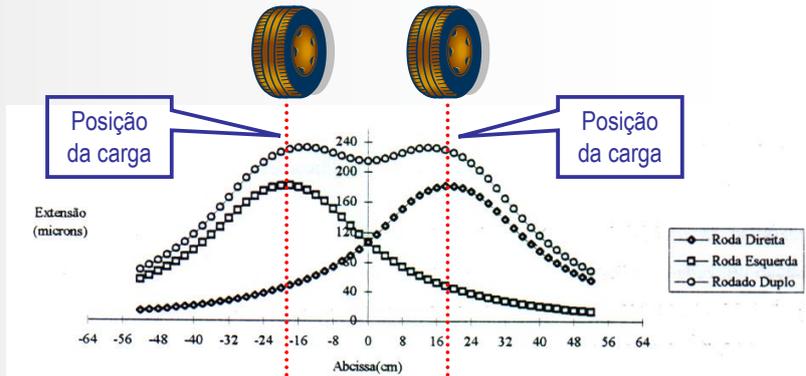
Menor espessura de camadas betuminosas

Maior espessura de camadas betuminosas



Camadas betuminosas

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Critérios de dimensionamento

Fendilhamento excessivo (com início nas zonas mais tracionadas das camadas ligadas)

Método da Universidade de Nottingham

Método da Shell

$$\log \varepsilon_t = \frac{14,39 \times \log V_b + 24,2 \times \log Tab - c - \log N}{5,13 \times \log V_b + 8,63 \times \log Tab - 15,8}$$

$$\varepsilon_t = \frac{0,856 \times V_b + 1,08}{E_m^{0,36} \cdot N^{0,2}}$$

ε_t – extensão de tração (em micro unidades – $\times 10^{-6}$)
 N – número de eixos padrão de 80 kN (milhões)
 V_b – percentagem volumétrica de betume
 Tab – temperatura de amolecimento “anel e bola”
 c – 48,82, para N provocando estado crítico
 c – 46,06, para N provocando estado de ruína

ε_t – extensão de tração (adimensional)
 N – número de eixos padrão de 80 kN
 V_b – percentagem volumétrica de betume
 E_m – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa (Pa)

ESTADO CRÍTICO:

10 mm de cavado de rodeira ou fendilhamento capilar no rasto das rodas (prob. de sobrevivência de 85%)

ESTADO DE RUÍNA:

20 mm de cavado de rodeira ou pele de crocodilo no rasto das rodas (prob. de sobrevivência de 50 a 60%)

COEFICIENTES DE AJUSTAMENTO:

Distribuição lateral do tráfego: x 2,5
 Repouso entre carregamentos: x 10 a x1,25 (x5 típico)
 Gradientes de temperatura: x 0,5 (temp. altas e/ou espessas camadas betuminosas)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Critérios de dimensionamento

Assentamento excessivo (com início à superfície do pavimento)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Método da Universidade de Nottingham

Método da Shell

$$\epsilon_z = \frac{A}{\left(\frac{N}{fr}\right)^c}$$

$$\epsilon_z = k_1 \cdot N^{-0,25}$$

ϵ_z – extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (em micro unidades – $\times 10^{-6}$)
 N – número de eixos padrão de 80 kN (milhões)
 fr – façor de indução de assentamento (MB: 1,5; MBD: 1,3; BD: 1,0)
 A – 250: Condições Críticas; 451,29: Condições de ruína
 c – 0,27, para N provocando estado crítico
 c – 0,28, para N provocando estado de ruína

ϵ_z – extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (adimensional)
 N – número de eixos padrão de 80 kN
 k_1 – $2,8 \times 10^{-2}$ (50% prob. de sobrevivência)
 $2,1 \times 10^{-2}$ (85% prob. de sobrevivência)
 $1,8 \times 10^{-2}$ (95% prob. de sobrevivência)



Reabilitação de Pavimentos Rodoviários: Tecnologias e avaliação estrutural

Conteúdo Programático [14 h]:

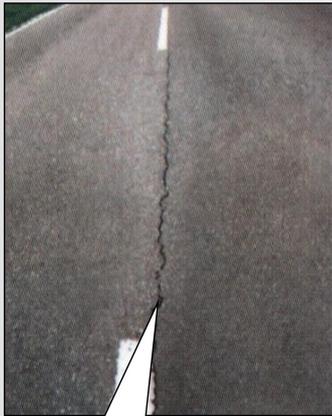
- Técnicas de Reabilitação Estrutural de Pavimentos Rodoviários

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



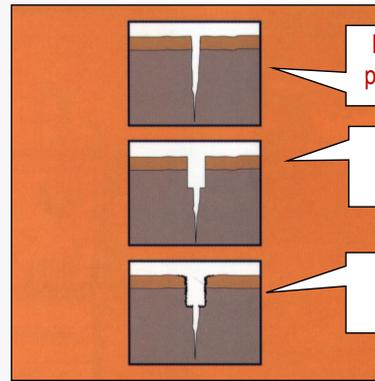
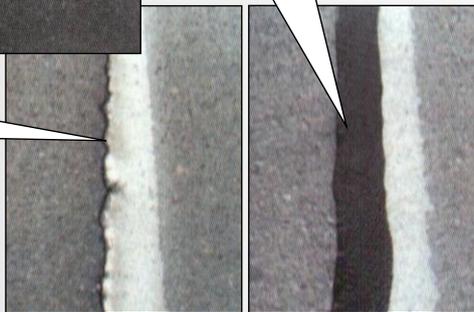
Ações de Conservação Corrente: selagem de fendas com serragem

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Fenda irregular antes da selagem

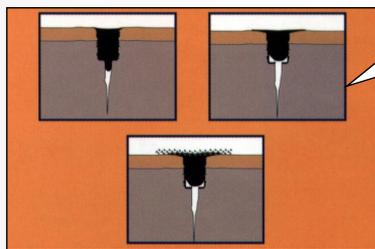
Fenda após reparação



Fenda no pavimento

Serragem da fenda: formação de junta

Serragem da fenda: formação de junta



Selagem e tratamento da textura



Ações de Conservação Corrente: selagem de fendas e juntas

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)





Ações de Conservação Corrente: selagem de fendas e juntas

Silvino Capitação, Prof. do ISEC (cabitao@isec.pt)



Silvino Capitação (DEC-ISEC)



Ações de Conservação Corrente: selagem de fendas com serragem e juntas

Silvino Capitação, Prof. do ISEC (cabitao@isec.pt)



Equipamento de serragem de juntas



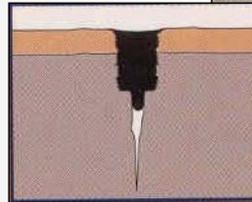
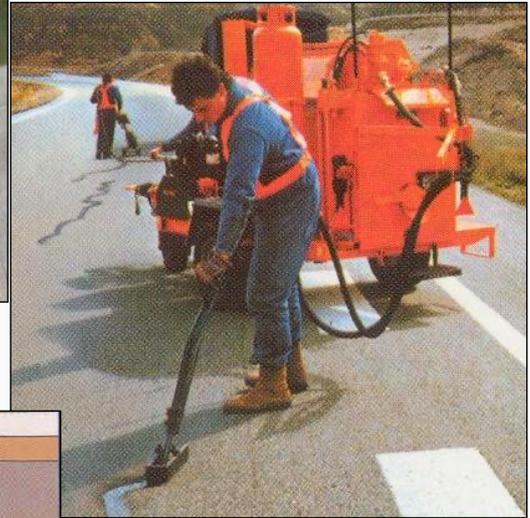
Equipamento para aquecimento dos bordos da junta

Silvino Capitação (DEC-ISEC)



Ações de Conservação Corrente:
selagem de fendas e juntas

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Ações de Conservação Corrente:
selagem de fendas e juntas

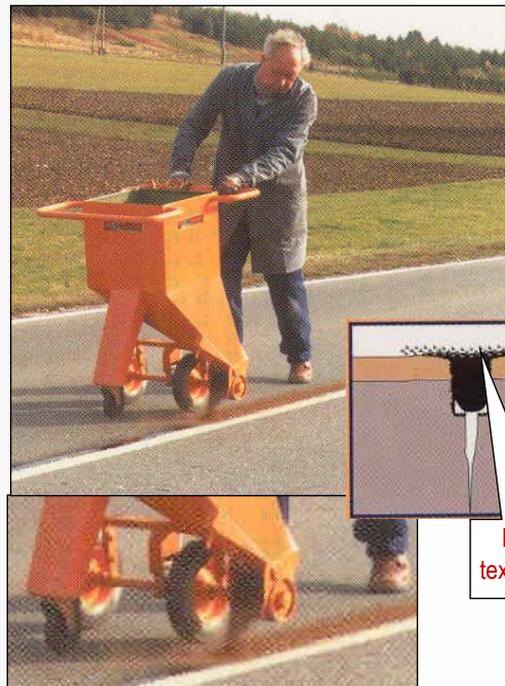
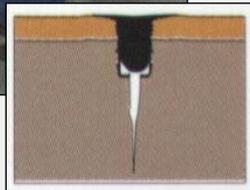
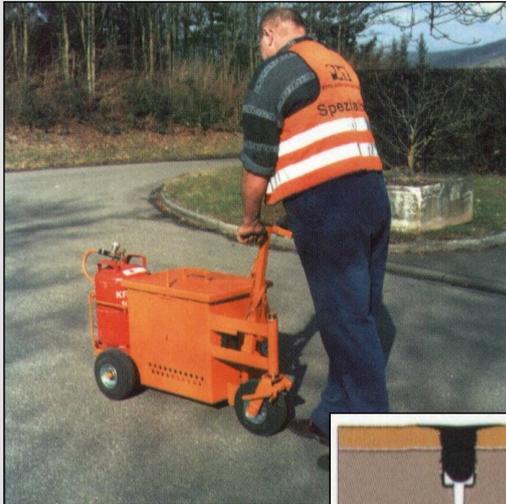
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)





Ações de Conservação Corrente: selagem de fendas e juntas

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Reposição da textura superficial



Ações de Conservação Corrente: Reparação de covas e similares

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

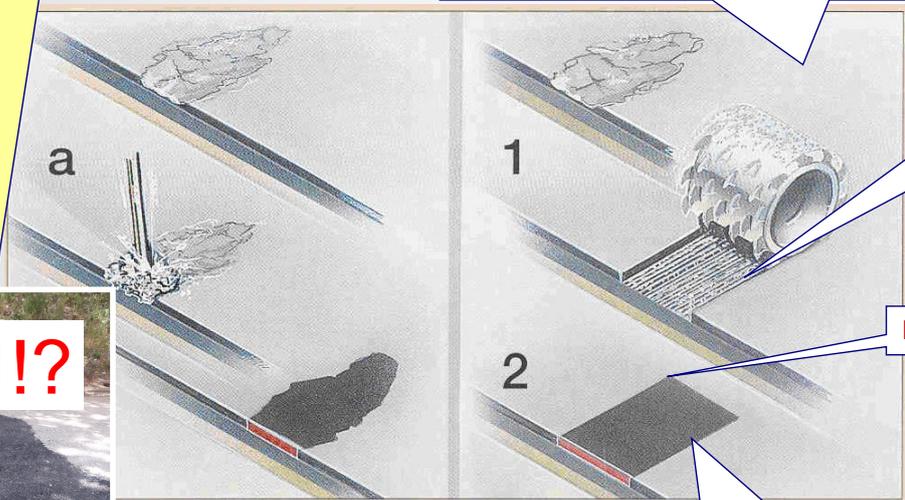
Reparação deficiente dum a cova (bordo irregular)

Fresagem pontual para saneamento dos materiais degradados (conferir uma forma rectangular ao contorno da reparação)

Limpeza com jacto de ar e aplicação de rega de colagem (incluindo os bordos)

Bordos verticais

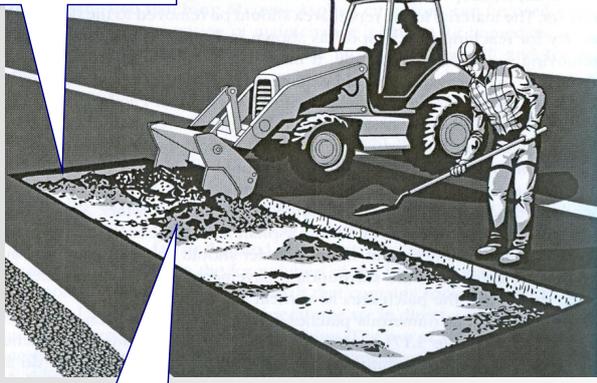
Colocação e compactação do material



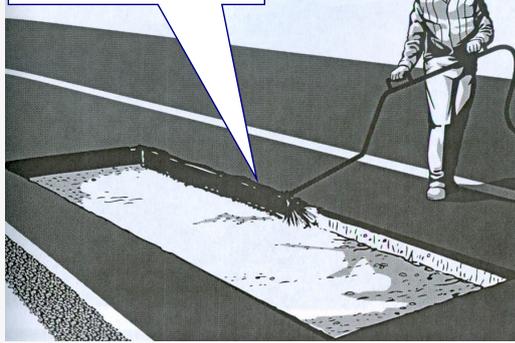
Ações de Conservação Corrente:
Reparação de covas e similares

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

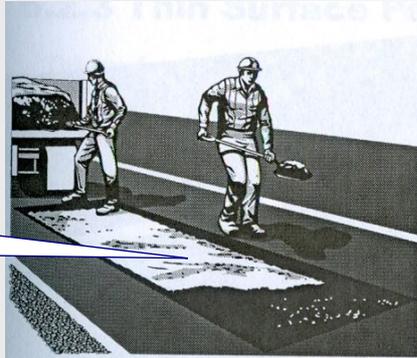
Bordos verticais



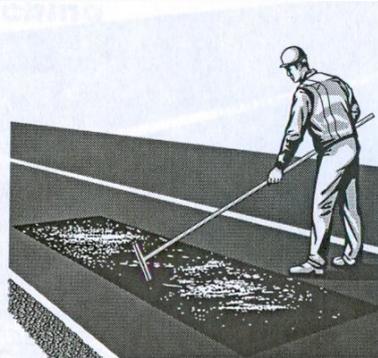
Aplicação de rega de colagem com emulsão



Remoção do material degradado e limpeza com jato de ar



Aplicação de mistura betuminosa



Silvino Capitão (DEC-ISEC)

63

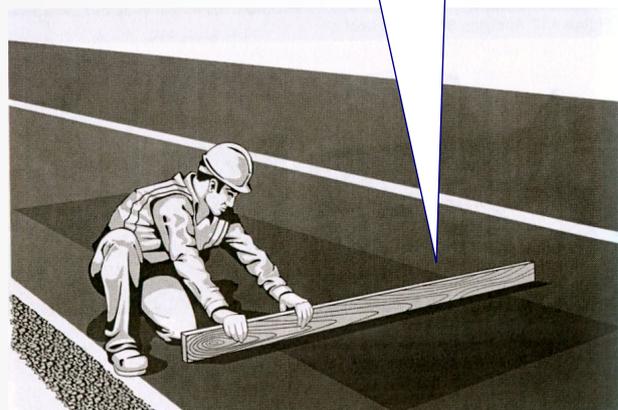
Ações de Conservação Corrente:
Reparação de covas e similares

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Colocação e compactação do material



Verificação do nivelamento da superfície



Silvino Capitão (DEC-ISEC)

64



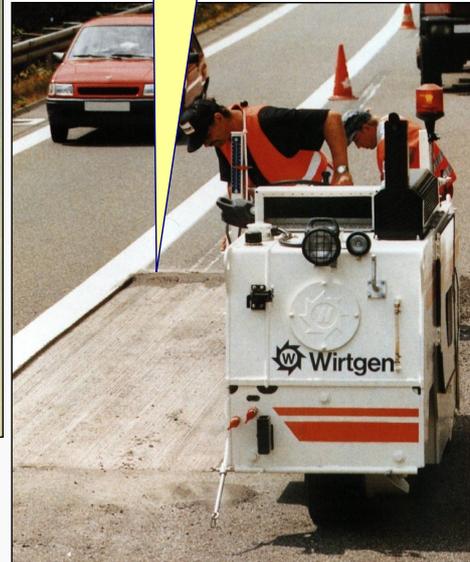
Ações de Conservação Corrente: Reparação de covas e similares

Saneamento a frio do material degradado: fresagem

Bordo não vertical



A fresagem através das extremidades de pistas individuais assegura a produção de uma borda perpendicular ao pavimento existente.



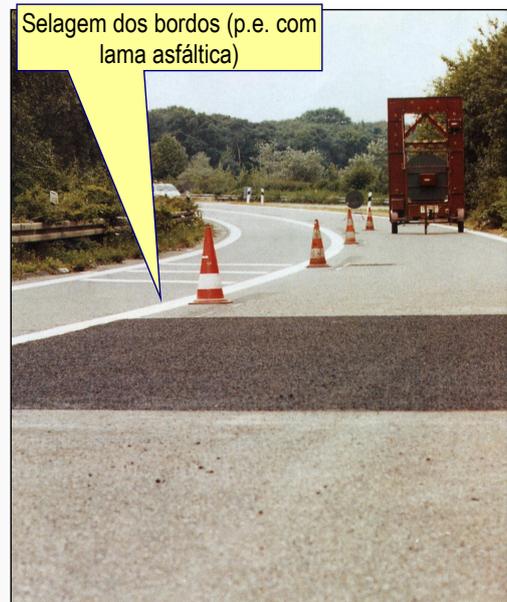
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Ações de Conservação Corrente: Reparação de covas e similares

Limpeza da interface com a nova camada e aplicação de rega de colagem

Colocação e compactação do material de reparação



Selagem dos bordos (p.e. com lama asfáltica)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Ações de Conservação Corrente:
Reparação de covas e similares

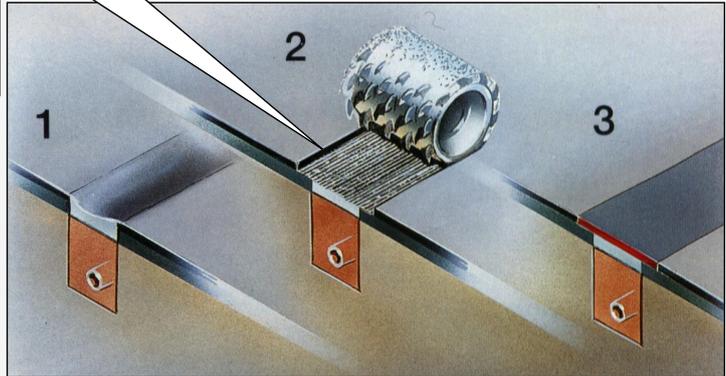


Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Largura superior à da vala

Compactação do material novo

Fresagem da zona da vala numa largura superior a esta



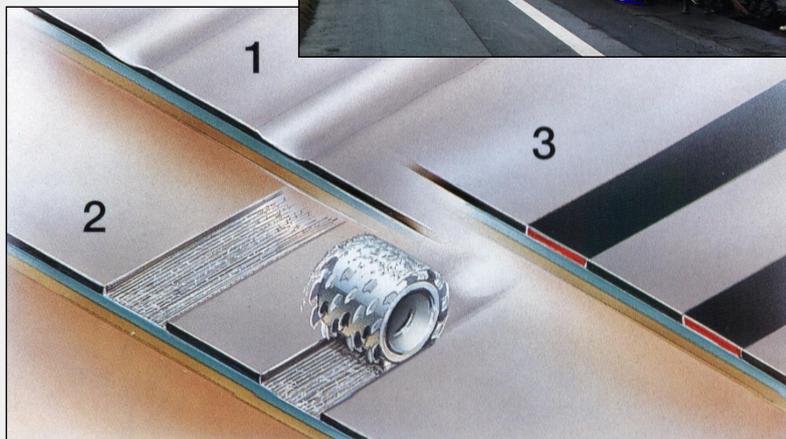
Ações de Conservação Corrente:
Reparação de covas e similares



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Fresadora que permite o corte em pequena largura

Fresagem de zona deformada do pavimento (rodeira)





Ações de Conservação Corrente:
Reparação de covas e similares

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Geometria do corte que favorece a compactação na zona do bordo



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: microaglomerado a frio





Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: microaglomerado a frio

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Quadro 14.03.4d - Tratamentos superficiais									
Requisitos/Propriedades da mistura									
Requisitos/Propriedades	Referência normativa	Condições específicas de ensaio/designação do ensaio	Unid.	Tipo de mistura					
				Microaglomerado betuminoso a frio			Slurry seal		
				Simple	Duplo 1ª aplicação	Duplo 2ª aplicação	Simple	Duplo 1ª aplicação	Duplo 2ª aplicação
				rubrica 14.03.4.1.1.1	rubrica 14.04.4.1.1.2	rubrica 14.03.4.1.2.1	rubrica 14.03.4.1.2.2		
Percentagem Ligante residual	EN 12274-1 ¹⁴ EN 12274-2	Extração do ligante de acordo com a EN 12697-1	%	≥ 7	≥ 8	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 7
Determinação do desgaste - perda máxima	EN12274-5	Ensaio abrasivo com roda molhada (WTAT)	g/m ²	≤ 600			≤ 800		
Taxa média de aplicação	EN12274-6	-	kg/m ²	8 a 11	5 a 8	11 a 14	8 a 11	5 a 8	8 a 11
Percentagem de água em relação ao agregado	EN12274-3	Ensaio de consistência	%	10 a 15	10 a 20	10 a 15	10 a 20	10 a 15	10 a 15
Adesividade da mistura	EN2274-1 ¹⁴ EN12274-7	Ensaio de abrasão com agitação; determinação da baridade de acordo com a EN12697-6	%	A declarar					
Para situações de rápida abertura ao tráfego é ainda exigida a observância:									
Coesão agregado/ligante aos 30 min	EN12274-4	Ensaio de coesão	MPa	≥ 12					
Coesão agregado/ligante aos 60 min	EN12274-4	Ensaio de coesão	MPa	≥ 20					
(a) - Amostragem									



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: microaglomerado a frio





Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: microaglomerado a frio



Silvino

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: microaglomerado a frio

Agregados: 0/6 (ou 0/10); 8 a 12% de finos

Ligante: emulsão (preferível modificada); 6 a 9% ligante residual

Descrição: camada simples ou dupla; < 1,5 cm esp. média; não necessita de compactação

Em tempo quente, molhagem prévia do pavimento para evitar rotura muito rápida da emulsão e melhorar a aderência (não se aplica rega de colgem)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

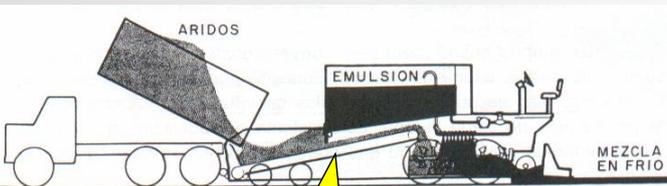


Fig. 11 MEZCLADOR MÓVIL PARA LA FABRICACIÓN Y EXTENSIÓN DE MEZCLAS AGREGADAS Y EMULSIONADAS EN FRÍO



Máquina de carregamento frontal (maior rendimento)



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: microaglomerado a frio

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Aplicação de microaglomerado a frio

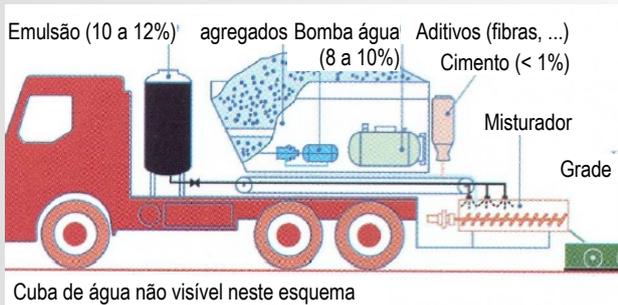


Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: microaglomerado a frio

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Aspectos Positivos

- Facilidade de execução
- Quase ausência de rejeição de agregados
- Permite aderência razoável
- Permite impermeabilidade razoável
- Emissão de ruído moderada
- Bom compromisso técnico-económico



Silvino Capitão (DEC-ISEC)

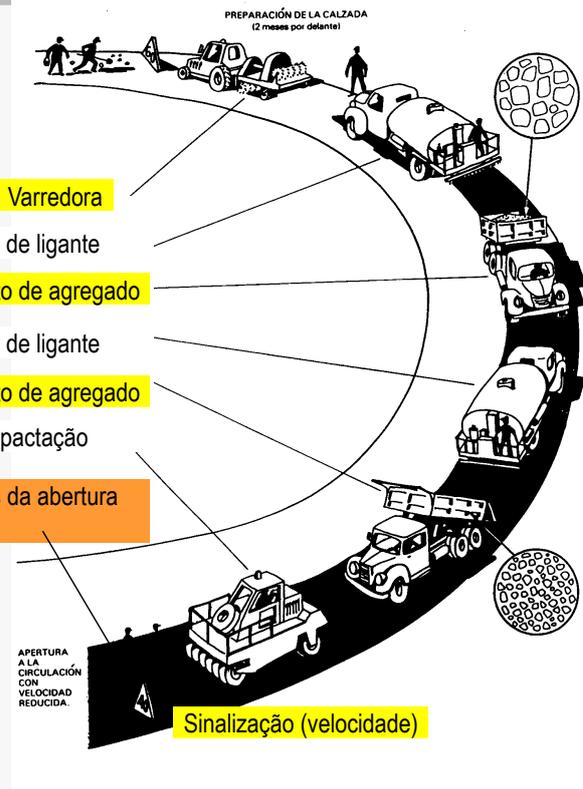
Aspectos Negativos

- Fracos resultados na melhoria da regularidade do pavimento
- Custos satisfatórios mas mais caro que o revestimento superficial (2,5 a 3 x)



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: revestimentos superficiais betuminosos

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



- ◆ Espessura < 1 cm
- ◆ Económico
- ◆ Bem adaptado para vias de tráfego ligeiro (++)

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: revestimentos superficiais betuminosos

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Ordem de colocação	Fases de execução	Estado da Superfície
2 1	Simple	4/6, 6/10, 10/14
3 2 1	Simple c/ duplo espalham. agregado	6/10 + 2/4, 10/14 + 4/6
4 3 2 1	Duplo	6/10 + 2/4, 10/14 + 4/6
3 2 1	Sandwich ou inverso	4/6 + 2/4, 6/10 + 2/4, 10/14 + 4/6



- Impermeabiliza bem
- Boa rugosidade
- Baixo custo

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: revestimentos superficiais betuminosos

Condições de utilização de revestimentos superficiais

Ligantes utilizados:

Ligantes modificados:

- Emulsão betuminosa modificada
- Betume quente
- Betume fluidificado

Localização	Pavimento	Tráfego			
		TMDA>300	50<TMDA<300	10<TMDA<50	TMDA<10
Interurbana	Liso sem exsudação	LAA 10/14-4/6	LA 6/10 LAA 6/10-2/4 LAA 10/14-4/6	LA 6/10	LA 4/6 LA 6/10
	Rugoso	LAla 10/14-4/6 LA 6/10	LAla 6/10-2/4 LA 6/10	LAla 6/10-2/4 LA 6/10	LAla 6/10-2/4 LA 4/6 6/10)
	Muito rugoso	LA 4/6	LA 4/6	LA 4/6	LA 4/6
	Heterogéneo permeável	não aconselhado	LAla 10/14-4/6	LAla 6/10-2/4	LAla 6/10-2/4
	Heterogéneo c/exsudação	não aconselhado	Ala 10/14-4/6	Ala 6/10-2/4	Ala 6/10- 2/4
Urbana	Liso sem exsudação	não aconselhado	LA 6/10 LAA 6/10-2/4	LA 6/10	LA 4/6
	Rugoso	não aconselhado	LAla 6/10-2/4 LA 6/10	LAla 6/10-2/4 LA 2/4	LAla 6/10-2/4 LA 2/4
	Heterogéneo permeável	não aconselhado	LAla 6/10-2/4	LAla 6/10-2/4	LAla 6/10-2/4
	Heterogéneo c/ exsudação	não aconselhado	Ala 6/10-2/4	Ala 6/10-2/4	Ala 6/10-2/4

Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: revestimentos superficiais betuminosos

Quadro 14.03.4e - Tratamentos superficiais		
Revestimento superficial simples - Taxas de aplicação dos materiais		
Revestimento superficial simples		
rubrica 14.03.4.1.3.1		
dimensão do agregado (mm)	Taxa de aplicação ^(a)	
	agregado (l/m ²)	ligante residual (kg/m ²)
4 / 6,3	6 - 7	0,9
6,3 / 10	8 - 9	1,2
10 / 14	11 - 13	1,5

(a) - As taxas de aplicação variam conforme o estado da superfície de aplicação, as dimensões do agregado e tipo de ligante, são indicados valores de referência para superfícies homogêneas de textura uniforme/regular



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: revestimentos superficiais betuminosos

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Quadro 14.03.4g - Tratamentos superficiais - Revestimentos superficial duplo - Taxas de aplicação dos materiais

Revestimento superficial duplo					
rubrica 14.03.4.1.3.3					
1ª aplicação			2ª aplicação		
dimensão do agregado (mm)	Taxa de aplicação ^(a)		dimensão do agregado (mm)	Taxa de aplicação ^(a)	
	agregado (l/m ²)	ligante residual (kg/m ²)		Agregado (l/m ²)	ligante residual (kg/m ²)
6,3 / 10	7 - 8	0,7	2 / 4	4 - 5	0,9
10 / 14	10 - 11	0,9	4 / 6,3	6 - 7	1,0

(a) - As taxas de aplicação variam conforme o estado da superfície de aplicação, as dimensões do agregado e tipo de ligante, são indicados valores de referência para superfícies homogêneas de textura uniforme/regular



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: revestimentos superficiais betuminosos

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Espalhamento de agregado





Gravilhador **Auto-gravilhador**

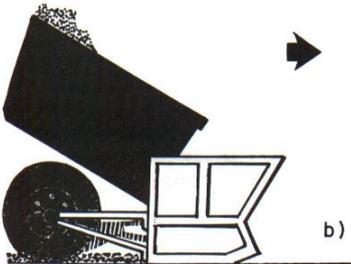
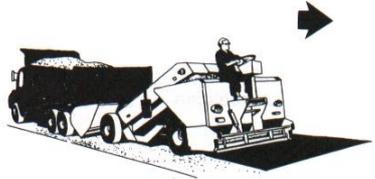
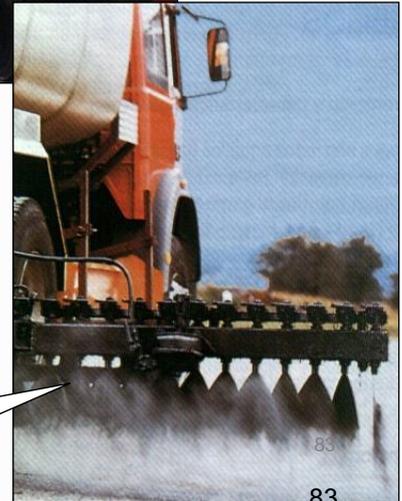
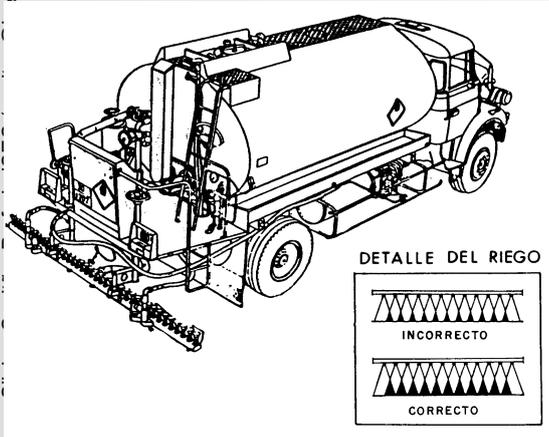



Fig. 4 ESQUEMAS DE DIVERSOS TIPOS DE EXTENDEADORAS DE GRAVILLAS: a) DE COMPUERTA ACOPLADA A LA CAJA DEL CAMIÓN; b) CON TOLVA EMPUJADA POR EL CAMIÓN; c) AUTOPROPULSADA



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: revestimentos superficiais betuminosos

Espalhamento de ligante



Em geral, emulsão de betume modificado

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

83



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: revestimentos superficiais betuminosos

Aspectos Positivos

- Facilidade de execução
- Boa rugosidade geométrica
- Impermeabilidade
- Aderência em idade jovem

Aspectos Negativos

- Execução sensível às condições climáticas
- Risco de rejeição de agregados
- Ruído de circulação
- Maior desgaste dos pneus dos veículos e maior consumo de combustível
- Fracos resultados na melhoria da regularidade do pavimento

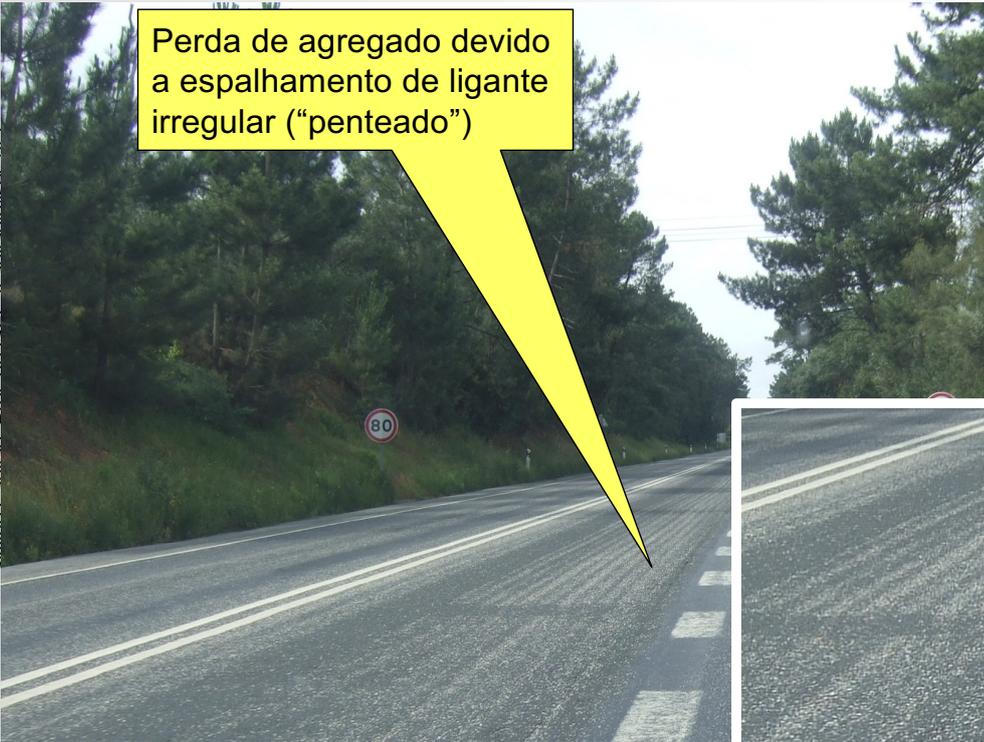
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

84



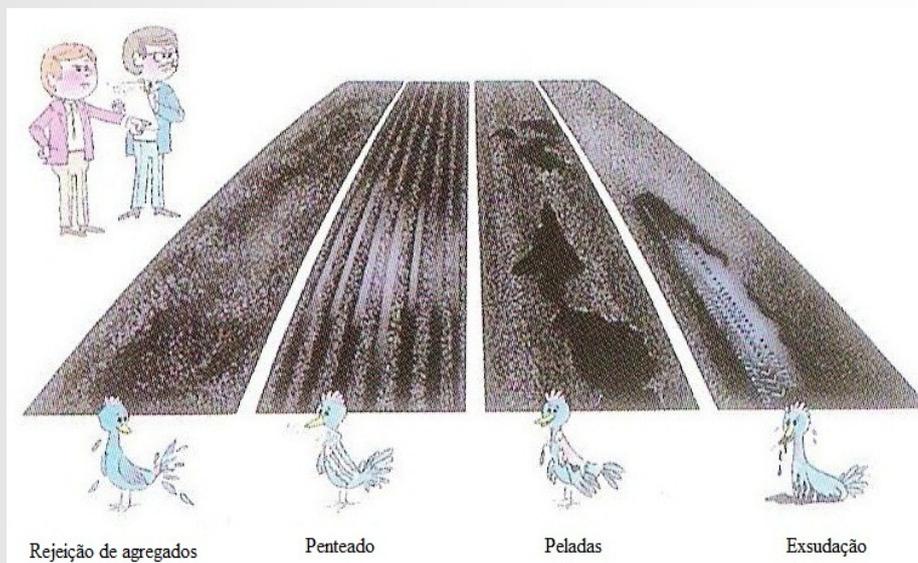
Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: revestimentos superficiais betuminosos



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: revestimentos superficiais betuminosos



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais

Características das técnicas de reabilitação funcional

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isc.pt)

★ Melhor

★ Pior

Económico

Características ou comportamento obtido	Técnica utilizada					
	Revestimento Superficial ★	Microbetão a frio	Termo regeneração	Betão betuminoso drenante	Betão betuminoso muito delgado ★	Betão betuminoso ultra delgado ★
Aderência imediata	++	+	+	+	++	++
Aderência após 3 anos	+	+	+	++	++	++
Impermeabilização	++	+	+	0	+	++
Ruído de circulação	0	+	++	++	++	+
Melhoria da regularidade longitudinal	0	0	+	++	+	+
Melhoria da regularidade transversal	0	0	++	++	+	+
Aspecto visual	0	0	++	++	++	++

0: ponto fraco; +: médio; ++: ponto forte

Técnicas de reabilitação de pavimentos (influência estrutural?)

Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais

Microbetão Betuminoso Rugoso:

Espessura: 2,5 a 3,5 cm

Agregados: 0/10 (descontinuidade em 2/6)

Ligante: betume modificado com polímeros

Rega de colagem: abundante (para aumentar impermeabilidade)

Fabrico e colocação: central a temperatura 160 – 180°C / pavimentadora / cilindros rolos estáticos

Características: boa regularidade e excelente aderência



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isc.pt)

Mistura	Dimensão máxima do agregado (mm)	Percentagem de borracha adicionada ao betume (%)	Percentagem de ligante na mistura (%)	Porosidade da mistura (%)
MBR-BMB	14,0	18-22	8-9	3,5-6,5
MBA-BMB	10,0	18-22	9-10	12-18



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: reperfilamento

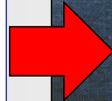
Agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão (eventualmente em duas camadas)

Agregados: 0/20
Ligante: C 57 B 6 (ECL - 1h)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Reperfilamento com "Pavimentadora" de intervenção rápida

Ação que também pode ser utilizada em trabalhos de reabilitação estrutural



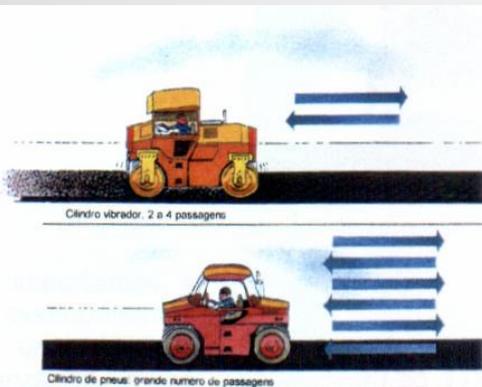
O reperfilamento pode ser, nalguns casos, conseguido por fresagens localizadas



Técnicas de Reabilitação das Características Superficiais: reperfilamento

Agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão (eventualmente em duas camadas)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



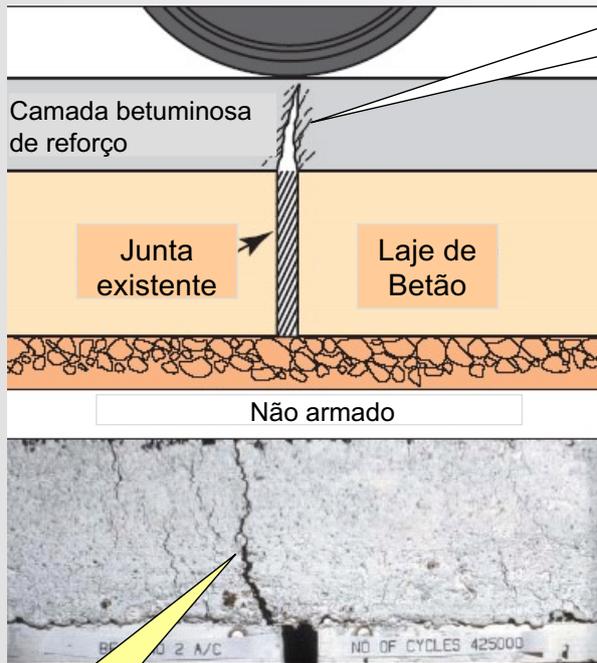
Adapta-se bem a elevada deformabilidade do suporte e a variações de espessura

Abertura ao tráfego relativamente curta



Técnicas antipropagação de fendas

Fenda originada pela propagação dos movimentos dos bordos da junta (ou fenda) existentes na camada subjacente



Técnicas “anti-fendas” mais correntes (a realizar antes da execução do reforço)

- Eliminação das fendas (fresagem do material fendilhado existente)
- Reciclagem ou regeneração da camada fendilhada
- Interposição de materiais que reduzam os esforços de corte induzidos pela actividade das fendas
 - SAMI – Stress Absorbing Membrane Interlayer
 - Grelhas e Armaduras
 - Geotextil impregnado com betume

Fendas que se propagaram

Junta existente

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

Técnicas antipropagação de fendas

Eliminação das fendas por fresagem



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



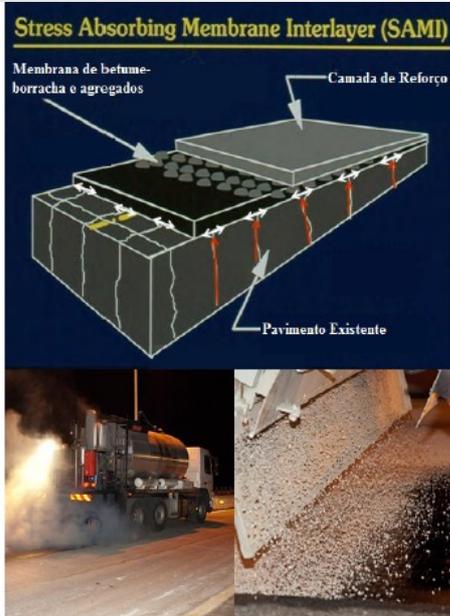
Técnicas antipropagação de fendas

SAMI – Stress Absorbing Interface

Argamassa betuminosa

Camada flexível com rigidez muito baixa

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Fendas que se propagaram até à superfície

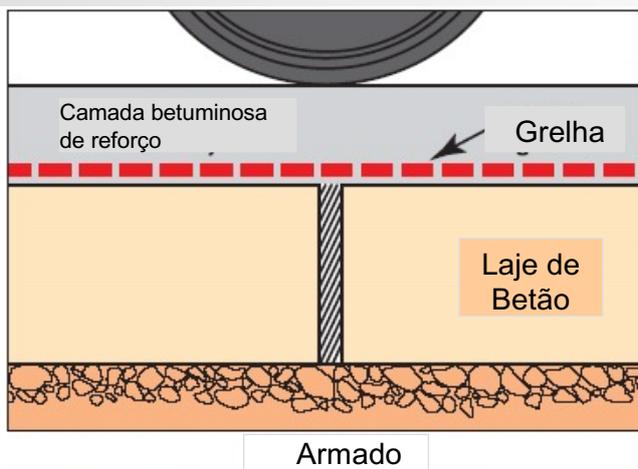


Silvino Capitão (DEC-ISEC)

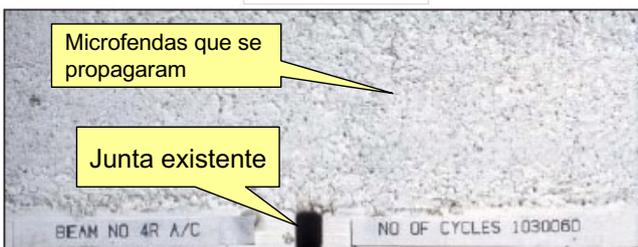


Técnicas antipropagação de fendas

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Colocação de grelha sob reforço de pavimento com juntas



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas antipropagação de fendas

Armaduras e Grelhas



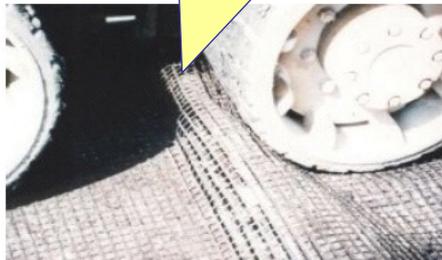
Absorve esforços gerados nos bordos das fendas

- Materiais:
- Polipropileno
 - polietileno
 - Poliester
 - Fibras (de vidro)
 - Metal

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Colocação deficiente de grelha



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas antipropagação de fendas

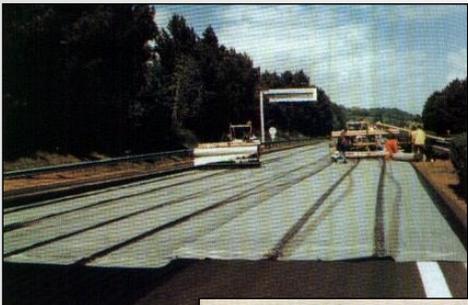
Geotextil impregnado com betume puro ou modificado



Camada flexível com rigidez muito baixa

Difícil de utilizar em traçados sinuosos; problemas de interação com o tráfego, incluindo o de obra

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Em geral, emulsão catiónica de rotura rápida, com elevada viscosidade

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

Vantagens ambientais

- ▶ Economizar nos materiais (ligante e agregados)
- ▶ Limitar a colocação em depósito de resíduos
- ▶ Redução das operações de transporte de agregados

Vantagens técnicas

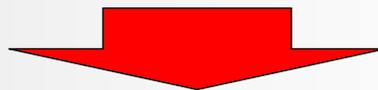
- ▶ Controlo da cota final do pavimento
- ▶ Correção do perfil longitudinal e transversal
- ▶ Eliminação do fendilhamento ou redução do problema
- ▶ Custos globalmente inferiores



Técnicas de reciclagem de pavimentos

A solução de reciclagem ideal:

- ▶ Reabilitar as características estruturais e funcionais do pavimento degradado
- ▶ Minimizar a rejeição de material a levar a vazadouro
- ▶ Minimizar a utilização de novos ligantes (em particular os betuminosos)
- ▶ Utilizar resíduos industriais, quer como agregado, quer como ligante



Com a evolução tecnológica, o aumento da utilização de técnicas de reciclagem e as restrições de carácter ambiental, a RECICLAGEM assumirá maior importância



Técnicas de reciclagem de pavimentos

Factores a considerar no âmbito da reciclagem de pavimentos:

1. Tráfego

2. Deflexão

3. Materiais a tratar:

- Solos e materiais granulares
- Misturas betuminosas (a quente ou a frio)
- Agregado estabilizado com cimento ou emulsão
- Semipenetração e revestimento superficial betuminoso
- Microaglomerado betuminoso
- Betão de cimento

4. Local da execução:

- No próprio local (*in situ*)
- Em central



Técnicas de reciclagem de pavimentos

Factores a considerar no âmbito da reciclagem de pavimentos:

5. Temperatura de produção:

- A quente
- Semi-quente
- A frio

6. Ligantes a utilizar:

- Cimento | cal | cinzas volantes
- Betume | betume-espuma | emulsão betuminosa
- Rejuvenescedor | biocatalizador

7. Materiais corretivos:

- Materiais granulares
- Subprodutos
- Misturas betuminosas a quente



Técnicas de reciclagem de pavimentos

Habitualmente são considerados seguintes processos de reciclagem [Martinho, 2005]:

1. Reciclagem *in situ*, a frio, com cimento
2. Reciclagem *in situ*, a frio, com emulsão betuminosa
3. Reciclagem *in situ*, a frio, com betume-espuma
4. Reciclagem *in situ*, a quente, com betume /rejuven.
5. Reciclagem em central, a frio, com emulsão betuminosa
6. Reciclagem em central, a frio, com betume-espuma
7. Reciclagem em central, semi-quente, com emulsão betuminosa
8. Reciclagem em central, a quente, com betume

Com base nas seguintes variáveis:

- o Local e Execução
- o Temperatura de produção
- o Ligantes | aditivos utilizados



Técnicas de reciclagem de pavimentos

Vantagens das técnicas de reciclagem *in situ*:

- o Evita o transporte dos materiais fresados para outro local
- o Reduz a degradação dos pavimentos das estradas utilizadas para a obra
- o Dispensa depósitos provisórios
- o Em alguns casos tem menores consumos energéticos
- o Provoca menor ruído e menor poluição atmosférica em alguns processos
- o O tempo de execução do processo é menor
- o O investimento total em equipamentos é inferior ao do processo em central
- o Aproveita na íntegra todos os materiais existentes no pavimentos

E as técnicas “em central”?

- Custo associado ao transporte
- Melhoria na qualidade do material final
- Mais facilidade em receber e armazenar materiais num único local

Desvantagens das técnicas de reciclagem *in situ*:

- o O rigor do tratamento não pode ser igual ao longo de toda a obra
- o A heterogeneidade das camadas existentes prejudica o rigor das fórmulas de trabalho
- o As condições locais de utilização podem afectar a qualidade do trabalho
- o Processo dependente das condições meteorológicas
- o Equipamentos complexos sujeitos a avarias no local da obra, com acesso às oficinas lento
- o As interferências com o tráfego poderão ser maiores nalguns casos



Técnicas de reciclagem de pavimentos

1. Reciclagem *in situ*, a frio, com cimento

Aplicabilidade

- ▶ Reabilitação estrutural forte de pavimentos com grande espessura de material granular

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

1. Reciclagem *in situ*, a frio, com cimento



Camadas betuminosas poderão ser executadas com Betume Modificado com Borracha (BMB)

- 4 cm Camada de desgaste
- 12 cm Camada de regularização
- 25 cm Camada de base tratada com cimento

[in Wirtgen]

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

1. Reciclagem *in situ*, a frio, com cimento

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



[in Wirtgen]



Técnicas de reciclagem de pavimentos

1. Reciclagem *in situ*, a frio, com cimento

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



[in Wirtgen]

Trem de construção adicional:
Cilindro + motoniveladora + cilindro de pneus





Técnicas de reciclagem de pavimentos

2. Reciclagem in situ, a frio, com emulsão betuminosa

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Aplicabilidade

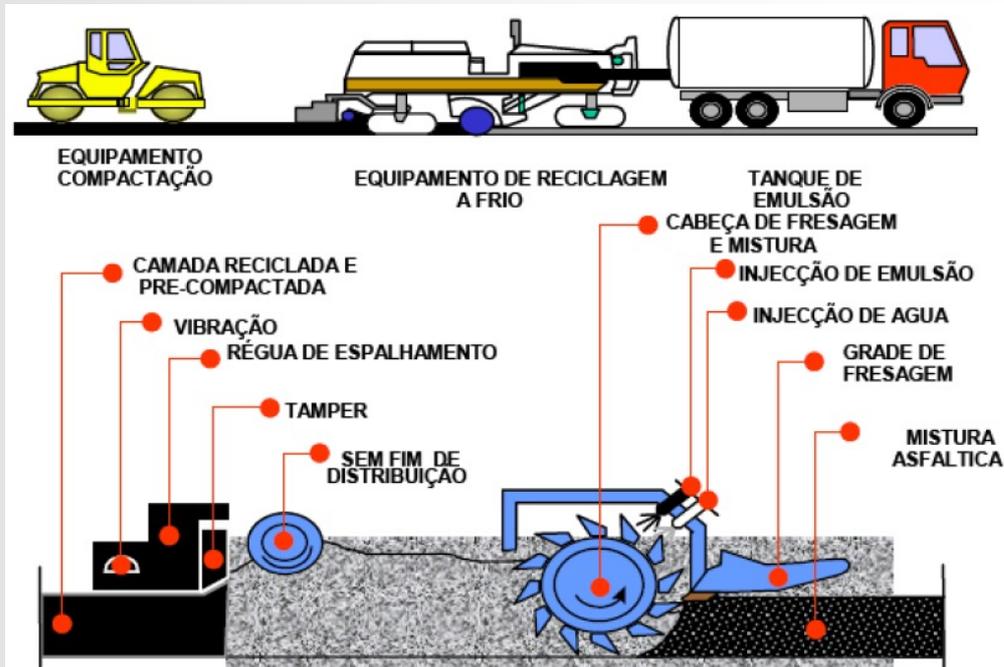
- ▶ Aproveitamento do material de pavimentos degradados (granular e/ou betuminoso)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

2. Reciclagem in situ, a frio, com emulsão betuminosa

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)





Técnicas de reciclagem de pavimentos

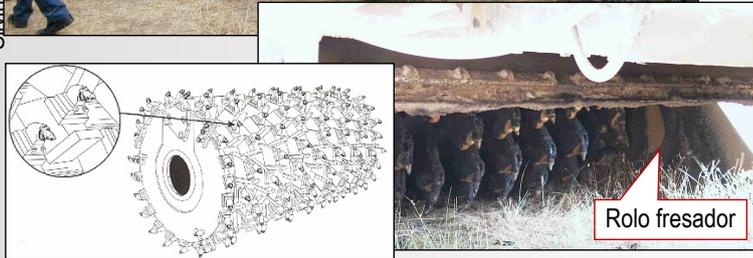
2. Reciclagem *in situ*, a frio, com emulsão betuminosa



Silvino Capitão, Prof. do ISEC. (capitao@isec.pt)



Entrada de água e emulsão



Rolo fresador

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

2. Reciclagem *in situ*, a frio, com emulsão betuminosa



Camada betuminosa reciclada *in situ* (~ 2 dias de idade)



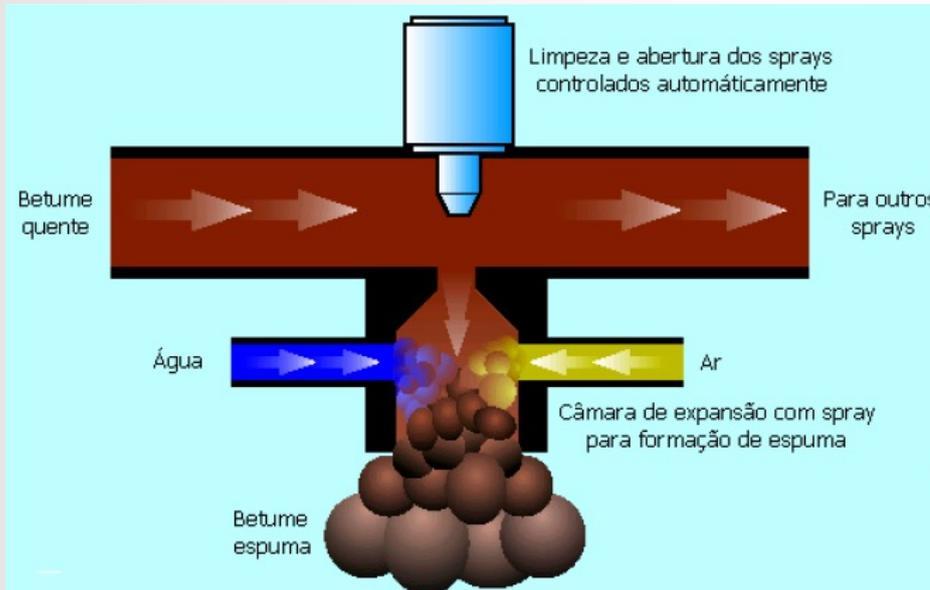
Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

3. Reciclagem *in situ*, a frio, com betume-espuma

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

3. Reciclagem *in situ*, a frio, com betume-espuma

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

4. Reciclagem *in situ*, a quente, com betume / rejuvenescido

Adequada para reabilitar defeitos da superfície e a descolagem da camada de desgaste, ou reabilitar a via da direita ("via de lentos") que se degrada mais rapidamente

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

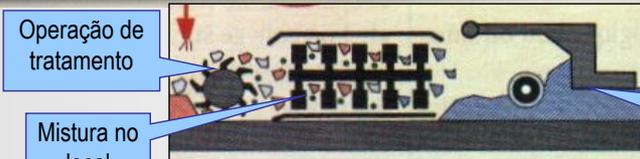
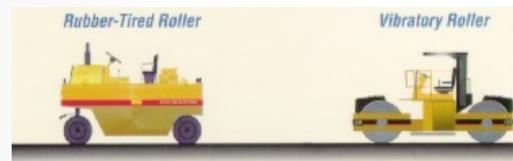
Aquecimento (série de painéis radiantes)



Tratamento, Mistura e Espalhamento



Compactação



Operação de tratamento

Mistura no local

Mesa da pavimentadora

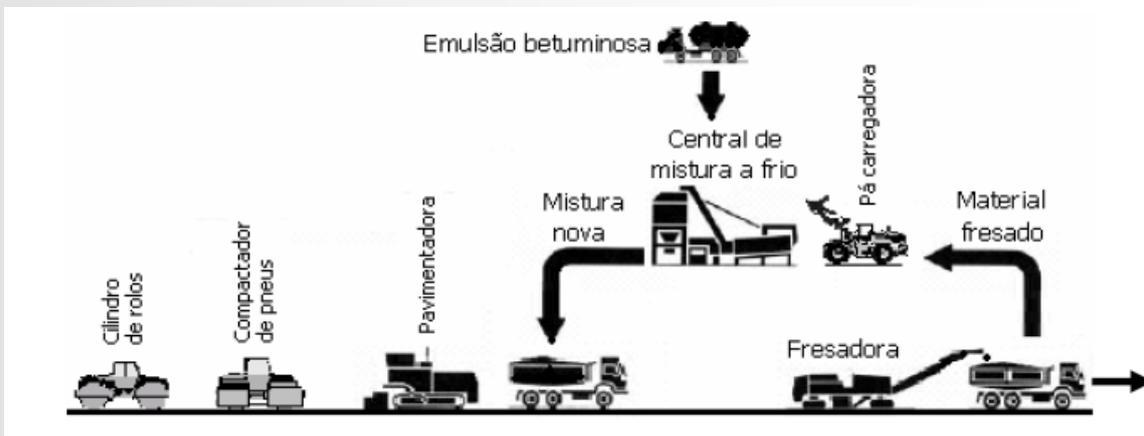
Silvino Capitão (DEC ISEC)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

5. Reciclagem em central, a frio, com emulsão betuminosa

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



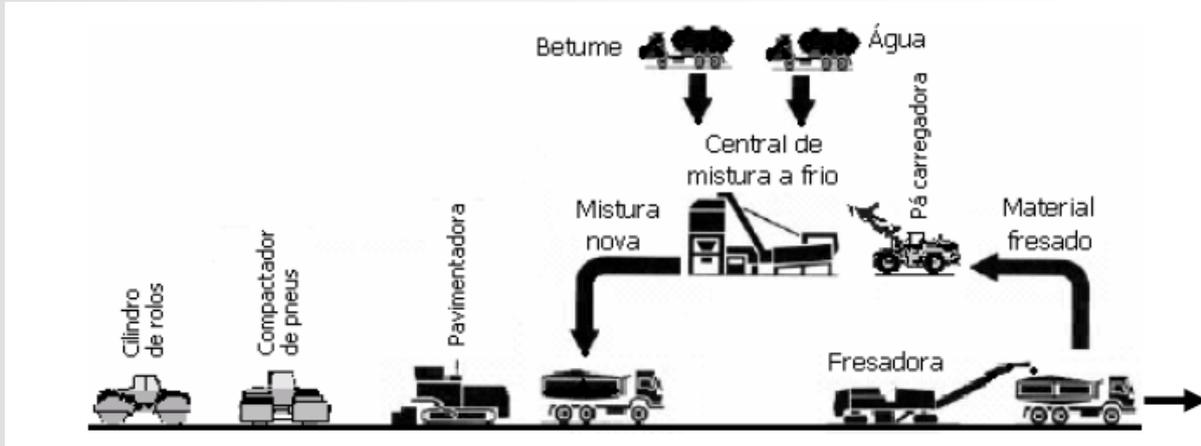
Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

6. Reciclagem em central, a frio, com betume-espuma

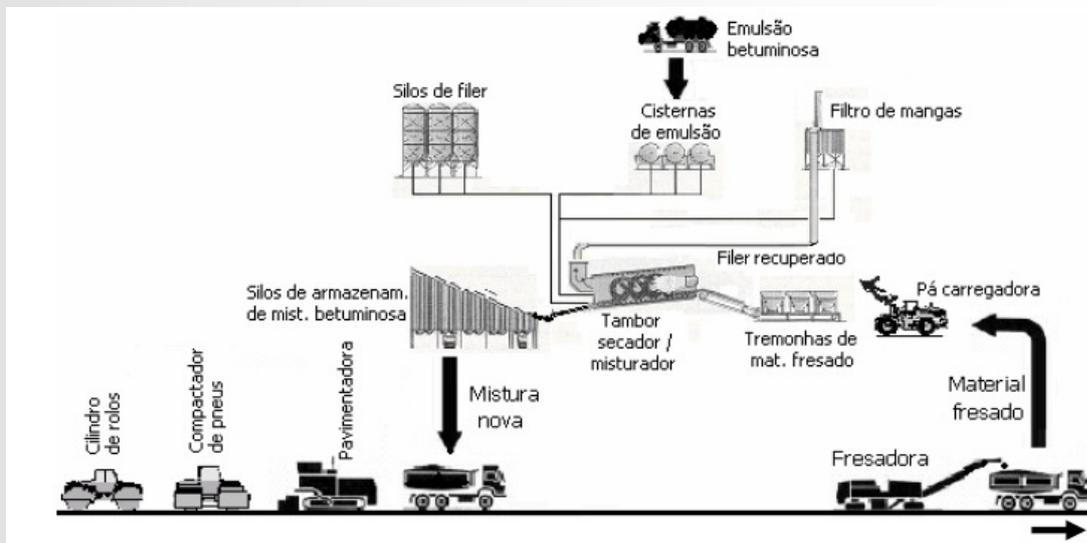
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

7. Reciclagem em central, semi-quente, com emulsão betuminosa

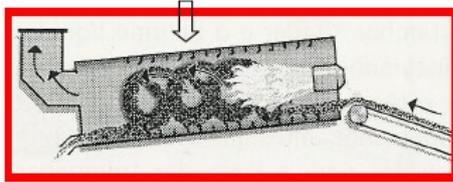
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



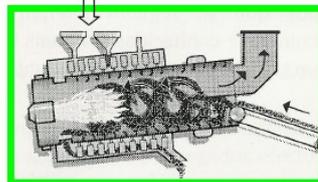


Técnicas de reciclagem de pavimentos

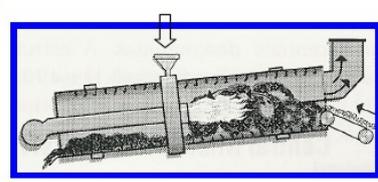
8. Reciclagem em central, a quente, com betume



Material fresado adicionado no meio do tambor-secador-msturador

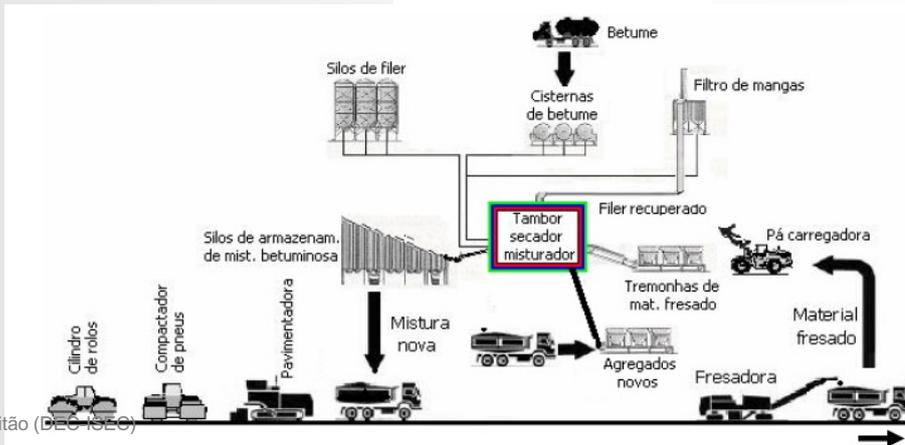


Material fresado adicionado num invólucro exterior (duplo tambor)



Material fresado adicionado num tambor com fluxo contracorrente

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



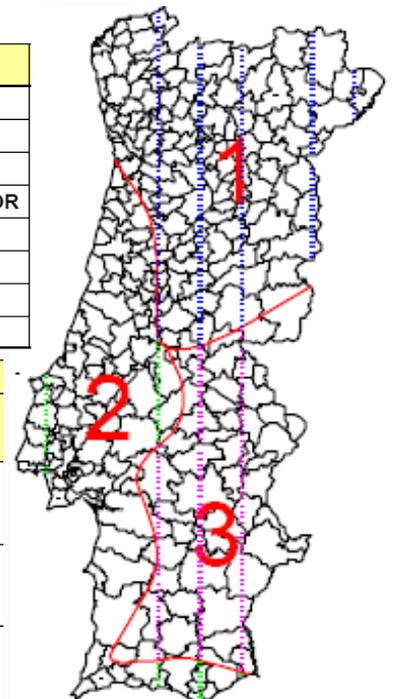
Técnicas de reciclagem de pavimentos

ESCOLHA DO MÉTODO DE RECICLAGEM: IDEIAS

Quadro 1 – Processos de reciclagem em estudo

PROCESSOS	LOCAIS DE RECICLAGEM	TEMPERATURAS	LIGANTES / ADITIVOS
R1	IN-SITU	A FRIO	CIMENTO
R2	IN-SITU	A FRIO	EMULSÃO BETUMINOSA
R3	IN-SITU	A FRIO	BETUME ESPUMA
R4	IN-SITU	A QUENTE	BETUME e/ou REJUVENESCEDOR
R5	EM CENTRAL	A FRIO	EMULSÃO BETUMINOSA
R6	EM CENTRAL	A FRIO	BETUME ESPUMA
R7	EM CENTRAL	SEMI-QUENTE	EMULSÃO BETUMINOSA
R8	EM CENTRAL	A QUENTE	BETUME

ZONAS	CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICAS DAS ROCHAS				VALORES MÉDIOS LÍMITES	
	PREDOMINANTES		MANCHAS SECUNDÁRIAS	OUTROS COMPLEXOS	TEMPERATURA (°C)	PRECIPITAÇÃO (mm / ano)
	TIPO DE FORMAÇÃO	ROCHA				
1	Eruptivas plutónicas e metamórficas	Granito	Xistentas	Anfibolitos	< 10	> 1 200
2	Sedimentares	Calcário	Basálticas	Sienitos, gabros	10 - 15	500 - 1 200
3	Metamórficas e sedimentares	Xisto	Grauvaquicas	Calcários, arenitos, diabases, corneanas, granitos, quartzitos	> 15	< 500



Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Técnicas de reciclagem de pavimentos

ESCOLHA DO MÉTODO DE RECICLAGEM: IDEIAS

PAVIMENTO EXISTENTE, i	TRÁFEGO, j		DEFLEXÃO, k			MELHORES ALTERNATIVAS DE RECICLAGEM								
						ZONA 1			ZONA 2			ZONA 3		
						1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
<div style="background-color: black; color: white; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">> 15 cm</div> Misturas betum. quente <div style="background-color: orange; color: black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">> 30 cm</div> Bases granulares Solo de fundação	T1, T2 e T3	500 < TMDAp < 2000	Pav. pouco deformável	defl. média baixa	d < 500 μm	R8	R4	R7	R7	R8	R4	R8	R7	R1
			Pav. muito deformável	defl. elevada	d > 500 μm	R1	R6	R8	R5	R6	R1	R5	R1	R2
	T4, T5 T6 e T7	0 < TMDAp < 500	Pav. pouco deformável	defl. média baixa	d < 500 μm	R8	R4	R6	R7	R8	R1	R1	R7	R8
			Pav. muito deformável	defl. elevada	d > 500 μm	R1	R8	R2	R1	R8	R2	R1	R8	R2
<div style="background-color: black; color: white; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">< 15 cm</div> Misturas betum. quente <div style="background-color: orange; color: black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">< 30 cm</div> Bases granulares Solo de fundação	T1, T2 e T3	500 < TMDAp < 2000	Pav. pouco deformável	defl. média baixa	d < 500 μm	R8	R2	R7	R7	R4	R2	R2	R7	R8
			Pav. muito deformável	defl. elevada	d > 500 μm	R1	R5	R2	R1	R5	R2	R1	R2	R5
	T4, T5 T6 e T7	0 < TMDAp < 500	Pav. pouco deformável	defl. média baixa	d < 500 μm	R7	R1	R5	R1	R7	R5	R1	R7	R5
			Pav. muito deformável	defl. elevada	d > 500 μm	R1	R2	R3	R1	R2	R6	R1	R2	R3
<div style="background-color: black; color: white; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">< 10 cm</div> Mist. e revest. superfic. <div style="background-color: orange; color: black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">< 20 cm</div> Bases granulares Solo de fundação	T1, T2 e T3	500 < TMDAp < 2000	Pav. pouco deformável	defl. média baixa	d < 500 μm	R1	R3	R2	R1	R5	R2	R1	R2	R3
			Pav. muito deformável	defl. elevada	d > 500 μm	R1	R5	R3	R1	R2	R5	R1	R2	R5
	T4, T5 T6 e T7	0 < TMDAp < 500	Pav. pouco deformável	defl. média baixa	d < 500 μm	R1	R2	R3	R1	R2	R5	R1	R2	R3
			Pav. muito deformável	defl. elevada	d > 500 μm	R1	R3	R2	R1	R2	R5	R1	R3	R2

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

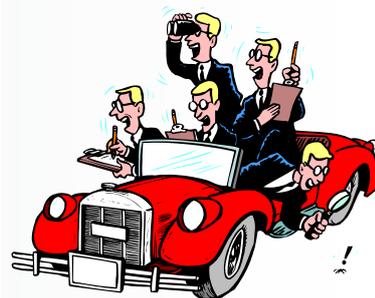
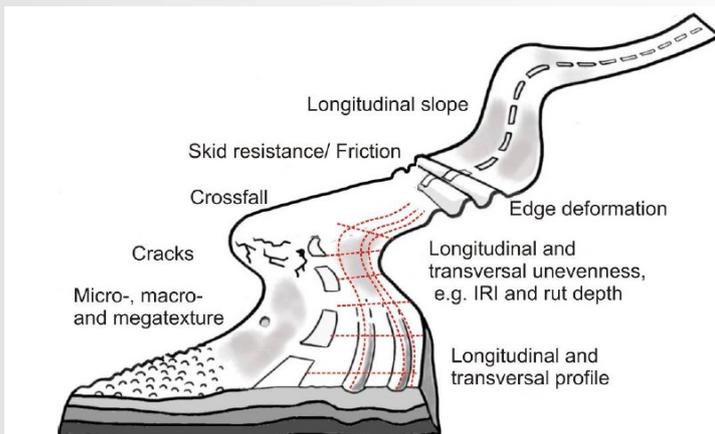


Reabilitação de Pavimentos Rodoviários: Tecnologias e avaliação estrutural

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

- Observação das Características Estruturais dos Pavimentos

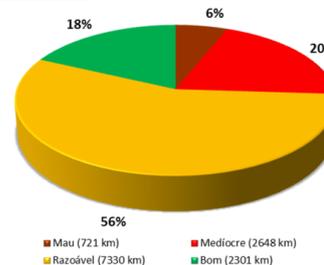
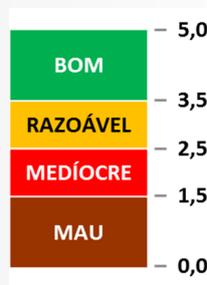
Parâmetros de estado



Avaliação da Qualidade Global

Avaliação Estrutural
Avaliação Funcional

EP (ano de 2011)



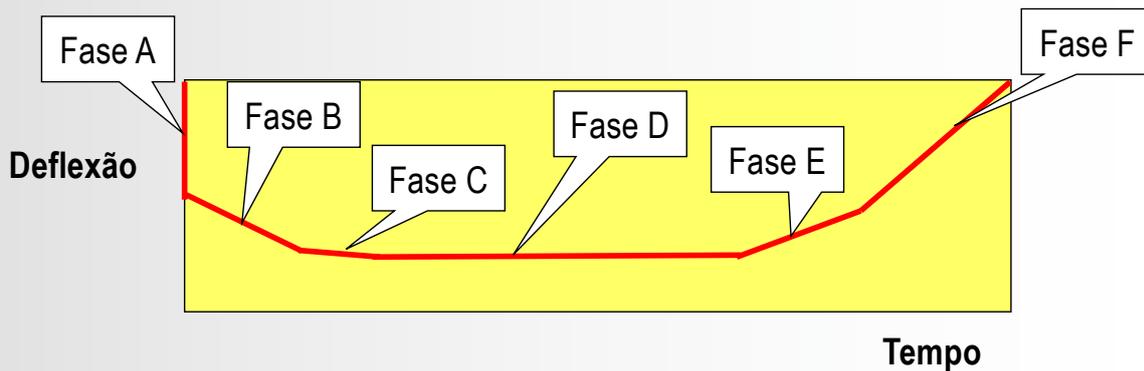
QUANTOS PARÂMETROS?

- Para que utilização?
- Qual a capacidade financeira disponível?
- Quais os equipamentos de medida disponíveis?

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Capacidade estrutural: deflexão



- FASE A:** execução do reforço
FASE B: melhoria do estado hídrico das camadas granulares e da fundação (impermeabilização do pavimento)
FASE C: estabilização do estado hídrico das camadas inferiores e aumento da rigidez das camadas betuminosas
FASE D: deflexão aproximadamente constante (em geral a fase mais longa)
FASE E: sinais de fadiga no pavimento e infiltração de água no pavimento pelas fendas entretanto formadas
FASE F: estado de ruína do pavimento

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

Baseia-se na observação da deformação vertical da superfície do pavimento:

- Resposta do pavimento quando sujeito à aplicação de uma carga em determinadas condições
- Mede-se a componente elástica (ou reversível) da deformação do pavimento

› Carga estática ou quase estática (ensaio de carga com pneu)

1. Viga Benkelman (ensaio pontual, de realização lenta)
2. Defletógrafo Flash (medição “quase” em contínuo)

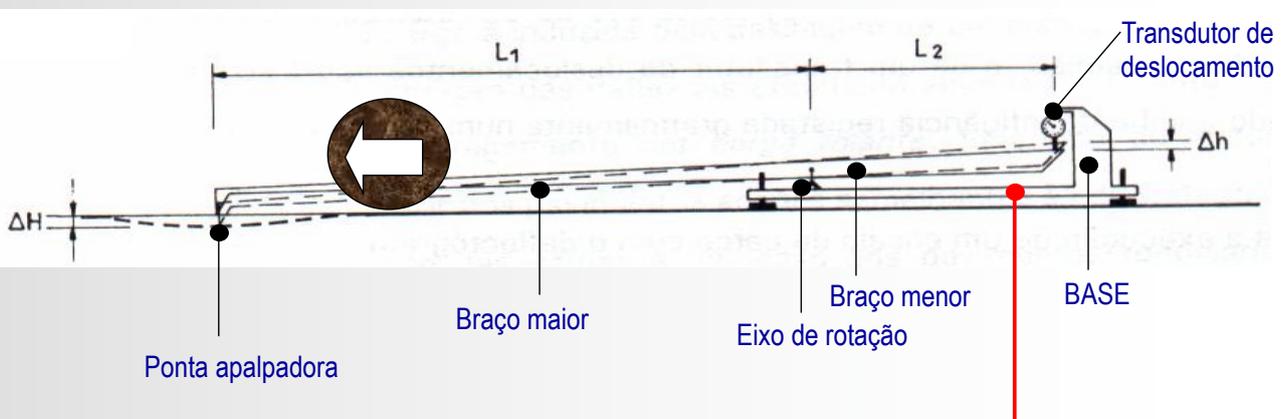
› Carga dinâmica (impacto de uma massa que cai de uma certa altura sobre uma placa colocada sobre o pavimento)

3. Defletómetro de Impacto (*Falling Weight Deflectometer*)



Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

› Viga Benkelman



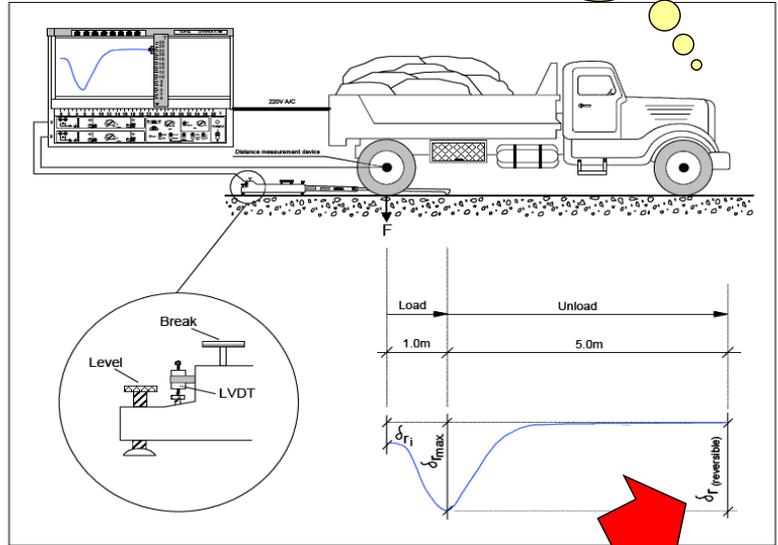
Base: referência de medição

Técnicas de avaliação da capacidade estrutural



► Viga Benkelman (defletógrafo do LNEC)

Parâmetro utilizado para gestão da rede



"Linha de influência" ou bacia de deflexão

Silvino Capitão_Prof. do ISEC. (capitao@isec.pt)

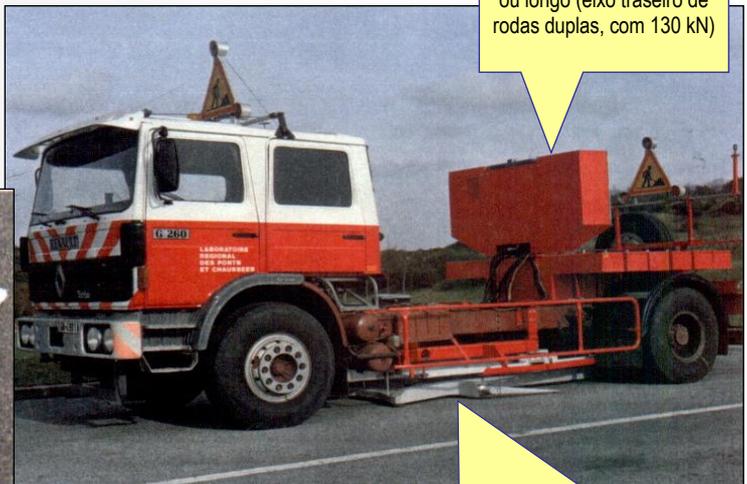
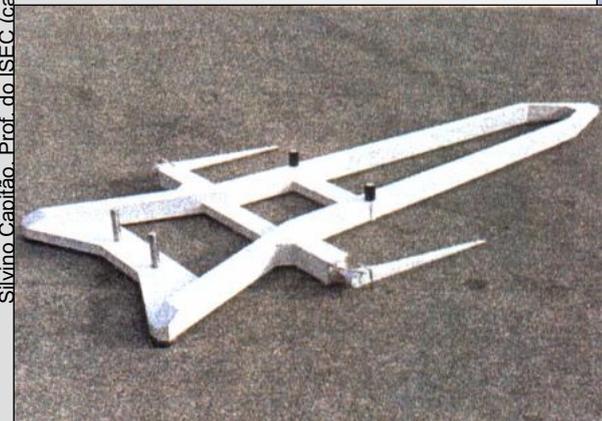
Técnicas de avaliação da capacidade estrutural



► Defletógrafo Flash

- 3 a 4 km/h
- medições de 3,5 a 100 m de intervalo

Camião de chassis normal ou longo (eixo traseiro de rodas duplas, com 130 kN)



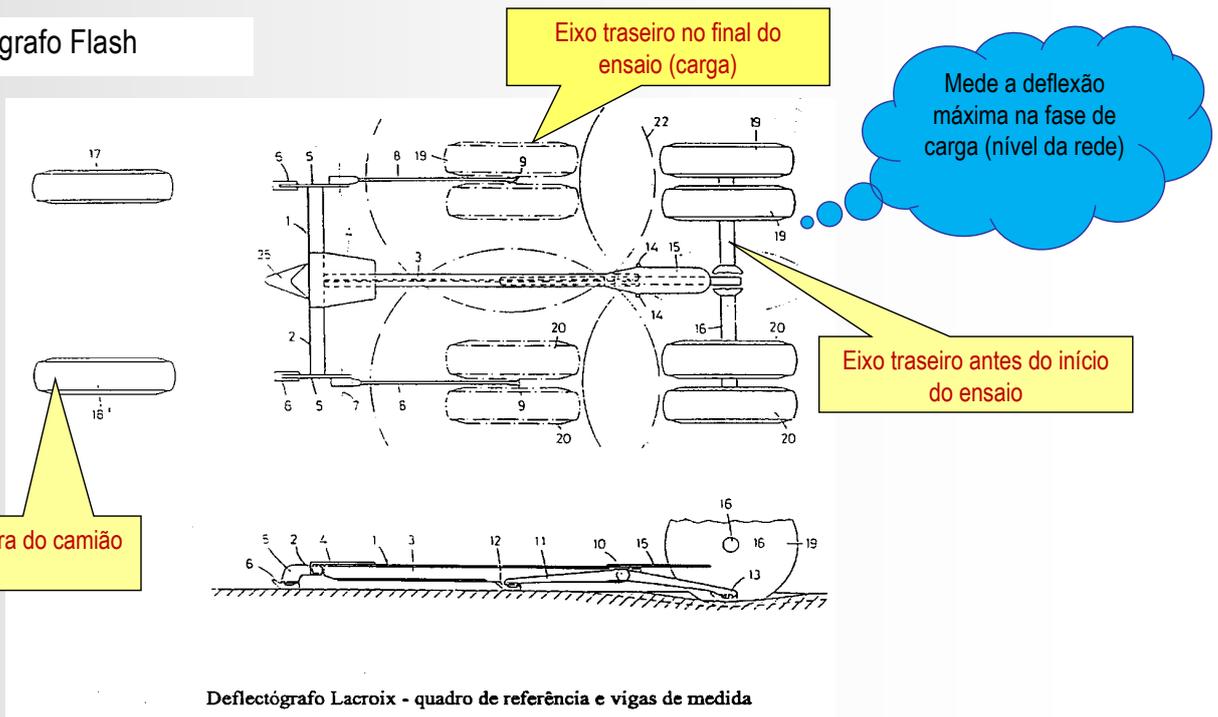
Quadro metálico, constituído por plano de referência, com 4 pontos de apoio sobre o pavimento, 2 braços captadores



Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

Defletógrafo Flash

capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

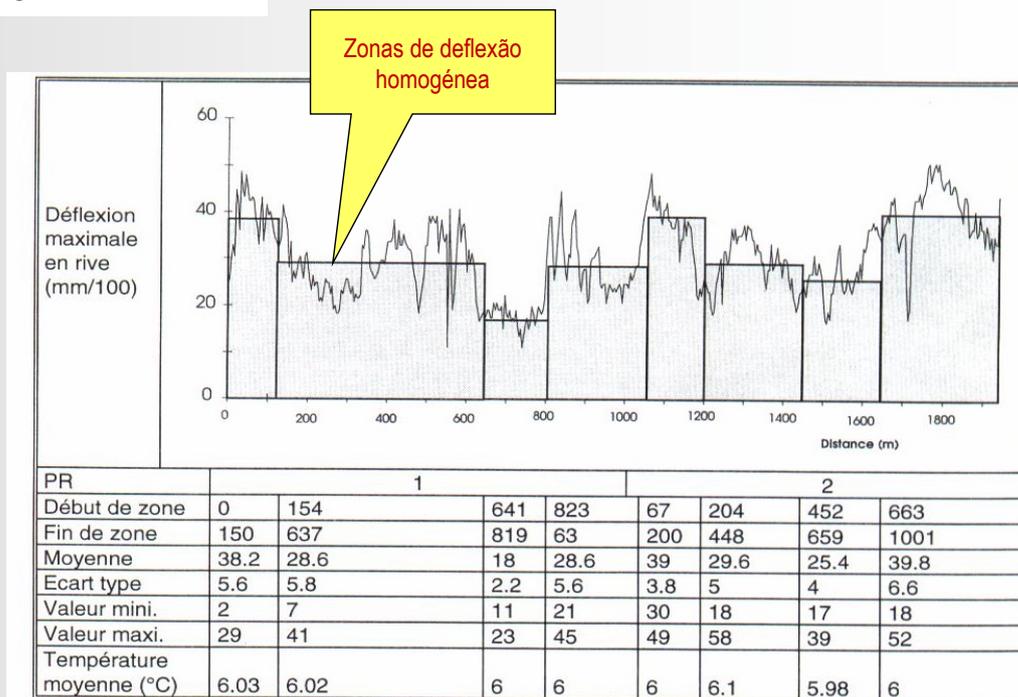


Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

Defletógrafo Flash

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



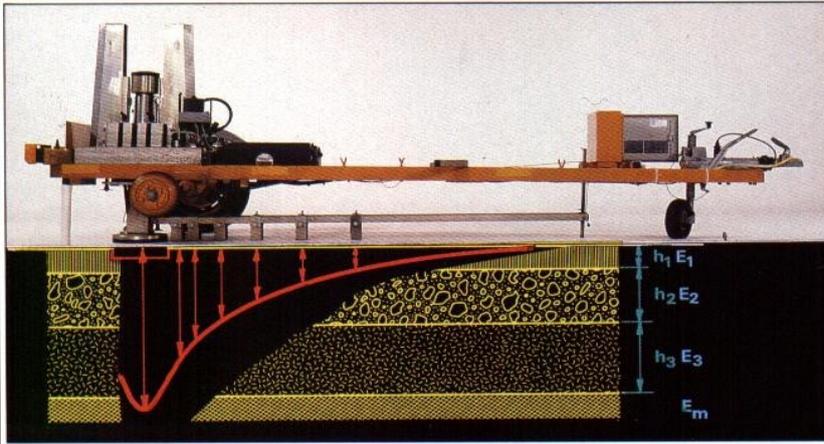
Exemple de découpage en zones homogènes de schéma d'itinéraire réalisé d'après les mesures de FLASH

Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

Defletómetro de Impacto (FWD – Falling Weight Deflectometer)

Equipamento adequado para observar a deflexão ao nível do projecto

Phase 3: Calculation of the road's bearing capacity



If the structure of the road's layers is known, the individual layer's strengths (elasticity modules), and thereby also the absolute bearing capacity, can be calculated.

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

Defletómetro de Impacto (FWD – Falling Weight Deflectometer)

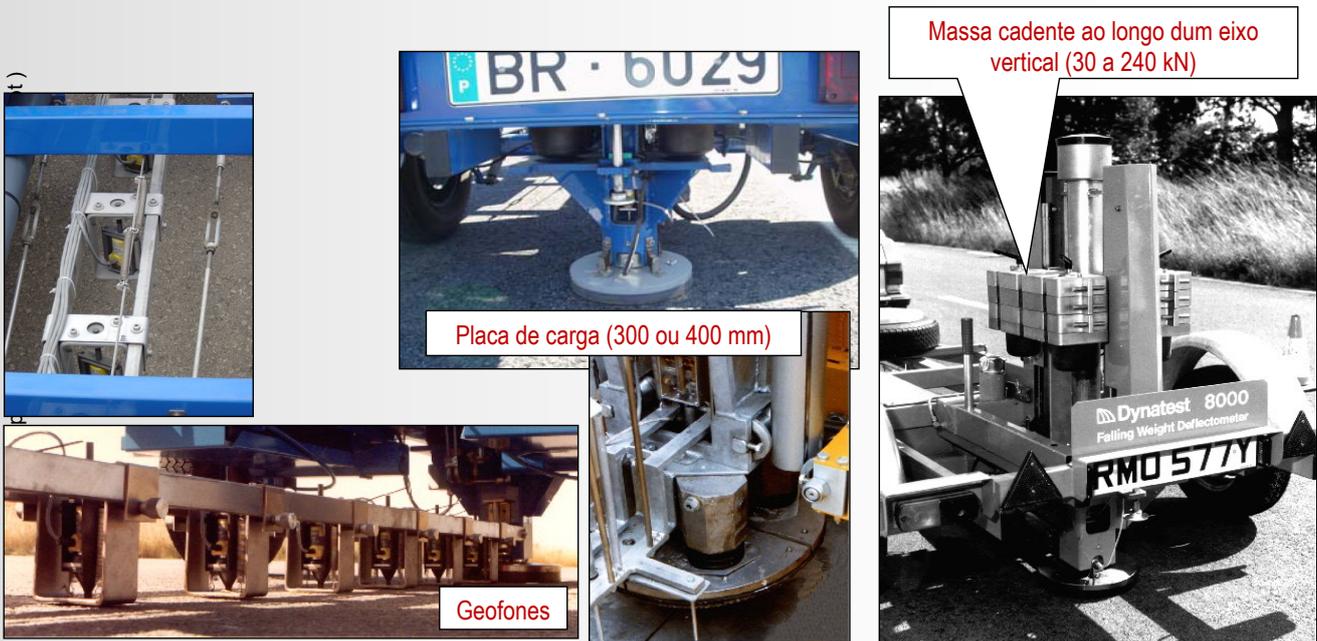


Vista geral do equipamento



Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

▶ Defletómetro de Impacto (FWD – *Falling Weight Deflectometer*)

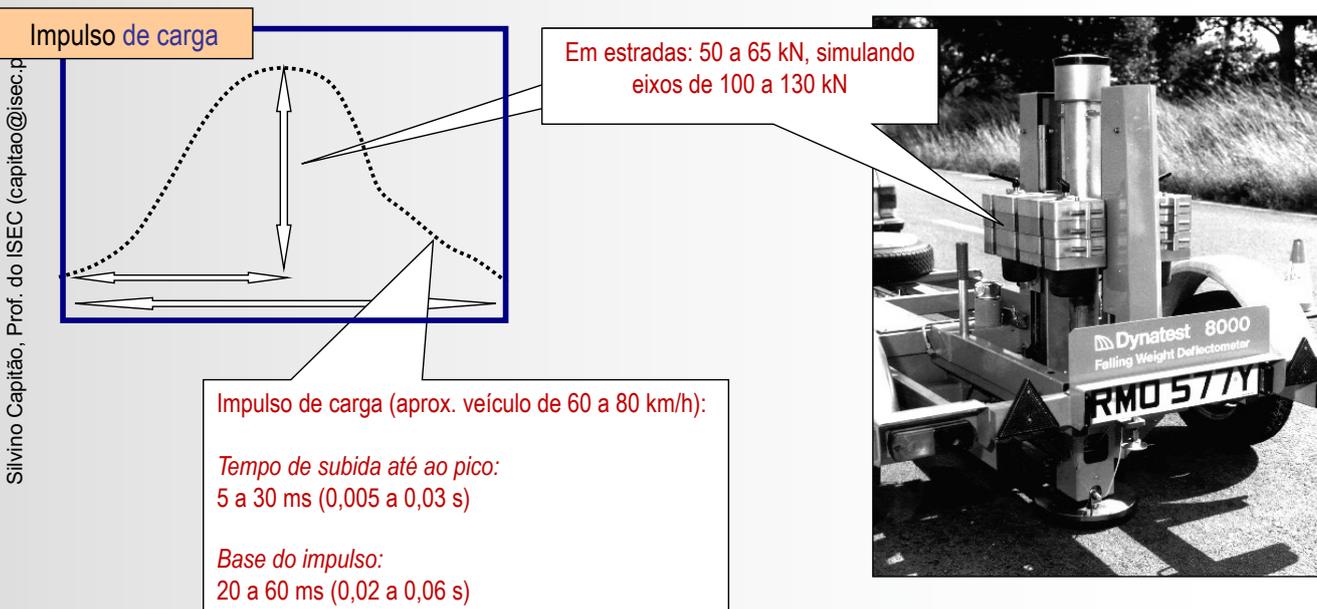


Silvino Capitão (DEC-ISEC)

131

Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

▶ Defletómetro de Impacto (FWD – *Falling Weight Deflectometer*)



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.p

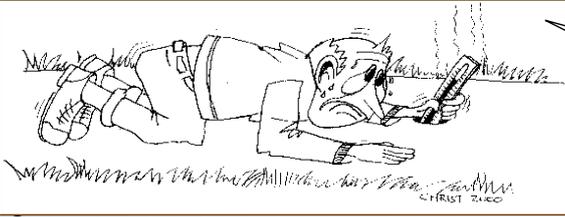
Silvino Capitão (DEC-ISEC)

132

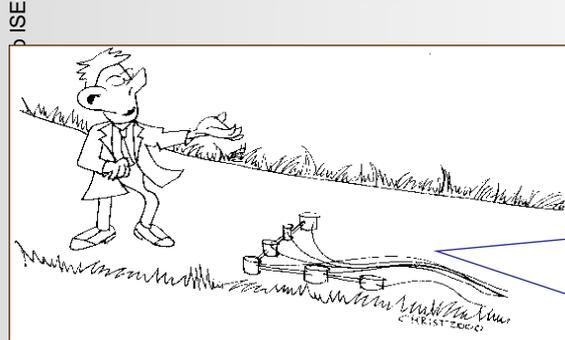
Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

▶ Defletómetro de Impacto (FWD – *Falling Weight Deflectometer*)

Medição da temperatura do pavimento



Deve medir-se a temperatura do pavimento para a interpretação dos "defletogramas"



Afastamento dos sensores em função da rigidez do pavimento [mínimo 6 sensores, em geral 7, colocados numa das posições indicadas]

0 - 200 - 300 - 450 - 600 - 900 - 1200 - 1500 - 1800 - 2100 - 2400 mm

Para pavimentos mais rígidos é necessário colocar sensores até posições mais afastadas do centro

Técnicas de avaliação da capacidade estrutural

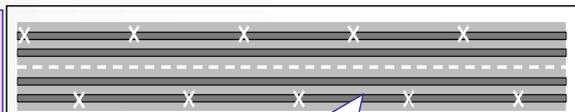
▶ Defletómetro de Impacto (FWD – *Falling Weight Deflectometer*)



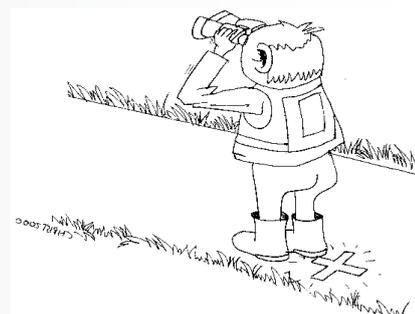
A análise dos defletogramas implica a recolha dum conjunto de dados relativos ao pavimento e às condições de ensaio



- Espessura das camadas e materiais constituintes
- Condições de carregamento
- Estado superficial do pavimento
- Condições climáticas



Em geral, ensaios espaçados de 50 a 100 m, podendo ser localizados como indicado



Técnicas de avaliação da capacidade estrutural: avaliação da espessura das camadas

Por processos não destrutivos: GEORADAR

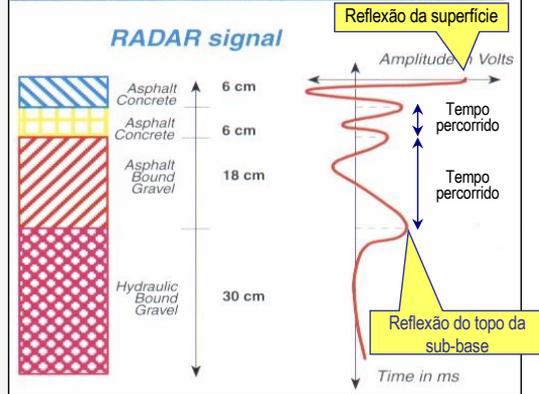
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Antenas de 1 GHz

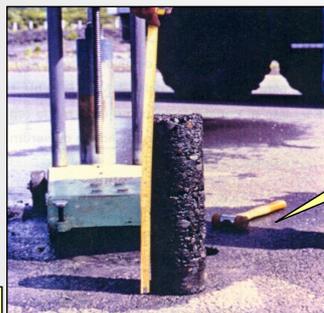
Antenas de 2 GHz

Ecrã de resultados



Avaliação da espessura das camadas e dos materiais constituintes

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Camadas ligadas

Camadas não ligadas

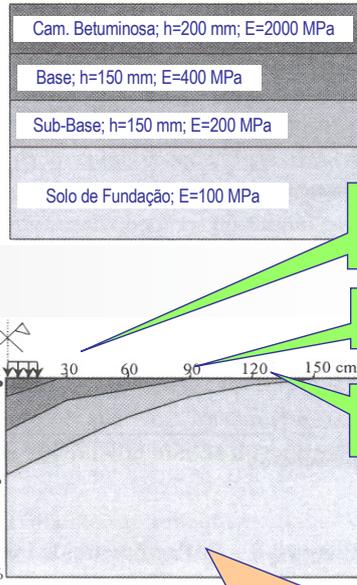
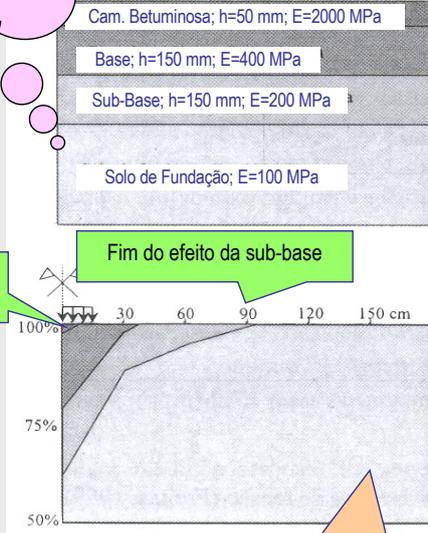


Contribuição das camadas da estrutura para a deflexão

Influência do solo de fundação em todos os pontos, com maior ênfase nas estruturas menos espessas

Pavimento "delgado"

Pavimento "espesso"



Pouca influência da camada superficial

Efeito da camada superficial (até cerca de 30 cm)

Fim do efeito da base (até cerca de 90 cm)

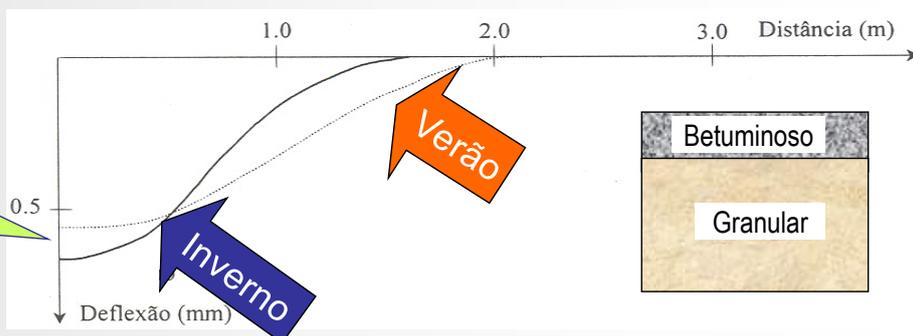
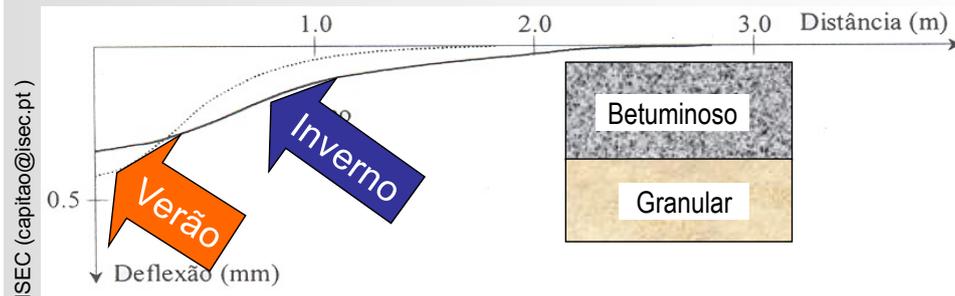
Fim do efeito da sub-base (até cerca de 120 cm)

Menor área de influência da carga e maior contribuição das camadas inferiores para a deflexão

Maior área de influência da carga e menor contribuição das camadas inferiores para a deflexão

Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Contribuição das camadas da estrutura para a deflexão



Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Deflexão superior à do pavimento com espessura betuminosa elevada. Porquê?

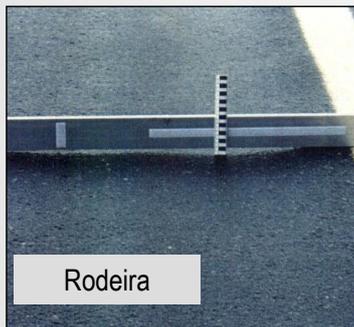


Degradações observáveis à superfície

Observação visual dos pavimentos (CATÁLOGO DE DEGRADAÇÕES)

- Ao nível da rede, nem todas as famílias de degradações são observadas com a mesma frequência (a principal família é o fendilhamento)
- Algumas são observadas por outros parâmetros com as quais estão relacionadas (p.e. as rodeiras são avaliadas pela obtenção do perfil transversal)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Rodeira



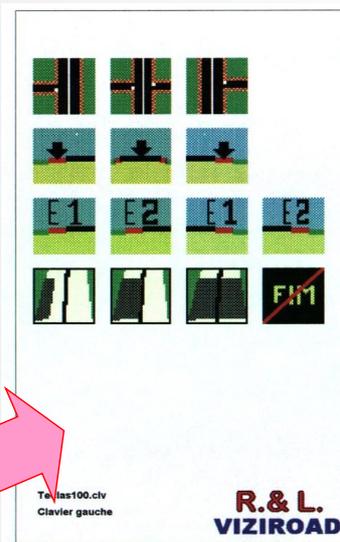
Subida de finos associada a fendilhamento



Degradações observáveis à superfície

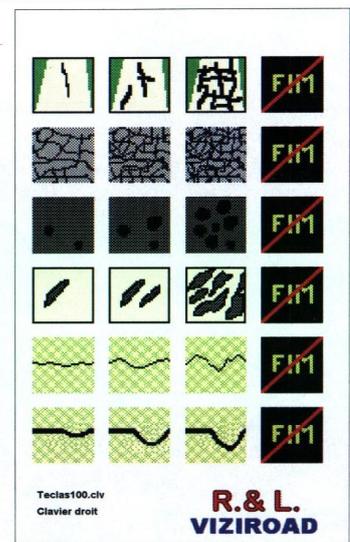
Observação Visual das Degradações Assistida por Computador (DESY e VIZIROAD)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Teclas100.clv Clavier gauche

R.&L. VIZIROAD



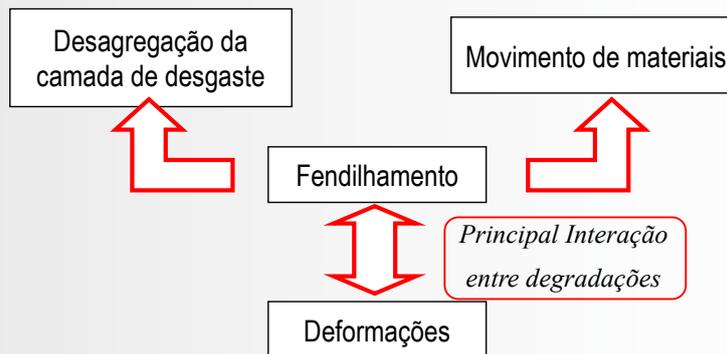
Teclas100.clv Clavier droit

R.&L. VIZIROAD



Patologias de pavimentos flexíveis: Famílias e tipos de degradações

- ▶ DEFORMAÇÕES
- ▶ FENDILHAMENTO
- ▶ DESAGREGAÇÃO DA CAMADA DE DESGASTE
- ▶ MOVIMENTO DE MATERIAIS



Patologias de pavimentos flexíveis: Famílias e tipos de degradações

DEFORMAÇÕES:

- Abatimento → Longitudinal → - Eixo
→ Transversal → - Berma
- Ondulação
- Deformações localizadas
- Rodeiras → Grande raio (camadas inferiores)
→ Pequeno raio (camadas betuminosas)



Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis: deformações

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Abatimento junto à berma



- Redução da capacidade de suporte das camadas granulares e da fundação (entrada de água pela berma ou interface berma-pavimento).

Abatimento junto ao eixo



- Redução da capacidade de suporte das camadas granulares e da fundação (infiltração de água até às camadas inferiores).

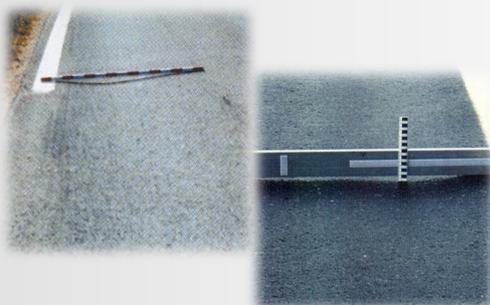
Deform. localizada



Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis: deformações

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Rodeira de grande raio



- Compacidade insuficiente das camadas estruturais do pavimento
- Deficientes condições de drenagem (p.e. por existirem fendas)
- Deficiente capacidade de carga do solo de fundação
- Subdimensionamento das camadas granulares

Rodeira de pequeno raio

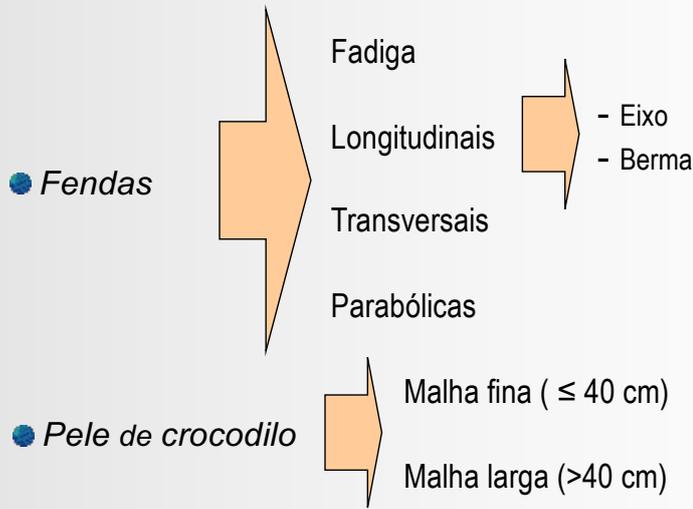


- Falta de qualidade dos materiais (em particular da camada de desgaste)
- Acções climáticas severas (temperaturas muito elevadas)
- Tráfego pesado, lento e canalizado



Patologias de pavimentos flexíveis: Famílias e tipos de degradações

FENDILHAMENTO:



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis: fendilhamento

Fenda isolada (longitudinal)



- ▶ Solicitação repetida dos esforços de tracção por flexão
- ▶ Deficiente qualidade das misturas betuminosas
- ▶ Fraca capacidade de suporte da fundação (estado hídrico desfavorável)
- ▶ Propagação de fendas das camadas ligadas inferiores

Fendas ramificadas



- ▶ Evolução do estado de fendas isoladas

F. por fractura térmica



- ▶ Temperaturas muito baixas

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis: fendilhamento

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Fenda longitudinal



Fenda transversal



- › Dificuldade em compactar eficazmente a extremidade da zona pavimentada (quando duas vias adjacentes não são feitas em simultâneo)

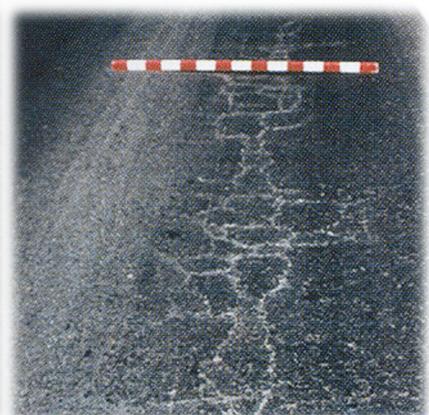
- › Problemas construtivos
- › Retracção térmica do material em climas frios



Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis: fendilhamento

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Pele de crocodilo



- › Evolução das fendas ramificadas (fase de evolução rápida do estado de degradação do pavimento)
- › Causas que contribuem para o fendilhamento em geral
- › Ausência de intervenções de conservação (conservação preventiva)



Patologias de pavimentos flexíveis: Famílias e tipos de degradações

DESAGREGAÇÃO DA CAMADA DE DESGASTE:

- *Desagregação*
- *Cabeça de gato*
- *Pelada*
- *Ninhos (covas)*



Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis: desagregação da camada de desgaste

Cabeça de gato



- › Falta de estabilidade da ligação entre os materiais constituintes da mistura (perda da componente fina da mistura)
- › Desgaste rápido da argamassa de betume
- › Deficiente qualidade dos materiais
- › Tráfego muito agressivo (tensões tangenciais elevadas)

Desagregação superficial



- › Evolução da degradação "Cabeça de gato" (perda de grossos)
- › Infiltração de água nas fendas



Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis: desagregação da camada de desgaste

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Pelada



- › Espessura reduzida da camada de desgaste
- › Deficiente ligação da camada ao suporte
- › Falta de qualidade dos materiais

Ninhos (covas)



- › Evolução da "pele de crocodilo"
- › Zona localizada com deficiente capacidade de suporte
- › Má qualidade de fabrico e colocação da camada de desgaste

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Patologias de pavimentos flexíveis: Famílias e tipos de degradações

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

MOVIMENTO DE MATERIAIS:

- Exsudação
- Subida de finos

In Pereira et al, 2005

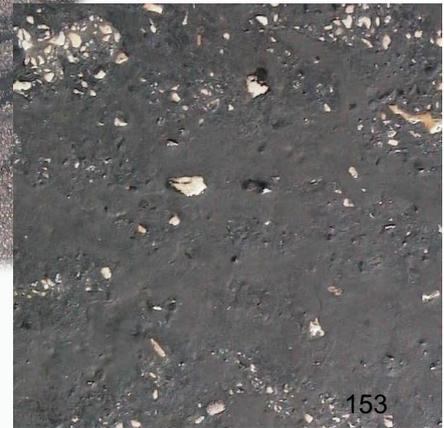
Silvino Capitão (DEC-ISEC)



Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis: movimento de materiais

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Exsudação



- › Deficiente formulação da camada de desgaste (excesso de ligante; ligante com viscosidade reduzida; excesso da fracção fina dos agregados)
- › Condições severas de tráfego
- › Temperaturas elevadas

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

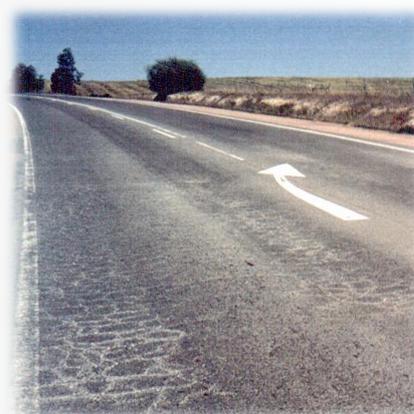
153



Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis: movimento de materiais

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Subida de finos



- › Camadas betuminosas fendilhadas associado à presença de água (nível freático; água da chuva; ...)
- › Condições severas de tráfego

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

154



Famílias e tipos de patologias em pavimentos flexíveis: reparações

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



- › Deficiente qualidade de execução
- › Deficiente qualidade dos materiais

Silvino Capitão (DEC-ISEC)



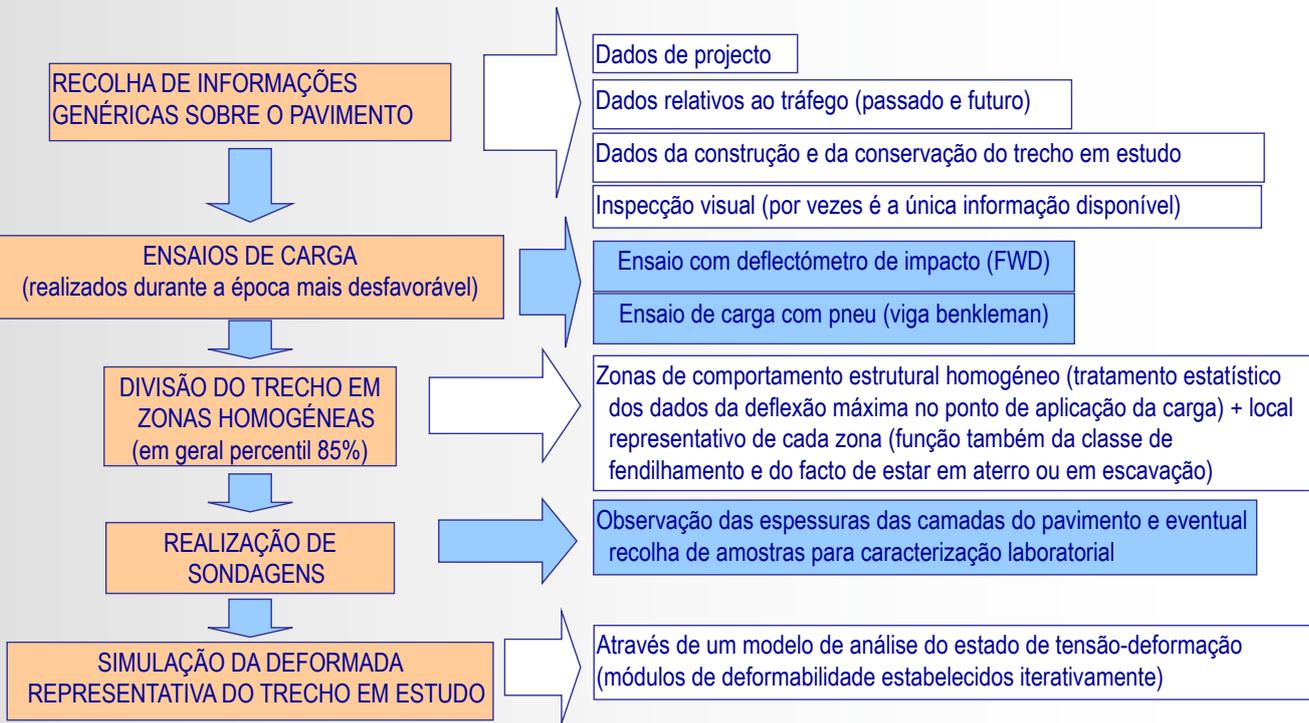
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Silvino Capitão (DEC-ISEC)

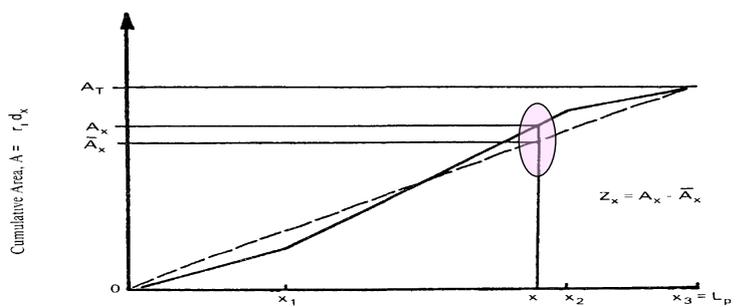
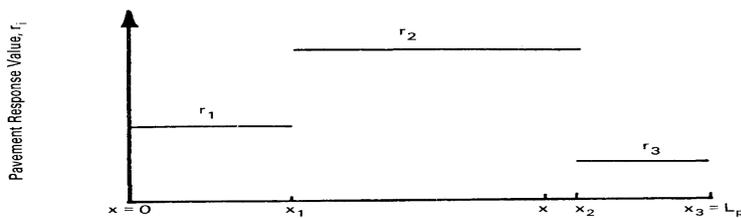
Procedimento baseado nas deflexões reversíveis

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Procedimento baseado nas deflexões reversíveis: divisão em zonas homogéneas (método da AASHTO – Anexo J: exemplo)

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

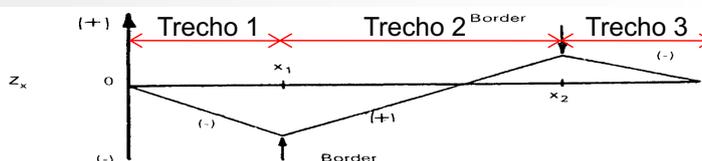


Expressão numérica para variáveis medidas de forma não contínua

$$Z_x = \sum_{i=1}^n a_i - \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{L_p} \sum_{i=1}^n x_i$$

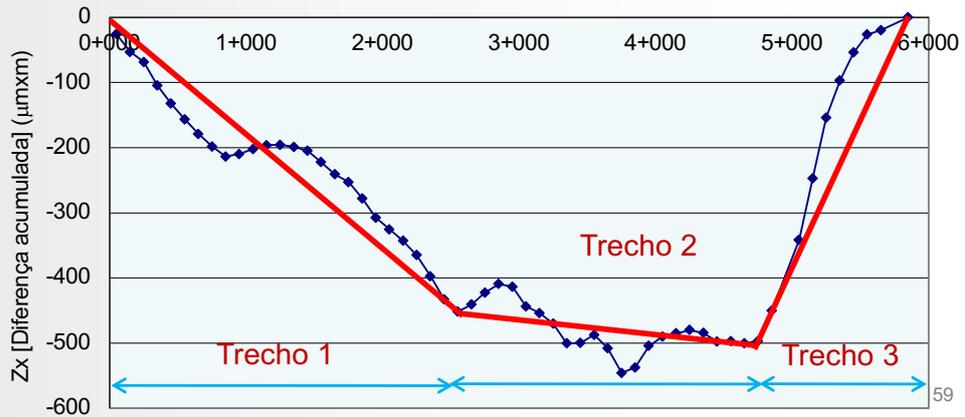
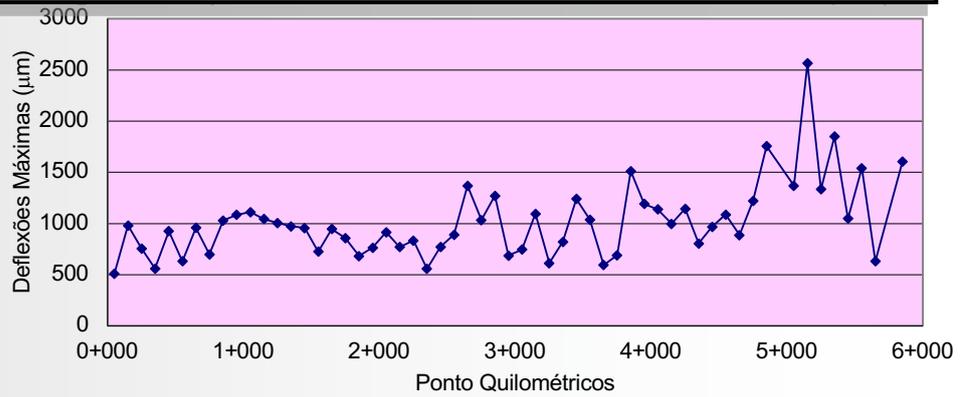
$$a_i = \frac{(r_{i-1} + r_i) \times x_i}{2} = \bar{r}_i \times x_i$$

Trecho 1





Procedimento baseado nas deflexões reversíveis: divisão em zonas homogéneas (método da AASHTO – Anexo J: exemplo)



Silvino Capitão (DEC-ISEC)

59

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Procedimento baseado nas deflexões reversíveis: deflectograma representativo dum trecho uniforme

P.K.	0mm (PLACA)	200 mm	300 mm	600 mm	900 mm	1200 mm	1500 mm
0,050	510	457	413	285	186	122	82
0,150	981	742	607	328	207	138	98
0,250	755	563	461	250	134	75	45
0,350	560	468	411	268	173	112	76
0,450	926	731	589	298	170	102	67
0,550	631	549	484	313	194	118	73
0,650	958	748	628	382	229	132	77
0,750	699	615	555	382	251	154	100
0,850	1031	865	740	451	254	162	112
0,950	1085	882	765	486	313	201	131
1,050	1112	910	751	443	247	145	92
1,150	1045	837	709	429	255	151	102
1,250	1005	801	674	434	265	163	103
1,350	972	823	732	386	243	136	75
1,450	957	810	696	446	282	175	116
1,550	725	616	530	351	231	152	99
1,650	946	806	681	414	193	115	68
1,750	858	736	661	449	284	173	104
1,850	682	620	566	354	221	134	83
1,950	765	649	579	382	229	138	90
2,050	916	706	533	325	194	107	63
2,150	770	666	598	415	282	163	108
2,250	833	730	658	438	267	176	107
2,350	558	511	396	261	164	100	67
2,450	772	684	602	379	248	156	97
2,550	891	637	504	231	101	39	15
P 85%	1011,5	826,5	714,8	443,8	270,8	165,5	107,3

Defletograma real que mais se aproxima do defletograma fictício correspondente ao percentil 85%

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

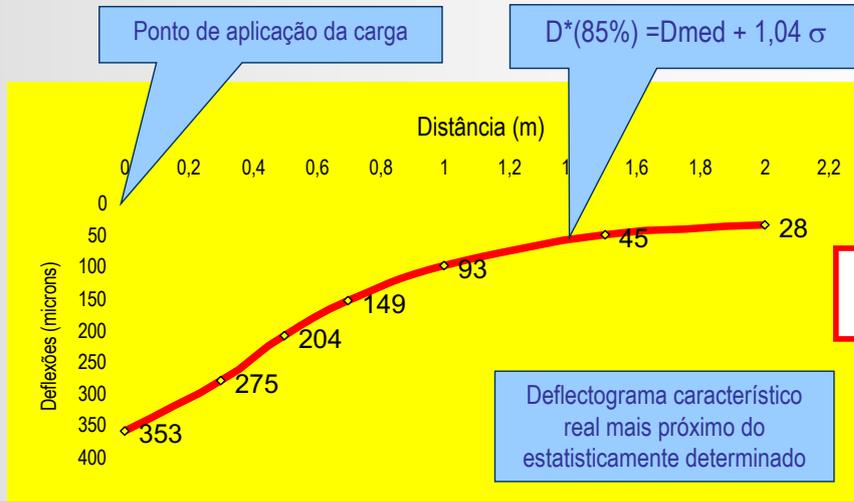
160

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Procedimento baseado nas deflexões reversíveis

Defletograma representativo (de cálculo) dum trecho uniforme

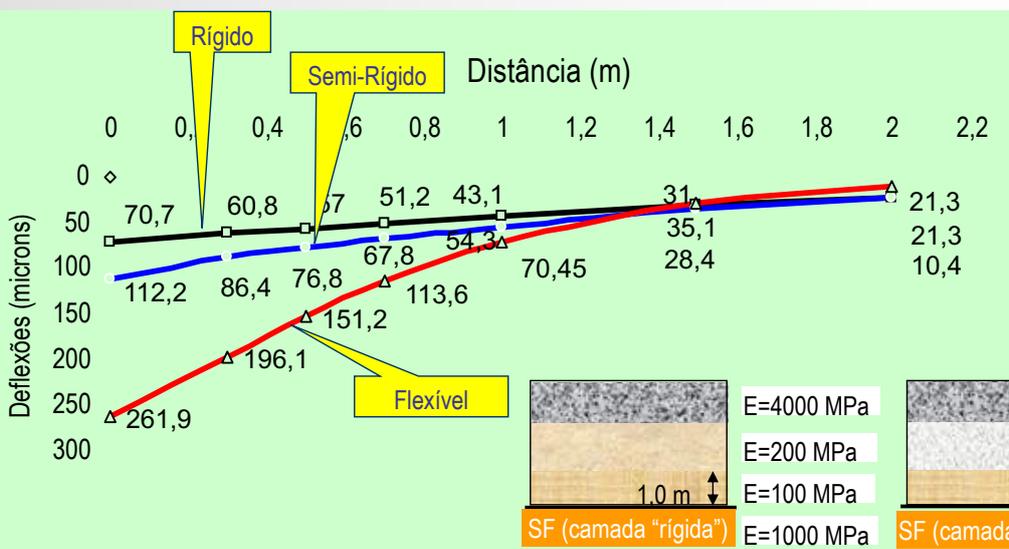


Serve para determinar, por tentativas, o conjunto de módulos de deformabilidade das camadas que constituem o pavimento.

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Procedimento baseado nas deflexões reversíveis

Defletogramas típicos (referentes a estruturas do MACOPAV)



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Procedimento baseado nas deflexões reversíveis: exemplo

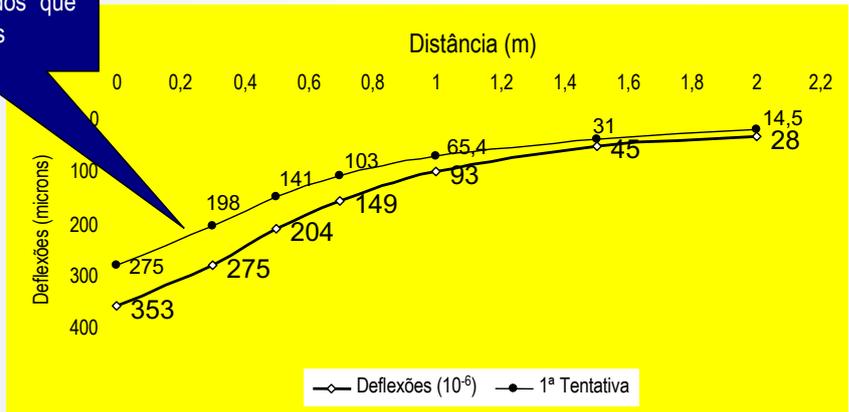
Pavimento: 12 cm de betão betuminoso;
30 cm de base granular;
30 cm de sub-base granular;
solo de fundação.

Ensaio de carga: defletómetro de impacto;
carga de 60 kN; placa de carga com 30 cm de diâmetro
defletograma representativo do trecho:

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Materiais "mais rígidos" que os existentes

1ª Tentativa:
E betão betuminoso = 10 000 MPa
(valor típico de Inverno)
E base = 450 MPa
E sub-base = 260 MPa
E solo de fundação = 100 MPa
E solo de fundação profundo= 1000 MPa



Procedimento baseado nas deflexões reversíveis: exemplo

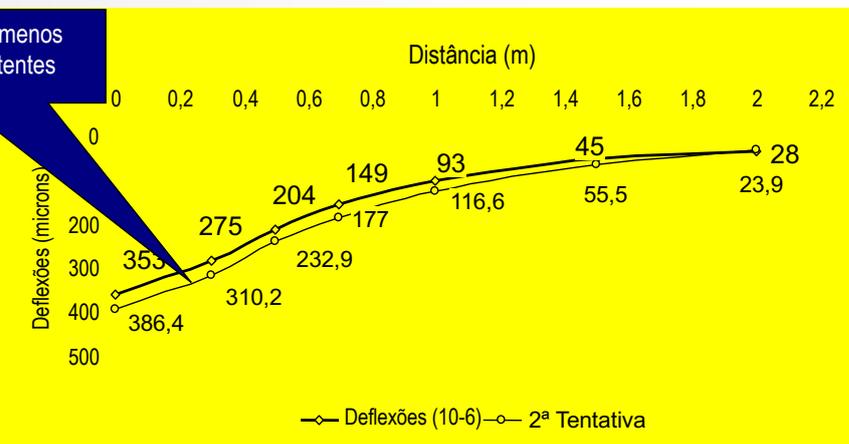
Pavimento: 12 cm de betão betuminoso;
30 cm de base granular;
30 cm de sub-base granular;
solo de fundação.

Ensaio de carga: defletómetro de impacto;
carga de 60 kN; placa de carga com 30 cm de diâmetro
defletograma representativo do trecho:

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Materiais inferiores "menos rígidos" que os existentes

2ª Tentativa:
E betão betuminoso = 10 000 MPa
(valor típico de Inverno)
E base = 350 MPa
E sub-base = 130 MPa
E solo de fundação = 50 MPa
E solo de fundação profundo= 1000 MPa

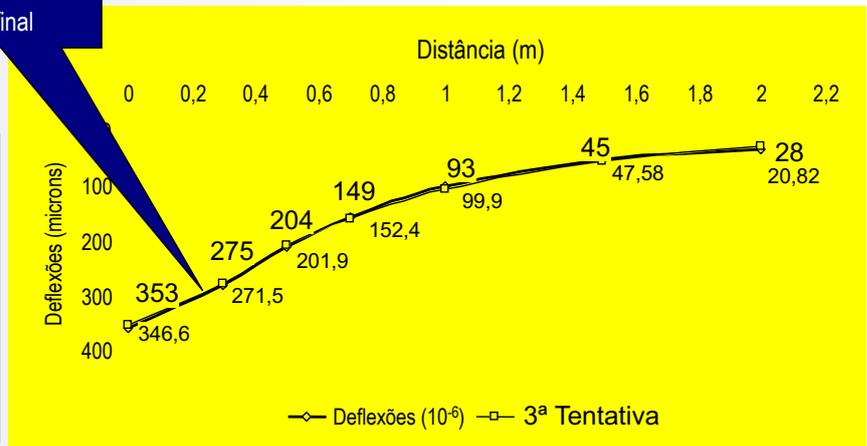


Procedimento baseado nas deflexões reversíveis: exemplo

Pavimento: 12 cm de betão betuminoso;
30 cm de base granular;
30 cm de sub-base granular;
solo de fundação.

Ensaio de carga: defletómetro de impacto;
carga de 60 kN; placa de carga com 30 cm de diâmetro
defletograma representativo do trecho:

Ajuste final



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

3ª Tentativa:
E betão betuminoso = 10 000 MPa
(valor típico de Inverno)
E base = 400 MPa
E sub-base = 150 MPa
E solo de fundação = 60 MPa
E solo de fundação profundo = 1000 MPa

Proc. baseado nas deflexões reversíveis:
propriedades representativas

Assume-se um certo RISCO
associado à incerteza na interpretação dos deflectogramas!

MATERIAIS NÃO LIGADOS:

Ter em atenção as condições efetivas de
medição do defletograma para efeitos da
sua interpretação:

- É VERÃO MAS CHOVEU NOS DIAS ANTERIORES?
- ORGÃOS DE DRENAGEM?
- CONDIÇÕES DE ACESSO DA ÁGUA?
- [...]!

Ter especial atenção se o comportamento é comandado por
estes materiais (pequena espessura de camadas betuminosas).
UTILIZAR PREVISÕES CONSERVADORAS



MATERIAIS LIGADOS:

Ter em atenção as condições efetivas de
medição do defletograma para efeitos
da sua interpretação:

- É VERÃO MAS CHOVEU NOS DIAS ANTERIORES?
- CONDIÇÕES DE ACESSO DA ÁGUA?
- CONDIÇÕES PONTUAIS QUE EXPLIQUEM MÓDULOS BAIXOS?
- [...]!

Temperatura representativa?

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)



Reabilitação de Pavimentos Rodoviários: Tecnologias e avaliação estrutural

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

- Orgânica da avaliação estrutural



Orgânica da Avaliação estrutural

Propriedades representativas com base em fatores de carga

MATERIAIS BETUMINOSOS - Decisão sobre a representatividade das características encontradas para caracterização da situação actual (**Metodologia 1**):

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Solução obtida do ajuste do defletograma

$E_1=1800$ MPa
 $E_2=80$ MPa
 $E_3=40$ MPa

$D_{m\acute{a}x}$ e D_{90} – deflexões máxima e a 90 cm do centro da placa

$$F_{cp} = \frac{D_{m\acute{a}x} + D_{90}}{2}$$

$$Se \left[f = \frac{F_{NOVO}}{F_{cp}} \right] < 1$$

Dimensionar como novo **afectando a espessura betuminosa existente de f** e usando as características obtidas na retroanálise para as camadas não ligadas

Pavimento NOVO

$E_1=3500$ MPa
 $E_2=100$ MPa
 $E_3=50$ MPa

F_{cp} e F_{NOVO} – **fatores de carga** do pavimento existente e do pavimento novo

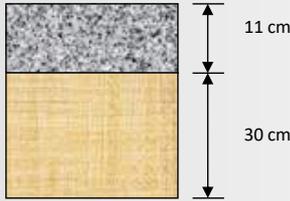
$$F_{NOVO} = \frac{D_{m\acute{a}x} + D_{90}}{2}$$

$$Se \left[f = \frac{F_{NOVO}}{F_{cp}} \right] \geq 1$$

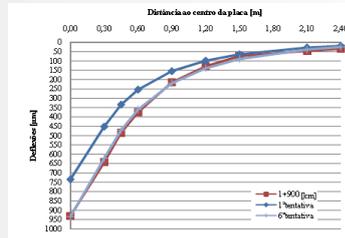
Dimensionar como novo, considerando que as camadas do pavimento existente têm características de novas

Propriedades representativas com base em fatores de carga

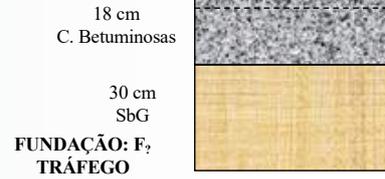
Pavimento existente



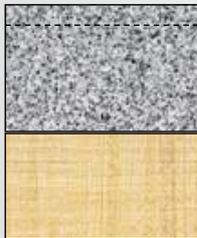
Propriedades camadas existentes?



Dimensões se o pavimento fosse NOVO



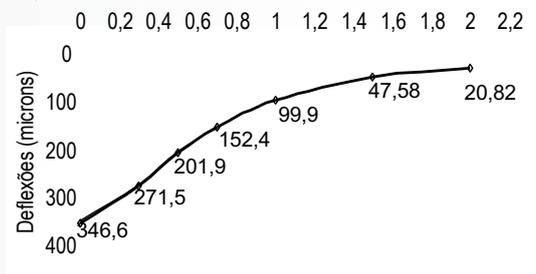
Dimensionamento do Reforço



Fatores de Carga (NOVO + Existente: perc. 85%)

$$Fi = \frac{D_{m\acute{a}x} + D_{90}}{2}$$

Deflexões do pavimento NOVO



Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

169

Propriedades representativas com base em fatores de carga

1

Conhecido o defletograma característico (em geral, perc. 85%), determinar numericamente uma combinação plausível de módulos para as camadas existentes [análise elástica linear com iterações sucessivas] que permitam modelar de forma satisfatória o defletograma medido.

2

Definir das ações a utilizar: tráfego [em geral para um período de 10 anos] e temperatura representativa

3

Determinar as propriedades das camadas do pavimento (E, ν) como se os materiais fossem novos [utilizar as expressões habitualmente aplicadas para o dimensionamento]

4

Pré-dimensionar o pavimento (totalmente NOVO) pelo Manual da ex-JAE (1995), para o tráfego determinado em 2, para se ter uma ideia da espessura da camada betuminosa a usar no processo de dimensionamento [fazer aprox. 1 cm c. bet = 3 cm c. granular se necessário]

5

Dimensionar [por exemplo pelo método da Shell] como se o pavimento fosse totalmente NOVO [ações e propriedade obtidas em 2 e 3]

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

Silvino Capitão (DEC-ISEC)

170



Propriedades representativas com base em fatores de carga

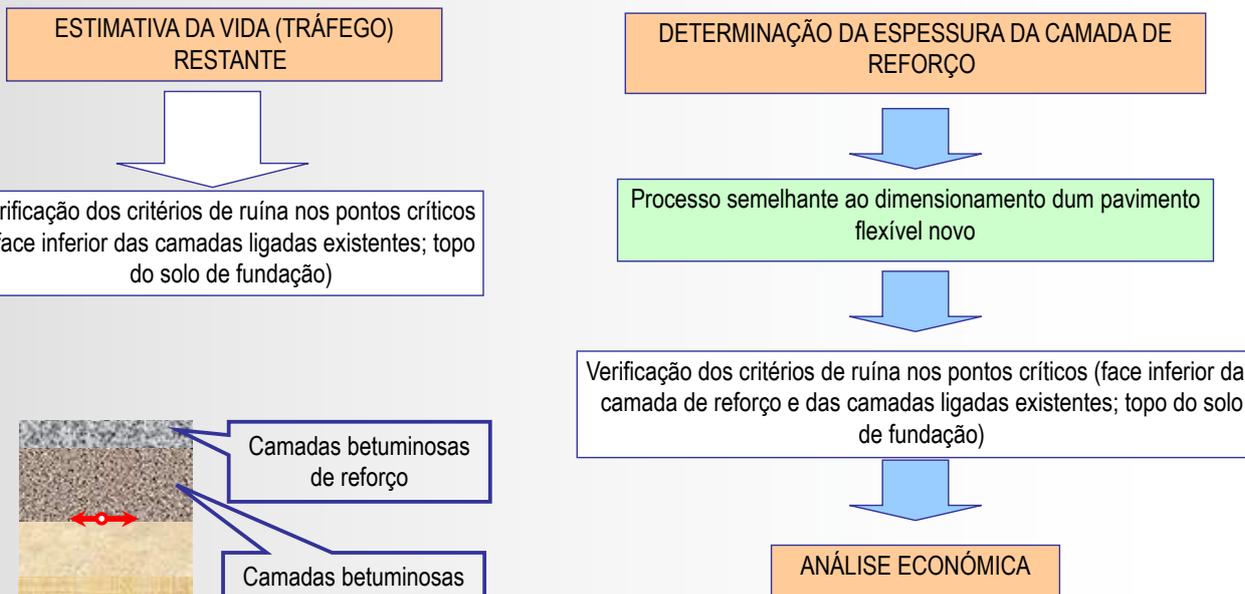
Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)

- 6 Determinar numericamente as deflexões para o pavimento NOVO dimensionado
- 7 Calcular os Factores de Carga [$F_i = (D_0 + D_{90})/2$] com base nos defletogramas obtidos, respetivamente, para o pavimento NOVO e para o pavimento existente [defletograma característico]
- 8 Calcular f [$f = F_{nova} / F_{existente}$]
- 9 Dimensionar [por exemplo pelo método da Shell] o pavimento como NOVO, tal como indicado em 5, mas considerando as propriedades mecânicas das camadas não ligadas deduzidas da retroanálise efectuada.
- 10 Calcular a espessura da camada de reforço [se $f < 1$: $Esp_{reforço} = Esp_{calculada} - f \times Esp_{existente}$]



Orgânica do dimensionamento da camada de reforço com uma metodologia mais próxima do processo de dimensionamento habitual

Silvino Capitão, Prof. do ISEC (capitao@isec.pt)





Proc. baseado nas deflexões reversíveis:
Dimensionamento do reforço

ATENÇÃO!

No dimensionamento da camada de reforço, deve haver uma interpretação cuidada da caracterização que é possível efectuar, ponderando essa interpretação com a experiência de realização de reabilitação em pavimentos flexíveis.

in Branco et al. (2006)