

V Jornadas FICAL Fórum Ibérico da Cal

Portugal | Lisboa | LNEC | 23-25 | maio | 2016



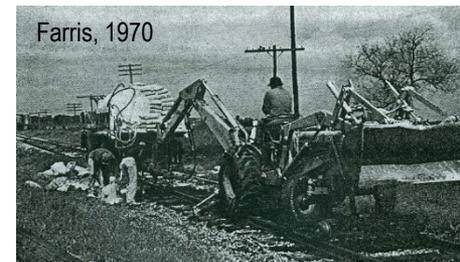
A cal no tratamento de materiais para a construção e reabilitação de infraestruturas de transporte

Eduardo Fortunato

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal

A importância do tema: utilização da cal em infraestruturas de transporte

- As primeiras utilizações de cal no tratamento de solos remontam a 3000 anos antes de Cristo (pirâmides de Shensi, no Tibete).
- O tratamento de solos foi utilizado na antiga Mesopotâmia na construção de estradas em terra.
- Durante a década de 60 do século XX os engenheiros portugueses procederam à estabilização de solos na construção rodoviária e aeroportuária em Moçambique.
- Na Europa esta técnica começou a ser utilizada nos anos 60 do século XX (rodovias e ferrovias).
- Atualmente esta técnica é prática corrente em vários países do mundo.
- Formas de utilizar a cal no tratamento de solos em infraestruturas de transporte
 - ✓ mistura de cal com solos para construção de camadas compactadas (solo-cal)
 - ✓ aterros correntes ou em zonas de transição
 - ✓ parte inferior de aterros em zonas inundáveis
 - ✓ aterros com taludes muito inclinados
 - ✓ camadas de leito, de base e sub-base de pavimentos
 - ✓ melhoria das características geotécnicas dos terrenos de fundação através de injeção de cal
 - ✓ construção de elementos de reforço do tipo inclusões de solo misturado com cal

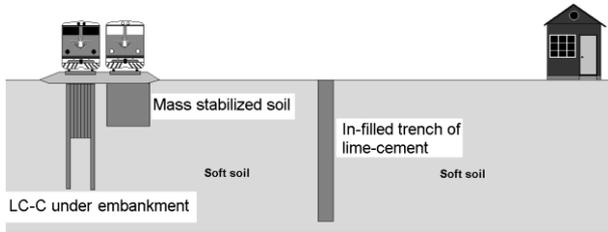


A técnica a utilizar em cada caso depende:

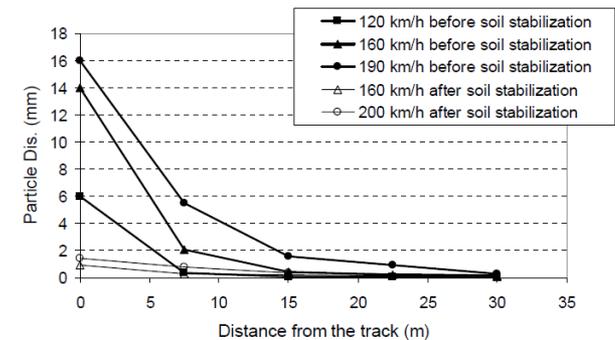
- Objetivos do projeto
- Características dos materiais
- Condições de execução e restrições

Pode-se pretender, por exemplo:

- Controlar a propagação de vibrações mecânicas



Particle displacement attenuation with distance



- Reforçar a fundação e reduzir os assentamentos



Colunas inclinadas (INNOTRACK, 2008)



Deep-mixing com pré-furação das camadas de apoio da via (INNOTRACK, 2008)



Efeitos da cal nos solos para construção de camadas compactadas:

- melhoria das características geotécnicas de solos húmidos inadequados (1-3% cal)

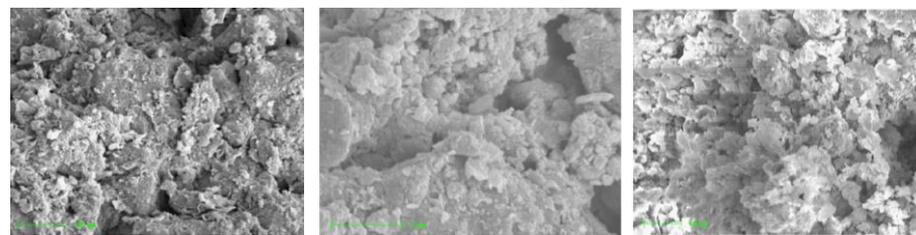
✓ melhoria das condições de compactação (secagem do solo e diminuição w_{opt})

✓ redução da plasticidade por floculação das partículas finas (+ trabalhabilidade; - sensibilidade à água)

✓ melhoria da capacidade de carga do solo (propriedades mecânicas)



Solo antes (à esquerda) e após (à direita) mistura com a cal (Graymont, 2016)



Alteração da microestrutura e da permeabilidade do solo (Bel et al., 2005)

- significativo aumento da rigidez e resistência mecânica - estabilização de solos (5-10% cal)



Vantagens da adição de cal na construção de camadas compactadas de solo:

- evita a substituição de materiais existentes nos locais das obras por outros difíceis de encontrar
- redução de custos (aquisição e transporte de materiais)
- diminuição dos tempos de execução das obras e redução de impactos (ambientais; património)
- aumento da qualidade e da eficiência nas intervenções de reabilitação em zonas com restrições físicas

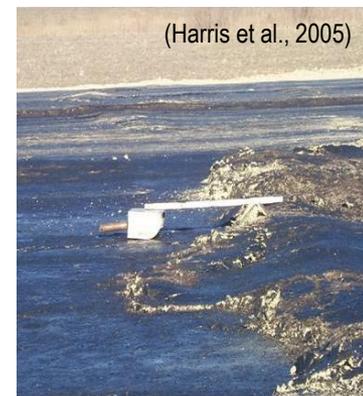
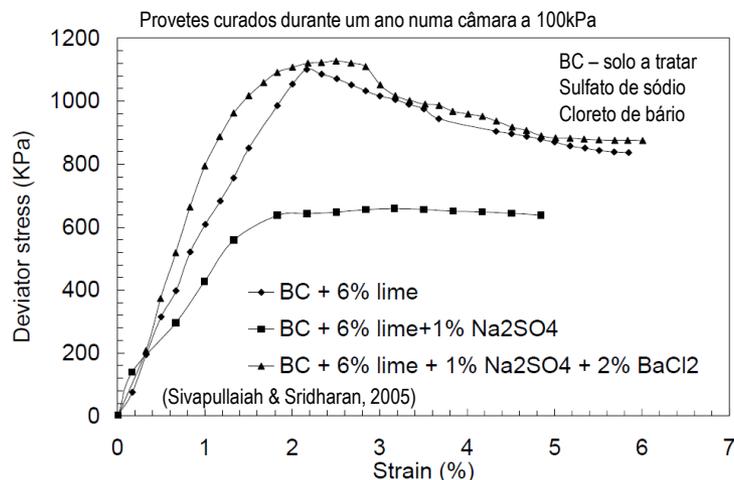
Aspetos que influenciam a eficácia do tratamento de solos com cal

- a natureza e parâmetros de estado dos solos
 - ✓ granulometria; $D_{máx}$; resistência mecânica das partículas (afeta a homogeneidade e eficiência dos equipamentos)
 - ✓ percentagem finos e mineralogia (influencia a plasticidade)
 - ✓ teor em água e compactidade (influenciam a escolha da cal e a qualidade do tratamento)
 - ✓ teor em matéria orgânica e pH do solo (influenciam a quantidade necessária de cal)
 - ✓ teor em fosfatos e nitratos (inibem ou retardam a presa hidráulica)
 - ✓ teor em cloretos (aceleram a presa e potenciam a expansão)
 - ✓ teor em sulfatos (espécies cristalinas que destroem a presa hidráulica, alteram as características e aumentam a expansibilidade)

Gran	Granulometria					
	>25% pass. no peneiro 0,075mm			<25% pass. no peneiro 0,075mm		
	$PI \leq 10$	$10 < PI \leq 20$	$PI \geq 20$	$PI \leq 6$ $PI \times \% < 0,075mm \leq 6$	$PI \leq 10$	$PI > 10$
Gran	A	NA	NA	A	A	D
Cim.	A	A	D	A	A	A
Cal	D	A	A	NA	D	A

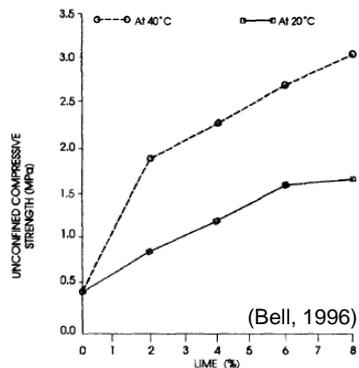
A - Adequado;
D - Duvidoso;
NA - Não adequado

Fonte: SADC "Guideline Low Volume Sealed Roads"



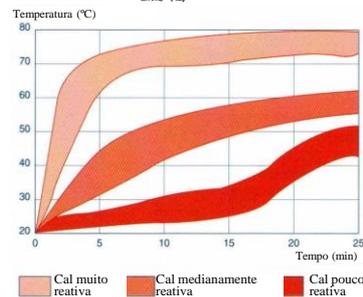
- quantidade, qualidade e tipo de cal

- ✓ teor em cal da mistura
- ✓ estado de conservação da cal
- ✓ viva, hidratada, leite de cal



- características físico-químicas da cal

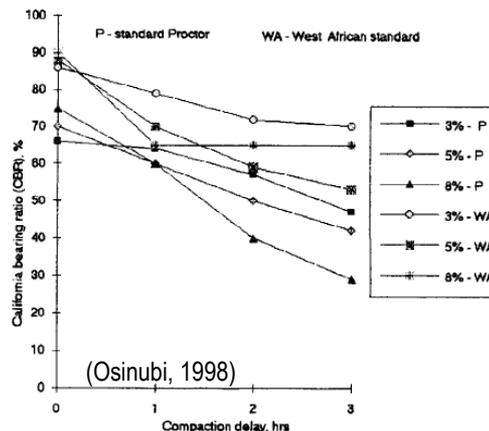
- ✓ granulometria
- ✓ solubilidade
- ✓ superfície específica das partículas
- ✓ teor em CaO
- ✓ reatividade



- equipamento utilizado no tratamento e técnica de execução da mistura



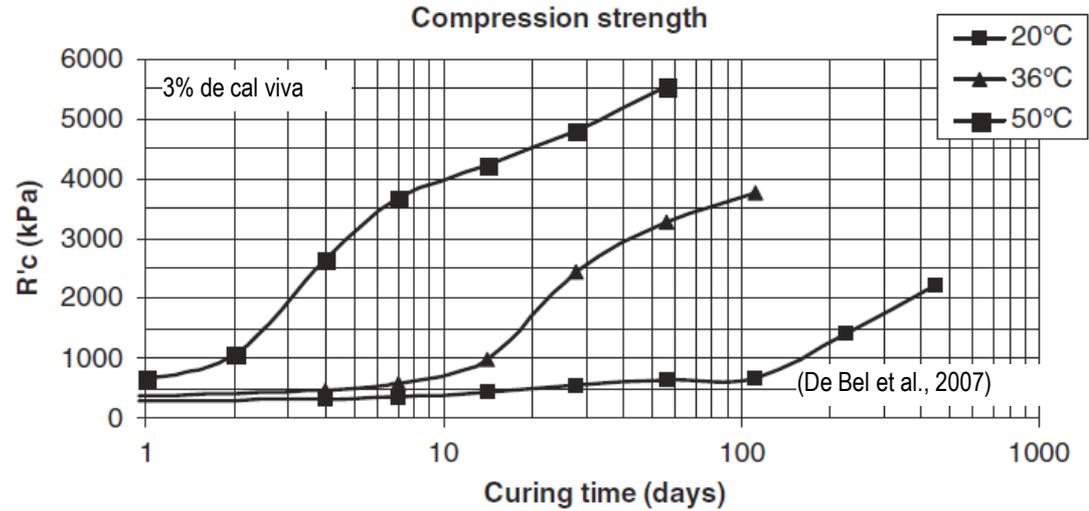
- energia e intervalo de compactação



(Osinubi, 1998)

- tempo e condições de cura (temperatura e humidade)

✓ $t > 4^{\circ}\text{C}$ durante 3 a 7 dias



- ✓ camada de proteção/impermeabilização (ex: rega betuminosa e espalhamento de gravilha ou areia)



Caracterização mecânica das misturas de solo com cal (laboratório ou in situ)



Requisitos dos solos tratados com cal

Estabelecimento dos objetivos em função das aplicações e dos materiais (IP, 2009)

- Solos tratados com cal para a parte inferior de aterros em zonas inundáveis

R_c (28dias) > 0,5 a 1,0 MPa após 14 dias de cura normal e 14 dias de embebição.

- Solos tratados com cal para aterro

Classe de solo	CBRim (inicial)	CBRim (final)
S0	<3	5
S1	3 a 5	5 a 15
S2	5 a 8	7 a 20

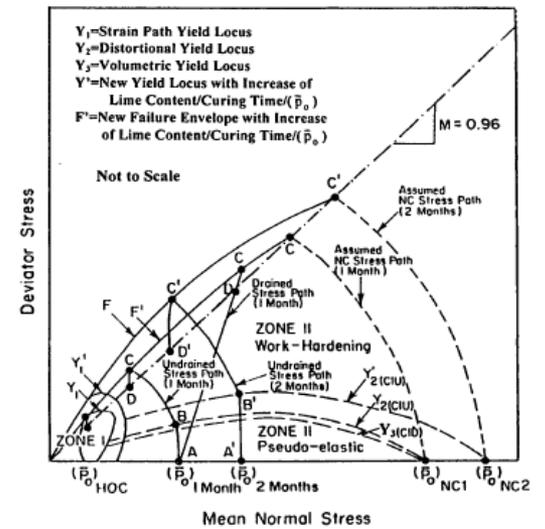
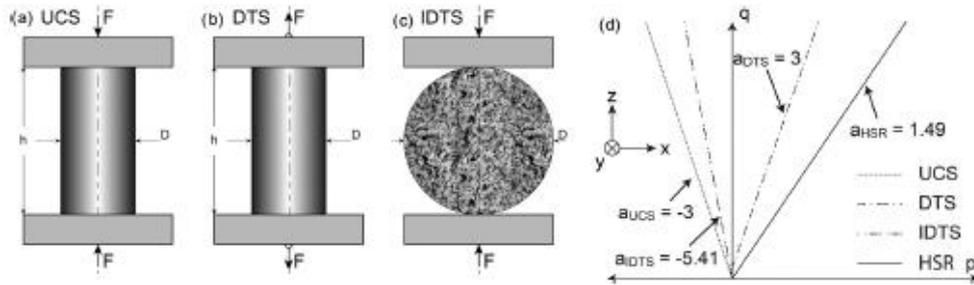
CBR imediato - 95% Proctor Normal e para o $W_{natural}$



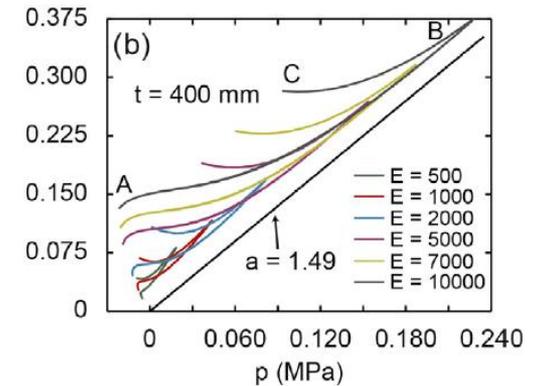
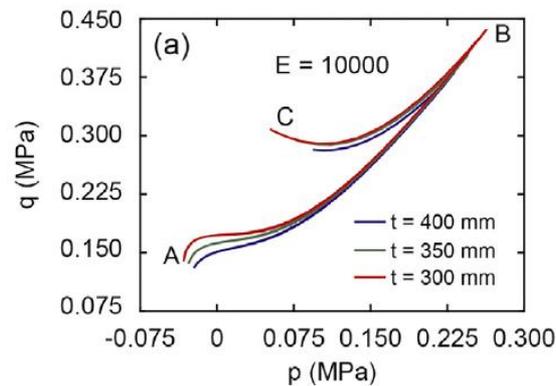
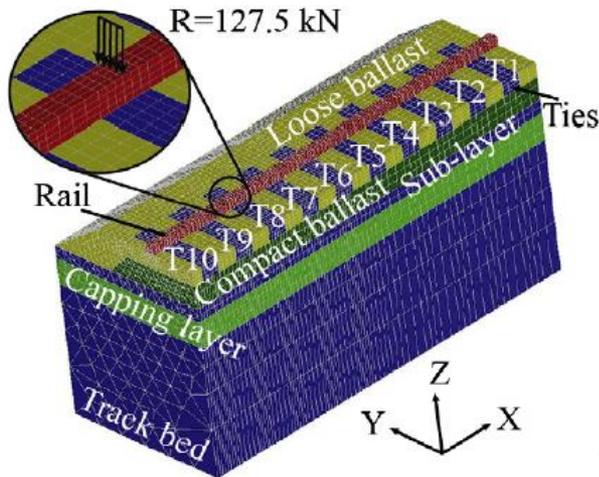
- Solo tratado com cal para o leito do pavimento

- ✓ CBR>20
- ✓ (CBR/CBRi)>1
- ✓ IP≤6
- ✓ expansibilidade ≤0,3%
- ✓ teor em cal ≥4%

Estabelecimento de modelos constitutivos da mistura solo-cal



Comportamento do material in-situ ?



(Preteuille et al., 2014)

No entanto....

existe ainda dificuldade em aceitar este tipo de técnica em camadas de apoio da via-férrea
leito de via e sub-balastro

Dúvidas sobre o comportamento
a longo prazo da estrutura

- Estabilidade
- Durabilidade
- Resistência mecânica
- Deformabilidade

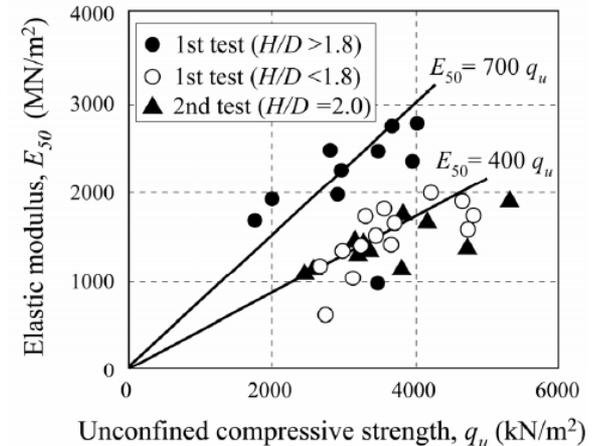
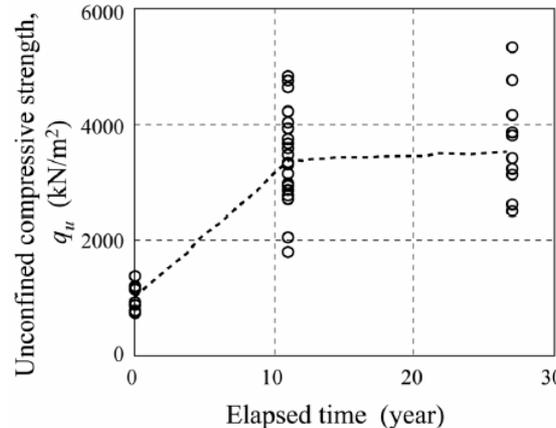
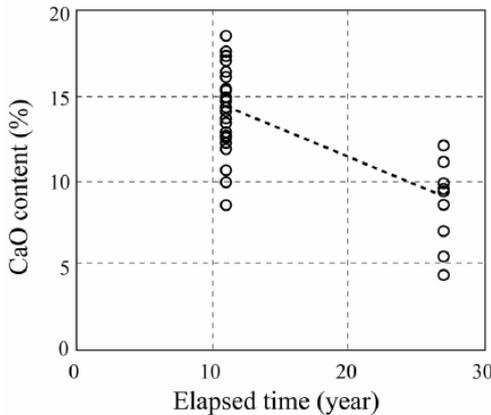


Porque...

- ocorrem muitas aplicações de carga a frequências elevadas impondo vários estados de tensão que podem induzir fissuração do solo-cal
- variações das condições de temperatura e humidade (molhagem e secagem)
- ausência de uma camada impermeável de proteção dos solos de fundação



Necessidade de realizar estudos para avaliar o comportamento dos materiais a longo prazo



(Kitazume & Takahashi, 2009)

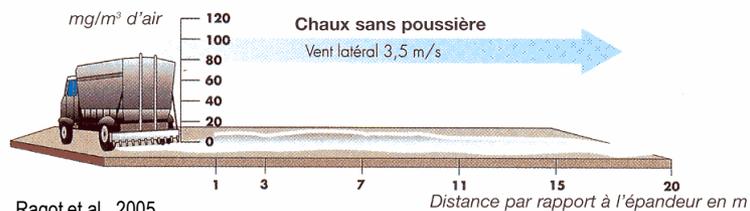
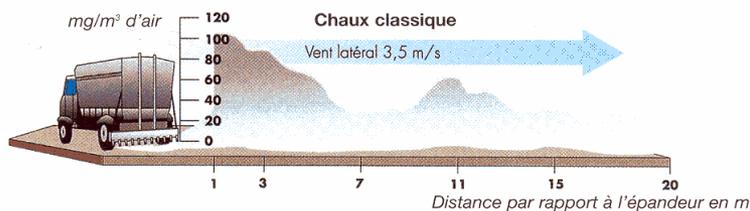
Eduardo Fortunato

Preocupações de saúde e ambientais

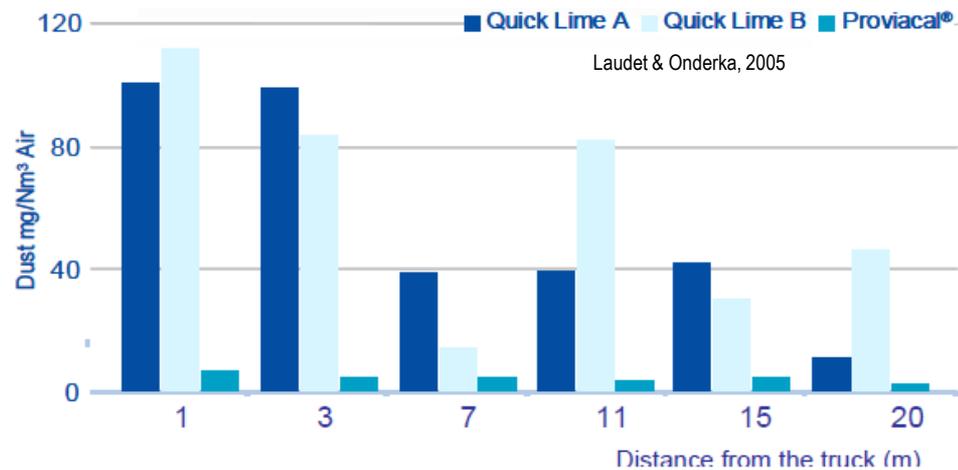


Utilização de cal com baixa emissão de pó

Comparaison des émissions de poussière à l'épandage



Ragot et al., 2005

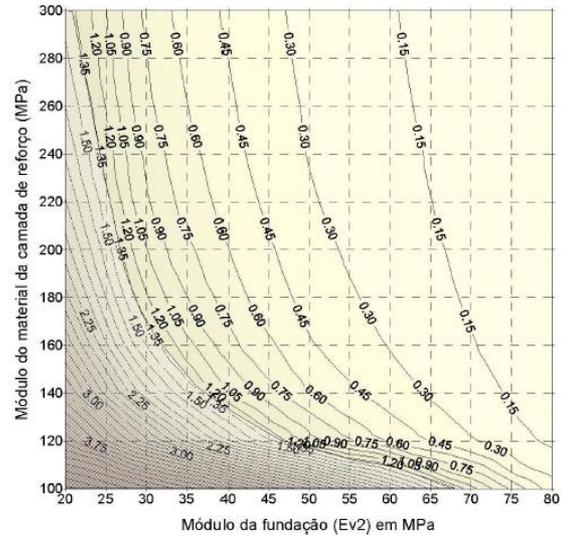
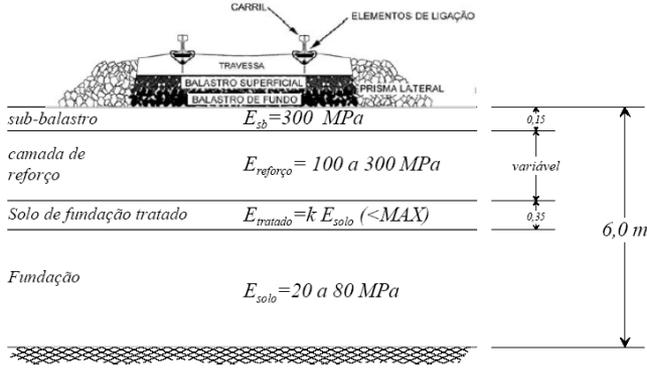


Laudet & Onderka, 2005

Aplicações de solos tratados com cal no âmbito da reabilitação de vias-férreas antigas em Portugal

• Linha do Norte

Método para dimensionar o reforço da plataforma ferroviária considerando a contribuição de uma camada de solo tratado *in situ* com cal (Mateus da Silva et. al (2006))



Tratamento de solos areno-argilosos e siltosos

- ✓ teores em cal entre 0,5 e 6% (em função do tipo de solo e do respetivo estado hídrico)
- ✓ $60 \leq EV_2 \leq 200 \text{ MPa}$



(Delgado, 2008)

- **Linha do Alentejo (troço Bombel e Vidigal a Évora)**

Castelo Branco et al. (2012)

Camada de coroamento da via construída com solos tratados com cal substituindo ABGE

- ✓ 2 a 4% de cal viva
- ✓ $80 \leq EV_2 \leq 160\text{MPa}$
- ✓ cumprimento do prazo de execução



solução eficiente em termos económicos, técnicos e ambientais



Aplicações rodoviárias em Portugal

Margas tratadas com cal em espaldas de aterro rodoviário e leito do pavimento na A10

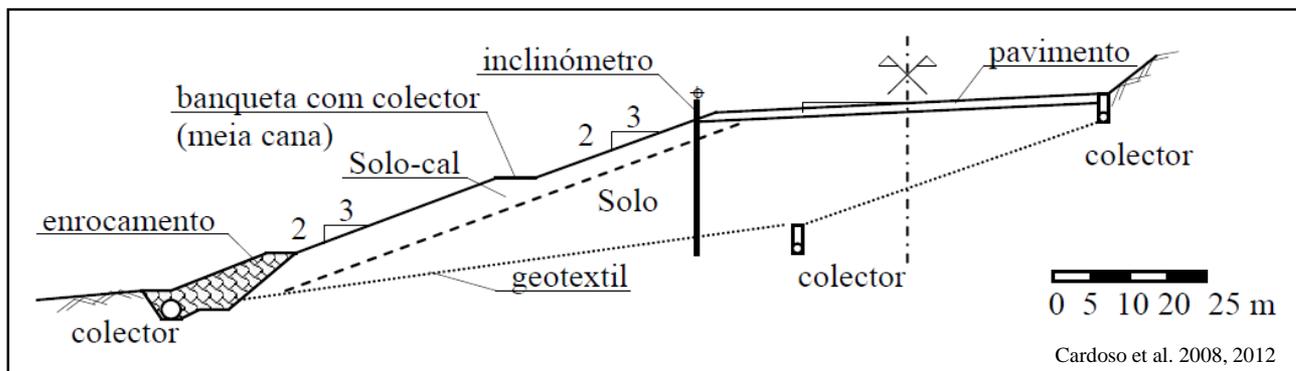
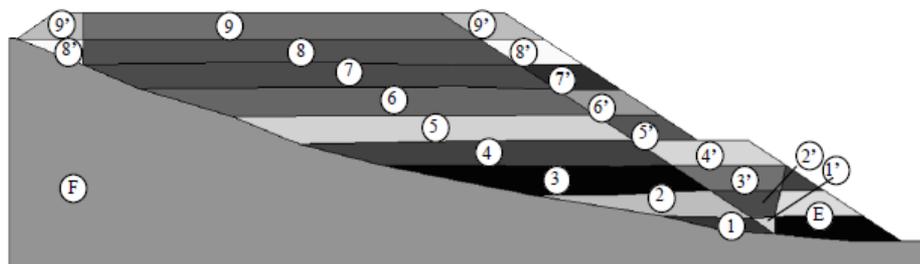


Figura 1 – Perfil Transversal Tipo do Aterro da A10.



Legenda: 1 a 9 – Camadas de solo
 1' a 9' – Camadas de solocal
 F – Solo de fundação
 E – Maciço de enrocamento (3 camadas)

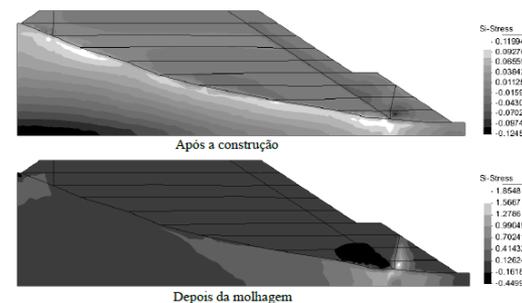


Figura 6 – Tensões Principais Relevantes no Aterro (valores em MPa).



Aparício, 2008



Aparício, 2008

Considerações finais

- O tratamento de solos no âmbito da construção e da reabilitação de infraestruturas de transporte é uma técnica que tem sido utilizada com sucesso em vários países.
- Ainda assim, continuam a existir dificuldades em estimar o comportamento a longo prazo dos solos tratados com cal.
- Há necessidade de continuar a desenvolver estudos para contribuir para o estabelecimento de valores de referência das propriedades dos materiais e assegurar um bom desempenho das infraestruturas.
- Os materiais e estruturas devem ser avaliados através da utilização sistemática de especificações baseadas no desempenho:
 - ✓ caracterização laboratorial dos materiais com recurso a ensaios de carga cíclica, para determinação do comportamento resiliente e da deformação permanente;
 - ✓ avaliação *in situ* da deformabilidade das camadas.



Parte deste estudo foi desenvolvido no âmbito da atividade do Grupo de Trabalho 4 – “Subestrutura da via-férrea, incluindo zonas de transição” - da Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes (CPGT) da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG).

Obrigado pela Vossa Atenção!

efortunato@lnec.pt