



# TRATAMENTO DOS SOLOS E RECICLAGEM

Descrição e vantagens da utilização de ligantes hidráulicos em pavimentos flexíveis e rígidos

*Maria da Conceição Monteiro Azevedo,*  
Professora da FEUCP  
Directora da CAeMD

# Utilização de Ligantes Hidráulicos em Vias de Comunicação

Em vias de comunicação é usual utilizar os ligantes hidráulicos quer na construção quer na manutenção das infra-estruturas existentes:



**BETÃO DE CIMENTO**  
**MATERIAIS GRANULARES**  
**MISTURAS BETUMINOSAS**  
**TRATAMENTO DE SOLOS**



**RECICLAGEM *IN SITU* COM EMULSÕES BETUMINOSAS**

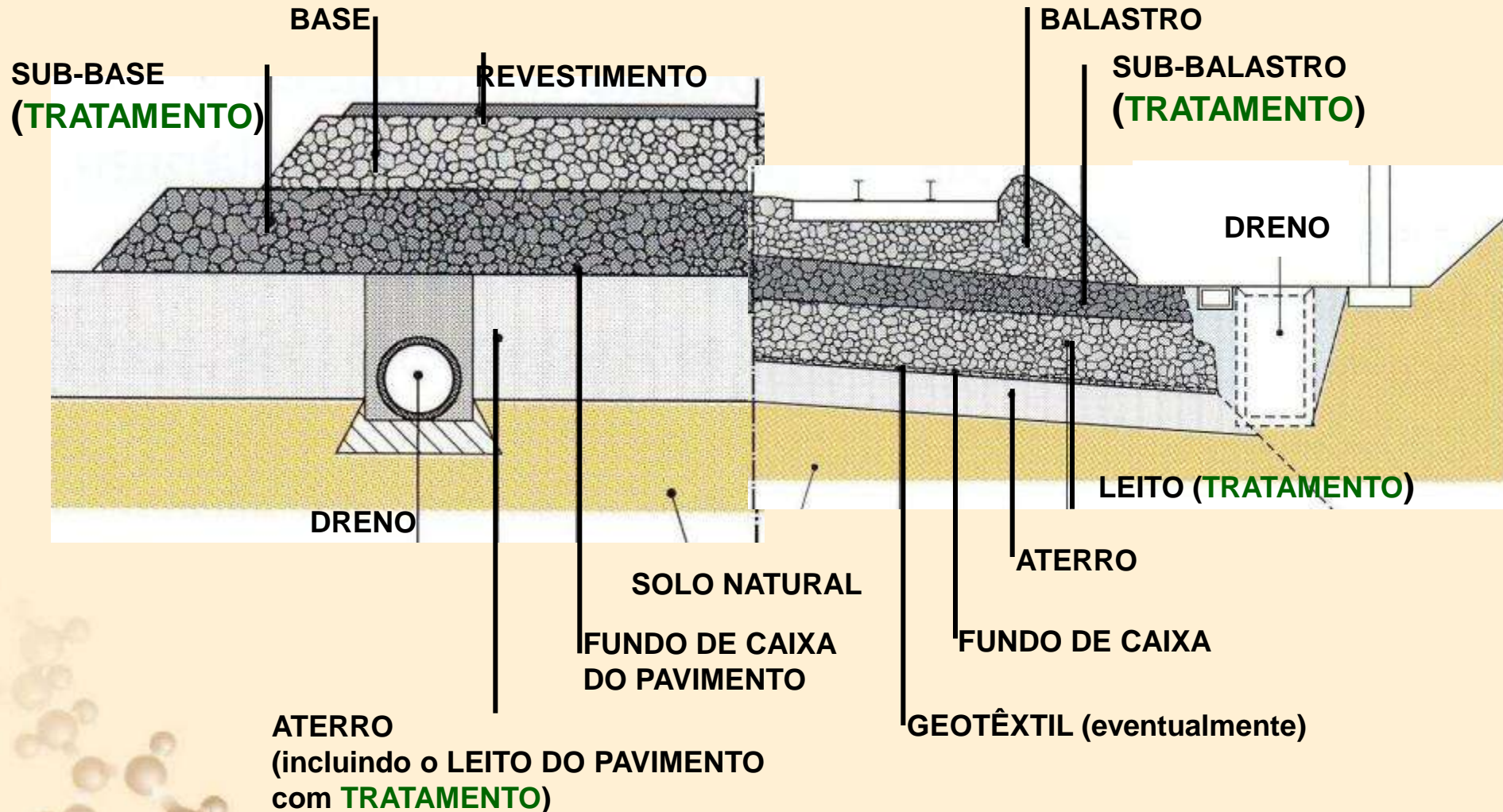


**RECICLAGEM *IN SITU* COM CIMENTO**

# ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

ESTRADA/VIA MUNICIPAL/  
AEROPORTOS/PORTOS

VIA FÉRREA



# Tipos de Agentes para o Tratamento de solos

**CIMENTOS**

**CAL AÉREA (viva ou hidratada)**

**CAL HIDRÁULICA**

**LIGANTES HIDRÁULICOS RODOVIÁRIOS**

# TRATAMENTO DOS SOLOS



Estabilização de solos, tendo em vista melhorar a qualidade da fundação, quer em estradas, aeroportos, portos e linhas ferroviárias;

Melhorar a traficabilidade do equipamento de obra sob períodos de chuva ou em solos de humidade excessiva;

Modificar as características físicas, químicas e mecânicas dos solos *in situ* - aumento da capacidade de suporte da fundação;

Forte hidraulicidade do CIMENTO e da CAL HIDRÁULICA confere uma resistência mecânica superior.



# TRATAMENTO DE SOLOS

## ➤ MELHORAMENTO DOS SOLOS:

✓ Operação quase instantânea que consiste em melhorar as propriedades geotécnicas dos solos (aumento da capacidade de suporte e melhoria da aptidão do solo à compactação), embora a natureza do solo se mantenha. Tem um carácter temporário.

Esta operação permite assegurar a colocação em obra com os equipamentos tradicionais de terraplenagens.

## ➤ ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS:

✓ Operação a médio e a longo termo, consistindo em aumentar significativamente as características mecânicas dos solos, de modo a conferir durabilidade, face ao estado hídrico e ao gelo-degelo. Traduz-se pelo endurecimento gradual da mistura solo-cal no decurso das semanas e meses que se seguem à compactação. Estes efeitos e respectivas propriedades são utilizados ao nível do dimensionamento.

# TRATAMENTO DOS SOLOS

Identificação: gran., PI, MB, WA, matéria orgânica

Tratamento pode ser encarado

Função do contexto da Obra

Verificação da aptidão ao Tratamento

Solo apto a ser Tratado

Tratamento Duvidoso

Ensaio de Formulação

Tratamento Possível

Tratamento Impossível  
(técnico ou económico)

Empreitada

Tratamento duvidoso

Fim do estudo/  
Tratamento específico

# CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

## ➤ CARACTERÍSTICAS DE NATUREZA FÍSICA:

- Granulometria ou grau de finura;
- Argilosidade (índice de plasticidade, PI; valor de azul de metileno, MB);
- Expansibilidade;
- Absorção de água, WA;
- Presença de constituintes, tais como matéria orgânica, sulfatos, sulfuretos, cloretos, nitratos, ....
- Estado hídrico.

## ➤ CARACTERÍSTICAS DE NATUREZA MECÂNICA:

- Ensaio Proctor;
- Índice de CBR;
- Ensaaios de compressão simples e/ou de compressão diametral.



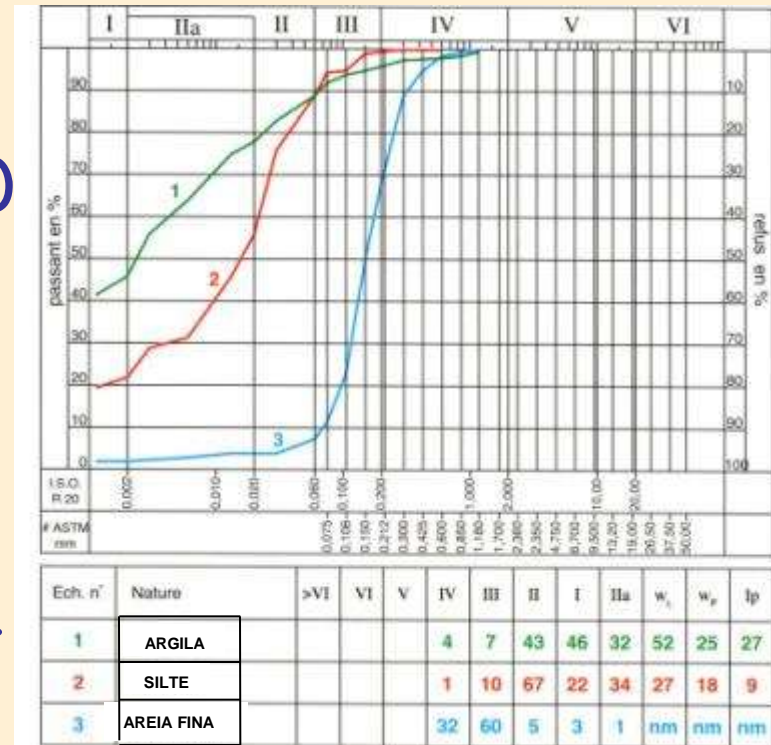
# TIPO DE SOLOS SUSCEPTÍVEIS DE TRATAMENTO

## ➤ SOLOS QUE NÃO DEVEM SER TRATADOS:

- Supérfluo: solos adequados mesmo sem tratamento;
- Inoperante: solos que não reagem com o agente de tratamento;
- Oneroso: solos muito húmidos, muito argilosos ou com muito cascalho ou gravilha.

## ➤ CONHECIMENTO DO (S) AGENTE (S) MAIS ADAPTADO AO TRATAMENTO DE CADA FAMÍLIA DE SOLOS:

- Argilas (fracção < 2  $\mu\text{m}$ );
- Siltes (fracção > 2  $\mu\text{m}$  e < 63  $\mu\text{m}$ );
- Areias (fracção > 63  $\mu\text{m}$  e < 2 mm).



Nota: nm significa "não mensurável"

# TIPO DE SOLOS SUSCEPTÍVEIS DE TRATAMENTO

## ➤ TEOR EM ÁGUA:

- Elevado: impede a circulação do tráfego de obra;
- Baixo: dificulta a compactação.
- ✓ CAL (principalmente a cal viva): secagem dos solos.

## ➤ PRESENÇA DE ARGILA:

- ✓ CAL/CIMENTO: diminui a plasticidade do solo e aumenta a sua resistência.

Os ligantes hidráulicos permitem a utilização dos solos escavados da linha sem características para tal (minimizando ou evitando impactos económicos, ambientais e técnicos).

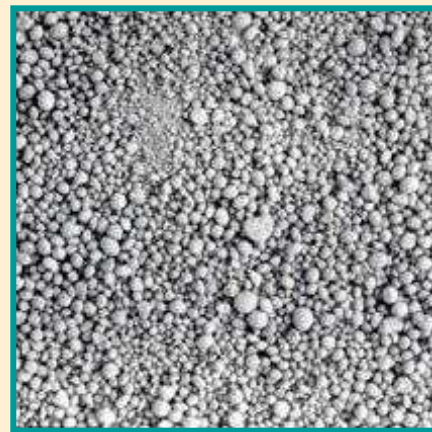
# MELHORAMENTO DE SOLOS

## ➤ TRAFICABILIDADE DIFÍCIL:

- $CBR_{im} < 5$  para solos argilosos;
- $CBR_{im} < 10$  para solos siltosos;
- $CBR_{im} < 15$  para solos arenosos.



Antes do tratamento



Após o tratamento  
com Cal Hidráulica

- ✓ Em solos siltosos ou argilosos húmidos, o ligante hidráulico provoca a aglomeração imediata das finas partículas argilosas em grumos estáveis (granulação ou floculação). Os grumos solo/ligante têm um aspecto mais arenoso. São mais pequenos, mais claros, mais secos e menos plásticos.

# APTIDÃO DO TRATAMENTO E TIPO DE AGENTE

- AVALIAÇÃO DO INTERESSE DO TRATAMENTO DO SOLO.
- DETERMINAÇÃO DO TIPO DE AGENTE DE TRATAMENTO.

Plasticity Index	MORE THAN 25% PASSING 75µm			LESS THAN 25% PASSING 75µm		
	PI ≤ 10	10 < PI < 20	PI ≥ 20	PI ≤ 6 PI x % passing 75µm ≤ 60	PI ≤ 10	PI > 10
<b>Form of Stabilisation</b>						
Cement and Cementitious Blends	Usually suitable	Doubtful	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable
Lime	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable
Bitumen	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable
Bitumen/ Cement Blends	Usually suitable	Doubtful	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable
Granular	Usually suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable
Miscellaneous Chemicals*	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable
Key	Usually suitable	Doubtful	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable	Usually not Suitable

\* Should be taken as a broad guideline only. Refer to trade literature for further information.

Note: The above forms of stabilisation may be used in combination, e.g. lime stabilisation to dry out materials and reduce their plasticity, making them suitable for other methods of stabilisation.

Table 2.3 — Guide to Selecting a method of Stabilisation

AAPA/AustStab/  
AUSTRROADS -  
"Guide to  
Stabilisation in  
Roadworks"  
Sydney, 1998



# APTIDÃO DO TRATAMENTO E TIPO DE AGENTE

- AVALIAÇÃO DO INTERESSE DO TRATAMENTO DO SOLO.
- DETERMINAÇÃO DO TIPO DE AGENTE DE TRATAMENTO.

		TIPOS DE SUELOS DE LA EXPLANACIÓN (DESMONTES) O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (TERRAPLENES, PEDRAPLENES O RELLENOS TODO-UNO)				
		SUELOS INADECUADOS Y MARGINALES (IN)	SUELOS TOLERABLES (0)	SUELOS ADECUADOS (1)	SUELOS SELECCIONADOS (2) y (3)	ROCA (R)
CATEGORIA DE EXPLANADA	E1 $E_{vd} \geq 60\text{MPa}$					
	E2 $E_{vd} \geq 120\text{MPa}$					
	E3 $E_{vd} \geq 300\text{MPa}$					

MINISTERIO DE FOMENTO - "Norma 6.1 - IC - Secciones de Firmes". 1ª edição Madrid, 2004

# ACERVO NORMATIVO EUROPEU

## ➤ EN 14227-11 - Hydraulically Bound Mixtures - Specifications - Part 11: Soil treated by lime

❖ Cal viva ou a Cal hidratada (em pó ou em leitada):  
CL 90 ou CL 80 (conforme EN 459-1)

### o Melhoramento e Estabilização

- o IPI (Immediate bearing index);
- o MCV (Moisture Condition Value);
- o DC (Degree of compaction);
- o LS (Swelling);
  
- o Teor em sulfatos do solo;
- o P (Degree of Pulverization);
- o W (Water content);
- o CBR (Californian Bearing Ratio);
- o  $R_c$  (Compressive Strenght);
- o Resistência ao gelo-degelo.



# ACERVO NORMATIVO EUROPEU

## ➤ EN 14227-10 - Hydraulically Bound Mixtures - Specifications - Part 10: Soil treated by cement

### ❖ Cimento (conforme EN 197-1 ou EN 197-4)

#### o Estabilização

- o IPI (Immediate bearing index);
- o MCV (Moisture Condition Value);
- o DC (Degree of compaction);
- o LS (Swelling);
  
- o Teor em sulfatos do solo;
- o P (Degree of Pulverization);
- o W (Water content);
- o CBR (Californian Bearing Ratio);
- o  $R_c$  (Compressive Strenght);
- o Resistência ao gelo-degelo.

# ACERVO NORMATIVO EUROPEU

- EN 14227-13 - Hydraulically Bound Mixtures - Specifications - Part 13: Soil treated by hydraulic road binder
  - ❖ Ligante hidráulico rodoviário, conforme ENV 13282;
    - Parte 2: cimentos comuns, cinzas volantes, ... Cais hidratadas, CL, CAIS HUDRÁULICAS, NHL, conforme EN 459-1.
  - ❖ Quando apropriado adicionar outros constituintes, tais como cal, conforme EN 14227-11, e/ou agregados, ...
    - **Mistura fresca e Mistura amadurecida**
      - W (Water content), valores mínimos relativos ao Proctor;
      - P (Degree of Pulverization);
      - IPI (Immediate bearing index);
      - MCV (Moisture Condition Value);
      - CBR (Californian Bearing Ratio); ou
      - $R_c$  (Compressive Strength); ou
      - $R_t$  (Direct Tensile Strength) e E (Modulus of Elasticity)
      - I (Strength after Immersion);
      - LS (Swelling) e a Resistência ao gelo-degelo.

# ESTUDO DE FORMULAÇÃO LABORATORIAL

## ➤ CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS:

o Solo SM1



o Solo SM2



- ✓ CAL HIDRÁULICA NHL 5
- ✓ CIMENTO
- ✓ CAL HIDRÁULICA NHL 5 E CIMENTO.



# ESTUDO DE FORMULAÇÃO LABORATORIAL


## ➤ SOLO SM1 - acastanhado-avermelhado, A-2-7 (0)

- 0,074 mm - 18%;
- IP - 20%; LL - 43%; LP - 23%;
- EA - 24%; MB - 20,6; MO - 1,1%;
- W<sub>nat</sub> - 11,9%;  $\rho_{smax}$  - 1940 kg/m<sup>3</sup>; W<sub>óp</sub> - 10%; CBR<sub>3d</sub> - 18%; CBR<sub>4dimensão</sub> - 17%.

} Cimento e Cal adequados

## ➤ SOLO SM2 - castanho-claro, A-7-6 (10);



- 
- 0,074 mm - 54%;
  - IP - 26%; LL - 44%; LP - 18%;
  - EA - 10%; MB - 42,3; MO - 1,5%;
  - W<sub>nat</sub> - 14,3%;  $\rho_{smax}$  - 1750 kg/m<sup>3</sup>; W<sub>óp</sub> - 15%; CBR<sub>3d</sub> - 14%; CBR<sub>4dimensão</sub> - 4%.

} Cimento não adequado  
Cal adequada

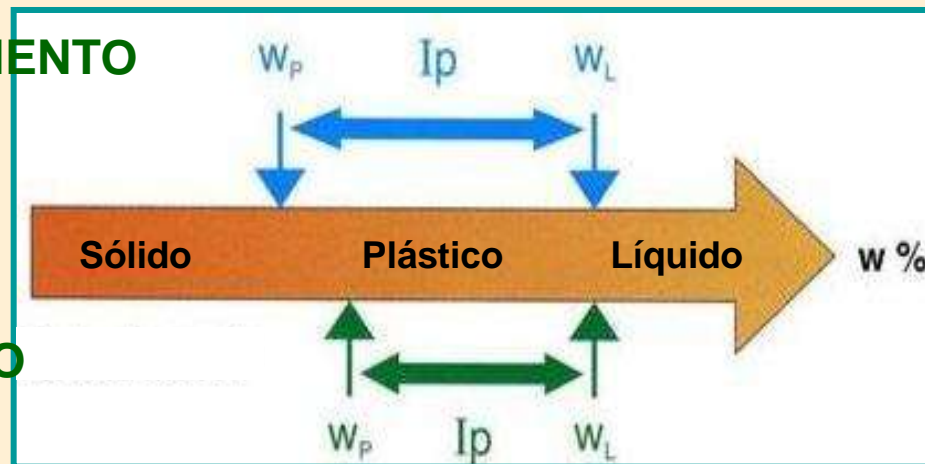
Ângela Nunes (Secil): 1 - 2% NHL5 + 3 - 4% CEMII/B-L 32,5N  
ou 4 - 8% NHL5

# ESTUDO DE FORMULAÇÃO LABORATORIAL

## ➤ CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS MELHORADOS:

### ❖ PLASTICIDADE DIMINUI:

ANTES DO TRATAMENTO



APÓS TRATAMENTO

Melhoramento das características plásticas de um solo devido ao efeito da cal

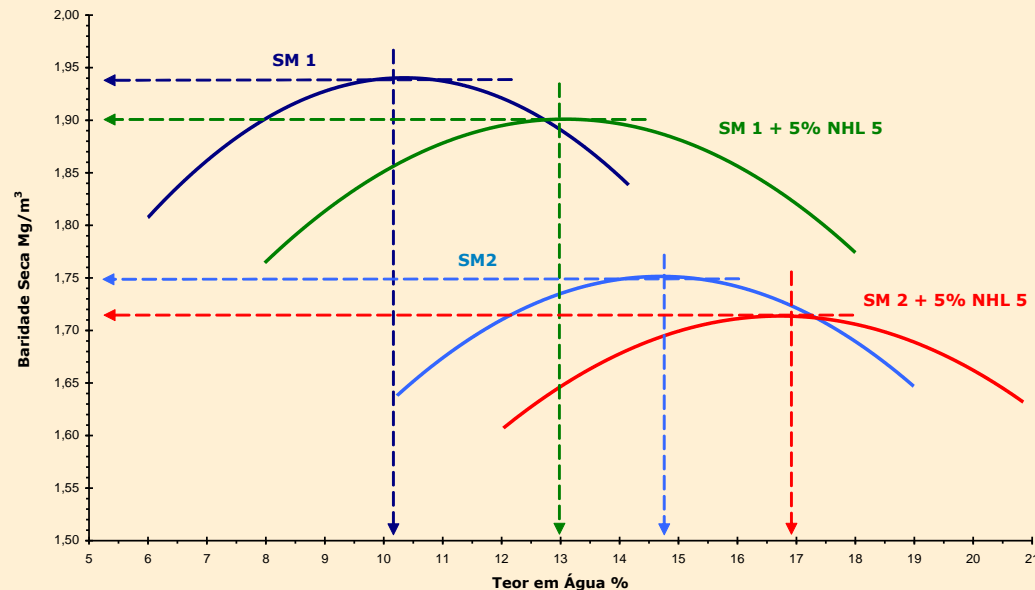
# ESTUDO DE FORMULAÇÃO LABORATORIAL

## ➤ CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS MELHORADOS:

ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR EN 13286-2

Baridade seca máxima e teor óptimo em água

Curvas de compactação



### ❖ A CURVA PROCTOR MODIFICA-SE:

- Forma mais plana;
- Baridade seca máxima menor ( $\rho_{smax}$ );
- Teor em água ótimo ( $W_{óp}$ ) mais elevado (1,5 a 4%).
- **GANHO NO ÍNDICE DE CBR.**





# SELECÇÃO DE TÉCNICAS DE RECICLAGEM PARA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS

Eficácia na resolução dos problemas existentes

Desempenho a longo prazo

Minimização dos custos dos utentes

Minimização dos custos da obra

Minimização dos impactes ambientais



# RAZÕES PARA A ELEIÇÃO DA SOLUÇÃO DE RECICLAGEM

## REABILITAÇÃO POR PROCESSOS TRADICIONAIS:

Fresagem dos materiais existentes mais degradados;

Transporte a vazadouro;

Reforço com novas misturas betuminosas.

## RECICLAGEM:

Economia de materiais;

Menor consumo de energia;

Eliminação das patologias existentes;

Homogeneidade das características dos materiais;

Correcção do perfil ou manutenção da cota da rasante.

# RECICLAGEM *IN SITU* COM CIMENTO

DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO EXISTENTE

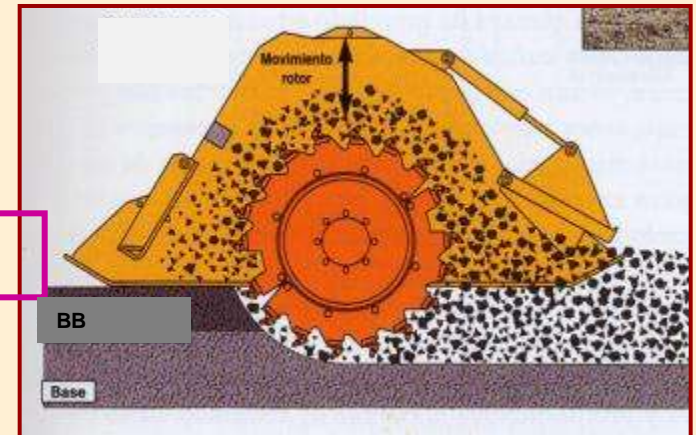
DIMENSIONAMENTO DO NOVO PAVIMENTO

ESTUDO DE FORMULAÇÃO (Composição, Resistências e Período de trabalhabilidade)

ESCOLHA DO EQUIPAMENTO



EMPREITADA



CONTROLO DA EXECUÇÃO



# RECICLAGEM *IN SITU* COM CIMENTO

Espessura da camada reciclada: 20 a 30 cm

$D < 63 \text{ mm}$  sem elementos  $> 80 \text{ mm}$

Ligante: 3 a 6% de cimento ou LHR

Água

Proctor Modificado (Wópt)

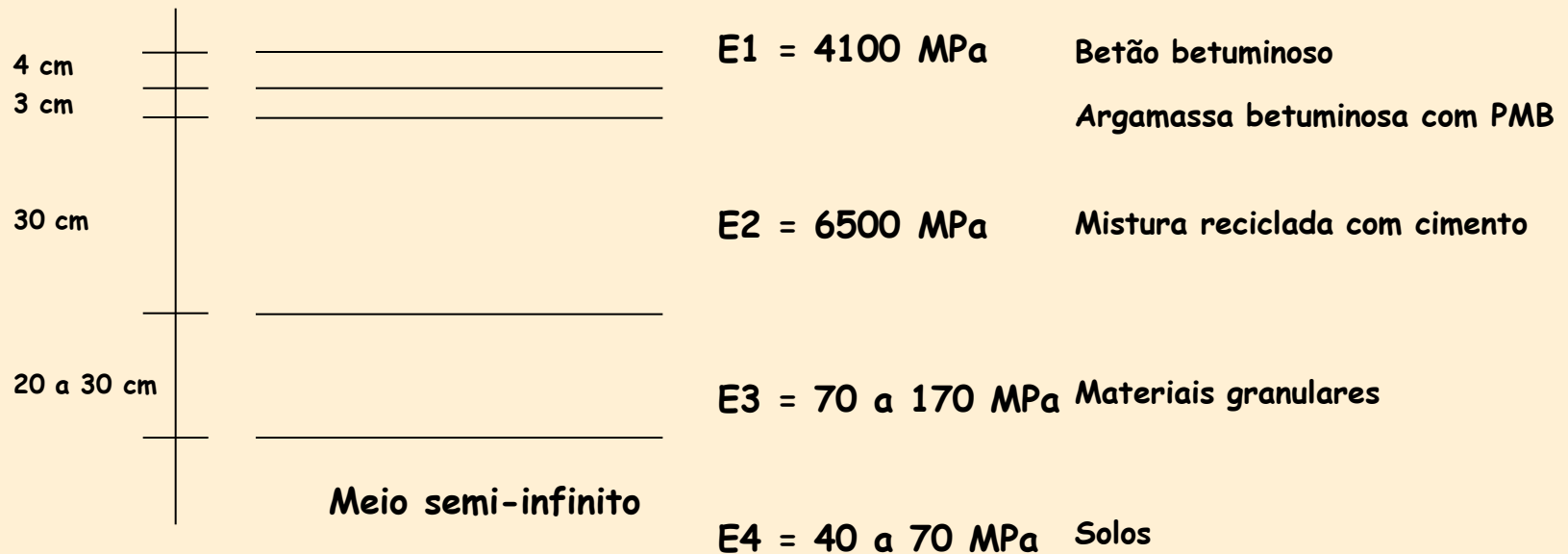
Ensaio de resistência

Identificação: gran., Finos ( $I_p$ , MB, WA), Proctor Modificado (Wópt), Resistência Mecânica....



# CASO DA VIA VITORINO NEMÉSIO, RAA

## DIMENSIONAMENTO



Resistência à compressão diametral mínima do material reciclado (conjunto de misturas betuminosas e diversos materiais granulares), aos 90 dias, de 0,9 MPa, a que corresponde uma resistência à flexão da ordem de 1,4 MPa.



# CASO DA VIA VITORINO NEMÉSIO, RAA

## EMPREITADA

DOSAGEM DE CIMENTO (%)	COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)		Baridade média (g/cm <sup>3</sup> )	COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)		Baridade média (g/cm <sup>3</sup> )
4,0	28 DIAS	8,99	2,551	28 DIAS	0,54	2,535
4,5		10,08	2,497		0,76	2,497
5,0		6,25	2,500		0,61	2,477
5,5		5,99	2,456		0,58	2,488
6,0		9,58	2,553		1,03	2,521
REQUISITOS DO CE	28 DIAS	---	---	28 DIAS	0,525	---
	90 DIAS	---	---	90 DIAS	0,9	---

## CARACTERIZAÇÃO FINAL DOS PAVIMENTOS

Idade (dias)	$h_{BB}$ [cm]	$h_{AB}$ [cm]	$h_{RC}$ [cm]	$E_{BB+AB}$ [MPa]	$E_{RC}$ [cm]	$E_{sf}$ [MPa]
> 90	3,8	2,9	31,1	5180	7860	60
> 90	4,2	3,0	31,0	5300	11500	70
70	3,8	3,9	26,6	4200	5700	55
58	4,0	2,3	27,8	4400	4000	90



**OBRIGADA PELA VOSSA  
ATENÇÃO!**