

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Estudo Laboratorial de Solos Tratados com Cal
Modelos de Comportamento**

Eduardo Nuno Sousa de Azevedo Castro Neves

Orientador:
António Viana da Fonsca

Co-Orientador:
Nuno Bravo de Faria Cruz

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

Julho 2009

Resumo

Esta dissertação pretende, ao menos, provocar o debate e activar a frequente utilização da técnica de tratamento de solos com recurso à cal em Portugal. O estudo foi desenvolvido no sentido de avaliar as modificações que os solos, frequentemente encontrados na construção de infra-estruturas rodoviárias e ferroviárias, sofrem após a adição de diferentes teores de cal viva.

O tratamento de solos com cal tem-se apresentado à engenharia geotécnica como um recurso capaz de dar resposta a três questões fundamentais: eficiência, economia e ecologia. Com efeito, esta técnica de tratamento de solos apresenta resultados satisfatórios do ponto de vista técnico, evita os impactos ambientais inerentes à utilização dos materiais tradicionais, e rentabiliza custos de obra e prazos de execução.

Nesse sentido, procurou-se seleccionar dois tipos de solos distintos: um de origem sedimentar e outro residual, existentes no nosso país e procedeu-se a uma extensa caracterização laboratorial. Essa caracterização compreendeu a caracterização física, química e mecânica, dos solos no seu estado natural e após a adição de 1,5, 2,5 e 4,0% de cal viva.

A caracterização química teve por objectivo conhecer com maior detalhe a natureza e constituintes dos solos em estudo e avaliar características fundamentais, tais como, presença de sulfatos e teor em matéria orgânica, que são fundamentais para a aptidão dos solos ao tratamento.

Por sua vez a caracterização física dos solos procurou avaliar as modificações que ocorrem após a adição da cal, nomeadamente na sua granulometria e comportamento da fracção fina no que diz respeito à sua argilosidade e sensibilidade à água.

Com a finalidade de avaliar a estabilização dos solos com a cal procedeu-se à sua caracterização mecânica através de ensaio IPI, CBR, compressões simples e compressões diametrais analisando a sua evolução em função do tempo de cura.

Procurou-se também identificar as alterações sofridas durante o processo de estabilização variando as condições de cura. Para tal procedeu-se a cura de provetes em câmara húmida, com temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa superior a 95%, cura de provetes em estufa a 40° C e cura de provetes imersos em água até 1/3 da sua altura conservados em câmara húmida.

Apresenta-se também o caso da obra de “Ampliação do Aeroporto da Portela – Plataforma Sul” onde foi aplicada esta técnica de tratamento aos solos.

Abstract

This dissertation intends, the least, to provoke the debate and to activate the frequent use of the technique of ground treatment with resource to the quick lime in Portugal. The study it was developed in the direction to evaluate the modifications that the ground, frequently found in the road and railway infrastructure construction, after suffer the addition from different percentages of quick lime.

The ground treatment with lime has been presented to geotechnical engineering as a resource capable to give answer to three fundamental questions: efficiency, economy and ecology. With effect, this technique of ground treatment presents resulted satisfactory of the point of view technician, it avoids inherent the environmental impacts to the use of the traditional materials, and rentabiliza costs of work and deadlines of execution.

In this direction, it was looked to select two types of distinct ground: one of residual origin sedimentary and other, existing in our country and proceeded it an extensive laboratorial characterization. This characterization understood the physical, chemical and mechanical characterization, of ground in its natural state and after the addition of 1,5, 2,5 and 4.0% of quick lime.

The chemical characterization had objective to know with bigger detail the nature and constituents of ground study and to evaluate fundamental characteristics, such as, presence of sulfatos and text in organic substance, that are fundamental for the aptitude of ground to the treatment.

In turn the physical characterization of ground looked for to evaluate the modifications that after occur the addition of the quick lime, namely in its granulometria and behavior of the fine fraction with respect to its argilosidade and sensitivity to the water.

With the purpose to evaluate the stabilization of ground with the quick lime was proceeded it its mechanical characterization through essay IPI, CBR, simple compressions and diametrical compressions analyzing its evolution in function of the cure time.

It was also looked to identify to the modifications suffered during the stabilization process varying the cure conditions. For such it was proceeded cure from test tubes in wet chamber, with temperature of 20 ± 2 °C and relative moisture better than 95%, cure of test tubes in heats 40° C and cure of immersed test tubes in water up to 1/3 of its height conserved in wet chamber.

The case of the work of “Magnifying of the Airport of the Portela is also presented - Platform South” where technique of treatment to ground was applied this

Agradecimentos

No decurso desta minha caminhada profissional, afortunadamente tenho beneficiado do incentivo e apoio, das opiniões e sugestões, e principalmente da amizade e carinho de muitas pessoas e algumas instituições que nunca esquecerei.

Pela importância que têm tido na minha vida profissional e académica aqui deixo o meu sincero agradecimento a algumas delas.

Em primeiro lugar, à LUSICAL- Companhia Lusitana de Cal, S.A., verdadeiro mecenas deste trabalho, pela confiança e apoio financeiro, sem os quais nunca teria sido possível realizar esta investigação.

Ao Senhor Professor António Viana da Fonseca, com quem aprendo sempre, enquanto orientador deste trabalho devo a disponibilidade que sempre demonstrou, bem como as indispensáveis ajudas que me indicaram o sentido da investigação.

Ao Mestre Nuno Cruz, credor de uma amizade e admiração especial, com quem já tive o prazer de trabalhar, por me ter despertado a curiosidade de querer saber mais e me ter ensinado que é sempre possível fazer melhor; como co-orientador desta investigação, devo os conselhos amigos e a pronta ajuda na discussão das minhas preocupações.

Ao Eng. Claude Joly que me ajudou na definição da temática a tratar e na planificação dos trabalhos, e que sempre, em todas as ocasiões, me contemplou com a sua sabedoria e entusiasmo constantes.

A todos os meus Colegas de trabalho do L.G.M.C. – Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção Civil do C.I.C.C.O.P.N., em especial aos meus colaboradores José Manuel, Rui, Daniel e a Marylene, agradeço a amizade e a ajuda que me ofereceram na realização de todos os ensaios. Ao Eng. Adriano Teixeira, agradeço a estima e o apoio para a concretização deste trabalho.

Sendo este um trabalho de cariz iminentemente prático, as visitas internacionais efectuadas revelaram-se essenciais para a compreensão da globalidade do estudo, pelo que agradeço aos Eng. Thierry Mollier e Eng. Oliver Denk, da egis géotechnique, pela partilha de conhecimentos e pela gentileza demonstrada na visita a Seyssins (França); e ao Eng. Miguel Lopez-Bachilla a quem devo o acompanhamento na obra de construção da auto-estrada Segóvia – Cuéllar na Norte de Madrid.

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

CBR – “Californian Bearing Ratio”

IPI – Índice de portance immédiate

G_v – Expansibilidade volumétrica

GC – Grau de compactação

CTC – Capacidade de Troca catiónica

D_{max} – diâmetro máximo das partículas

C_u – Coeficiente de uniformidade

W – teor em água

$W_{opt.}$ – Teor óptimo em água

$W_{nat.}$ – Teor em água natural

HR – Humidade relativa

t – Temperatura

min. – Minutos

h - horas

F_t - Força de rotura por tracção

$\gamma_{d\ max.}$ – Peso volúmico seco máximo

γ_w - Peso volúmico húmido

γ_d - Peso volúmico seco

σ_t - Tensão de rotura por tracção

σ_1 – Tensão axial total

σ_3 – Tensão radial total

σ'_1 – Tensão axial efectiva

σ'_3 – Tensão radial efectiva

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ – Tensão de desvio

u – Pressão neutral

ε_a - Extensão axial

t – Tensão de desvio media $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$

s' - Tensão média efectiva

S_u – Resistência não drenada

σ_d – Tensão de desvio

σ_c – Tensão de consolidação

Δu – Incremento de pressão neutra

$\Delta\sigma_3$ – Incremento de tensão radial

P.R - Perda ao rubro

SIGLAS

AGE – Agregado de granulometria extensa

ANCADE - Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España

ANTER - Asociación Técnica de Estabilizados de suelos y reciclado de firmes

ASTM – “American Society for Testing and Materials”

APHA - American Public Health Association, Washington, DC.

E – Especificação do LNEC

GTR - Guide Technique: Réalisation des remblais et des couches de forme

GTS - Guide Technique: Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

IPAC – Instituto Português de Acreditação de Laboratórios

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP – Norma Portuguesa

TRB – Transportation Research Board

SÍMBOLOS QUÍMICOS

CaO – Oxido de cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

MgO – Óxido de magnésio

Mg(OH)_2 – Hidróxido de magnésio

CaCO_3 – Carbonato de cálcio

SiO_2 – Óxido de silício

Fe_2O_3 – Ferro

Al_2O_3 - Alumínio

Índice

1. CAPÍTULO - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.1. INTRODUÇÃO	2
1.2. OBJECTIVO DO TRABALHO	4
1.3. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	5
2. CAPÍTULO – PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS MATERIAIS	7
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
2.2. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ARGILAS	8
2.2.2. Estrutura mineral das argilas	9
2.2.3. Capacidade de permuta das argilas	12
2.2.4. Cargas superficiais	13
2.2.5. Dupla camada	14
2.2.6. Dimensão das partículas	16
2.2.7. Tipos de argilas	16
2.2.8. Propriedades dos solos argilosos	18
2.3. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA CAL	19
2.3.1. Processo de fabrico	20
2.3.2. Tipos e classificação da cal	25
2.3.3. Caracterização da cal aérea	27
3. CAPÍTULO – MODIFICAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL	28
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	29
3.2. PRINCIPAIS REACÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS	29
3.2.1. Generalidade	29

3.2.2. Permuta iónica	30
3.2.3. Floculação e aglomeração de partículas	31
3.2.4. Acções de cimentação	32
3.2.5. Acção de carbonatação	34
3.3. EFEITOS DA APLICAÇÃO DA CAL	35
3.3.1. Modificações do estado hídrico do solo	35
3.3.2. Modificação das características da fracção argilosa do solo	36
3.3.3. Modificação da textura e consistência	37
3.4. FACTORES CONDICIONANTES NO TRATAMENTO DE UM SOLO COM CAL	38
3.5. METODOLOGIA GERAL DOS ESTUDOS DE SOLOS TRATADOS COM CAL	41
3.5.1. Procedimento do Texas	42
3.5.2. Procedimento Eades and Grim	44
3.5.3. Metodologia Francesa (GTS 2000)	46
4. CAPÍTULO – CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL	50
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	51
4.2. CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL	53
4.2.1. Ensaio de identificação e caracterização física	54
4.2.1.1. Ensaio de avaliação da aptidão do solo ao tratamento	55
4.2.1.2. Análise granulométrica	56
4.2.1.3. Limites de consistência	60
4.2.1.4. Azul de metileno	64
4.2.1.5. Equivalente de areia	67
4.2.1.6. Densidade das partículas	70

4.2.1.7. Classificação dos solos	70
4.2.2. Ensaios de caracterização química	72
4.2.2.1. Capacidade de troca catiónica;	72
4.2.2.2. Determinação do pH;	74
4.2.2.3. Determinação do teor em matéria orgânica	76
4.2.2.4. Determinação do teor de sulfatos	76
4.2.2.5. Determinação do teor em cloretos;	77
4.2.2.6. Análise mineralógica – Difraccção raio X;	77
4.2.2.7. Dosagem de elementos maiores – Fluorescência de raio X ;	78
4.2.3. Ensaios de caracterização mecânica	79
4.2.3.1. Ensaios de compactação	79
4.2.3.2. Ensaios de IPI	86
4.2.3.3. Ensaios de CBR	92
4.2.3.4. Relação entre o IPI e o CBR	96
4.2.3.4. Ensaios de compressão uniaxial	99
4.2.3.5. Resistência à tracção indirecta	113
4.2.3.6. Ensaios triaxiais clássicos	114
5. CAPÍTULO – CASO DE OBRA	130
5.1. CASO DE OBRA	131
5.1.1. Introdução	131
5.1.2. Metodologia de execução do aterro experimental	131
5.1.3. Ensaios de caracterização física e mecânica	135
5.1.3.1. Ensaios de laboratório	135

5.1.3.2. Ensaio “in situ”	143
6. CAPÍTULO – CONSIDERAÇÕES FINAIS	148
6.1. Introdução	149
6.2. Principais conclusões	150
6.3. Desenvolvimentos futuros	152

Índice de Figuras

<i>Figura 2.1 - Duas das mais comuns estrutura dos solos são a sílica tetraédrica (a) e o alumínio octaédrico (b) (adaptado de Little, 1995)</i>	9
<i>Figura 2.2 - Unidades tetraédricas e octaédricas podem também arranjar-se em folhas com grandes áreas superficiais (adaptado de Little, 1995)</i>	11
<i>Figura 2.3 - Unidades básicas de 1:1 mineral caulinite (a) e 2:1 mineral montmorilonite (b) (adaptado de Little, 1995)</i>	12
<i>Figura 2.4 – Os catiões e a água são atraídos pela superfície de argila negativamente carregada. Isto resulta em: a) catiões e moléculas de água adsorvidos à superfície e b) uma camada difusa de catiões e entrada de água em direcção à superfície da argila devida à elevada concentração electrolítica (adaptado de Little, 1987)</i>	14
<i>Figura 2.5 – Pedra calcária (Correia, 2008)</i>	20
<i>Figura 2.6 – Pedra calcária após calcinação (Correia, 2008)</i>	21
<i>Figura 2.7 – Ilustração do processo de calcinação da pedra calcária (Correia, 2008)</i>	22
<i>Figura 2.8 – Óxido de cálcio em pó (cal viva) (Correia, 2008)</i>	22
<i>Figura 2.9 - Esquema geral do processo de fabrico da cal (imagem cedida por Claude Joly) (</i>	23
<i>Figura 2.10 – Tipos de cal de construção (NP EN 459-1:2002)(</i>	25
<i>Figura 3.1 – Ilustração da reacção pozolânica resultante da acção do cálcio com a sílica e alumina dos solos (Puatti, 2008, adaptado)</i>	33
<i>Figura 3.2 - Solubilidade do SiO_2 e do Al_2O_3 em função do pH do meio (Dallas Little, 1995)</i>	34
<i>Figura 3.3 - Partículas de argila separadas por uma larga camada de água adsorvida (Dallas Little, 1995)</i>	37
<i>Figura 3.4 - Adição de cal provoca a diminuição da camada de água e permite a floculação (Dallas Little, 1995)</i>	38
<i>Figura 3.5 – Determinação da percentagem óptima de cal para ensaios de compressão com base nos valores de IP e percentagem de passados no peneiro nº40 (TRB Report 5, 1987, adaptado in Cruz 2008)</i>	44
<i>Figura 3.6 - Eades and Grim pH teste (Dallas Little, 1995)</i>	45
<i>Figura 3.7 – Exemplo de representação dos resultados de um estudo de formulação de um solo para reutilização em aterros (GTS 2000, adaptado in Cruz 2008)</i>	47
<i>Figura 4.1 - Extracto da carta geológica de Portugal, na escala 1:50 000 com a localização da zona de recolha</i>	51

<i>Figura 4.2 - Extracto da carta geológica de Portugal, na escala 1:50 000 com a localização da zona de recolha</i>	52
<i>Figura 4.3 – Extracto da carta geológica do Conselho de Lisboa dos Serviços Geológicos de Portugal, à escala 1:10 000 com a localização da zona de recolha</i>	52
<i>Figura 4.4 – Variação da temperatura da mistura de solo com 4% de cal</i>	53
<i>Figura 4.5 – Fotografia do provete para ensaio de avaliação da aptidão ao tratamento com cal</i>	55
<i>Figura 4.6 – Curvas granulométricas do solo natural e com 4% de cal para t=2 e 72 horas após a mistura - S100</i>	57
<i>Figura 4.7 – Fotografias do ensaio de sedimentação para t=72 horas do solo de Alter do Chão – S100</i>	58
<i>Figura 4.8 - Curvas granulométricas do solo natural com 1,5%, 2,5% e 4,0 % em cal para 72 horas após a mistura – S200</i>	59
<i>Figura 4.9 - Curvas granulométricas do solo natural – S300</i>	59
<i>Figura 4.10 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=2 horas) – S100</i>	61
<i>Figura 4.11 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=72 horas) – S100</i>	62
<i>Figura 4.12 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=2 horas) – S200</i>	63
<i>Figura 4.13 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=72 horas) – S200</i>	63
<i>Figura 4.14 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=2 horas) – S300</i>	64
<i>Figura 4.15 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=72 horas) – S300</i>	64
<i>Figura 4.16 - Valor do azul de metileno em função do teor em cal às 2 e 72 horas - S100</i>	66
<i>Figura 4.17 - Valor do azul de metileno em função do teor em cal às 2 e 72 horas – S200</i>	67
<i>Figura 4.18 - Valor do azul de metileno em função do teor em cal às 2 e 72 horas – S300</i>	67
<i>Figura 4.19 - Valor do equivalente de areia em função do teor em cal às 2 e 72 horas – S100</i>	69
<i>Figura 4.20 - Valor do equivalente de areia em função do teor em cal às 2 e 72 horas – S200</i>	69
<i>Figura 4.21 - Valor do equivalente de areia em função do teor em cal às 2 e 72 horas – S300</i>	69
<i>Figura 4.22 - Variação do pH em função da percentagem de cal - S100</i>	75
<i>Figura 4.23 - Variação do pH em função da percentagem de cal – S200</i>	75
<i>Figura 4.24 - Variação do pH em função da percentagem de cal – S300</i>	75
<i>Figura 4.25 - Variação do teor óptimo em água e do peso volúmico seco máximo em função do teor em cal para t=2horas – S100</i>	81

<i>Figura 4.26 - Variação do teor óptimo em água e do peso volúmico seco máximo em função do teor em cal para t=2horas – S300</i>	82
<i>Figura 4.27 - Variação do teor óptimo em água e do peso volúmico seco máximo em função do teor em cal para t=2horas – S300</i>	82
<i>Figura 4.28 – Curva de compactação do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas - S100</i>	83
<i>Figura 4.29 – Curva de compactação do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas – S200</i>	83
<i>Figura 4.30 – Curva de compactação do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas – S300</i>	84
<i>Figura 4.31 – Curva de compactação do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 72 horas - S100</i>	84
<i>Figura 4.32 – Curva de compactação do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 72 horas – S200</i>	85
<i>Figura 4.33 – Evolução do IPI com o teor em água do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas - S100</i>	87
<i>Figura 4.34 – Evolução do IPI com o teor em água do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas – S200</i>	88
<i>Figura 4.35 – Evolução do IPI com o teor em água do solo natural e com 2,0 e 3,0 % de cal para t = 2 horas – S300</i>	89
<i>Figura 4.36 – Evolução do IPI com o teor em água do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 72 horas - S100</i>	90
<i>Figura 4.37 – Evolução do IPI com o teor em água do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 72 horas – S200</i>	91
<i>Figura 4.38 – Evolução do CBR com o teor em água do solo natural e com 1,5 e 4,0 % de cal – S100</i>	94
<i>Figura 4.39 – Evolução do CBR com o teor em água do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal – S200</i>	94
<i>Figura 4.40 - Evolução do CBR para diferentes energias de compactação do natural e com 2,0 e 3,0% de cal – S300</i>	95
<i>Figura 4.41 - Evolução do CBR em função do teor em cal para diferentes solos estudados – S100, S200 e S300</i>	96
<i>Figura 4.42 - Variação do IPI e do CBR com o teor em água para o solo natural – S200</i>	97

<i>Figura 4.43 - Variação do IPI e do CBR com o teor em água para o solo com um teor em cal de 1,5% – S200</i>	98
<i>Figura 4.44 - Variação do IPI e do CBR com o teor em água para o solo com um teor em cal de 2,5% – S200</i>	98
<i>Figura 4.45 - Variação do IPI e do CBR com o teor em água para o solo com um teor em cal de 4,0% – S200</i>	98
<i>Figura 4.46 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S100 com teor em cal de 1,5% e cura em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$)</i>	101
<i>Figura 4.47 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S100 com teor em cal de 4,0% e cura em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$)</i>	102
<i>Figura 4.48 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S200 com teor em cal de 1,5% e cura em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$)</i>	102
<i>Figura 4.49 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S200 com teor em cal de 2,5% e cura em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$)</i>	103
<i>Figura 4.50 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S200 com teor em cal de 4,0% e cura em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$)</i>	103
<i>Figura 4.51 – Resistência a compressão em função do tempo de cura, para provetes com 1,5% de cal – Solo S200</i>	104
<i>Figura 4.52 - Resistência a compressão em função do tempo de cura, para provetes com 2,5% de cal – Solo S200</i>	104
<i>Figura 4.53 - Resistência a compressão em função do tempo de cura, para provetes com 4,0% de cal – Solo S200</i>	105
<i>Figura 4.54 – Representação da resistência à compressão em função do tempo de cura para o solo S200 com 1,5, 2,5 e 4,0% de cal, curado em câmara húmida ($20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} > 95\%$)</i>	106
<i>Figura 4.55 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S200 com teor em cal de 4,0% e cura em estufa a 40°C</i>	108
<i>Figura 4.56 - Efeito do tipo de cura na evolução das resistências à compressão em função do tempo para uma mistura com 4% de cal – S200</i>	109
<i>Figura 4.57 – Representação das duas fases de crescimento das resistências à compressão em função do tempo para diferentes condições de cura de uma mistura com 4% de cal – S200</i>	109
<i>Figura 4.58 – Cura de provetes de solo natural e estabilizado com 3% de cal imersos em água até 1/3 da sua altura – S300</i>	111

<i>Figura 4.59 – Pormenor com o aspecto dos provetes imediatamente após a imersão em água a 1/3 da sua altura. a) solo tratado, b) solo natural – S300</i>	111
<i>Figura 4.60 – Desagregação dos provetes de solo natural após 1 hora de imersos em água até 1/3 da sua altura – S300</i>	112
<i>Figura 4.61 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S300 com teor em cal de 3,0% e cura em câmara húmida e imersos 1/3 da sua altura em água</i>	113
<i>Figura 4.62 e 4.63 – Curvas tensão de desvio extensão axial e pressão neutra extensão axial do ensaio triaxial realizado sobre o solo natural – S200</i>	116
<i>Figura 4.64 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$ do solo natural – S200</i>	118
<i>Figura 4.65 – Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$ do solo natural – S200</i>	118
<i>Figura 4.66 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$ do solo natural – S200</i>	119
<i>Figura 4.67 – Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$ do solo natural – S200</i>	120
<i>Figura 4.68 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$ do solo natural – S200</i>	121
<i>Figura 4.69 - Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$ do solo natural – S200</i>	121
<i>Figura 4.70 e 4.71 - Curvas tensão de desvio extensão axial e pressão neutra extensão axial do ensaio triaxial realizado sobre o solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200</i>	123
<i>Figura 4.72 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200</i>	125
<i>Figura 4.73 – Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200</i>	125
<i>Figura 4.74 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200</i>	126
<i>Figura 4.75 – Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200</i>	127
<i>Figura 4.76 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200</i>	128
<i>Figura 4.77 - Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200</i>	128
<i>Figura 5.1 – Esquema dos trechos estudados no aterro experimental (Santos, 2009)</i>	132

<i>Figura 5.2 – Regularização da camada de fundação do aterro experimental (foto cedida por Santos, 2009)</i>	132
<i>Figura 5.3 – Espalhamento e mistura a cal no aterro experimental</i>	134
<i>Figura 5.4 – Compactação das camadas estabilizadas com cal no aterro experimental</i>	134
<i>Figura 5.5 – Evolução do equivalente de areia com diferentes teores em cal para os solos do aterro experimental e estudo laboratorial do solo S300</i>	138
<i>Figura 5.6 - - Evolução do azul de metileno com diferentes teores em cal para os solos do aterro experimental e estudo laboratorial do solo S300</i>	138
<i>Figura 5.7 - Evolução da percentagem de passados no peneiro de 0,075 mm em função da percentagem de cal</i>	139
<i>Figura 5.8 - - Evolução do peso volúmico seco máximo com diferentes teores em cal para os solos do aterro experimental e estudo laboratorial do solo S300</i>	141
<i>Figura 5.9 - - Evolução do peso volúmico seco máximo com diferentes teores em cal para os solos do aterro experimental e estudo laboratorial do solo S300</i>	142
<i>Figura 5.10 - Evolução do teor óptimo em água com diferentes teores em cal para os solos do aterro experimental e estudo laboratorial do solo S300</i>	142
<i>Figura 5.11 – Evolução da rigidez com o teor em cal em função do tempo de cura, para o aterro experimental</i>	146
<i>Figura 5.12 - Evolução da rigidez com o tempo de cura m função do teor em cal, para o aterro experimental</i>	147

Índice de quadros

<i>Quadro 2.1 - Capacidade de troca catiónica de alguns minerais argilosos (adaptado de Salas e AkIpañes, 1975 in Neves, 1993)</i>	13
<i>Quadro 2.2 - Propriedades das caulinites e das montmorilonites (adaptado de Castelló, 2003)</i>	18
<i>Quadro 2.3 – Propriedades dos solos de natureza argilosos (adaptado de Castelló, 2003)</i>	19
<i>Quadro 2.4 - Principais fases do processo de fabrico da cal (Procedimento Lusical, adaptado).</i>	24
<i>Quadro 2.5 – Vantagens e Inconvenientes de cada uma das formas utilizadas da cal (Cruz, 2008).</i>	26
<i>Quadro 2.6 – Características químicas e físicas da cal aérea a utilizada no tratamento de solos de acordo com a NP EN 459-1:2001</i>	27
<i>Quadro 3.1 – Alcance das diversas fases nos níveis de estudo (Castelló, 2003, adaptado)</i>	49
<i>Quadro 4.1 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de avaliação da aptidão ao tratamento com cal – S200</i>	55
<i>Quadro 4.2 – Resumo dos valores da análise granulométrica dos solos naturais e com diferentes teores em cal</i>	56
<i>Quadro 4.3 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de limites de consistência para os solos naturais e com diferentes teores de cal para t = 2 e 72 horas</i>	61
<i>Quadro 4.4 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios de azul de metileno para os solos naturais e com diferentes teores em cal para t = 2 e 72 horas</i>	66
<i>Quadro 4.5 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios equivalente de areia para os solos naturais e com diferentes teores em cal para t = 2 e 72 horas</i>	68
<i>Quadro 4.6 – Resumo das densidades dos solos naturais e com diferentes teores em cal</i>	70
<i>Quadro 4.7 – Classificação dos solos naturais e com os diferentes teores em cal utilizados no estudo</i>	71
<i>Quadro 4.8 - Capacidade de troca catiónica de alguns dos principais minerais argilosos (adaptado de Lambe, 1969)</i>	73
<i>Quadro 4.9 – Resumo dos valores de capacidade de troca catiónica para os solos naturais e com diferentes teores em cal</i>	73
<i>Quadro 4.10 – Resumo dos valores do pH do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal</i>	74
<i>Quadro 4.11 – Resumo dos valores da matéria orgânica dos solos naturais</i>	76
<i>Quadro 4.12 – Resumo dos valores do teor em sulfatos dos solos naturais</i>	77
<i>Quadro 4.13 – Resumo dos valores do teor de cloretos dos solos naturais</i>	77

Quadro 4.14 – Resumo dos valores da análise mineralógica dos solos naturais	78
Quadro 4.15 – Resumo dos valores da análise química dos solos naturais	78
Quadro 4.16 – Resumo dos pesos volúmicos secos máximos e teores óptimos em água para os solos naturais e com diferentes teores em cal	80
Quadro 4.17 - Valores do IPI do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas - S10087	
Quadro 4.18 - Valores do IPI do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas – S20088	
Quadro 4.19 - Valores do IPI do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 72 horas - S100	90
Quadro 4.20 - Valores do IPI do solo natural e com 1,5 e 4,0 % de cal para t = 72 horas – S200	91
Quadro 4.21 - Resumo dos valores obtidos no ensaio CBR com variação do teor para os solos naturais e com diferentes teores em cal	93
Quadro 4.22 – Resumo dos valores obtidos no ensaio CBR com variação de energia, para o solo natural e com 2 e 3 % de cal - S300	95
Quadro 4.23 – Resumo da relação entre os valores do CBR e IPI para teores em cal de 1,5, 2,5 e 4,0% – S200	97
Quadro 4.24 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial para o solo natural e com 1,5 e 4,0% de teor de cal – S100	100
Quadro 4.25 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial para o solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0% de teor de cal – S200	101
Quadro 4.26 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial para o solo com 4,0% de teor de cal curados a uma temperatura de 40°C – S200	107
Quadro 4.27 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial para o solo natural e com 3,0% de teor de cal conservados em câmara húmida e imersos em água 1/3 da sua altura – S300	112
Quadro 4.28 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de tracção indirecta para o solo natural e com 1,5 2,5 e 4,0% de teor de cal conservados em câmara húmida – S100 e S200.	114
Quadro 4.29 – Resumo das características dos provetes para triaxial do solo natural – S200	115
Quadro 4.30 – Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max.}$, solo natural - S200	117
Quadro 4.31 – Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma_1 / \sigma_3)_{max.}$, solo natural - S200	119

<i>Quadro 4.32 - Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$, solo natural - S200</i>	120
<i>Quadro 4.33 – Resumo das características dos provetes para triaxial do solo com 4% de cal – S200</i>	122
<i>Quadro 4.34 – Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max.}$, solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200</i>	124
<i>Quadro 4.35 – Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max.}$, solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200</i>	126
<i>Quadro 4.36 – Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$, solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200</i>	127
<i>Quadro 4.37 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais para os vários critérios de rotura – S200</i>	129
<i>Quadro 5.1 – Referencia das amostras recolhidas no aterro experimental</i>	135
<i>Quadro 5.2 – Comparação entre a cal pretendida e real, com base nos ensaios de determinação de carbonatos</i>	136
<i>Quadro 5.3 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de caracterização física dos solos sem cal e com diferentes teores em cal recolhidos no aterro experimental</i>	137
<i>Quadro 5.4 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de caracterização física no estudo laboratorial inicial - S300</i>	137
<i>Quadro 5.5 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos solos sem cal e com diferentes teores em cal recolhidos no trecho do leito de pavimento</i>	140
<i>Quadro 5.6 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos solos sem cal e com diferentes teores em cal recolhidos no trecho do leito de pavimento</i>	140
<i>Quadro 5.7 – Resumo dos parâmetros obtidos no ensaio de garrafa de areia</i>	143
<i>Quadro 5.8 – Resumo dos parâmetros obtidos no ensaio com gamadensímetro</i>	144
<i>Quadro 5.9 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de carga em placa</i>	145

1. CAPÍTULO - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. INTRODUÇÃO

“*Explicar algo é fazer a sua história*”, afirmou Nietzsche. Conhece-se a aplicação de solos estabilizados com cal em obras de engenharia de grande magnitude já na nossa era a partir do século I, quer no Velho Continente, na Roma Imperial através da construção de caminhos e aquedutos, quer no distante Continente asiático, na China Imperial na construção da sua Grande Muralha.

Sabemos assim que o posterior desenvolvimento, conhecimento e aplicação desta técnica passou por diferentes etapas de evolução. Já no século XX, pese embora a atenção que se vinha dedicando ao estudo desta técnica, são esparsos os estudos teóricos acerca da mesma, pelo que os projectos em que se utilizava solo-cal desenrolavam-se mediante a observação do comportamento de obras construídas, utilizando um certo grau de racionalismo empírico. Ainda assim, encontramos algumas referências na bibliografia norte-americana à estabilização de solos com cal, e sua aplicação foi pioneira no Estado do Texas, onde em 1947 se construíram 120 Km de infra-estruturas rodoviárias tratadas com cal.

Deste modo, a partir da década de 50 a utilização de solos estabilizados com cal no domínio da geotecnia rodoviária concretizou-se a um ritmo crescente. Para tanto, terão contribuído os excelentes resultados obtidos na fase experimental antecedente que permitiu, não só que os engenheiros se habituassem à utilização da técnica, mas também demonstrando que, da sua aplicação, não resultava qualquer insegurança.

Mc'Dowell (1966) condensa toda a experiência do Texas num gráfico que permite seleccionar a percentagem de cal necessária para a sua estabilização. Este gráfico passou logo a integrar a Norma AASHO-DT- 220-66 e é assim divulgada à comunidade científica internacional.

Todavia, na Europa, designadamente em países como a Bélgica, França, Alemanha, Áustria e Suíça, só a partir da década de 60 é que se começaram a registar casos de aplicação da cal na estabilização de solos, (Neves, 1993). Registaram-se sucessos na aplicação desta técnica em todos os citados países europeus, mas foi sobretudo a engenharia francesa que apostou fortemente no estudo, desenvolvimento e utilização da mesma. Deste modo, as valências da estabilização de solos com cal obtidas através das pesquisas realizadas desde a década de 60 foram reconhecidas pela geotecnia francesa, passando esta a ser uma técnica corrente no tratamento dos solos. Na verdade, a experiência e o "know-how" franceses adquiridos no tratamento dos solos e terraplanagens realizados desde então, foram compilados em artigos que se converteram em verdadeiros manuais pedagógicos para os engenheiros. Já nessa altura, o LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) e o SETRA (*Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes*) publicaram documentos que são agora referência para os grandes trabalhos de terraplanagem: o GTR (2000) - *Guide Technique pour la*

réalisation des remblais et des couches de forme e o GTS (2000) - *Guide Technique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques* (Fortunato, 2008).

Sendo a França pioneira na Europa no estudo, aperfeiçoamento e aplicação desta técnica no tratamento de solos, não será de estranhar que, actualmente, se estime que de 40 a 50 milhões de metros cúbicos de solos movimentados anualmente, cerca de 1/3 a 1/2 deste volume sejam tratados, sendo que 15 a 25 milhões de metros cúbicos, o são com cal, em percentagens de cerca de 2% (Fortunato, 2008).

O tratamento de solos com cal tem-se apresentado à engenharia geotécnica francesa como um recurso capaz de dar resposta a três questões fundamentais: eficiência, economia e ecologia. Com efeito, esta técnica de tratamento de solos apresenta resultados satisfatórios do ponto de vista técnico, evita os impactos ambientais inerentes à utilização dos materiais tradicionais, e rentabiliza custos de obra e prazos de execução.

Ora, o potencial da utilização de cal no melhoramento das características mecânicas - deformabilidade, resistência – dos solos compactados para utilização em obras de geotecnia, vai hoje, muito para além da experiência francesa, assumindo-se como uma técnica de tratamento de solos consagrada internacionalmente. Na realidade, a técnica em referência, revela-se de particular importância no tratamento dos solos que, no seu estado natural, não cumprem as exigências específicas de execução de obras de terra.

A estabilização com cal é uma metodologia onde são desencadeadas reacções predominantemente químicas entre os constituintes mineralógicos do solo e a cal. Estas reacções são responsáveis pela alteração de algumas características físicas como o teor em água, granulometria, plasticidade, compactação e resistência imediata, tendo reflexo na trabalhabilidade e, por isso, na boa gestão do estaleiro em obras de aterro.

Conforme já referimos, a utilização de cal no melhoramento das características mecânicas dos solos compactados, quer na sua trabalhabilidade, quer no comportamento dos mesmos a longo prazo, justifica a sua utilização nas obras do domínio rodoviário, já que é nestas obras de engenharia que as propriedades mecânicas dos solos desempenham um papel fundamental. De salientar ainda que a aplicação de solos estabilizados neste domínio permite também reduzir custos de obra, traduzindo-se numa importante vantagem a ter em conta.

Nesta conformidade, no caso de obras em linha, rodoviárias ou ferroviárias, este tipo de estabilização e melhoria das propriedades de solos potencialmente rejeitáveis é muito importante, pois as consequências ambientais e económicas de balanços desequilibrados de terras (aterro e escavação) são decisivas. (Viana da Fonseca et al., 2008).

Não obstante, a recepção desta técnica de geotecnia não tem sido pacífica no seio da engenharia Portuguesa. Na verdade, em Portugal, ao longo dos últimos anos, a estabilização de solos através da adição de cal tem tido uma utilização muito limitada, apresentando-se quase como técnica de último recurso, ou seja, apenas para a melhoria da trabalhabilidade dos solos para aterro e somente quando os métodos tradicionais já falharam. Apesar de se registarem sucessos nos casos de obra portuguesas em que esta técnica de tratamento de solos foi utilizada, a prática corrente continua centrada na substituição dos solos naturais, cujas características não se compatibilizam com a execução da obra, por outros capazes de prosseguir a finalidade pretendida. Contudo, esta substituição de solos através de movimentação de terras traduz-se em enormes volumes de materiais escavados de área de empréstimo e outros tantos rejeitados dispostos em vazadouro, criando desequilíbrios ambientais preocupantes.

Além disso, nas obras portuguesas a construção de sub-bases e base de pavimentos rodoviários, continuam a ser realizadas com recurso a agregados de granulometria extensa (AGE) de origem granítica e calcária. Pese embora a existência no nosso país de um elevado número de unidades de extracção e produção destes materiais, esta não pode, nem deve ser encarada pela engenharia como a única solução técnica capaz de satisfazer as exigências de construção das infra-estruturas rodoviárias, uma vez que, apresenta claras desvantagens do ponto de vista económico.

Finalmente, de salientar que além fronteiras a estabilização de solos com recurso à cal é hoje uma técnica de tratamento de solos de uso recorrente, não se estranhando a frequente referência à mesma nos cadernos de encargos. Estas técnicas de estabilização de solos com recurso à cal são consideradas nos cadernos de encargos e utilizadas com grande frequência noutros países.

1.2. OBJECTIVO DO TRABALHO

Partindo da experiência internacional do tratamento de solos com cal, e sabendo da relutância da engenharia portuguesa na aplicação desta técnica, o objectivo fundamental deste trabalho consistiu na avaliação do potencial de tratamento com recurso à cal viva de solos existentes no nosso país, a fim de serem utilizados na construção de infra-estruturas rodoviárias e ferroviárias. Para cumprir este objectivo procedeu-se a uma extensa caracterização laboratorial, quer física quer mecânica, dos solos no seu estado natural e após a adição de diferentes teores de cal viva.

Assim, a avaliação efectuada neste trabalho desenrolou-se tomando por base um estudo laboratorial e um caso de obra sobre solos areno-argilosos, designadamente, a execução de uma ampliação realizada no Aeroporto da Portela, referenciada por "ALS – Plataforma Sul" e executada pela empresa MOTA-ENGIL, Engenharia e Construção, S.A..

Deste modo, seleccionaram-se dois tipos de solos distintos: um de origem sedimentar e outro residual, recolhidos na localidade da Barosa, Conselho de Leiria e em Alter do Chão, respectivamente.

Em primeiro lugar, a fim de avaliar as alterações físicas e mecânicas que ocorriam para os diferentes teores em cal após a mistura com o solo, realizou-se o estudo laboratorial que compreendeu a adição de 1,5, 2,5 e 4,0% de cal viva aos solos em estudo. Procedeu-se à adição dos mesmos teores para avaliação da evolução das características físicas dos solos após 72 horas sobre a adição de cal. Este estudo demonstrou que o tratamento de solos com cal após este tempo de cura permite alterações físicas nos solos susceptíveis de armazenamento em depósitos de obra e, conseqüentemente, uma maior eficiência na gestão da execução dos trabalhos.

Posteriormente, no caso de obra, o solo foi estudado para um teor em cal de 2,0 e 3,0%, recolhendo-se amostras nas camadas do leito de pavimento executado. Por um lado, pretendeu-se avaliar a técnica de espalhamento da cal, e por outro, realizar ensaios de caracterização que permitissem confirmar os resultados já obtidos no estudo laboratorial.

A caracterização laboratorial foi realizada no LGMC – “Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção” do CICCOPN que se encontra acreditado pelo IPAC desde 1994, os ensaios triaxiais cíclicos realizados no LabGeo da Faculdade de Engenharia do Porto, FEUP e os ensaios “in situ” foram executados pela empresa MOTA-ENGIL, Engenharia e Construção, S.A..

1.3. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

A primeira abordagem ao tema a tratar é feita nesta nota de introdução, onde se refere o objectivo do trabalho, descrevendo a forma como o mesmo foi estruturado e sumariando os estudos desenvolvidos em cada um dos cinco capítulos seguintes.

No segundo capítulo, abordam-se os aspectos relacionados com as propriedades físicas e químicas dos materiais que intervêm no processo de tratamento de solos, nomeadamente os seus constituintes, mais propriamente as partículas de argila e a cal. Inicia-se este capítulo pela descrição da estrutura mineralógica das argilas, descrevendo-se sucintamente as estruturas mais comuns, as unidades tetraédricas e octaédricas que formam a unidade básica do mineral de argila. Seguidamente, apresenta-se a capacidade de permuta das argilas, as cargas superficiais das partículas de argilas e a dupla camada que caracteriza este tipo de mineral. Finalmente, descrevem-se sob o ponto de vista da Engenharia Civil os três tipos de argilas usualmente adoptadas para caracterização: caulinite, ilite e o grupo das montmorilonites terminando com a descrição das propriedades dos solos argilosos. Relativamente à cal, este segundo capítulo, e tendo sempre presente o caso da cal viva, sintetiza o seu

processo de fabrico, o tipo e classificação da cal e a caracterização da cal utilizada no presente trabalho.

No terceiro capítulo, apresentam-se as reacções físico-químicas que se desenvolvem entre o solo e a cal, mais propriamente a permuta iónica, a floculação e aglomeração de partículas, a acção de cimentação e a acção de carbonatação. De seguida, referem-se os efeitos da aplicação da cal: modificação do estado hídrico do solo, alteração das características da fracção argilosa do solo e da textura e consistência. Por fim, referem-se os factores condicionantes no tratamento de um solo com cal, as exigências dos cadernos de encargos em obras Portuguesas as Exigencias da Norma Europeia EN 14227-11 "*Hydraulically bound mixtures – Specifications – Part 11: Soil treated by lime* e metodologias gerais dos estudos de solos tratados com cal, mais propriamente: Processo do Texas, Procedimento de Eades and Grim e a metodologia Francesa (GTS2000).

Já no quarto capítulo, apresentam-se as características geológicas dos solos utilizados no estudo e procede-se a uma caracterização laboratorial extensa dos mesmos, através de ensaios de caracterização física, química e mecânica sem adição de cal e com adição dos vários teores em cal utilizados no estudo. Descreve-se ainda a metodologia seguida na realização dos ensaios e apresentam-se os valores obtidos nos mesmos, evidenciando-se a sua evolução em função dos vários teores em cal utilizados. De salientar que neste capítulo, relativamente aos ensaios de caracterização mecânica procurou-se avaliar a evolução da resistência em função de três variantes: os teores em cal adicionados, o período de cura e as condições de cura. Desta forma, procedeu-se à realização de provetes com vários teores em cal, realizados ensaios com diferentes períodos de cura e fazendo variar as condições de cura: em câmara húmida a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa superior a 95%, em estufa a 40°C e em câmara húmida a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ mas parcialmente imersos em água.

É no quinto capítulo que se apresenta um caso de obra, descrevendo a metodologia seguida na execução das camadas de um aterro experimental inicial e a sua caracterização mecânica com recurso a ensaios de carga em placa. Posteriormente, apresentam-se os ensaios de caracterização física e mecânica executada sobre uma camada de leito de pavimento e realiza-se uma comparação dos valores obtidos na camada com os valores obtidos no estudo laboratorial inicial.

A terminar e em jeito de conclusão, no sexto capítulo, apresentam-se os principais aspectos que ressaltam dos ensaios laboratoriais executados e do caso de obra analisado. Perante as evidências dos valores obtidos procura-se abordar a temática em estudo de forma despretensiosa, chamando a atenção para o potencial da estabilização de solos com cal e sugerindo ainda a necessidade de desenvolver continuamente o estudo desta técnica.

A divulgação deste trabalho poderá, ao menos, provocar o debate e activar a frequente utilização desta técnica, ainda que para divergir das soluções apresentadas, pois, só com o alargamento do estudo e da discussão se evita o seguidismo acrítico de opiniões alheias.

2. CAPÍTULO – PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS MATERIAIS

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A cal ao entrar em contacto com os solos em especial com as partículas de argila desencadeia um conjunto de reacções que para melhor serem compreendidas é conveniente conhecer as propriedades e características de cada um destes elementos individualmente.

O conhecimento mineralógico dos solos, em especial das argilas, é um factor que permite compreender os fenómenos envolvidos na estabilização de solos com cal. O tema da composição mineralógica dos solos é complexo e intrigante. Contudo uma mera comparação da estrutura mineralógica de alguns solos comumente caracterizados consegue ilustrar um espectro crítico da estrutura mineralógica e cristalina.

As partículas de argila tem diferentes características, ou seja, são constituídas por vários tipos de minerais, por diferentes tamanhos e formas de partículas, diferentes superfícies específicas, actividades diferentes, capacidade de troca catiónica variável, plasticidades distintas. O conhecimento destas características e a sua influência no tratamento do solo com cal são factores importantes a ter em consideração quando se parte para o tratamento e estabilização de solos.

Conhecimentos sobre a matéria-prima o processo de fabrico e as características físicas e químicas da cal são importantes para melhor compreender os mecanismos de reacção que se geram nas misturas de solo-cal.

2.2. PROPRIEDADES FISICO-QUIMICAS DAS ARGILAS

A fracção argilosa de um solo é compreendida por partículas de dimensão inferior a 2 μ , isto é, das várias fracções granulométricas que constituem um solo a fracção argilosa corresponde a mais fina. Os solos argilosos além de serem constituídos por partículas de pequeno diâmetro, que os distinguem dos solos siltosos ou arenosos, apresentam também outras propriedades próprias características como elevadas superfícies específicas, comportamento plástico na presença da água, baixa permeabilidade, elevada capacidade de adsorção de água devido à sua carga eléctrica negativa.

A crosta terrestre a uma profundidade até 15 Km compõe-se de oxigénio (47,3%), sílica (27,7%) e alumínio (7,8%). Estes são complementados por pequenas quantidades de metais de ferro (4,5%), cálcio (3,5%), potássio (2,5%) e magnésio (2,2) (Mitchell, 1976).

A forma como estes elementos se combinam para gerar a composição dos solos e das rochas existentes na crosta terrestre está condicionada pela termodinâmica existente no início do processo.

Composições atómicas organizadas não acontecem por acaso, ocorrem de forma a preservar a neutralidade eléctrica, satisfazer as ligações e a minimizar as fortes repulsas iónicas e a curto prazo proporcionar a mais estável composição atómica possível.

As duas estruturas mais comuns são as tetraédricas e as octaédricas, sendo que em cada uma destas construções estruturais o catião multivalente é coordenado com oxigénio. Estas duas estruturas representam cerca de 83% dos materiais constituintes da crosta terrestre.

2.2.2. Estrutura mineral das argilas

As partículas de argilas compõem-se por agrupamentos moleculares, associados em estruturas mais ou menos complexas. Os esquemas básicos de agrupamento são constituídos por lâminas muito delgadas de malhas tetraédricas e octaédricas. As unidades tetraédricas são constituídas por um átomo de silício, Si, coordenado com quatro átomos de oxigénio, O, equidistantes do átomo de silício, constituindo os vértices da forma geométrica. As unidades octaédricas são formadas por um átomo de alumínio, Al, ou de magnésio, Mg, equidistantes de seis átomos de oxigénio, O, ou hidróxidos, OH⁻, que se dispõem nos vértices.

A sílica tetraédrica representa a coordenação básica poliédrica que compõe a maior parte dos minerais de quartzo e feldspatos. A sílica tetraédrica não é electronicamente neutra. As ligações tetraédricas juntas em combinações minimizam a forte repulsão dos iões de sílica. A elevada carga eléctrica positiva dos iões de sílica desenvolvem uma variedade de possíveis combinações em resposta à repulsa gerada entre os catiões adjacentes.

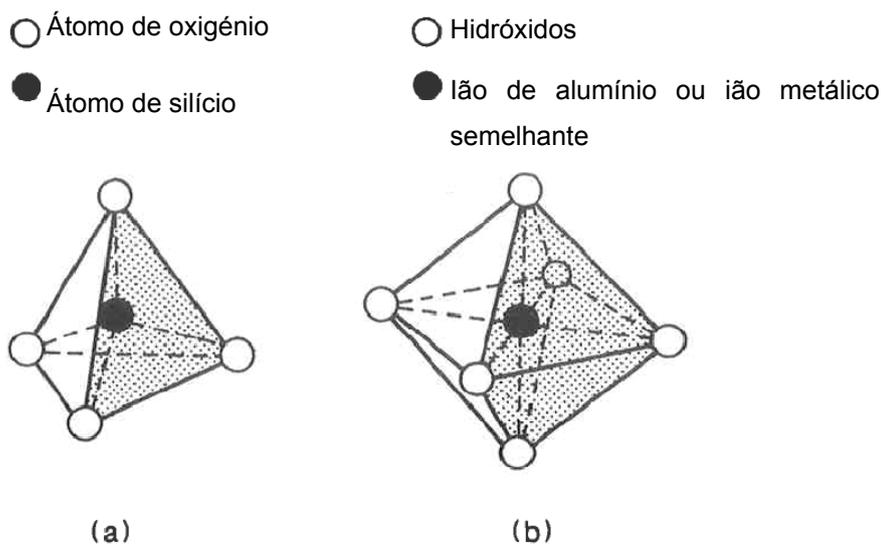


Figura 2.1 - Duas das mais comuns estrutura dos solos são a sílica tetraédrica (a) e o alumínio octaédrico (b) (adaptado de Little, 1995)

Uma estrutura de sílica como o quartzo é um mineral muito forte (mecanicamente) e durável (mecânica e quimicamente), esta estabilidade deve-se a ligações internas muito forte. Outra estrutura de sílica idêntica ao quartzo é o feldspato. Na sua formação parte das posições de silício são substituídas por alumínio, porque o alumínio tem uma carga menor que o silício, o que origina um desequilíbrio de cargas na estrutura tridimensional. Este desequilíbrio é anulado pela adsorção de cátions no seio dessa estrutura, tais como potássio cálcio e sódio. O mineral de feldspato é mais fraco e menos durável que o quartzo por duas razões:

- i. O cátion alumínio é maior do que o ião de silício e não se encaixa tão bem entre as partículas de oxigénio tal como acontece com o silício;
- ii. Os cátions fixados dentro do silicato tridimensional tornam a estrutura mais susceptível à alteração;

Apesar destas diferenças tanto o quartzo como o feldspato resultam em partículas que são equidimensionais, granulares, duras e relativamente estáveis quimicamente. O quartzo e o feldspato podem existir num grande espectro de partículas desde o seixo até ao silte. Na verdade o quartzo, devido à sua natureza extremamente estável pode mesmo reter a sua estrutura mineralógica mesmo que seja alterado para partículas inferiores a 2μ . Por outro lado o feldspato uma vez que é menos estável mecânica e quimicamente não retém a sua estrutura mineralógica básica quando sofre modificações externas, por outras palavras, dificilmente encontramos partículas de feldspato com dimensão da argila. As estruturas tridimensionais de silicatos constituem tipicamente solos granulares não plásticos.

As camadas estruturais tetraédricas de sílica agrupam-se através de contactos apenas nos seus vértices, devido a uma forte repulsa entre os triângulos adjacentes do tetraédrico. Este arranjo permite ao tetraedro formar diversas combinações de cristais além das estruturas silicatadas. Inclusivamente nestas estruturas existem silicatos independentes, anéis ou correntes tetraédricas e folhas de silicatos. As folhas de silicatos tem apenas uma unidade consistente mas teoricamente podem expandir-se infinitamente na sua dimensão lateral. Estas são as unidades a partir das quais se formam os minerais mais pequenos.

Um cenário típico para a formação de minerais de argila é o desgaste químico do feldspato. O processo químico mais importante desta alteração é a hidrólise causada por uma reacção entre iões do mineral feldspato e os iões hidrogénio (H^+) e hidroxilo (OH^-) dissociados das moléculas de água.

Os pequenos iões de hidrogénio (H^+) dissociados da molécula da água podem facilmente penetrar na estrutura do mineral de feldspato. Em grandes concentrações vão substituir os iões metálicos da estrutura que foram adsorvidos para neutralizar o desequilíbrio de cargas, causado pela substituição do silício pelo alumínio durante a formação do feldspato. Os iões substituídos incluem o sódio, o potássio e cálcio.

Em seguida, as superfícies hidrogenadas do mineral tornam-se instáveis, e formam-se folhas de unidades tetraedro e octaédricas que são formadas e removidas para o exterior. Estas folhas tetraédricas e octaédricas são ilustradas na Figura 2.2.

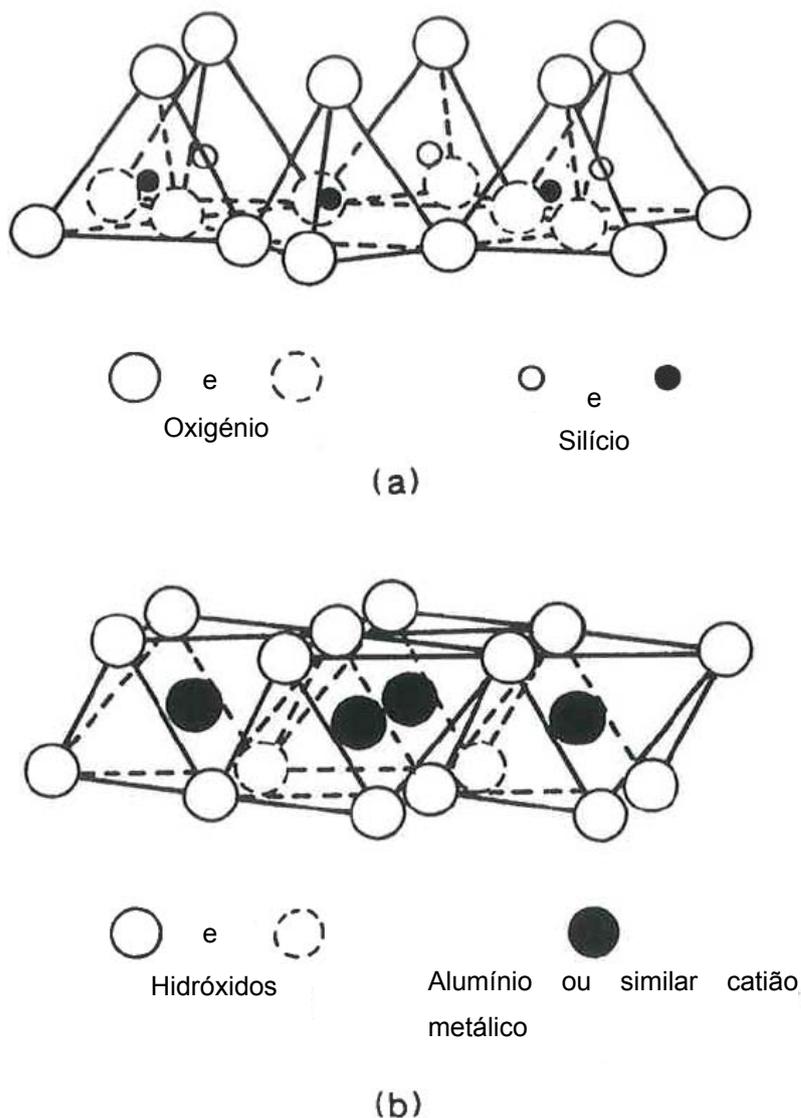


Figura 2.2 - Unidades tetraédricas e octaédricas podem também arranjar-se em folhas com grandes áreas superficiais (adaptado de Little, 1995)

As duas folhas básicas, tetraédricas e octaédricas, apresentadas na figura anterior encontram-se agrupadas para formarem o mineral argiloso mais comum.

Os dois arranjos mais comuns das folhas tetraédricas e octaédricas, formam a unidade básica do mineral de argila. A configuração 1:1 é típica do mineral de caulinite, o qual apresenta pouca

plasticidade. A configuração 2:1 é típica de um mineral argiloso do grupo das montmorilonite também designado por grupo das esmectites, os quais podem ser muito plásticos e instáveis.

Nas duas configurações, um plano de átomos é comum a ambas as folhas tetraédricas e octaédricas. A ligação entre as folhas é muito forte, ligações de primeira valência. Contudo, as uniões que ligam as unidades estruturais para dar forma a partículas são muito mais fracas e são a razão para a resposta variável dos minerais em termos de plasticidade e consistência.

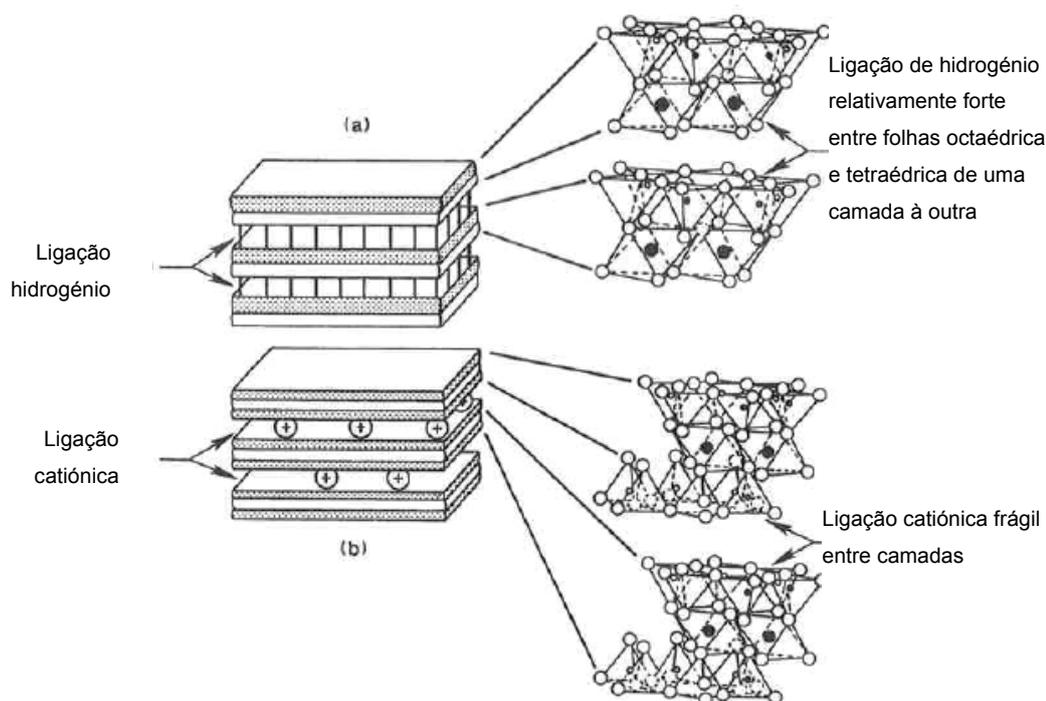


Figura 2.3 - Unidades básicas de 1:1 mineral caulinite (a) e 2:1 mineral montmorilonite (b) (adaptado de Little, 1995)

2.2.3. Capacidade de permuta das argilas

Um fenómeno muito comum nas estruturas tetraédricas e octaédricas é a sua propensão para a substituição dos iões de sílica e alumínio por outros de menor carga ou valência positiva. Como as partículas de argila estão, globalmente, carregadas negativamente, estes iões atraídos são essencialmente positivos. A estes catiões atraídos para a superfície das argilas dá-se o nome de catiões permutáveis. Designam-se de permutáveis porque podem ser substituídos por outros de igual valência ou por pares de outros com metade da valência.

A grande superfície específica dos vários minerais argilosos contribui e aumenta a possibilidade de adsorver os cátions permutáveis. Por outro lado a possibilidade de roturas das estruturas laminares em partículas pequenas também aumenta esta propensão dada a existência de carga desequilibrada.

Os cátions permutáveis mais frequentes nas argilas são o cálcio e o magnésio, o potássio e o sódio aparecem em menores quantidades, o alumínio e o hidrogénio são predominantes nos solos ácidos.

A capacidade de troca catiónica (CTC) constitui uma medida de aptidão do solo para reter cátions permutáveis e exprime-se em cmol.Kg^{-1} de solo seco. Os valores de capacidade de troca variam em função da natureza dos minerais argilosos. No quadro seguinte apresentam-se valores para alguns dos minerais mais importantes, calculados para um meio neutro ($\text{pH} = 7$).

Tipo de mineral	Capacidade de troca catiónica (cmol.Kg^{-1})
Quartzo	0,04 – 0,3
Talco	< 2
Pirofilite	< 1 – 5
Caulinite	2,2 – 15
Meta-haloisite	5 – 10
Ilite e Clorite	10 – 40
Sepiolite e Atapulgit	20 – 30
Haloisite	10 – 50
Alofana	20 – 43
Montmorilonite	75 – 150
Vermiculite	100 – 150

Quadro 2.1 - Capacidade de troca catiónica de alguns minerais argilosos (adaptado de Salas e Aklpañes, 1975 in Neves, 1993)

A capacidade de troca é uma característica de cada tipo de mineral argiloso, conforme dados do quadro anterior, verificando-se uma capacidade de troca cerca de 10 vezes superior dos minerais da montmorilonite quando comparada com a caulinite.

2.2.4. Cargas superficiais

A parte interior de uma partícula de argila encontra-se em equilíbrio pelo facto dos iões com cargas opostas se anularem. A parte correspondente à superfície, e devido à falta de matéria para o lado exterior, não permite a existência de iões que equilibrem, os iões adjacentes à superfície. Tal facto, origina que a superfície das partículas de argila se encontre com cargas eléctricas por equilibrar.

Como consequência dos fenómenos de desequilíbrio eléctrico nas unidades elementares e de intercâmbio iónico na estrutura dos solos argilosos é normal que se verifique o seguinte:

- i. Nas estruturas laminares compostas só restarem cargas negativas livres, ou deficiências de cargas positivas;
- ii. Aparecerem cargas positivas ou negativas nos bordos originadas pela rotura das lâminas.

O primeiro fenómeno é característico de alguns tipos de argilas especialmente activas, como a montmorilonite, enquanto o segundo se verifica em praticamente todas as argilas. Relativamente ao segundo ponto pode dizer-se que o tamanho da partícula aumenta o número de cargas eléctricas por equilibrar, devido a um maior rotura das grandes lâminas estruturais e portanto a um maior número de ligações quebradas.

2.2.5. Dupla camada

Dada a pequena dimensão das partículas de argila e muito grande superfície específica disponível juntamente com a natureza de elevada carga das partículas, não admira que as partículas sejam tão activas e possam normalmente adsorver líquidos polarizáveis como a água ou os catiões disponíveis existentes no ambiente. A Figura 2.4 pretende simplificar a explicação enquanto evidencia dois importantes fenómenos.

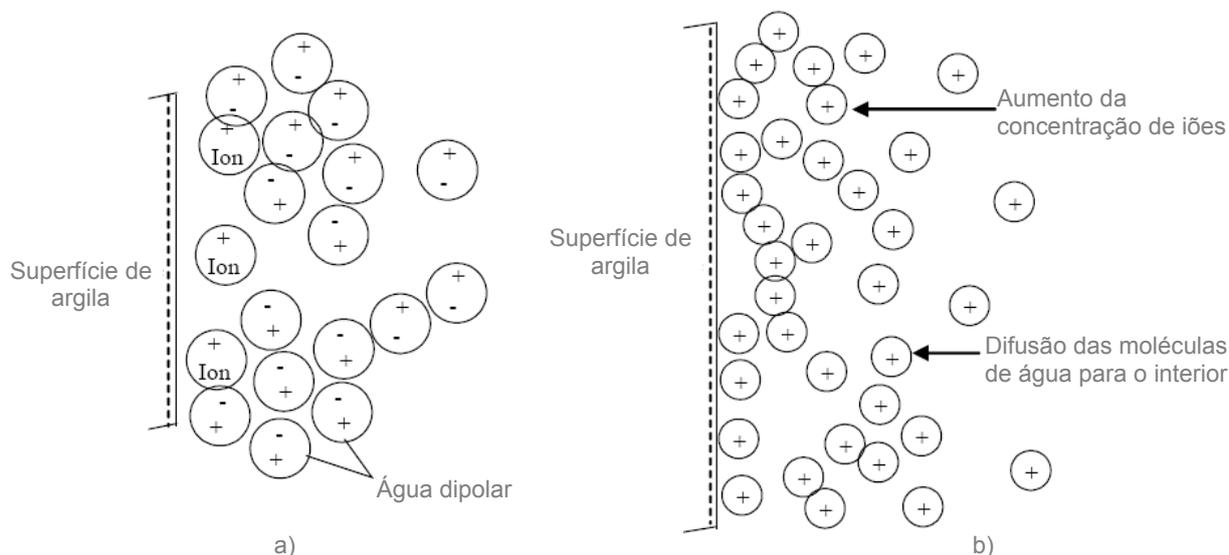


Figura 2.4 – Os catiões e a água são atraídos pela superfície de argila negativamente carregada. Isto resulta em: a) catiões e moléculas de água adsorvidos à superfície e b) uma camada difusa de catiões e entrada de água em direcção à superfície da argila devido à elevada concentração electrolítica (adaptado de Little, 1987)

Em primeiro lugar a superfície negativa da partícula aparece rodeada por catiões de carga positiva atraídos para a superfície de forma a equilibrar a carga potencial. Estes iões não estão dispostos de forma ordenada na superfície da partícula, mas antes de forma difusa. Esta difusão deve-se a repulsão entre cargas do mesmo sinal que gera uma agitação térmica dos catiões.

O segundo fenómeno que aparece ilustrado é a difusão das moléculas de água em direcção à alta concentração de catiões. Esta difusão para o interior é despoletada pela tendência natural dos sistemas evoluírem para uma condição menos ordenada.

As moléculas de água, para além da tendência que apresentam para difundir a camada de catiões adsorvidos, são efectivamente atraídas pelos catiões e pela superfície das partículas de argila carregada negativamente, devido à sua estrutura dipolar.

Na figura anterior as moléculas de água encontram-se representadas como moléculas com um pólo positivo e outro negativo, devido ao arranjo molecular entre os átomos de hidrogénio e oxigénio que a compõem. Alguns investigadores acreditam que existe uma camada de moléculas de água ligada a superfície da argila por ligações de hidrogénio, encontrando-se as camadas subsequentes ligadas de forma mais fraca.

Em qualquer caso, o resultado é uma camada difusa que rodeia a argila compreendida por:

- i. Água retida por ligações de hidrogénio e/ou atraída pelo gradiente de difusão;
- ii. Uma camada difusa de catiões, atraídos pela carga negativa da superfície da argila e aniões (iões com carga negativa), os quais são atraídos pelos catiões e pelas moléculas dipolares de água.

A superfície altamente carregada, como no caso das esmectites, bem como a existência de catiões monovalentes termicamente activos, origina uma extensa camada de água difusa que rodeia as partículas de argila.

Devido à existência desta camada algumas esmectites têm sido designadas como sendo capazes de fixar uma quantidade de água sete vezes superior ao seu peso seco. Quando se encontram no seu estado de hidratação máximo estas camadas de água difusa obrigam as partículas de argila a disporem-se segundo uma orientação paralela que oferece muito pouca resistência.

A espessura desta camada difusa de água e altamente depende do tipo e concentração de catiões existentes na água disponível. Catiões divalentes (ou seja catiões com carga +2) conseguem equilibrar de forma mais eficiente as cargas negativas do que os catiões monovalentes (ou seja catiões com carga +1). Assim a camada difusa resultante, constituída por catiões divalentes e água, que rodeia as partículas de argila é mais pequena do que a camada difusa constituída por catiões monovalentes e água.

2.2.6. Dimensão das partículas

Conforme referido os solos de natureza argilosa são constituídos por partículas de pequena dimensão, inferiores a 2 µm. Uma característica associada à reduzida dimensão das partículas e à sua estrutura laminar é a sua grande superfície específica relativamente aos restantes materiais. Assim é usual verificarem-se superfícies específicas de várias centenas de metros quadrados por cada grama de argila.

Esta característica faz com que qualquer fenómeno ou propriedade que afecte o seu contorno ou superfície, como os que se verificam na interacção com a cal, assumam especial relevância no estudo destes materiais.

Também é de referir que o tamanho das partículas de argila seja condicionado pelas ligações e cargas eléctricas entre as unidades e lâminas que as compõem, sendo uma característica de cada tipo de argila.

As ligações entre camadas realizadas por catiões supõem ligações mais frágeis do que as existentes entre lâminas realizadas por hidrogénio. Como consequência as argilas com elevada capacidade de troca, ou seja, com grande desequilíbrio de carga, originam uma alta concentração de catiões na sua superfície que configurará a união entre camadas. Gerando-se ligações relativamente frágeis em que o risco de rotura e de fraccionamento das partículas é maior.

No caso da montmorilonite, que apresenta uma capacidade de troca muito superior à das argilas cauliniticas, são também constituídas por partículas de tamanho médio bastante inferior e superfícies específicas muito superiores.

2.2.7. Tipos de argilas

Tendo em conta o descrito nos pontos anteriores, facilmente se entende que possam existir uma grande complexidade e variabilidade das argilas e das suas características. Tal deve-se à variação qualitativa e quantitativa dos minerais argilosos e não argilosos que as constituem, à variação da distribuição dimensional das partículas minerais que as formam e às suas características texturais. Estes factores dificultam a classificação das argilas, conduzindo à ideia de que não existem duas argilas iguais.

Poderá dizer-se que existem mais de uma dezena de tipos de argilas, contudo sob o ponto de vista da Engenharia Civil, só três destes tipos são usualmente adoptados para a caracterização: a caulinite, a illite e o grupo das montmorilonites.

As caulinites são argilas com poucas substituições isomorfas compensadas por catiões localizados exclusivamente à superfície das partículas e, por isso, apresentam uma baixa capacidade de troca catiónica (Gillot, 1987; Jeremias, 1991 in Neves 1993). Um cristal de caulinite é constituído, em média, por 40 a 50 camadas estruturais.

Os minerais mais abundantes nas argilas são os do grupo da ilite. Os minerais de ilite e de montmorilonite possuem estruturas análogas. No entanto, exibem por vezes comportamentos diferentes devidos a pequenas diferenças:

- i. Ausência de expansibilidade intracristalina dos minerais da ilite;
- ii. A carga eléctrica negativa por unidade de superfície é maior na ilite do que na montmorilonite;
- iii. A carga eléctrica nos minerais de ilite localizam-se na folha tetraédrica, isto é, mais perto dos catiões intercalares, ao contrário na montmorilonite essa carga está mais concentrada na folha octaédrica;
- iv. As forças intercamadas na ilite são mais fortes e a água e outros líquidos polares penetram dificilmente entre camadas (Gomes, 1986 in Neves, 1993) ao contrário o mineral montmorilonite apresenta ligações frágeis.

Os minerais de montmorilonite formam-se sobretudo em águas alcalinas em condições de fraca drenagem, imposta pela topografia, com uma relação sílica/alumina elevada. Ocorre em bacias sedimentares de regiões aplanadas semi-áridas com clima quente caracterizado por uma estação seca longa e uma estação pluviosa curta, solos derivados da alteração residual de cinzas e tufos vulcânicas, depósitos sedimentares situados na proximidade de zonas vulcânicas extrusivas (Gomes 1986 in Neves 1993).

Os minerais do tipo da montmorilonite exibem expansibilidade intracristalina ou entre-camadas como consequência da entrada de moléculas de água no interior das camadas estruturais, fazendo aumentar o seu espaçamento basal, o que origina que o espaçamento entre camadas seja muito variável (Neves, 1993).

As suas propriedades podem ser ilustradas no quadro seguinte onde recolhe valores de distintos autores para os grupos extremos.

Propriedades	Caulinite	Montmorilonite
Ligações entre camadas	Hidrogénio (forte)	Catiões (fraca)
Carga superficial	Baixa	Elevada (10:1)
Superfície específica	10 – 15 m ² /g	800 – 1200 m ² /g
Diâmetro	0,3 – 3,0 µm	0,1 – 1,0 µm
Espessura/diâmetro	1/3 – 1/10	1/100
Capacidade de troca catiónica	2 – 15 cmol/Kg	75 – 150 cmol/Kg
Limite de liquidez	38 – 59	290 – 790
Limite de plasticidade	27 – 37	54 – 75
Índice de plasticidade	11 – 23	215 – 656
Actividade	Pouco activa	Muito activa

Quadro 2.2 - *Propriedades das caulinites e das montmorilonites (adaptado de Castelló, 2003)*

As características das ilites são normalmente intermédias, entre as apresentadas no quadro anterior.

2.2.8. Propriedades dos solos argilosos

Os solos de natureza argilosa, apresentam como já referido nos pontos anteriores deste capítulo, uma granulometria muito fina, ou seja, são constituídos por partículas de pequeno diâmetro, geralmente em forma de lâminas ou placas e apresentam grandes superfícies específicas.

A granulometria é uma característica importante dos solos argilosos e que domina muitas das suas propriedades, contudo o parâmetro que comanda o comportamento é o seu teor em água. Enquanto os solos de natureza arenosa a composição granulométrica é normalmente suficiente para a sua identificação, no caso dos solos argilosos a sua identificação exige parâmetros que reflectam a dependência do comportamento do solo na presença da água. Estes parâmetros são designados por limites de Atterberg ou de consistência.

A sua composição mineralógica (silicatos hidratados de alumina) favorece o desenvolvimento de reacções químicas com a água presente no solo e com os sais que aquela tem dissolvido. Desta forma, geram-se importantes forças de superfície que acabam por comandar o comportamento do

agregado de partículas, ultrapassando largamente o efeito das forças do peso próprio¹ (Matos Fernandes, 1994).

No quadro seguinte apresenta-se o comportamento esperado para os solos de natureza argilosa tendo em conta diferentes propriedades.

Propriedade	Comportamento
Permeabilidade quando compactado	Baixa
Instabilidade volumétrica quando compactado	Alta
Resistência ao corte quando compactado	Fraca
Compressibilidade quando compactado e saturado	Alta
Capacidade de carga quando compactado e saturado	Fraca
Trabalhabilidade como material de construção	Fraca

Quadro 2.3 – Propriedades dos solos de natureza argilosos (adaptado de Castelló, 2003)

Os valores baixos de permeabilidade devem-se essencialmente ao facto da água adsorvida dificilmente se separar das partículas minerais de um solo argiloso, os vazios disponíveis para a circulação da água apresentam um volume inferior, o que implica uma menor permeabilidade. Os solos de natureza argilosa apresentam geralmente grandes volumes de vazios, como a resistência ao corte diminui com o aumento da distância entre partículas, estes solos normalmente, mesmo após compactação, apresentam uma baixa resistência aos esforços de corte. Dada a sua elevada compressibilidade, ocorrem normalmente consideráveis deformações com os incrementos de tensão aplicada. A elevada capacidade de adsorção de água das partículas de argila é responsável pela instabilidade volumétrica.

2.3. PROPRIEDADES FISICO-QUIMICAS DA CAL

A diversidade das origens das matérias-primas conduz ao desenvolvimento de diferentes espécies de cal, quer em termos físicos quer em termos químicos.

Inicialmente havia a tendência para encarar a cal como um material único, desprezando as diferenças entre os vários tipos de cal. A investigação e a experiência acumuladas com o tempo depressa se

¹ Partículas cujo comportamento seja comandado pelas forças de superfície e não pelo peso próprio designam-se por coloides. Em geral as partículas com superfícies específicas superiores a 25 m²/g têm comportamento coloidal.

encarregaram de mostrar o que é hoje uma evidência: alguns tipos de cal são mais eficazes do que outros (Cruz, 2008).

Tendo em consideração apenas a constituição química, a cal refere-se ao óxido de cálcio (CaO) ou ao hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂).

Segundo (PG3, 2004) define-se como cal para estabilização de solos aqueles ligantes constituídos principalmente por óxidos ou hidróxios de cálcio (CaO, Ca(OH)₂) com ou sem óxidos ou hidróxidos de magnésio (MgO, Mg(OH)₂) e quantidades menores de óxido de silício (SiO₂), ferro (Fe₂O₃) e alumínio (Al₂O₃), utilizadas para a construção de estradas.

Com a finalidade de reunir informação sobre os diferentes tipos de cais de construção, sua classificação e apresentando também requisitos para as suas propriedades químicas e físicas, foi criada a nível Europeu e obrigatória a sua aplicação em Portugal desde Abril de 2002, a norma NP EN 459-1 “Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade”.

A designação de cal tem uma maior abrangência e segundo a NP EN 459-1 o termo cal significa “material abrangendo quaisquer formas físicas e química, sob a as quais pode aparecer o óxido de cálcio e ou de magnésio (CaO e MgO) e ou os hidróxidos (Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂)”.

2.3.1. Processo de fabrico

A matéria prima utilizada para a produção dos produtos à base de cal é a pedra calcária (Figura 2.5) composta por carbonato de cálcio (CaCO₃) de elevada pureza, ou seja, com, uma percentagem não inferior a 95% de carbonato de cálcio e magnésio.

Em Portugal, as reservas de pedra calcária localizam-se no maciço Estremonho da Serra dos Candeeiros no Conselho de Santarém, nos Maciços Calcários de Souselas e de Brasfemesa a cerca de 10 Km de Coimbra. Existe ainda a Pedreira de Calcário da região de S. Brás de Alportel, no Algarve, e outros afloramentos de menor expressão (Ana Coelho et al 2009).



Figura 2.5 – Pedra calcária (Correia, 2008)

Para a matéria-prima entrar no processo de fabrico, tornam-se necessárias passar pelas seguintes fases:

- i. **Extracção:** normalmente realizada em pedreiras a céu aberto, por degraus de bancadas sucessivas de 15 m de altura máxima; o desmonte da pedra é realizado com recurso a explosivos;
- ii. **Britagem:** redução dos blocos resultantes do desmonte, através de processos de trituração;
- iii. **Crivagem:** separação das partículas de maior dimensão que poderão ser submetidas a novo processo de britagem e eliminação das fracções granulométricas mais finas que são desfavoráveis no processo de cozedura devido à passagem dos gases nos fornos e por razões de qualidade química;
- iv. **Transporte:** do local de extracção para o local onde é produzida a cal.

Existem vários tipos de fornos, os fornos horizontais cada vez menos utilizados porque consomem muita energia por tonelada produzida e os fornos verticais com cubas múltiplas que permitem a recuperação máxima das calorias.

Um forno vertical é constituído por três zonas principais que são:

- i. A zona de pré aquecimento antes de saída dos gases em chaminé;
- ii. A zona de combustão na qual existe uma espécie de injectores que lançam o combustível;
- iii. A zona de arrefecimento antes da saída da cal do forno.

A cozedura faz-se à uma temperatura de 900/950° C com combustíveis fósseis - gases ou óleo combustível e a biomassa. Neste processo ocorre a calcinação do calcário, (Figura 2.6) e a transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio



Figura 2.6 – Pedra calcária após calcinação (Correia, 2008)

O processo de fabrico consiste na libertação do dióxido de carbono que existe no carbonato de cálcio, realizado através da calcinação do calcário, obtendo-se o óxido de cálcio (CaO). Esta reacção química ocorre para temperaturas entre os 900 e os 1200 °C. A figura seguinte ilustra a forma como é realizado o processo de calcinação da pedra calcária e o produto que daí resulta.

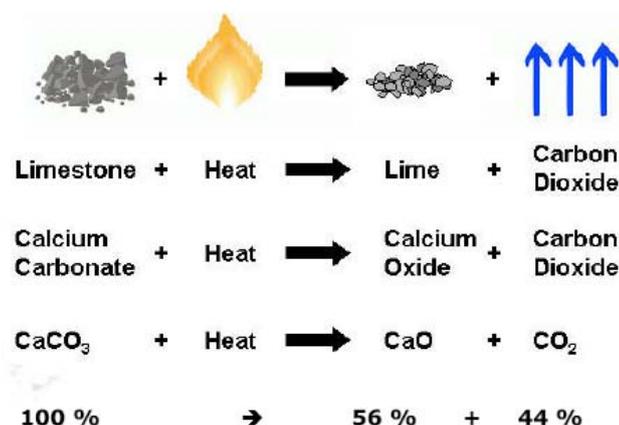
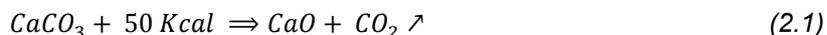


Figura 2.7 – Ilustração do processo de calcinação da pedra calcária (Correia, 2008)

A equação seguinte demonstra a reacção química que resulta no processo de fabrico da cal aérea.



À saída de forno “desenfornamento” o calcário (carbonata de cálcio) já foi transformado em cal viva - óxido de cálcio.

À saída de forno, a cal passa por um processo de crivagem e trituração, que consiste em verificar a granulometria da cal passando-a por crivos e procedendo se necessário a sua trituração e seguidamente crivada de novo. Pode também ser moída em elementos mais finos entre algumas dezenas de µm até aos mm (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Óxido de cálcio em pó (cal viva) (Correia, 2008)

O desenformamento e o enformamento são regulados por um conjunto de automatismos comandados por sensores. A temperatura da cal à saída do forno situa-se entre 60 e 110°C por os fornos direitos, estando a cal em balanço de 0 à D mm, sendo D a granulometria da pedra no enformamento.

A hidratação é obtida por adição de água ao óxido de cálcio num reactor chamado “hydrateur” e permite obter a cal hidratada. A reacção é exotérmica e permite a passagem do óxido ao hidróxido de cálcio.

A

Figura 2.9 pretende ilustrar de uma forma geral, os principais processos que são necessários seguir durante o fabrico da cal.

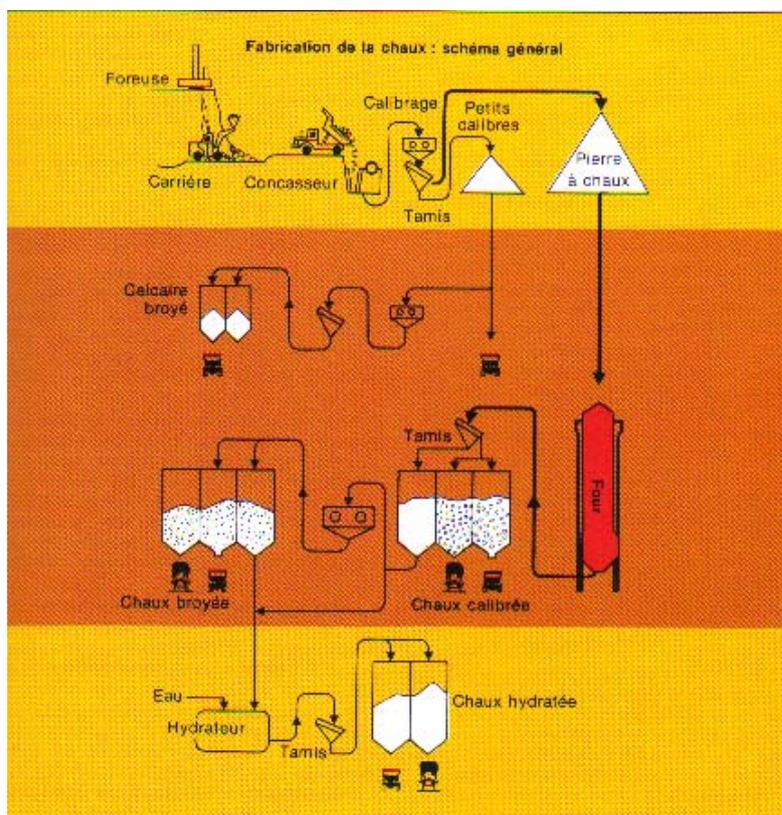


Figura 2.9 - Esquema geral do processo de fabrico da cal (imagem cedida por Claude Joly) (

No quadro seguinte apresenta-se de forma resumida e ordenada as principais fases do processo de fabrico e uma breve descrição das actividades desenvolvidas em cada um deles.

Fases do processo de fabrico	Descrição
Extracção da matéria-prima	Limpar a zona a explorar (desmatação), no caso de se tratar da camada superior da pedreira. Proceder à perfuração e ao desmonte mediante utilização de explosivos. Inspeccionar a matéria-prima resultante do desmonte e seleccionar o material de acordo com a sua qualidade.
Transporte da matéria-prima	Transportar a matéria-prima da zona de exploração/stockagem para a instalação de britagem.
Britagem e selecção dos produtos	Coordenar as operações de britagem e selecção de acordo com
Armazenagem primária dos produtos	Coordenar a armazenagem primária dos produtos finais em stocks
Enfonamento fornos	A carga da “pedra a forno” é extraída do stock por extractor vibrante para um crivo de 30 mm. O material com dimensão inferior não entra no processo de fabrico da cal, o material com dimensão superior é pesado e transportado por um sistema de elevação “skip” para a tramonha do topo do forno.
Calcinação	A “pedra a forno” entra nos fornos, em ciclos temporizados e em quantidades pesadas e programadas. A “pedra a cal” é calcinada na câmara de combustão dos fornos.
Desenfonamento	A pedra calcinada “cal” é encaminhada para os silos onde é armazenada.
Moagem e crivagem	Dos silos a “cal” segue para os processos de fragmentação, crivagem e separação (moinhos e crivos), onde é reduzido e separado em diferentes fracções granulométricas. No final a “cal” é armazenada em silos.
Hidratação e micronização	Dos silos a “cal” segue para os processos de hidratação e micronização. Depois de hidratada no reactor esta é separada por meio de separadores aerodinâmicos em diferentes fracções granulométricas e encaminhada para silos. Na micronização a “cal” é enviada para um moinho de martelos, que depois de moída é separada por meio de um separador aerodinâmico em diferentes fracções granulométricas e encaminhada para silos.
Armazenamento e ensacagem	Armazenagem da cal produzida seguida de ensacagem ou carregamento dos camiões cisterna nos silos e/ou dos big bag’s. Durante estas fases é feita uma recolha de amostras para realizar o controlo da produção e controlo da conformidade da cal.

Quadro 2.4 - Principais fases do processo de fabrico da cal (Procedimento Lusical, adaptado).

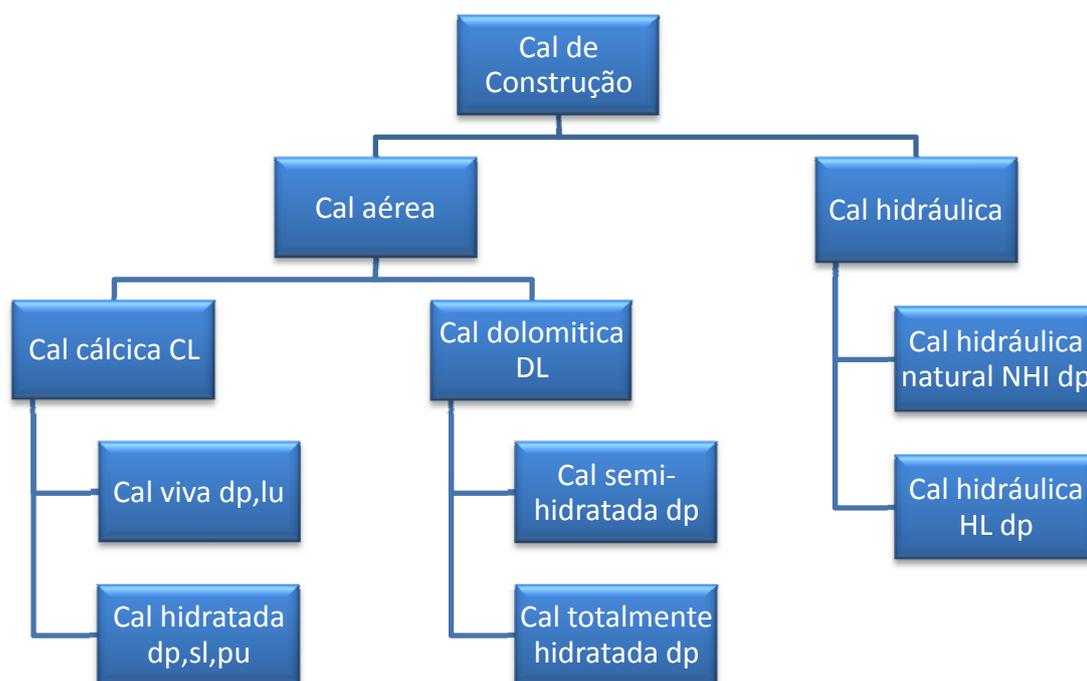
Para se produzir uma tonelada de óxido de cálcio são necessárias cerca de duas toneladas de pedra de calcário. Durante o processo de calcinação da pedra calcária são libertadas grandes quantidades de dióxido de carbono.

2.3.2. Tipos e classificação da cal

Segundo a Norma NP EN 459-1:2002, pode-se definir cal como um material abrangendo quaisquer formas físicas e químicas, sob as quais pode aparecer o óxido de cálcio (CaO), o óxido de magnésio (MgO) e ou hidróxidos de cálcio e magnésio (Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂). De acordo com a referida norma, existem diferentes tipos de cal de construção, destacando-se nestes a cal aérea e a cal hidráulica.

As cals mais utilizadas no tratamento e estabilização de solos para construção de infra-estruturas de transporte são as cals aéreas cálcicas (CL). Têm esta designação porque endurecem em contacto com o ar, e são compostas principalmente por óxido de cálcio e de magnésio, sem adição de materiais pozolânicos e hidráulicos.

A cal aérea pode apresentar-se na forma de cals vivas e cals hidratadas. As cals vivas (Q) são definidas como cals aéreas constituídas principalmente por óxido de cálcio (CaO) e por óxidos de magnésio (MgO) produzidas por calcinação de rocha calcária ou de dolomite e apresentam uma reacção exotérmica quando em contacto com a água. As cals vivas incluem as cals cálcicas (CL) e as cals dolomíticas (DL). Dentro destes tipos as mais utilizadas são as CL 90-Q.



dp – pó seco; sl – leite ou calda de cal; lu – cal viva em pedaços; pu – pasta de cal

Figura 2.10 – Tipos de cal de construção (NP EN 459-1:2002)

As cals hidratadas (S) são cals aéreas, cálcicas ou dolomíticas, resultantes da extinção controlada das cals vivas. São compostas principalmente por hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). São produzidas sob a forma de pó seco, de pasta, ou de calda (leite de cal). Dentro destes tipos as mais utilizadas são as CL 90-S.

No Quadro seguinte resumem-se as vantagens e inconvenientes dos tipos e formas de cal mais utilizadas.

Forma	Vantagens	Inconveniente
Cal viva (pó)	<ul style="list-style-type: none"> - A proporção de óxido de cálcio é mais alta para igual peso; - Pode ser utilizada na secagem dos solos; - Permite trabalhar em épocas do ano desfavoráveis (a cal “aquece” o solo); - Reduz custos de transporte; - Armazenamento mais económico uma vez que a sua densidade é maior; - Aplicação mais rápida que em leitada. 	<ul style="list-style-type: none"> - É um material instável para armazenamento; - A sua aplicação é perigosa; - Origina emissões de poeiras; - Requer normalmente a aplicação de água após o seu emprego para promover a sua hidratação.
Cal hidratada (pó)	<ul style="list-style-type: none"> - Não apresenta perigos na aplicação; - Aplicação mais rápida que em leitada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requer mais quantidade para proporcionar a mesma actividade que a cal viva; - Origina emissões de poeiras.
Cal hidratada (leitada)	<ul style="list-style-type: none"> - A humedificação do solo e a aplicação da cal são simultâneas; - É mais fácil assegurar uma distribuição homogénea. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custos maiores de transporte; - Requer meios especiais para armazenamento e espalhamento

Quadro 2.5 – Vantagens e Inconvenientes de cada uma das formas utilizadas da cal (Cruz, 2008).

De uma forma genérica, a cal viva é muito mais eficiente do que a cal hidratada. Segundo as recomendações francesas do SETRA-LCPC (1972), um teor em cal viva de 3% produz o mesmo efeito estabilizante que um teor em cal hidratada de 4%. Porém, as cals hidratadas são mais seguras e mais fáceis de utilizar.

A cal calcítica é, de um modo geral, mais eficaz que a cal dolomítica hidratada porque reage mais rapidamente com a água. A cal hidráulica, devido às suas características (é um ligante hidráulico), não tem aplicação na estabilização de solos finos.

As cals aéreas são ligantes não hidráulicos, isto é, não têm possibilidade de endurecer dentro de água. São solúveis em água, sendo maior a sua solubilidade na água do mar, tal facto leva a que não sejam usadas em obras hidráulicas.

2.3.3. Caracterização da cal aérea

A cal aérea a utilizar no tratamento e estabilização de solos, quimicamente deve ter a composição apresentada no Quadro 2.6 e determinada de acordo com a NP EN 459-1:2001 “Cal de Construção – Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade”. A cal pode apresentar aditivos em pequenas quantidades para melhorar o fabrico ou as propriedades da cal. Quando esses valores excedem 0,1%, a quantidade efectiva e o tipo de aditivo devem ser declarados.

No quadro seguinte apresentam-se de forma resumida as características químicas e físicas das cals aéreas a utilizada no tratamento de solos.

Tipo de cal	Características químicas ⁽¹⁾					Características físicas		
	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Cal livre	Finura ⁽³⁾		Teor de água livre (%)
						0,09	0,2	
CL 90	≥ 90	≤ 5 ⁽²⁾	≤ 4	≤ 2	---			
CL 80	≥ 80	≤ 5 ⁽²⁾	≤ 7	≤ 2	---	≤ 7	≤ 2	≤ 2
CL 70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	---			

⁽¹⁾ Expressas em percentagem da massa;

⁽²⁾ É admitido um teor em magnésio até 7% desde que o valor do ensaio de expansibilidade seja inferior a 2 mm

⁽³⁾ em % de resíduo em massa

Quadro 2.6 – Características químicas e físicas da cal aérea a utilizada no tratamento de solos de acordo com a NP EN 459-1:2001

No estudo laboratorial em causa, a cal utilizada no tratamento dos solos apresentava características químicas e físicas que permitem enquadrá-la dentro do tipo CL 90-Q.

Ora, já tendo a cal – enquanto material a utilizar no tratamento de solos - sido objecto de normalização europeia, estamos em condições de afirmar que existe uma maior garantia da qualidade do produto, o que, *de per si*, contribui para a eficiência do processo.

3. CAPÍTULO – MODIFICAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As obras do domínio rodoviário são obras de engenharia em que as propriedades físicas e mecânicas dos solos desempenham um papel fundamental. A utilização da cal no tratamento dessas propriedades, tanto na já referida trabalhabilidade, como no comportamento a longo prazo, é um processo com elevadas vantagens técnicas e económicas.

Existem, essencialmente, duas formas de tratamento, normalmente designadas por: modificação e estabilização.

A modificação ocorre primeiramente e deve-se fundamentalmente às reacções da cal com as partículas dos minerais argilosos que se desenvolvem num ambiente com pH elevado, originado pela adição da cal. O resultado desta melhoria traduz-se numa redução da plasticidade, redução do teor em água, redução da expansibilidade e maior facilidade na trabalhabilidade do solo.

Por sua vez, a estabilização ocorre quando se verifica uma reactividade entre o solo e a cal. A principal diferença entre um processo e outro assenta no facto de na modificação se registarem ganhos significativos a longo prazo nas resistências mecânicas desenvolvidas pelas ligações estabelecidas pelas reacções pozolânicas. Estas reacções podem desenvolver-se rapidamente e também são responsáveis por alguns efeitos da modificação.

3.2. PRINCIPAIS REACÇÕES FISICO-QUIMICAS

3.2.1. Generalidade

A adição de cal a um solo desencadeia reacções, predominantemente, químicas entre os constituintes mineralógicos do solo e a cal. Estas reacções, são responsáveis pela alteração de algumas características físicas como o teor em água, granulometria, plasticidade, compactação e resistência imediata, o que se reflecte directamente na sua trabalhabilidade.

Deste modo, a introdução de cal no solo provoca por um lado acções denominadas “imediatas”, que tem lugar desde que se misturam solo com a cal, e por outras acções a “longo prazo” que prosseguem durante vários meses, ou mesmo anos, depois da aplicação do solo tratado.

Neste sentido Diamond e Kinter (1971) realizaram experiências juntando cal (4% em peso de argila) a uma suspensão de bentonite previamente saturada com cálcio de modo a neutralizar a capacidade de

permuta catiónica das mesmas. Em seguida, realizaram a evolução da condutividade eléctrica da suspensão para diferentes tempos, comparando o decrescimento da mesma até valores muito baixos em menos de 24 horas. Estes resultados deram a indicação de que a cal era rapidamente adsorvida, permitindo a estes autores, com base nestas e em investigações posteriores, concluir que dentro das reacções imediatas entre as argilas e a cal ocorrem os seguintes processos:

- i. Adsorção física do hidróxido de cálcio da solução a uma velocidade muito rápida pelas argilas saturadas com cálcio. Fenómeno reversível nas etapas iniciais da reacção;
- ii. Reacção quase instantânea entre os bordos de apoio da alumina de grande área superficial das partículas argilosas e a cal adsorvida sobre as superfícies argilosas para produzir aluminato tetracálcio hidratado similar ao produzido pela hidratação no cimento portland;
- iii. Formação de um gel de silicatos (CSH), também designado por gel de tobermorita, nos pontos de contacto, entre o bordo e a superfície das partículas de argila, num período de varias horas;
- iv. A formação desses aluminatos e silicatos de forma rápida é de difícil demonstração, devido à pequena quantidade desses produtos criados e à natureza do sistema;

Alem disso, os autores em referencia, como produtos da reacção a longo prazo entre a cal e as argilas, reconhecem ainda a existência de:

- i. O gel de tobermorita (CSH);
- ii. Compostos pouco cristalizados e de difícil reconhecimento, mas similares aos que se produzem nas reacções do cimento portland;
- iii. Aluminatos de cálcio hidratados (CAH);

3.2.2. Permuta iónica

Quando a cal toma contacto com as partículas finas de argila, os catiões de cálcio tendem a substituir outros, que estavam adsorvidos à superfície das partículas, dispersos no que se designa por “dupla camada iónica”. Trocam-se assim os catiões monovalentes, usualmente nas argilas naturais, com os de sódio, potássio ou magnésio. Durante a permuta iónica não ocorre a formação de novos compostos químicos, mas sim uma redistribuição iónica (Dallas Little, 1995).

Esta substituição é um fenómeno que está dependente, fundamentalmente, de critérios de valência dos catiões e do tamanho dos mesmos. De forma genérica, pode dizer-se que, quando a uma partícula de argila com um tipo de catiões adsorvidos na sua superfície se apresentam outros de maior valência

ou tamanho, existe uma predisposição para a substituição. Este fenómeno acontece devido a uma compensação, de forma mais efectiva, entre os equilíbrios eléctricos das partículas argilosas e a uma redução da concentração diferencial de iões na camada dupla. Em consequência disto, regista-se claramente uma redução da espessura da camada dupla.

Assim, é possível relacionar uma série de catiões que são substituídos por outros na seguinte ordem:



Ora, é evidente que a maior concentração de catiões no meio dos mais altos da série, produzirá uma maior substituição dos inferiores da série.

A diminuição da espessura da dupla camada, que se produz pela substituição de um catião da série por outro situado mais á sua direita, leva a que se forme uma dupla camada mais estável. Fenómeno que se explica pelo facto de se verificar que menos catiões podem modificar esta nova configuração.

Por outro lado, a capacidade de troca iónica depende da composição mineralógica e química das partículas. Nas argilas predominantemente cauliniticas, as partículas têm características eléctricas superficiais muito estáveis, pelo que, as reacções de permuta são comparativamente pequenas, sobretudo quando comparadas com as reacções desencadeadas em argilas do grupo montmorilonite, em que a intensidade é cerca de 10 vezes superior (Folque, 1988).

3.2.3. Floculação e aglomeração de partículas

A floculação é uma consequência da permuta iónica responsável pela redução de espessura da dupla camada da argila. Isto implica que, a zona de forte concentração de catiões que separam uma partícula da outra seja reduzida, quer por concentração, quer por repulsa eléctrica, promovendo uma aproximação das partículas gerando-se novas forças de atracção entre elas.

Deste modo, ao colocarmos novas partículas de argila em contacto, e uma vez que a força resultante entre elas é atractiva, surgem novas agregações de partículas que, num momento anterior, estavam dispersas ou separadas, formando flocos ou conjunto de partículas.

Este mecanismo é evidentemente favorecido por uma maior concentração do electrólito ou de catiões permutáveis no meio, onde se encontram as partículas de argila. Quando a suspensão de argila se encontra diluída e, portanto num estado de menor concentração do electrólito, as partículas encontram-se mais afastadas e, como consequência da menor distância, as forças atractivas diminuem. Além disso através da presença de valores altos de pH no meio, também se favorece uma maior substituição em meio básico, que se justifica pela capacidade das argilas aumentarem a sua capacidade de permuta iónica em meios com altos valores de pH (Neves, 1993).

De acordo com Lambe e Whitman (1969), a floculação pode ser intensificada quando se incrementa um ou mais dos seguintes factores:

- i. Concentração electrolítica;
- ii. Valência do ião;
- iii. Temperatura.

A tendência para a floculação pode ser diminuída quando se diminuem, também um ou mais dos seguintes factores:

- i. Constante dieléctrica;
- ii. Dimensão do ião;
- iii. pH;
- iv. Adsorção aniónica;

De um modo geral, são as reacções físico-químicas de permuta iónica e floculação, as principais responsáveis pela alteração das propriedades e características geotécnicas do solo após a acção imediata da cal, nomeadamente, a alteração da granulometria, plasticidade, características de compactação, resistência imediata e trabalhabilidade.

3.2.4. Acções de cimentação

A adição da cal a um solo que contenha partículas de argila vai provocar, por uma forma lenta e ao longo do tempo, a ligação entre as partículas. Esta reacção denomina-se “cimentação” ou “reacção pozolânica” e é a responsável pelo processo de estabilização das camadas compactada de solos misturados com cal, devido à formação de uma matriz resistente.

As argilas são minerais que contêm importantes quantidades de sílica, alumínio e outros elementos de substituição, como o ferro e o magnésio. Características que conferem aos materiais argilosos propriedades pozolânicas naturais.

Quando quantidades adequadas de cal e água são adicionadas, o pH do solo rapidamente aumenta acima dos 10.5, permitindo que as partículas de argila se dividam, tal facto vai provocar que a sílica e o alumínio sejam libertados, entrem em contacto com o cálcio da cal para formarem silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CAH). Os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados são produtos similares aos que se formam na presa do cimento portland.

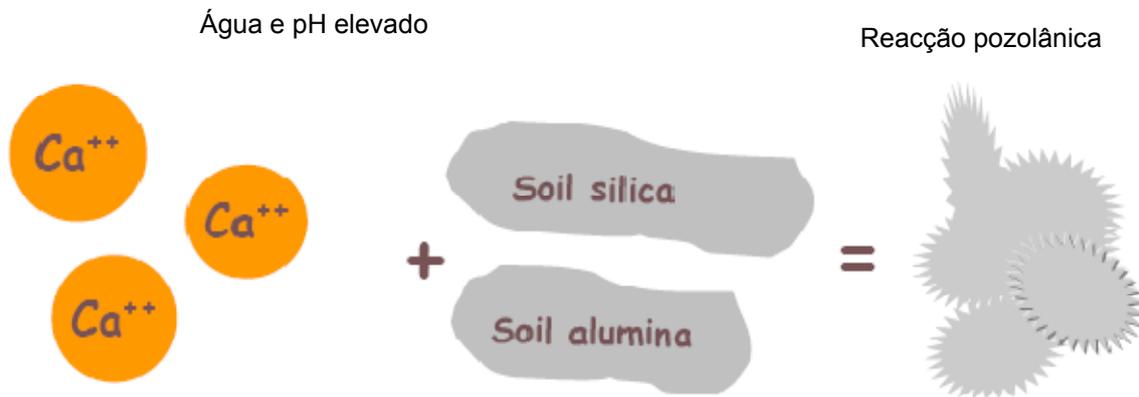
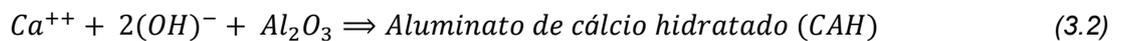


Figura 3.1 – Ilustração da reacção pozolânica resultante da acção do cálcio com a sílica e alumina dos solos (Puatti, 2008, adaptado)

Este processo rege-se pelas seguintes reacções:



Todavia, para que estas reacções se realizem, é necessários que se verifiquem as seguintes condições:

- i. Existir cal livre disponível;
- ii. O pH do meio tem de ser manter alto (pH > 10,5) para que se libertem a sílica e o alumínio da argila;

Após o processo de troca iónica e floculação é necessário que o teor de cal existente permita criar um meio fortemente básico, uma vez que, a insuficiência de cal pode levar a que não se dissolvam os elementos pozolánicos responsáveis pela reacção de cimentação.

A destruição das argilas pela acção reactiva da cal tem origem na solubilidade elevada da sílica (SiO_2) e do alumínio (Al_2O_3) num meio fortemente básico.

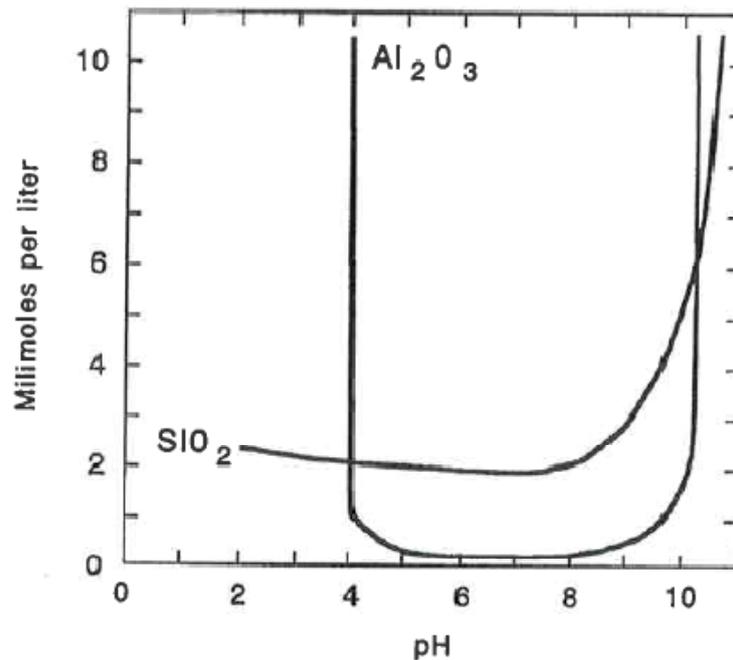


Figura 3.2 - Solubilidade do SiO₂ e do Al₂O₃ em função do pH do meio (Dallas Little, 1995)

Através da análise da *Figura 3.1* é possível verificar que os valores de solubilidade da sílica (SiO₂) e do Alumínio (Al₂O₃) ocorrem para valores de pH > 9 que correspondem à ordem de grandeza dos valores de pH das misturas de solo com cal. Para valores de pH < 9 as reacções pozolânicas ocorrem de forma muito mais lenta e apresentam alguma dificuldade em se realizarem.

3.2.5. Acção de carbonatação

A acção de carbonatação é um fenómeno que, embora não esteja associada à interacção do solo com a cal, mas sim entre a cal e o dióxido de carbono, é importante mencionar. Quando ocorre este fenómeno, da interacção da cal com o dióxido de carbono, em vez de ligações de cimentação de silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CAH), forma-se carbonato de cálcio.

Tratando-se de cal viva, a equação química que rege este comportamento é a seguinte:



Contudo, mesmo a elevadas temperaturas a carbonatação completa normalmente não ocorre, isto porque a adsorção do CO₂ na cal é um fenómeno superficial, formando-se gradualmente um escudo de carbonato de cálcio em volta das partículas de CaO (Boynton, 1979). É importante notar que, a água actua como um catalisador para a carbonatação, e o processo de carbonatação é mais completo em partículas de cal de pequeno tamanho, grandes superfícies específicas, do que em partículas de maior tamanho.

Esta reacção só se verifica se, por um lado a mistura de solo com cal estiver exposta ao ar atmosférico ou no seu interior existir CO₂ e, por outro, existir ainda cal disponível, isto é, se houver cal que não tenha reagido com as partículas do solo (Winterkorn e Pamukcu, 1991, in Neves 1993). Este último factor pode ser dividido da seguinte forma:

- i. As características mineralógicas das partículas do solo que não apresentam afinidade à possível reacção de cimentação desencadeada pela cal;
- ii. A um excesso da quantidade de cal adicionada ao solo, não permite que a totalidade da cal seja completamente dissociada para poder reagir com as partículas argilosas do solo.

Segundo Kézdy (1979), esta reacção tem uma importância secundária no caso das estabilizações de solos pertencentes a camadas de coroamento de aterros ou de leito do pavimento, na medida em que estas camadas ficarão protegidas do ar atmosférico, através da protecção conferida pela estrutura do pavimento rodoviário.

3.3. EFEITOS DA APLICAÇÃO DA CAL

3.3.1. Modificações do estado hídrico do solo

Estas modificações dependem da forma em que se encontra a cal (viva, hidratada, leite de cal) e da quantidade introduzida.

No caso da utilização de cal viva, podemos observar uma diminuição do teor em água no solo por acção combinada dos três fenómenos seguintes:

- i. Hidratação da cal viva de acordo com a reacção ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{Calor}$);
- ii. Evaporação de água devido à reacção exotérmica existente durante a hidratação da cal viva (15,5 kcal/mol);

- iii. Introdução de material seco (cal apagada) que reduz a relação entre o peso da água e o peso dos sólidos.

A importância relativa destes três fenómenos é praticamente a mesma, e pode concluir-se que a diminuição do teor em água provocada pela introdução de cal viva no solo é aproximadamente 1% por cada 1% de cal viva introduzida. Caso o tratamento em obra ser realizado em períodos que favoreçam a evaporação, a redução do teor em água é, muitas vezes, superior à provocada exclusivamente pela adição da cal, e pode chegar a valores da ordem dos 4 a 6%, devido ao arejamento que se verifica no processo de mistura do solo com a cal.

Já no caso da cal utilizada ser hidratada, verificamos também sobre o teor em água do solo, mas aqui unicamente provocado pela introdução de material seco, o que leva a que a diminuição do teor em água seja na ordem de 0,3% por cada 1% de cal hidratada introduzida.

Finalmente, no caso da utilização do leite de cal, verifica-se o efeito inverso, ou seja, observamos um aumento do teor em água que é função da sua concentração (massa de CaO por litro de água) e da quantidade misturada com o solo.

3.3.2. Modificação das características da fracção argilosa do solo

A permuta iónica e a floculação são as primeiras reacções que se desenvolvem logo após a cal tomar contacto com as partículas de argila, os iões de cálcio (Ca^{++}) da cal hidratada migram para a superfície das argilas e deslocam a água e outros iões.

Deste modo, verifica-se uma alteração da densidade das cargas eléctricas que rodeiam as partículas de argila, permitindo que as mesmas sejam atraídas umas contra as outras formando flocos. Em consequência destes fenómenos surge uma aglomeração das partículas argilosas em conjunto de partículas de maior tamanho fazendo com que a curva granulométrica do material fique mais grosseira.

Rajasekaran et al. (1997) realizou varias observações com microscópio electrónico sobre amostras de argilas estabilizadas com cal, observando a microfábrica da mistura, de onde pode constatar a presença de grupos de flocos cimentados com produtos de reacção do solo com a cal. À medida que a cal envolve as partículas de argila, produz-se a agregação destas em unidades maiores, com um consequente aumento dos tamanhos de vazios. A formação de grupos de flocos com uma estrutura muito aberta e elevados índices de vazios, foi claramente observada ao mesmo tempo que partículas argilosas cimentadas com produtos estáveis derivados da reacção solo-cal (CSH e CAH).

Este fenómeno é o principal responsável pelas alterações geotécnicas ocorridas no solo após a acção imediata da cal: granulometria, plasticidade, compactação, trabalhabilidade e resistência imediata.

3.3.3. Modificação da textura e consistência

O fenómeno da floculação vai promover a alteração na orientação laminar característica dos solos argilosos passando a estrutura do solo a ser constituída por conjunto de partículas desordenadas.

Os solos argilosos, ao apresentarem uma estrutura laminar em que o contacto entre partículas está lubrificado por água, exprimem uma elevada compressibilidade e uma fraca resistência às solicitações de corte. A adição de cal ao solo, conforme já referido, altera a orientação laminar, passando o solo a evidenciar um comportamento mais isotrópico e com maior atrito entre as partículas, que também se tendem a aglomerar, devido à diminuição da dupla camada iónica e à maior aproximação entre partículas. Isto leva a que, o solo substitua o comportamento de um material plástico por outro mais frível, aproximando-se dos solos granulares.

Segundo Castelló,(2003) a conclusão de todo este conjunto de mecanismos de alteração da forma e distribuição das partículas, leva a que um solo argiloso de comportamento característico plástico, com a adição de cal experimente os seguintes fenómenos descritos:

- i. Uma estabilização do equilíbrio eléctrico das partículas que elimina a propensão a modificação num solo;
- ii. Uma redução da importância da dupla camada e da quantidade de água adsorvida;
- iii. Um aumento dos vazios na mistura solo-cal com conseqüente aumento do volume inicial de solo;
- iv. Uma desordem das partículas, o que origina um comportamento menos coesivo da mistura solo-cal, imediatamente após a adição da cal.

As figuras 3.3 e 3.4 pretendem ilustrar os efeitos da adição de cal na textura das partículas de argila, resultante dos efeitos da troca catiónica, floculação e aglomeração.

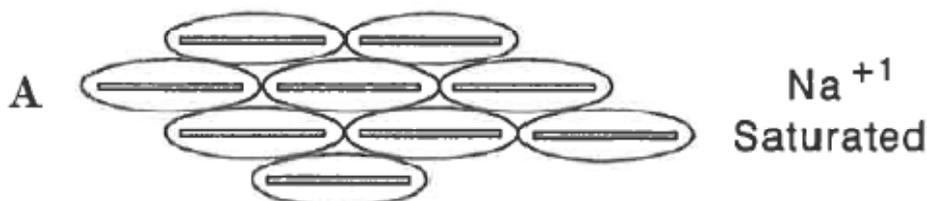


Figura 3.3 - Partículas de argila separadas por uma larga camada de água adsorvida (Dallas Little, 1995)



Figura 3.4 - Adição de cal provoca a diminuição da camada de água e permite a flocculação (Dallas Little, 1995)

Uma aproximação das partículas de argila, obtida à custa da diminuição da camada de água adsorvida em torno das partículas, é responsável por um incremento do atrito entre partículas, e conseqüentemente por um aumento da resistência ao corte, que se traduz num melhoramento da sua capacidade de carga.

3.4. FACTORES CONDICIONANTES NO TRATAMENTO DE UM SOLO COM CAL

Quando se pretende utilizar a cal no tratamento de solos com o objectivo de os modificar ou de os estabilizar, deve ter-se em consideração uma série de factores, dos quais pode depender o êxito do tratamento.

Neste ponto, apenas são referidos os factores relacionados com a natureza do solo e do elemento de tratamento, no caso a cal viva. Contudo, outros factores como os equipamentos utilizados, quer no espalhamento, quer na mistura e mesmo na compactação dos materiais, são também factores condicionantes do resultado final do tratamento.

Entre os factores de natureza dos solos podem ser destacados os seguintes:

- i. Percentagem de argila presente no solo;
- ii. Índice de plasticidade do solo;
- iii. Características mineralógicas das argilas;
- iv. Percentagem de matéria orgânica;
- v. pH do solo;

vi. Percentagem de sulfatos.

A percentagem de argila existente num solo deve ser tomada em consideração, principalmente quando se pretende proceder à estabilização do solo, ou seja, aumentar substancialmente as suas características de resistência mecânica. As partículas de argila fornecem a sílica e a alumina necessária para o desenvolvimento de produtos pozolânicos, importantes para o aumento de resistência do solo.

A plasticidade está normalmente associada aos solos argilosos o que permite que o índice de plasticidade também seja referenciado como um factor condicionante no tratamento de solos com cal.

As diferentes características mineralógicas das argilas são responsáveis por diferentes superfícies específicas, capacidades de troca iónica, plasticidade e, em conjunto, são também elas que levam a que se obtenham diferentes reactividades com a cal. Solos em que as argilas são sódicas ou potássicas, iões facilmente trocados por cálcio apresentam uma melhor apetência para o tratamento com cal. As diferentes características mineralógicas das argilas afectam sobretudo os tratamentos em que seja importante assegurar a estabilização dos solos, ou seja, desenvolver as reacções de cimentação com base no desenvolvimento de produtos pozolânicos. Nesses casos, o estudo mineralógico poderá ser levado em consideração.

Existem vários indicadores que referem as quantidades mínimas que um solo deve possuir, quer de partículas argilosas, quer de índice de plasticidade, para poder ser passível de tratamento com cal bem sucedido:

i. National Lime Association:

Índice de Plasticidade > 10%;

ii. Estado de Illinois:

Percentagem em argila > 7%;

Índice de Plasticidade > 8%;

iii. U.S. Air Force Soil Stabilization Index System. SSIS (1976)

Passados no peneiro nº 200 (75 µm) > 25%;

Índice de Plasticidade > 10%.

Como mostram estes exemplos, as regulamentações e especificações técnicas, privilegiam o uso da cal em solos argilosos, descartando os solos não plásticos. Na verdade, esta preferência assenta no

facto dos tratamentos que sofrem os solos argilosos com a adição da cal, quando comparados com os solos de natureza siltosa ou arenosa, geralmente constituídos por quartzo, feldspatos e micas.

Estes conceitos baseados numa teoria generalista, não devem servir para excluir os solos de um possível tratamento com cal. A aptidão do solo ao tratamento com cal deve ser realizada tendo em vista o fim pretendido com esse tratamento e sempre determinado com recurso a ensaios laboratoriais onde se avalia a resposta do solo ao tratamento, onde serão contabilizados diversos aspectos, quer dos solos, quer do tipo de cal utilizada.

A experiência tem demonstrado que a cal poderá reagir com solos de granulometria média, moderadamente fina e fina conduzindo a uma diminuição da plasticidade, aumento da trabalhabilidade, redução da expansibilidade e aumento de resistência. Segundo a classificação Unificada são CH, CL, MH, SC, SM, GC, SW-SC, SP-SC, SM-SC, GP-GC ou GM-GC e podem ser potencialmente capazes, de ser estabilizados com cal (Dallas N. Little, 1995).

A existência de matéria orgânica num solo a tratar com cal é um factor de elevada importância, uma vez que, a sua presença influencia negativamente o normal e eficaz desenvolvimento da acção de cimentação. A matéria orgânica é constituída por partículas complexas que podem adsorver catiões de cálcio, inibindo assim a reacção superficial da cal com as partículas de argila prejudicando a formação das reacções pozolânicas.

Este fenómeno é complexo e está muito condicionado pela natureza do solo e da matéria orgânica presente. Embora não seja definida uma regra rígida relativamente ao limite da percentagem de matéria orgânica que leva a esta inibição, é seguro afirmar que conteúdos inferiores a 1% não apresentam problemas (Castelló, 2003).

Segundo Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A. (2007), a matéria orgânica retarda os efeitos de cal nos solos e inibe as reacções pozolânicas de cimentação a longo prazo definindo como percentagens máximas de matéria orgânica:

- i. Um por cento (1%) para leitos de pavimento;
- ii. Dois porcentos (2%) para o resto dos casos

Segundo (GTS 2000) a presença de matéria orgânica no solo, em função da sua percentagem, consome "prioritariamente" uma quantidade mais ou menos importante de produto de tratamento para neutralizar a acidez do meio, quantidade essa que se perde no desenvolvimento das reacções de cimentação.

A reacção da cal com as argilas necessita, conforme descrito no ponto 3.2.4. Acções de cimentação, que o meio apresente um pH alto para assegurar o intercâmbio iónico e promover as reacções

pozolânicas. Na verdade, a introdução de cal num solo é capaz de elevar os valores de pH da mistura para valores da ordem dos 12,4.

Para que se possam produzir as reacções pozolânicas de cimentação a longo prazo dos solos com a cal é importante que o valor do pH seja superior a 12 (Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A. 2007)

Actualmente, os especialistas definem que o valor do teor em de cal óptima deve ser definido tendo em conta os objectivos que se pretendem obter com o tratamento, quer em termos de características físicas, quer em termos de características mecânicas.

A presença de sulfatos solúveis é um factor que nos últimos anos tem despertado especial atenção por parte de diversos autores, pois não raras vezes aparece associado a importantes casos de patologias em aterros rodoviários em que se recorreu a técnica de estabilização com cal.

A interferência dos sulfatos nas reacções pozolânicas é um efeito conhecido na presa do cimento portland. Nas reacções entre as partículas de argila e a cal formam-se silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato de cálcio hidratado (CAH), que são produtos similares aos que se formam na presa do cimento e, por isso, é de esperar também uma interferência nas reacções. A presença de sulfatos pode levar á formação de um produto reactivo que consiste em cálcio, alumina, água e sulfatos. Este cálcio-sulfato-aluminato hidratado pode ocorrer sobre a forma de:

- i. Etringite (elevada concentração de sulfato);
- ii. Monosulfatoaluminato (baixa concentração de sulfato).

Este cálcio-sulfato-aluminato hidratado constitui um problema pelo seu potencial expansivo resultante do seu processo de formação e porque essa expansão pode ocorrer associada a um elevado potencial de pressão.

Os sulfatos são os componentes cuja presença resulta em mais problemas para os solos estabilizados com cal e a experiência evidencia que a sua acção pode ser muito prejudicial a partir de conteúdos da ordem de 1% (GTS, 2000).

3.5. METODOLOGIA GERAL DOS ESTUDOS DE SOLOS TRATADOS COM CAL

O principal objectivo dos estudos é identificar a quantidade óptima de cal para introduzir durante a construção para modificar ou estabilizar o solo ou agregado. A quantidade óptima de cal varia em função da utilização que se pretende para o solo. Isto porque, se pode-se utilizar uma larga variação da percentagem de cal consoante as propriedades pretendidas. Os objectivos a alcançar vão desde a

redução da plasticidade e da trabalhabilidade até à modificação definitiva das propriedades que afectam a resistência da mistura e ao desempenho de um pavimento que contenha uma camada tratada.

Segundo (Dallas N. Little, 1995), os critérios de dimensionamento de uma mistura podem ser divididos em duas categorias. Na primeira categoria, os objectivos são a modificação do solo e redução da plasticidade, melhoria da trabalhabilidade, aumento imediato da resistência e redução do potencial de expansão. Estas características estão geralmente associadas às reacções iniciais entre o solo e a cal. A troca catiónica é o fenómeno associado da floclulação e da aglomeração, e ocorre quase simultaneamente com o processo da mistura do solo com a cal. Contudo, algumas reacções pozolânicas imediatas também podem contribuir para estas modificações. Os critérios de dimensionamento da mistura neste tipo de categoria de estabilização incluem:

- i. O aumento da quantidade de cal não se traduz numa diminuição do IP;
- ii. Redução aceitável do IP para o objectivo da estabilização;
- iii. Redução aceitável do potencial de expansão;
- iv. Aumento da resistência (i.e., CBR ou compressão uniaxial) que permitam a sua utilização.

Por sua vez, a segunda categoria inclui critérios de resistência associados às reacções pozolânicas entre a cal e o solo. Os critérios de resistência podem ser relacionados com o desempenho do pavimento e com projecto estrutural do pavimento. Adicionalmente, a durabilidade também está associada aos aumentos de resistência das misturas solo-cal. Aumento de resistência e durabilidade são objectivos da estabilização.

Existe um número alargado de metodologias para estudos de misturas de solo-cal, isto porque vários estados e países desenvolveram procedimentos de forma a satisfazerem as suas necessidades específicas de tratamento. Diversos procedimentos de misturas estão sumarizados em várias publicações, o TRB State of the Art Report 5 (1987) tem sumarizado os procedimentos Californiano, Eades and Grim, Illionois, Texas, Oklahma, South Dakota, Thompson e Virginia, o GTS Guide Technique: Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (2000) tem definido procedimentos para a aplicação em construção de aterros e leitos de pavimento.

3.5.1. Procedimento do Texas

O procedimento de estudo da mistura de solo-cal utilizado pelo Departamento de Transportes do Texas deu origem à norma AASHTO T-220, o qual tem por base ensaios de compressão uniaxial

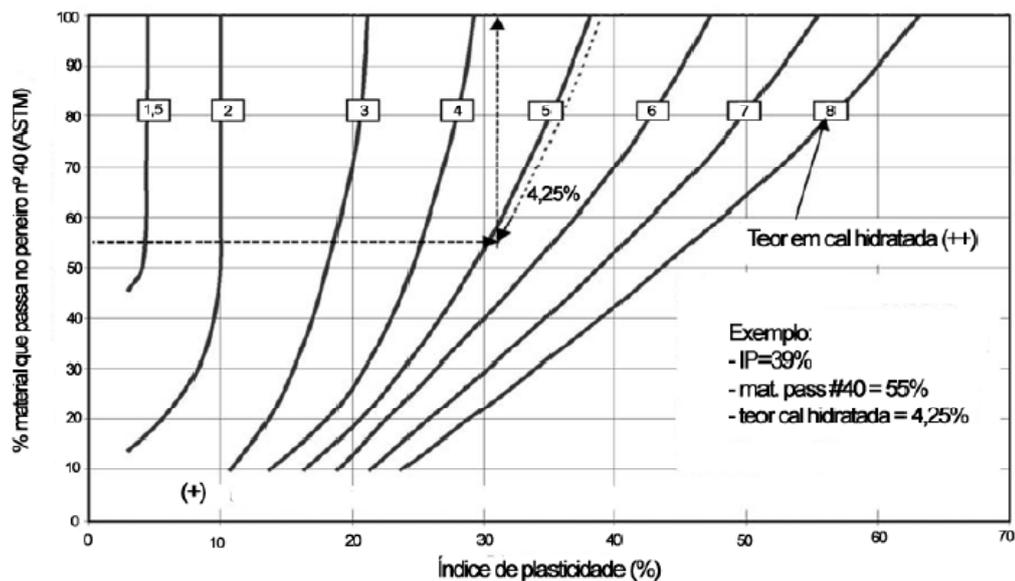
realizados sobre a mistura de solo-cal. Este procedimento sugere o critério de resistência de 690 kPa para a construção de bases e 345 kPa para sub-bases de pavimento.

Este procedimento pode resumir-se nos seguintes passos:

Com base na granulometria e Índice de Plasticidade (IP), a percentagem de cal é seleccionada com recurso à

Figura 3.5. A sua utilização não pode ser considerada para materiais com menos de 10% de passados no peneiro nº40 e IP inferiores a 3%. A cal a utilizar deve ter uma percentagem de mais de 90% de óxido de Ca ou Mg e 85% ou mais de partículas com dimensão inferior a 75 µm. As teores em cal apresentadas são para a estabilização de bases e sub bases onde os efeitos de duração são desejados. Resultados satisfatórios são algumas vezes obtidos com recurso a mais 0,5% da percentagem mencionada;

- i. O teor óptimo em água e o peso volúmico seco máxima são obtidos com recurso ao ensaio de compactação PROCTOR;
- ii. Provetes de 152 mm de diâmetro e 203 mm de altura são compactados com o teor óptimo em água e máxima baridade seca;
- iii. Colocar os provetes em câmaras triaxiais e curá-los do seguinte modo:
 - a. Permitir que os provetes baixem a temperatura;
 - b. Remo-los das câmaras e secar os provetes a uma temperatura que não exceda os 60°C por 6 horas ou até remover entre 1/3 a 1/2 do teor em água da moldagem;
 - c. Deixar o provete a arrefecer durante pelo menos 8 horas;
 - d. Submeter o provete à absorção de água por capilaridade por 10 dias.
- iv. Submeter o provete curado ao ensaio de compressão uniaxial de acordo com (AASHTO T-220)



- + Não considerar os solos com menos de 10% de material passado no peneiro nº 40 (ASTM) e com um índice de plasticidade inferior a 3%.
- ++ A cal a utilizar deve ter as seguintes características: %Ca(OH)₂ ou Mg(OH)₂ > 90%
% material que passa no peneiro nº 200 (ASTM) > 85%

Figura 3.5 – Determinação da percentagem óptima de cal para ensaios de compressão com base nos valores de IP e percentagem de passados no peneiro nº40 (TRB Report 5, 1987, adaptado in Cruz 2008)

3.5.2. Procedimento Eades and Grim

O procedimento desenvolvido por Eades and Grim (1966) é baseado na filosofia segundo a qual adicionando uma quantidade suficiente de cal ao solo de forma a satisfazer a capacidade de troca catiónica (CTC) e todas as reacções iniciais fornecendo quantidade suficiente cal para manter o pH alto de forma a sustentar as reacções pozolânicas responsáveis pelo desenvolvimento da resistência da mistura.

Este procedimento está descrito na norma ASTM C-977 Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization, e compreende os seguintes passos:

- i. Pesar o correspondente a 20 g de solo seco passado no peneiro de 0,420 mm de abertura e colocar dentro de um recipiente plástico com capacidade de 150 ml;
- ii. Como a maioria dos solos necessitam entre 2 e 5% de cal, são necessárias 5 recipientes com 2, 3, 4, 5 e 6% de cal. Isto assegura que na maioria dos casos a percentagem de cal requerida

será determinada em 1 hora. Pesar a cal com uma aproximação de 0,01g e adicionar ao solo e de seguida agita-se para misturar o solo seco e a cal;

- iii. Adicionar 100 ml de água destilada (sem CO₂) a cada um dos recipientes;
- iv. Agitar o solo com a cal e a água até não se verificar qualquer evidência de material seco. A agitação deve demorar no mínimo 30 segundos;
- v. Agitar os recipientes a cada 10 minutos durante 30 segundos;
- vi. Após 1 hora transferir parte da solução para um recipiente plástico e avaliar o pH. O equipamento de avaliação do pH deve possuir um Hyalk electrode and standardized with a buffer solução com um pH de 12,00;
- vii. Registrar o valor de pH de cada uma das misturas. A menor percentagem de cal que atribui à mistura um pH de 12,4 é a que corresponde à percentagem requerida. Caso o valor de pH não exceda os 12,3 e dois teores em cal apresentem esse mesmo valor deve ser considerada a mais baixa como percentagem requerida.

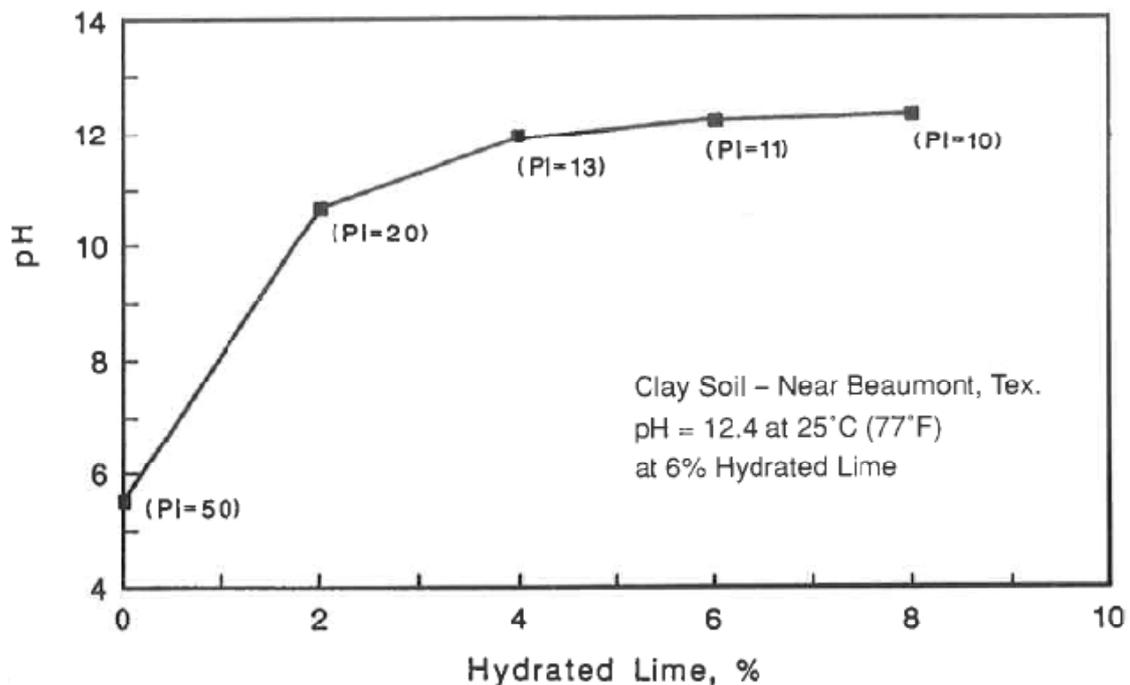


Figura 3.6 - Eades and Grim pH teste (Dallas Little, 1995)

Este método foi utilizado durante o final do século passado e era visto como um bom teste para ser usado como um ponto de partida para a selecção da percentagem óptima em cal. Contudo, Hardy (1970) demonstrou que este método não é tão efectivo na determinação do teor óptimo em cal, já que, para determinados solos, o teor óptimo é aquele que corresponde ao valor máximo da tensão de compressão.

3.5.3. Metodologia Francesa (GTS 2000)

A comunidade geotécnica Franceses, após vários anos de prática, compilaram num guia técnico a sua experiência no tratamento de solos com cal e/ou ligantes hidráulicos. Este guia técnico encontra-se dividido em três partes, sendo que na primeira parte (Parte A) constam generalidades relativas à técnica de solos tratados com cal ou com ligantes hidráulicos, comumente utilizados em aterros e leitos de pavimento. A segunda parte (Parte B), é dedicada ao tratamento de solos a aplicar nos aterros e alargado à construção de determinadas partes críticas dos aterros (aterros técnicos, parte superior dos aterros, PSE, fundação dos aterros de grande altura e pendentes dos taludes de aterro). Na terceira parte (Parte C), analisam-se os leitos de pavimento, abordando os seguintes aspectos: estudos, técnicas e maquinaria para a sua execução e controlo da qualidade.

Por forma a verificar a aptidão do solo ao tratamento com o produto, a parte A indica que os ensaios de laboratório devem incidir sobre os seguintes aspectos:

- i. identificação dos solos a partir de parâmetros considerados significativos para o tratamento: granulometria (D_{max} , Cu), argilosidade (limites de consistência e azul de metileno), expansibilidade, caracterização da compactação, ensaios de penetração CBR imediato em provetes compactados com diferentes valores de teor em água, com a energia do ensaio de compactação a definir, componentes químicas (matéria orgânica, fosfatos, nitratos, cloretos, sulfatos e sulfuretos);
- ii. identificação e caracterização da cal: análise granulométrica; avaliação da composição química; teste de reactividade, no caso de cal viva; e
- iii. estudo do material estabilizado: limites de consistência; ensaios de compactação; ensaios de caracterização mecânica.

Já na parte B, refere-se que o tratamento de solos aplicado à construção de aterros, tem como objectivo principal, permitir a reutilização de solos sensíveis à água que no momento da sua aplicação se encontram demasiados húmidos para serem utilizados em condições técnicas e económicas aceitáveis. O guia técnico refere ainda que também se pode recorrer ao tratamento para a construção de partes do aterro que exijam materiais de características mecânicas superiores, como por exemplo,

os que constituem a parte superior dos aterros (PSA), aterros em zonas de difícil acesso, execução das partes inferiores dos aterros altos construídos com solo sensíveis à água ou com determinados materiais rochosos evolutivos que podem estar inundados temporariamente e ainda, o aumento da pendente dos taludes do aterro.

O parâmetro escolhido na fase de estudo para decidir sobre a necessidade do tratamento e sobre as dosagens é o índice de capacidade de carga imediato (IPI) do solo com a humidade provável no momento da sua aplicação.

Esta metodologia consiste em humidificar a fracção 0/20 mm das amostras com três valores de teor em água (considerar os valores extremos do estado hídrico previsível no período de execução e a média dos valores medidos aquando do reconhecimento) e para esses valores adicionar diversos teores em cal, de forma a obter curvas que relacionam os valores de CBR e IPI com essas percentagens, para os diferentes valores de teor em água de compactação. Por sua vez, estas curvas servem de base à elaboração de um gráfico que permite obter a dosagem de cal requerida em função do teor em água do solo para diferentes níveis de CBR e IPI. É este gráfico que vai ser utilizado para determinar a dosagem de cal mais apropriada para o objectivo pré-estabelecido, a partir do teor em água natural do solo no momento dos trabalhos (Cruz 2008). Na Figura 3.7 está apresentado um exemplo de um estudo de formulação com base no valor de IPI.

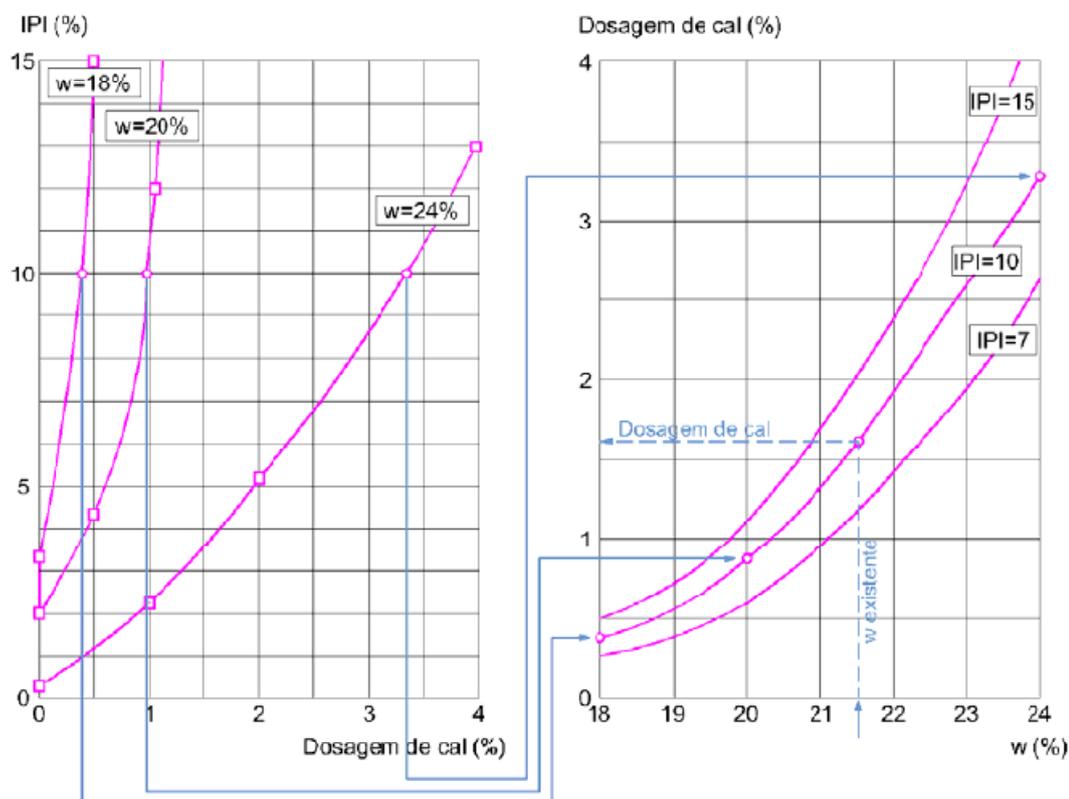


Figura 3.7 – Exemplo de representação dos resultados de um estudo de formulação de um solo para reutilização em aterros (GTS 2000, adaptado in Cruz 2008)

De acordo com a figura para se obter um IPI mínimo de 10, a dosagem de cal a utilizar será de 1,7% no caso de o solo apresentar um teor em água de 21,5% no momento dos trabalhos (sem ter em conta a evaporação que se produz durante o processo da mistura).

Por fim, na terceira e última parte deste faz-se uma abordagem acerca dos tratamentos de solos a aplicar em leitos de pavimento e, para tal, torna-se indispensável um estudo de formulação, cuja extensão depende da maior ou menor participação do leito de pavimento na estrutura do pavimento e da experiência disponível sobre o uso da mistura considerada. Neste sentido, este guia propõem três níveis de estudo de formulação em ordem crescente de importância.

- i. O estudo de formulação nível 1 corresponde a uma simples verificação de que a fórmula escolhida à priori baseada em outras experiências, permite alcançar os efeitos pretendidos a curto e longo prazo. Caso esta condição não se verifique, deve abordar-se o estudo de nível 2;
- ii. O estudo de nível 2 tem como objectivo determinar a percentagem do produto de tratamento que conduza a um material cujas características mecânicas permitam atingir a classe de fundação pretendida. Conhecer a incidência das possíveis variações, da percentagem de cal, sobre o comportamento mecânico do material tratado e definir os procedimentos de ajuste da dosagem que permitam corrigi-las. Este nível de estudo também tem a finalidade de otimizar as dosagens dos produtos de tratamento;
- iii. O estudo de nível 3 deve realizar-se quando está previsto um dimensionamento do conjunto leito de pavimento-estrutura do pavimento, mediante um método de cálculo de estruturas. O objectivo do estudo consiste então em determinar, para diferentes formulações as características mecânicas, ou sejam, módulo de deformabilidade, E e resistência à tracção, R_t que podem ser aplicados no modelo de cálculo com o objectivo de escolher aquelas que permitam obter uma optimização técnica e económica do pavimento.

No quadro seguinte apresentam-se para as diferentes fases do estudo o alcance de cada um dos níveis de estudo anteriormente apresentados.

Fase	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Ensaio de aptidão do solo	Imprescindível (NF P 94-100)		
Dosagem da cal	Proposta por experiências similares	É necessário procurar o valor óptimo	
Estudo da fórmula de trabalho	Para a percentagem proposta	Pelo menos para duas ou três percentagens diferentes em função da experiência	Salvo conhecimentos especiais é provável que se tenha que estudar mais de três percentagens
Condições de compactação	Valores mínimos: IPI ⁽¹⁾ e teores em água de execução ⁽²⁾	Igual ao nível 1, com realização para cada percentagem estudada. Se são menos de três percentagens estudadas, bastará estudar para o valor mais provável	
Prazos de trabalhabilidade	É necessário estudar ou adoptar valores padrões	Analisar os valores obtidos para todas as percentagens estudadas	
Comportamento com tráfego	Comparação dos valores de IPI / CBR		
Comportamento com gelo (se aplicável)	Comparação da resistência à compressão simples		
Estudo de sensibilidade face às variações de dosagem	---	Realizar separadamente para cada parâmetro ou avaliar condições críticas extremas	Realizar para cada uma das condições Proctor correspondentes e para cada dosagem estudada
Dosagem seleccionada	A prevista caso se obtenha os efeitos pretendidos. Caso contrário passa-se ao estudo nível 2.	A mais baixa que permita assegurar os objectivos propostos	Os cálculos são realizados para a percentagem escolhida considerando os valores de resistência mais desfavoráveis incluindo os obtidos no estudo de sensibilidade

⁽¹⁾ IPI > 10, 15 ou 20 função da classificação do solo; ⁽²⁾ $W_{nat.} \geq 0,9 W_{opt.}$

Quadro 3.1 – Alcance das diversas fases nos níveis de estudo (Castelló, 2003, adaptado)

4. CAPÍTULO – CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Foram objecto de estudo no presente trabalho três tipos de solos distintos, todos eles recolhidos em Portugal Continental e que representam uma amostragem dos solos portugueses que se encontram frequentemente nas obras geotécnicas realizadas no país, designadamente na construção de aterros. Os diferentes solos em estudo foram recolhidos nas seguintes zonas:

- i. Alter do Chão – Distrito de Portalegre (referenciado por S100 – Solo de Alter do Chão);
- ii. Localidade da Barosa – Concelho de Leiria (referenciado por S200 – Solo da Barosa);
- iii. Lisboa - Zona do Aeroporto Figo Maduro (referenciado por S300 – Solo do Aeroporto)

Deste modo, e com a finalidade de conhecer o enquadramento geológico dos solos em estudo apresenta-se de forma sumária uma descrição geológicas dos diferentes locais onde foram recolhidos.

Os solos residuais existentes na zona de Alter do Chão, de acordo com a Notícia Explicativa da Folha 32 – B - Portalegre, da Carta Geológica de Portugal, resultam sobretudo de granitos tectonizados. São rochas gnássicas derivadas de granitos alcalinos porfiróides, de grão grosseiro e de grão fino.

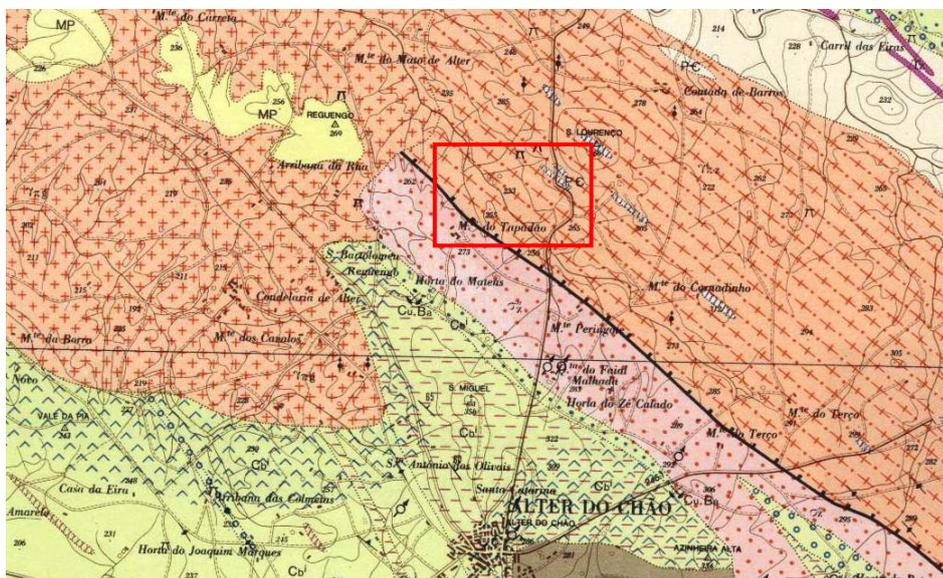


Figura 4.1 - Extracto da carta geológica de Portugal, na escala 1:50 000 com a localização da zona de recolha

A zona da Barosa, de acordo com a Notícia Explicativa da Folha 23 – C – Leiria, da Carta Geológica de Portugal, é constituída sobretudo por formações detríticas, de arenitos argilosos ou siliciosos, mais ou menos grosseiros, com predominância de cores acastanhadas, rosadas ou avermelhadas.

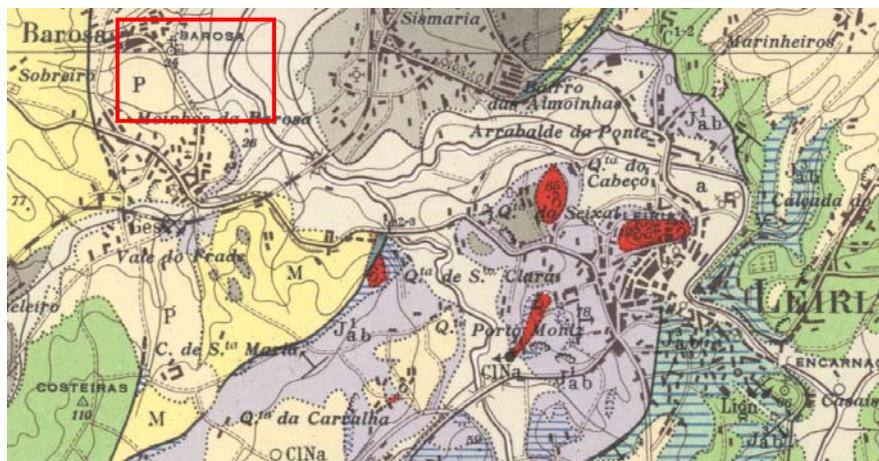


Figura 4.2 - Extracto da carta geológica de Portugal, na escala 1:50 000 com a localização da zona de recolha

O enquadramento geológico da zona, onde foi recolhido o solo referenciado por “S300 - Solo do Aeroporto”, evidencia a presença de aterros heterogéneos de espessura variável, constituídos por solos areno argilosos, podendo atingir valores superiores a 15,0m, que assentam sobre formações do Miocénico, constituído por areias finas a médias, siltosas pontualmente argilosas, e por calcários gresosos, fossilíferos, medianamente compactos, com níveis arenosos e siltosos friáveis.

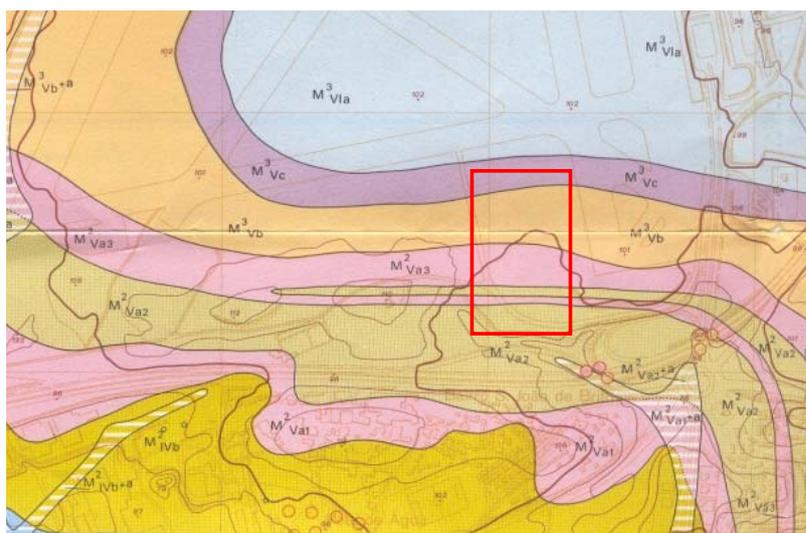


Figura 4.3 – Extracto da carta geológica do Conselho de Lisboa dos Serviços Geológicos de Portugal, à escala 1:10 000 com a localização da zona de recolha

4.2. CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL

Os ensaios laboratoriais, numa primeira fase, visam obter informações sobre características físicas e químicas dos solos de forma a poder avaliar a potencialidade do solo ao tipo de tratamento. Atentas as modificações que ocorrem após a adição da cal aos solos, já descritas no capítulo 3, é necessário caracterizar e conhecer esse novo material.

O programa de ensaios estabelecido visa conhecer e avaliar alteração das características físicas e mecânicas dos solos, 2 e 72 horas após a adição de diferentes teores em cal.

Os cálculos dos teores em cal foram determinados tendo por base a relação entre a massa do produto de tratamento com a soma das massas das partículas secas existentes na mistura, ou seja:

$$\text{Teor em cal} = \frac{\text{Massa de cal (g)}}{\text{Massa de solo seco (g)} + \text{Massa de cal (g)}} \times 100 (\%) \quad (4.1)$$

Uma vez que, na realização do estudo em referência foi realizado com recurso a cal viva - que ao entrar em contacto com a água provoca uma reacção exotérmica, conforme descrito em 2.3.3., foi necessário estabelecer um período de tempo mínimo entre a mistura do solo com a cal e a realização dos ensaios. Nesta conformidade, avaliou-se a temperatura do solo antes da adição de cal e a evolução da mistura após a adição de 4% de cal. O solo antes da mistura com a cal, apresentava um teor em água de 17%. A Figura 4.4 exemplifica o registo da variação da temperatura com o tempo, da mistura de solo com 4% de cal.

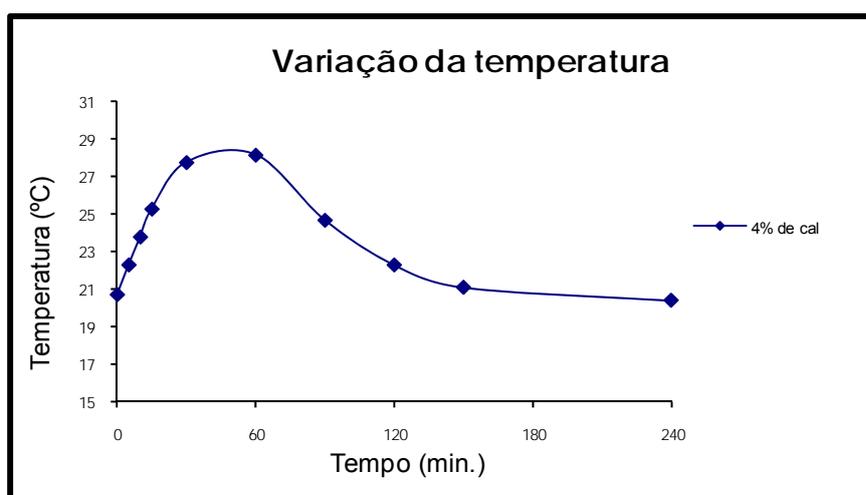


Figura 4.4 – Variação da temperatura da mistura de solo com 4% de cal

Da análise destes valores obtidos resulta que, durante os 40 minutos seguintes à adição de cal ao solo, a temperatura da mistura regista aumentos. Todavia, imediatamente após este período inicial verifica-se uma diminuição da temperatura, de tal forma que decorridos 120 minutos sobre a adição da cal a mistura apresenta uma temperatura praticamente igual à inicial

Assim, atentos os valores observados e as recomendações da bibliografia, estipulou-se como tempo mínimo de repouso 120 minuto.

4.2.1. Ensaios de identificação e caracterização física

Após a adição de cal a um solo ocorrem modificações quase de imediato devido às reacções de troca cationica, floculação e aglomeração que vão contribuir para uma alteração das propriedades físicas do solo.

A adição de cal a um solo geralmente conduz a um modificação das propriedades desse solo. Inicialmente a cal era apenas utilizada para o tratamento de solos finos, hoje em dia a cal é bastante utilizada para modificar as características da fracção fina e solos granulares.

Com a finalidade de identificar e caracterizar os solos envolvidos no estudo, bem como avaliar os efeitos da sua modificação, verificada pela adição dos diferentes teores em cal viva utilizadas, foram realizados os seguintes ensaios:

- i. Avaliação da aptidão do solo ao tratamento;
- ii. Análise granulométrica por sedimentação;
- iii. Limites de consistência;
- iv. Azul de metileno;
- v. Equivalente de areia;
- vi. Densidade das partículas;
- vii. Classificação dos solos;

4.2.1.1. Ensaio de avaliação da aptidão do solo ao tratamento

O ensaio consiste em acelerar, por condições particulares de cura, os fenómenos de presa que se produzem numa amostra de material tratado, e medir a expansibilidade que eventualmente ocorra durante esse processo. O ensaio foi realizado segundo a norma Francesa NF P 94-100 “Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essai d’évaluation de l’aptitude d’un sol au traitement”.

A expansibilidade é medida pela variação de volume de provetes, com altura igual ao diâmetro ($h=d=5$ cm) conservados nos primeiros 3 dias ± 4 horas a 20 ± 2 °C e humidade relativa superior a 90% e nos restantes 7 dias ± 4 horas totalmente imersos em água a uma temperatura de 40 ± 2 °C.

Os provetes foram moldados com material passado no peneiro de 4,76 mm de abertura, com 4% de teor em cal, compactados de forma estática, para um teor em água igual ao teor óptimo e para um peso volúmico seco correspondente a 95% do peso volúmico seco máximo obtido no respectivo ensaio de compactação.



a) Provette após moldagem



b) Provette após 3 dias em câmara húmida

Figura 4.5 – Fotografia do provete para ensaio de avaliação da aptidão ao tratamento com cal

No quadro seguinte apresenta-se um resumo dos valores obtidos no ensaio para avaliação da aptidão do solo ao tratamento com cal, através da avaliação da expansibilidade volumétrica.

Ref. do solo	V_0 - Volume inicial do provete (cm^3)	V_1 - Volume do provete (cm^3)	V_2 - Volume da membrana (cm^3)	G_v - Expansibilidade volumétrica (%)
		Após 7 dias ± 4 h de imersão		$[(V_1 - V_2) - V_0] / V_0 \times 100$ Após 7 dias ± 4 h de imersão
Solo da Barosa (S200)	97,94	107,96	9,13	0,9

Quadro 4.1 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de avaliação da aptidão ao tratamento com cal – S200

Segundo o anexo A da referida norma de ensaio os solos que apresentem valores de expansão volumétrica $G_v \leq 5\%$ podem ser considerados aptos, solos com valores entre $10 > G_v > 5$ devem ser considerados duvidosos e solos com valores de $G_v \geq 10\%$ inadequados ao tratamento com cal.

O valor obtido no ensaio realizado sobre o solo da Barosa – S200 com 4% de cal registou um valor de expansibilidade volumétrica, $G_v=0,9\%$, pelo que pode ser considerado apto para o tratamento com cal.

4.2.1.2. Análise granulométrica

Este ensaio laboratorial tem por objectivo a caracterização das partículas presentes num solo em termos de dimensão, ou seja, a análise granulométrica procura determinar a faixa de tamanho das partículas existentes, expressando os valores obtidos através de uma percentagem do peso total seco.

Em concreto, as análises granulométricas foram realizadas pelo processo de sedimentação, segundo a Especificação do LNEC E196:1966 “Análise granulométrica” com a finalidade de avaliar a percentagem e diâmetro das partículas com dimensão inferior ao peneiro de 0,075 mm de abertura.

Os solos submetidos ao ensaio em causa foram sujeitos a um processo de tratamento prévio, indicado na norma de referência, que tem como finalidade isolar as partículas constituintes da amostra a ensaiar. Este processo, denominado como dispersão, consiste na agitação do provete juntamente com uma solução antifloculante a uma velocidade de 10 000 rotações/min. por um período de 15 min.

Os valores obtidos nos ensaios realizados sobre os três solos estudados são resumidos no quadro seguinte.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Tempo após a mistura do solo com a cal (horas)	Acumulados passados (%)				
			4,75 mm	2,00 mm	0,420 mm	0,075mm	0,002mm
Solo de Alter do Chão (S100)	0	---	79,4	51,4	25,0	13,4	5
	4,0	2	76,3	47,4	23,0	11,3	< 1
	4,0	72	73,0	44,8	19,9	8,2	< 1
Solo da Barosa (S200)	0	---	96,0	91,2	69,4	44,8	28
	1,5	72	98,4	92,8	70,1	42,4	20
	2,5	72	97,8	92,7	66,9	40,5	17
	4,0	72	98,4	93,4	66,0	36,6	3
Solo do aeroporto (S300)	0	---	85,6	82,4	74,8	32,5	8

Quadro 4.2 – Resumo dos valores da análise granulométrica dos solos naturais e com diferentes teores em cal

De forma a poder visualizar a evolução da granulometria dos solos antes e após a mistura da cal apresentam-se nas figuras 4.4, 4.6 e 4.7 as curvas granulométricas dos ensaios realizados.

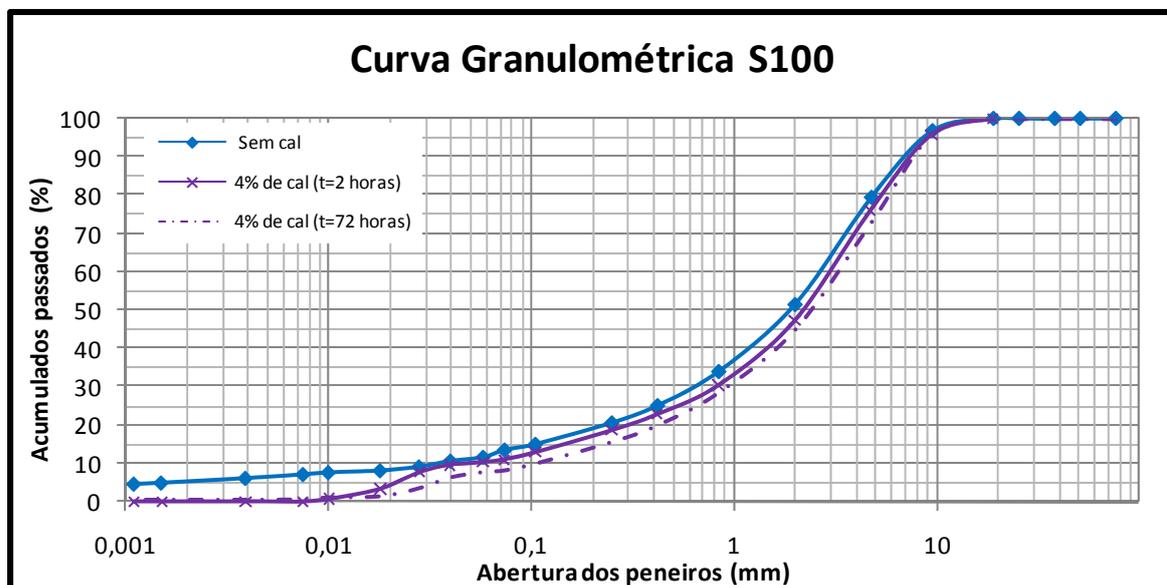


Figura 4.6 – Curvas granulométricas do solo natural e com 4% de cal para t=2 e 72 horas após a mistura - S100

Através da análise das curva granulométricas, e mesmo tratando-se de um solo com baixa percentagem de partículas com diâmetro inferior a 0,075mm, é possível verificar, que após a adição da cal é manifesta a diminuição da percentagem de partículas mais finas, designadamente inferiores a 0,01mm.

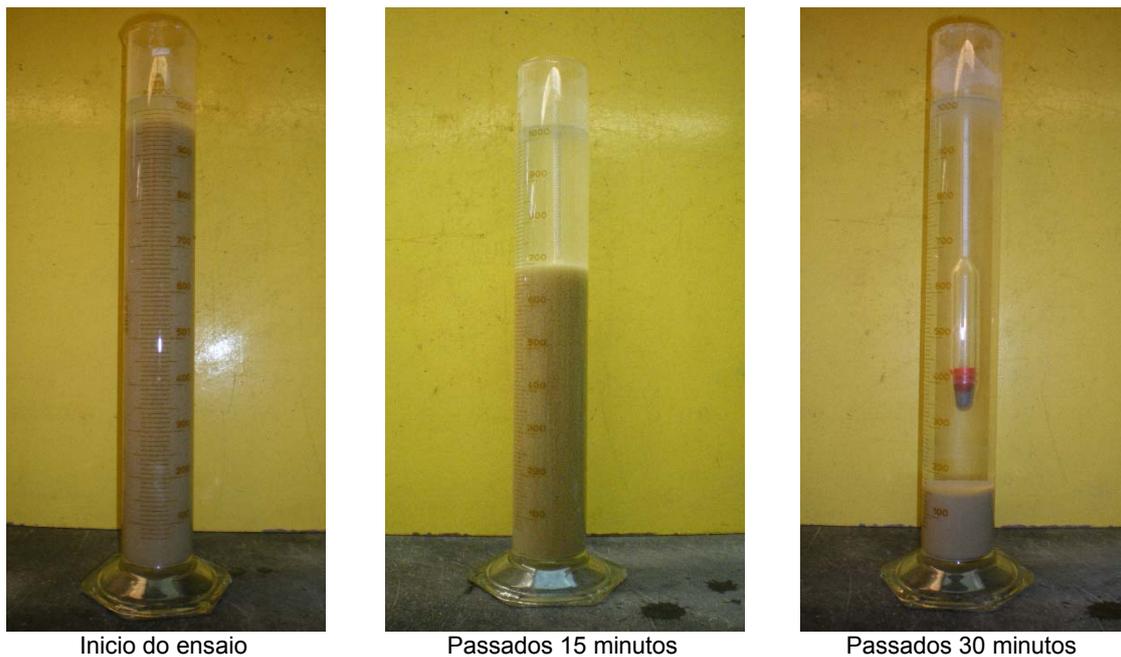


Figura 4.7 – Fotografias do ensaio de sedimentação para $t=72$ horas do solo de Alter do Chão – S100

Atentas as fotografias, podemos verificar que a adição de cal a este solo contribuiu para que o processo de sedimentação ocorresse de forma muito mais rápida ficando praticamente concluído decorridos 30 min. Ora, o mesmo não se verificou com o solo sem cal, que manteve sempre até ao final do ensaio (3 dias) partículas em suspensão.

A figura seguinte permite uma visualização da variação da granulometria do solo da Barosa – S200 para os diferentes teores em cal utilizadas.

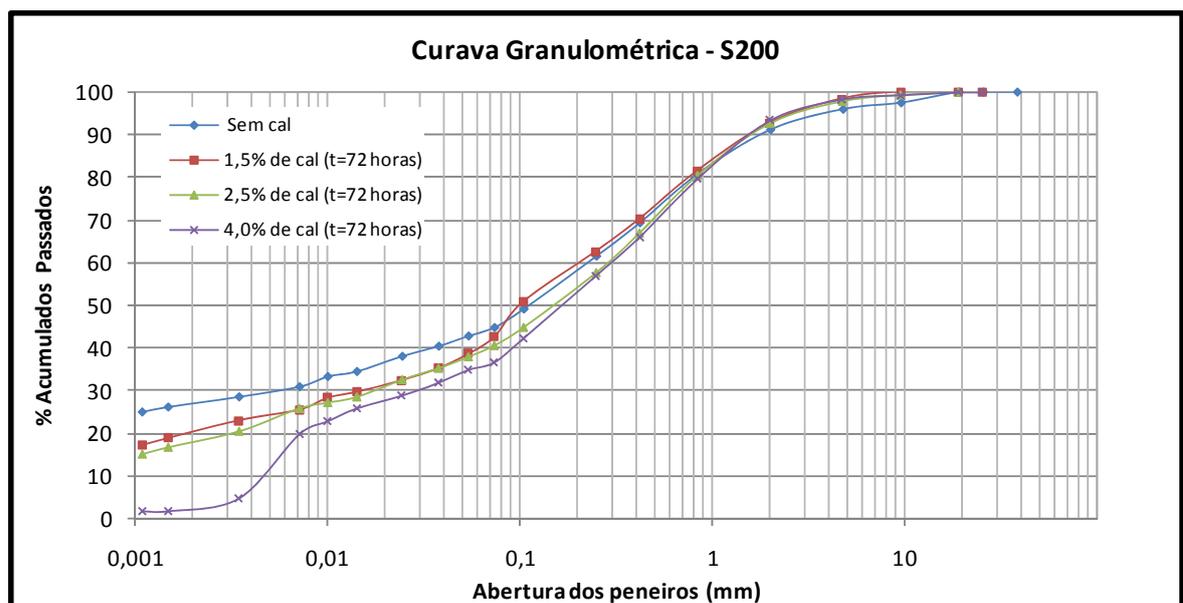


Figura 4.8 - Curvas granulométricas do solo natural com 1,5%, 2,5% e 4,0 % em cal para 72 horas após a mistura – S200

Através da visualização das curvas de sedimentação do solo da Barosa (S200) é possível constatar que o aumento da quantidade de cal leva a uma diminuição da quantidade de partículas finas. Este solo apresenta cerca de 45% de partículas com dimensão inferior a 0,075 e com a adição de 4% de cal esse valor diminui cerca de 9%. Para as partículas mais finas, inferiores a 2 μ m, onde o fenómeno da aglomeração e floculação é mais eficiente, verifica-se uma diminuição de cerca de 25%.

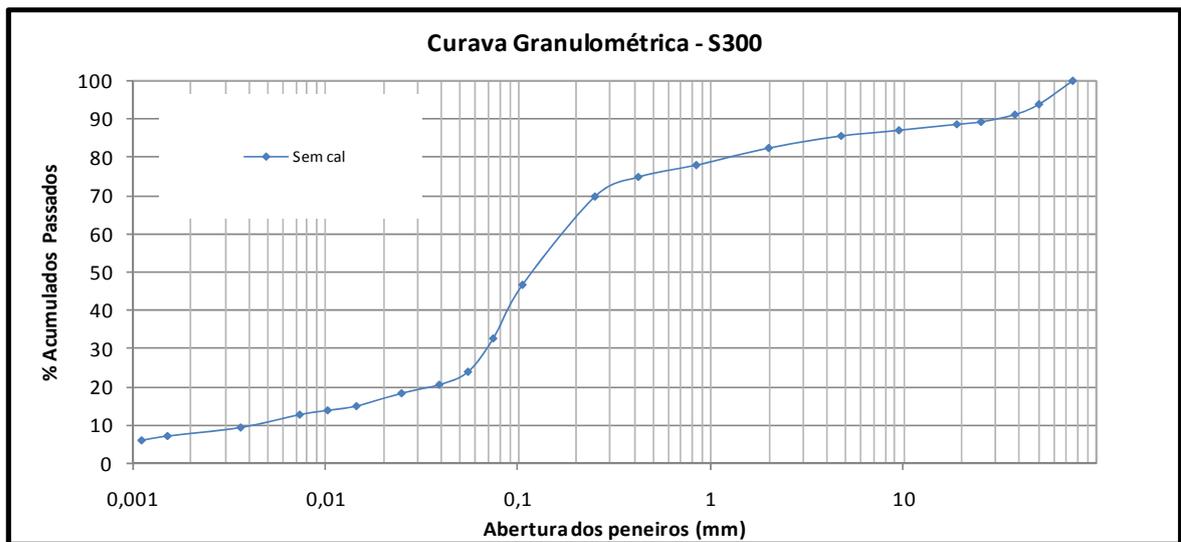


Figura 4.9 - Curvas granulométricas do solo natural – S300

As reacções físico químicas de permuta iónica, aglomeração e floculação, descritas nos pontos 3.2.2 e 3.2.3, contribuem para a alteração da granulometria dos solos estabilizados com cal. Essa alteração traduz-se numa menor percentagem de partículas de argila, conseguida através aglomeração das partículas o que partículas de maior diâmetro, muitas vezes designada na bibliografia com uma nova textura do solo.

Segundo Herzog e Mitchell (19__) este fenómeno é causado pelo incremento da concentração do electrólito na água e da adsorção de cálcio da superfície da argila e Diamond e Kinter (19__) sugerem que a formação rápida de materiais de cimentação do aluminato de cálcio hidratado seja significativa no desenvolvimento das tendências de floculação e aglomeração nas misturas de solo com cal.

4.2.1.3. Limites de consistência

Nos solos com uma elevada fracção fina verifica-se normalmente a presença de minerais argilosos em maior ou menor quantidade e com maior ou menor actividade. Esta fracção fina, na presença da água, apresenta comportamentos distintos em função do seu teor em água, podendo o comportamento do solo ser dividido em quatro estados básicos – sólido, semi-sólido, plástico e líquido.

O ensaio de limites de consistência permitem avaliar os teores em água que definem os diferentes estados básicos. Assim sendo, designa-se por limite de retracção (LR), o teor em água que corresponde à transição do estado sólido para o semi-sólido. O teor em água que corresponde à passagem do estado semi-sólido para o estado plástico toma a designação de limite de plasticidade (LP), e do estado plástico para o estado líquido toma a designação de limite de liquidez (LL). Estes parâmetros também são conhecidos como limites de Atterberg.

O índice de plasticidade (IP), é a diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) de um solo. O índice de plasticidade (IP) é um parâmetro utilizado em praticamente todas as classificações de solos, tendo maior importância nos solos cuja fracção fina é mais significativa. É fundamental para o gráfico de plasticidade de Casagrande que actualmente é a base para o Sistema Unificado de classificação de solo.

Os ensaios foram realizados com base na NP 143 (1969) – “Solos. Determinação dos limites de consistência”, sem secagem do solo em estufa. Após a peneiração foi adicionada uma quantidade de água que permitiu elevar o teor em água até valores ligeiramente superiores ao teor óptimo, que foi previamente quantificado, admitindo que para além deste estamos próximos da curva de saturação o que promove bem a hidratação da cal. Posteriormente adicionada a cal e realizada a sua homogeneização. Após a sua homogeneização a mistura permaneceu fechada até à realização do ensaio de forma a evitar a perda de água durante esse período.

Os valores obtidos nos ensaios realizados sobre os três solos com os três teores em cal para os tempos de 2 e 72 horas após a mistura do solo com a cal são apresentados no quadro seguinte.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Tempo após a mistura do solo com a cal (horas)	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)
Solo de Alter do Chão (S100)	0	2	34	17	17
	1,5		NP	NP	NP
	2,5		NP	NP	NP
	4,0	72	NP	NP	NP
	0		34	17	17
	1,5		NP	NP	NP
	2,5	NP	NP	NP	

	4,0		NP	NP	NP
Solo da Barosa (S200)	0		38	11	27
	1,5	2	43	20	23
	2,5		43	21	22
	4,0		39	20	19
	0		38	11	27
Solo do Aeroporto (S300)	1,5	72	44	18	26
	2,5		37	19	18
	4,0		39	22	17
	0		25	NP	NP
Solo do Aeroporto (S300)	2,0	2	NP	NP	NP
	3,0		NP	NP	NP

Quadro 4.3 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de limites de consistência para os solos naturais e com diferentes teores de cal para $t = 2$ e 72 horas

Com base nos valores apresentados no quadro anterior e de modo a permitir uma visualização da evolução das características de consistência observadas no solo de Alter do Chão (S100), apresenta-se nas figuras seguintes a sua variação para os diferentes teores de cal.

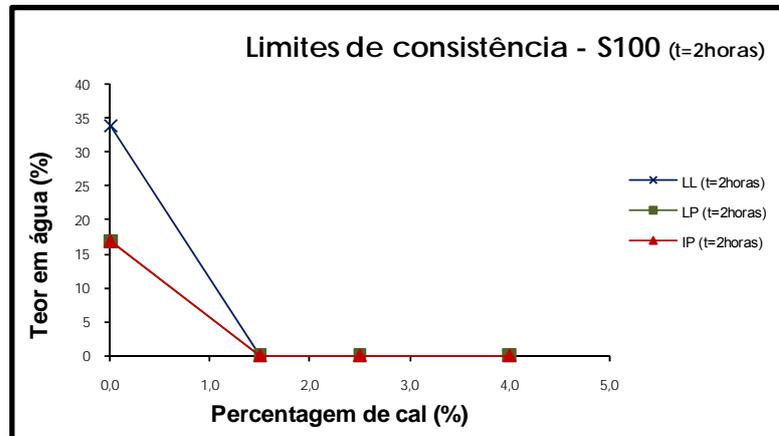


Figura 4.10 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal ($t=2$ horas) – S100

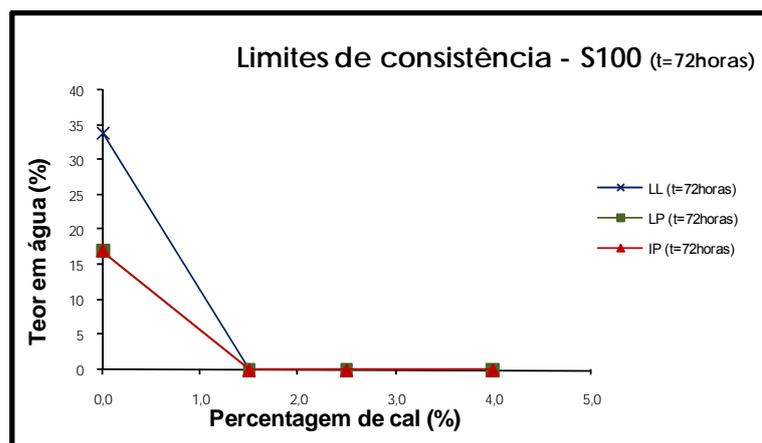


Figura 4.11 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=72 horas) – S100

Através da análise dos gráficos apresentados é possível verificar que o solo inicialmente apresentava um IP – Índice de plasticidade de 17% e com a adição de cal ao solo este deixa de apresentar um patamar plástico, ou seja, com a adição das quantidades de cal utilizadas no estudo 1,5, 2,5 e 4,0% o solo perde as características de plasticidade, passando a considerar-se um solo NP - não plástico.

Esta perda de plasticidade revela-se logo após 2 horas de adição da cal e como seria de esperar não sofre variação para os ensaios realizados 72 horas após a mistura.

As características que o solo apresenta após a adição da cal não permitem determinar o limite de liquidez, fruto da agregação em pequenos torrões “arenização virtual” impedindo a moldagem do solo na concha de Casagrande.

Na verdade, a adição de cal a um solo contribui para uma redução do índice de plasticidade e, em muitos casos, pode mesmo alterar a característica plástica intrínseca do solo tornar-se não plástico. Geralmente solos com elevada percentagem de argilas ou solos que apresentem altos valores iniciais de índice de plasticidade, requerem grandes quantidades de cal para se tornarem não plásticos (TRB 1987).

Com base nos valores apresentados no Quadro 4.3 e de modo a permitir uma visualização da evolução das características de consistência observadas no solo da Barosa (S200) as figuras seguintes apresentam a sua variação com o tempo após a mistura de 2 e 72 horas para os diferentes teores em cal.

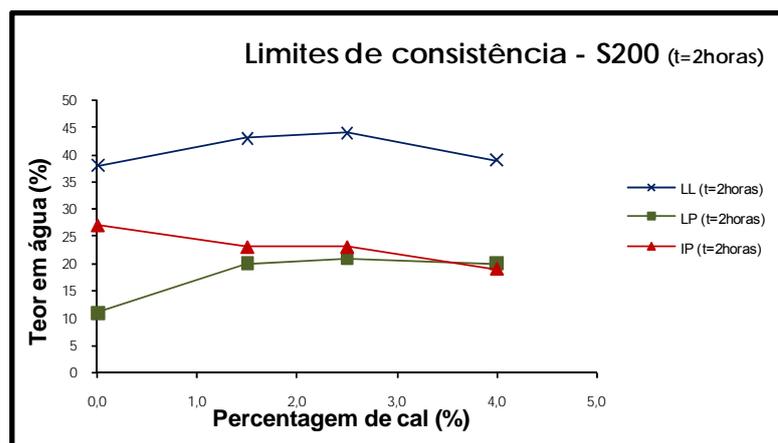


Figura 4.12 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=2 horas) – S200

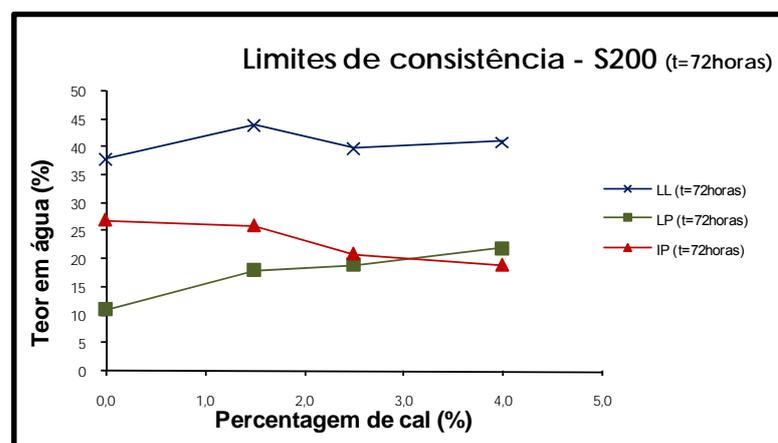


Figura 4.13 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=72 horas) – S200

Desta foram, os resultados obtidos nos ensaios realizados sobre o solo da Barosa (S200) apresentam um ligeiro aumento do limite de liquidez e um aumento mais significativo do limite de plasticidade para baixos teores de cal. O facto do aumento do limite de plasticidade ser superior ao aumento do limite de liquidez, traduz-se numa diminuição do índice de plasticidade mesmo para baixos teores em cal. O maior incremento na diminuição do índice de plasticidade verifica-se também para baixas dosagens de cal.

Os primeiros incrementos de cal, mesmo em baixos teores, são geralmente mais eficientes na redução do índice de plasticidade, as adições subsequentes tornam-se menos benéficas (TRB 1987).

Com o aumento dos teores em cal verifica-se uma estabilização ou diminuição do limite de liquidez e um aumento do limite de plasticidade, conduzindo a uma diminuição do índice de plasticidade.

Os valores obtidos nos ensaios realizados 2 e 72 horas após a mistura do solo com a cal evidenciam um comportamento muito semelhante registando-se para teores em cal de 4% uma diminuição do valor do índice de plasticidade em 8 e 10% respectivamente.

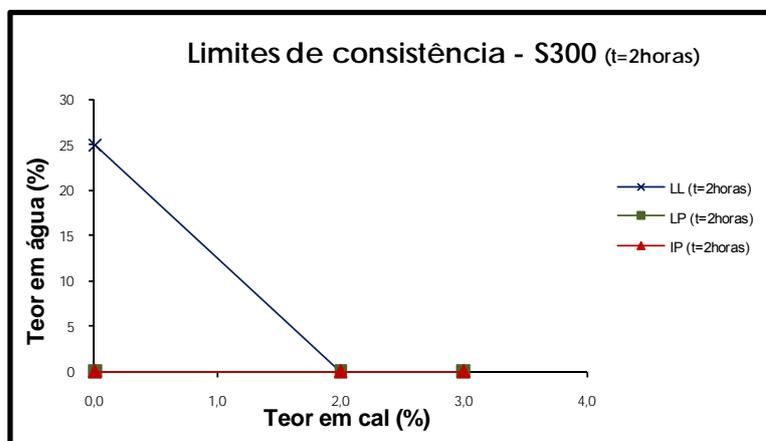


Figura 4.14 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=2 horas) – S300

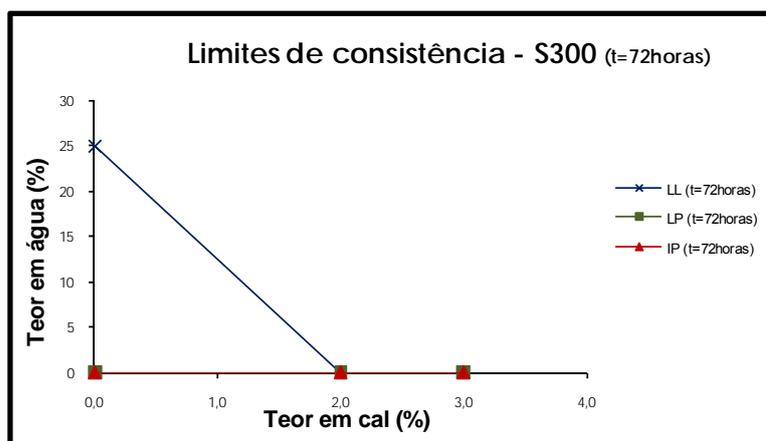


Figura 4.15 - Variação dos limites de consistência com o teor em cal (t=72 horas) – S300

4.2.1.4. Azul de metileno

O valor azul de metileno de um solo (VBS) constitui um parâmetro de identificação que mede globalmente a quantidade e a actividade da fracção argilosa, contida num solo. É um dos parâmetros de identificação sobre o qual se apoia a classificação Francesa de solos (NF P 11-300).

O ensaio consiste na medição por dosagem da quantidade de azul de metileno que pode ser adsorvido pelo provete de ensaio. O valor de azul do solo está relacionado directamente com a superfície

específica das partículas que o constituem, sendo que este é de todos, o valor mais importante para determinar a actividade dos minerais argilosos presentes na fracção fina dos solos (NF P 94-068).

A determinação da dosagem efectua-se juntando sucessivamente diferentes quantidades de azul de metileno e controlando a adsorção após cada adição. Para tal, retira-se uma gota da suspensão e deposita-se num papel de filtro provocando uma mancha. A adsorção máxima é atingida assim que uma auréola azul claro persistente é produzida à volta da mancha.

No nosso estudo, o ensaio de azul de metileno foi realizado sobre a fracção de solo passada no peneiro de 2,0mm de abertura, conforme norma de referencia, e as amostras de solos submetidas a ensaio foram secas ao ar, procurando-se desta forma que os solos no momento da mistura com a cal apresentassem um teor em água ligeiramente superior ao óptimo. Após a mistura do solo com a cal as amostras permaneceram fechadas até à altura de realização do ensaio, evitando assim a perda de água durante esse período.

Os valores obtidos nos ensaios realizados sobre os três solos com os três teores de cal para os tempos de 2 e 72 horas após a mistura do solo com a cal são apresentados no seguinte

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Tempo após a mistura do solo com a cal (horas)	Valor azul (g/100g de solo)
Sola de Alter do Chão (S100)	0,0	2	1,38
	1,5		0,76
	2,5		0,60
	4,0		0,57
	0,0	72	1,38
	1,5		0,77
	2,5		0,67
	4,0		0,48
Solo da Barosa (S200)	0,0	2	2,42
	1,5		2,32
	2,5		1,91
	4,0		1,68
	0,0	72	2,42
	1,5		2,31
	2,5		2,04
	4,0		1,75
Solo do Aeroporto (S300)	0,0	2	1,22
	1,5		0,68
	2,5		0,60
	4,0		0,58

0,0		1,22
1,5	72	0,65
2,5		0,52
4,0		0,47

Quadro 4.4 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios de azul de metileno para os solos naturais e com diferentes teores em cal para t = 2 e 72 horas

Da análise dos valores obtidos resulta que a um aumento do teor em cal corresponde, em todos os solos, a uma diminuição do valor azul de metileno.

Quer os ensaios realizados 2 horas após a mistura, quer os ensaios realizados 72 horas após a mistura do solo com a cal, evidenciam que a maior diminuição do valor de azul de metileno é conseguida com a adição de apenas 1,5% de cal viva.

Nas figuras seguintes apresentam-se os valores do azul de metileno em função da teor em cal utilizada para ensaios realizados 2 horas e 72 horas após a mistura do solo com a cal.

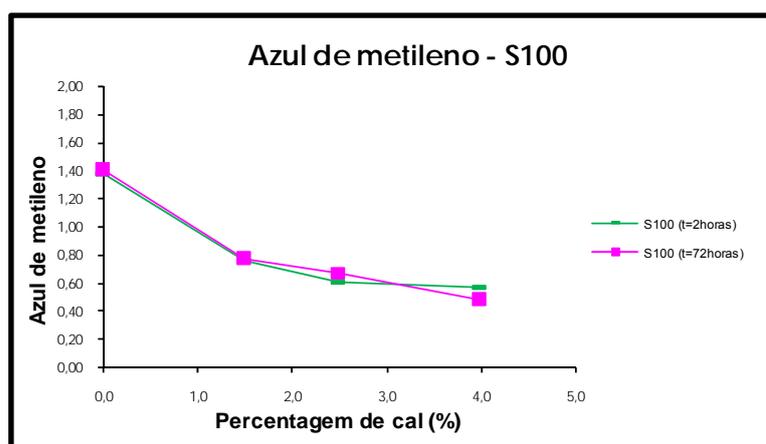


Figura 4.16 - Valor do azul de metileno em função do teor em cal às 2 e 72 horas - S100

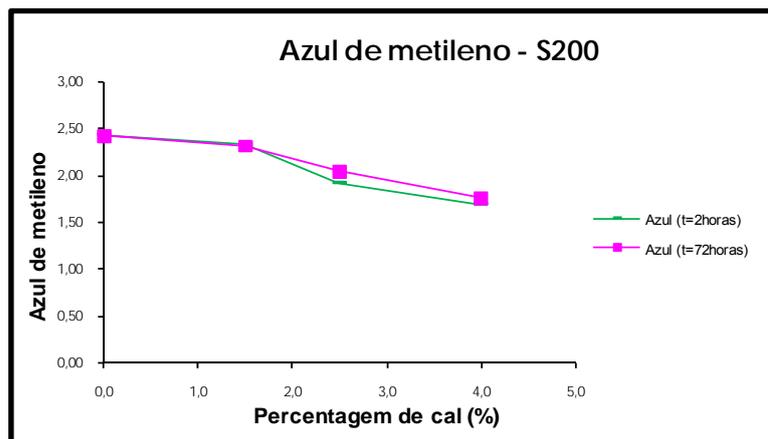


Figura 4.17 - Valor do azul de metileno em função do teor em cal às 2 e 72 horas – S200

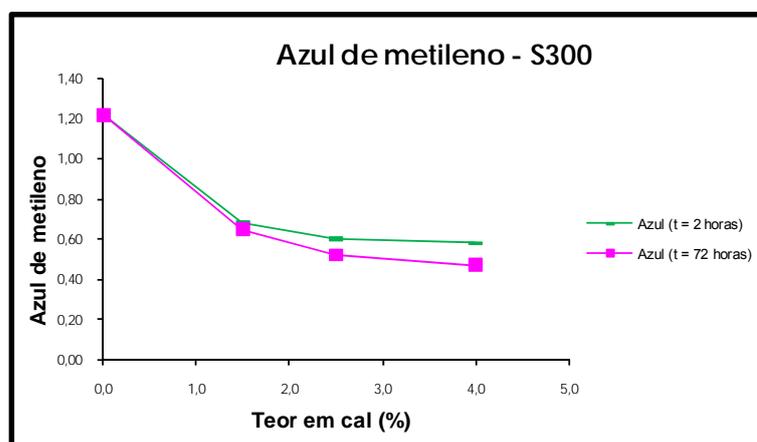


Figura 4.18 - Valor do azul de metileno em função do teor em cal às 2 e 72 horas – S300

4.2.1.5. Equivalente de areia

Define-se equivalente em areia como sendo uma relação volumétrica entre os elementos arenosos e a totalidade dos elementos (arenosos e finos). São considerados, convencionalmente, elementos arenosos os elementos granulares e não floculáveis que sedimentam no fundo da proveta. Os elementos finos serão, portanto, aqueles que permanecem em floculação. Este parâmetro perde muito do seu interesse depois da introdução do ensaio de azul de metileno, VBS.

O ensaio de equivalente de areia foi realizado sobre a fracção de solo passado no peneiro de 4,76 mm de abertura, segundo a metodologia do LNEC “E199-67 - Solos - Equivalente de areia”

Foram realizados ensaios com adição de três teores de cal e para tempos de 2 horas e 72 horas após a mistura do solo com a cal. Os valores obtidos são apresentados no quadro seguinte.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Tempo após a mistura do solo com a cal (horas)	Equivalente de areia (%)
Sola de Alter do Chão (S100)	0,0	2	21
	1,5		50
	2,5		48
	4,0		52
	0,0	72	21
	1,5		50
	2,5		63
	4,0		65
Solo da Barosa (S200)	0,0	2	6,0
	1,5		13,0
	2,5		15,0
	4,0		15,0
	0,0	72	6,0
	1,5		21,0
	2,5		26,0
	4,0		30,0
Solo do Aeroporto (S300)	0,0	2	13
	2,0		18
	3,0		25
	0,0	72	13
	2,0		35
	3,0		51

Quadro 4.5 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios equivalente de areia para os solos naturais e com diferentes teores em cal para t = 2 e 72 horas

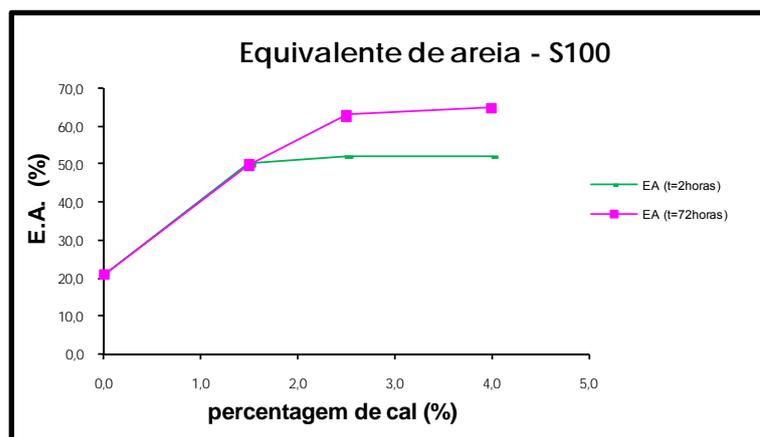


Figura 4.19 - Valor do equivalente de areia em função do teor em cal às 2 e 72 horas – S100

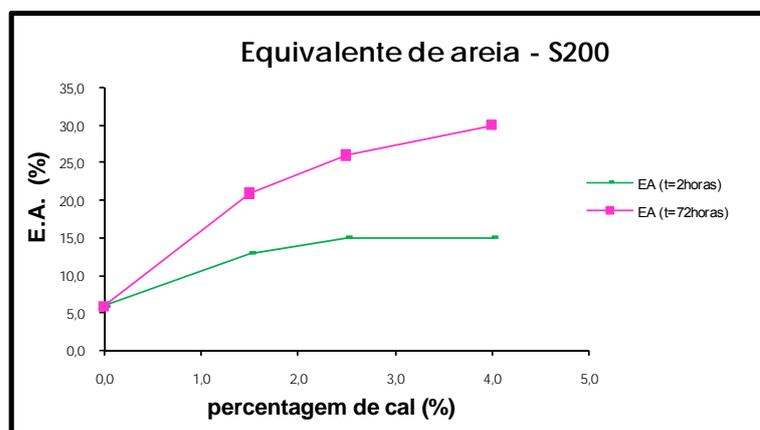


Figura 4.20 - Valor do equivalente de areia em função do teor em cal às 2 e 72 horas – S200

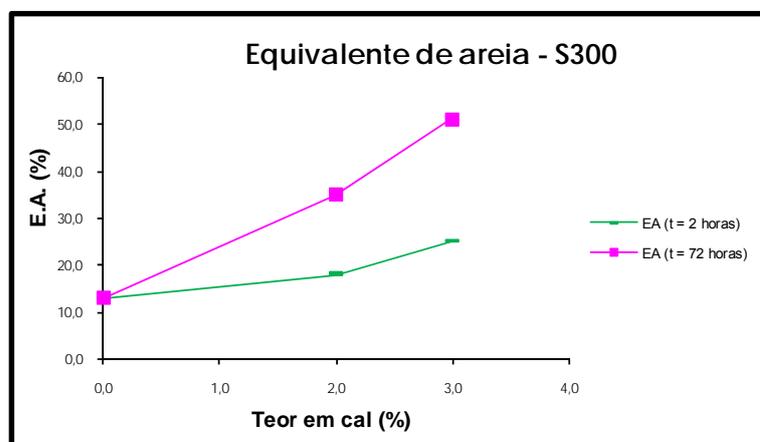


Figura 4.21 - Valor do equivalente de areia em função do teor em cal às 2 e 72 horas – S300

Os resultados obtidos nos ensaios evidenciam um aumento do valor de equivalente de areia (EA) com a adição de cal. Este aumento evidencia o efeito da floculação e aglomeração das partículas, descrito em 3.2.3., que embora seja uma reacção imediata, evidencia que os maiores valores de EA se registam para ensaios realizados 72 horas após a adição do solo com a cal. Verifica-se também que os maiores incrementos no valor de EA são para 1,5% de cal aumentando de forma menos significativa para as restantes teores.

4.2.1.6. Densidade das partículas

A avaliação deste parâmetro teve por base a Norma Portuguesa “NP 83 (1965) Solos – Densidade das Partículas” em que se avalia a densidade do material com dimensão inferior a 4,75mm. Para a realização destes ensaios com adição de cal foi realizada a mistura do solo com a cal, humedecido o solo de forma a garantir a hidratação da cal, ficando o conjunto em repouso durante pelo menos 24 horas, posteriormente foi seco em estufa de forma a que o ensaio fosse realizado com secagem prévia da amostra.

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos de densidade das partículas para os diferentes solos e para os diferentes teores de cal.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Densidade das partículas
Sola de Alter do Chão (S100)	0,0	2,65
	4,0	2,64
Solo da Barosa (S200)	0,0	2,63
	1,5	2,63
	2,5	2,63
	4,0	2,63
Solo do Aeroporto (S300)	0,0	2,67

Quadro 4.6 – Resumo das densidades dos solos naturais e com diferentes teores em cal

A análise dos valores encontrados nos ensaios realizados permite constatar que a adição de cal ao solo, nos teores utilizados, não altera o valor da densidade das partículas.

4.2.1.7. Classificação dos solos

A classificação de solos pretende, em primeira aproximação, descrever a aptidão do solo como material de construção e prever o seu comportamento em obra.

Ao longo do tempo, e nos vários domínios da Engenharia em que se trabalha com solos, têm sido adoptados vários critérios para o estabelecimento da sua classificação. A classificação de solos com maior interesse para propósitos de Engenharia Civil, são aquelas que se baseiam nas características de identificação de solos (análise granulométrica e limites de consistência).

Os diferentes sistemas de classificação geotécnica dos solos propostos até agora têm sido estabelecidos com a preocupação de servir os diferentes domínios da Engenharia Civil onde estes materiais se enquadram (obras em terra, fundações, estabilização de taludes, etc.).

Todavia, constatou-se que esta procura de universalidade era demasiado ambiciosa, pois a complexidade do comportamento dos solos faz com que as propriedades que são significativas para uma certa finalidade não sejam as mesmas para outra função do solo.

Entre as classificações existentes e mais utilizadas no nosso país é de realçar a aptidão da classificação Francesa para orientar a utilização dos solos como materiais de aterro (aterros para estradas, aeródromos, barragens de terra).

Com base nos ensaios de caracterização realizados procedeu-se à classificação dos três solos estudados, pelas seguintes metodologias de classificação:

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Classificação		
		Classificação para Fins Rodoviários - E240-170	Standard Practice for Classification of Soils for Engineering - ASTM 2487-00	Francesa
Sola de Alter do Chão (S100)	Sem cal	A-2-6 (0)	SC – Areia Argilosa	B6
	4,0	A-1-a (0)	SM – Areia	D2
Solo da Barosa (S200)	Sem cal	A-6 (8)	SC – Areia argilosa	A3
	1,5	A-2-7 (0)	SC	B6
	2,5			
4,0				
Solo do Aeroporto (S300)	Sem cal	A-2-4 (0)	SM	B6

Quadro 4.7 – Classificação dos solos naturais e com os diferentes teores em cal utilizados no estudo

4.2.2. Ensaio de caracterização química

A ocorrência e o grau de desenvolvimento das reacções entre o solo e cal estão dependentes de diversos factores. Entre eles destacam-se algumas características químicas, que podem ser a chave para o sucesso de uma estabilização. O conhecimento das características químicas que de seguida se enumeram afigura-se importante para melhor compreender o comportamento dos solos em conjunto com a cal. Na verdade, algumas dessas características podem ser condicionantes no tratamento do solo com recurso à cal.

Com a finalidade de avaliar as características químicas com interesse para o estudo dos solos estabilizados com cal foram realizados os seguintes ensaios:

- i. Capacidade de troca catiónica;
- ii. Determinação do pH;
- iii. Determinação do teor em matéria orgânica;
- iv. Determinação do teor em sulfatos;
- v. Determinação do teor em cloretos;
- vi. Análise mineralógica – Difraccção de raio X;
- vii. Fluorescência de raio X

4.2.2.1. Capacidade de troca catiónica;

Os minerais argilosos possuem as propriedades de troca de iões (catiões e aniões) fixados na superfície exterior dos seus cristais, situados nos espaços intercamadas estruturais ou localizados noutros espaços interiores, mas acessíveis por outros iões existentes em soluções aquosas envolventes. Por capacidade de troca iónica, entende-se ser a quantidade de iões, particularmente catiões, que um mineral argiloso ou argila pode adsorver e trocar. É uma propriedade importante dos minerais argilosos e argilas que resulta do desequilíbrio das suas cargas eléctricas. O processo de troca de iões é um processo estequiométrico segundo o qual cada equivalente de um ião adsorvido pelo mineral argiloso ou argila, provoca a libertação de um equivalente do catião anteriormente fixado.

Neste método, os catiões originais são trocados pelo ião Na^+ durante o tratamento com a solução 1N de acetato de sódio a um pH de 7,0. Após este procedimento, o ião Na^+ é trocado pelo ião NH_4^+ , através do tratamento com uma solução de 1N de acetato de amónio. A concentração dos catiões

intercambiáveis foi determinada analiticamente através de espectrometria espectrofotometria de absorção atômica.

No quadro abaixo estão indicados alguns valores da capacidade de troca de catiões (CTC) dos minerais argilosos mais comuns.

Mineral	Capacidade de troca catiónica (cmol.Kg ⁻¹)
Caulinite	10 – 20
Illite	80 – 100
Montmorilonite	800

Quadro 4.8 - Capacidade de troca catiónica de alguns dos principais minerais argilosos (adaptado de Lambe, 1969)

Com a finalidade de avaliar a capacidade de troca catiónica e sendo os catiões permutáveis mais frequentes nas argilas o cálcio e o magnésio, seguindo-se o potássio e o sódio, apresentam-se no quadro seguinte os valores obtidos nos ensaios de complexo de troca catiónica (CTC) para os três solos estudados e para os diferentes teores em cal.

Ref. da amostra	Teor em cal (%)	Catiões intercambiáveis (cmol.Kg ⁻¹)				CTC (cmol.Kg ⁻¹)
		Cálcio (Ca ⁺⁺)	Magnésio (Mg ⁺⁺)	Potássio (K ⁺)	Sódio (Na ⁺)	
Sola de Alter do Chão (S100)	Sem cal	5,68	5,2	0,11	0,77	11,76
	1,5	40,00	3,47	0,09	0,63	44,19
	2,5	60,48	3,33	0,09	0,63	65,43
	4,0	109,44	3,60	0,08	0,70	113,82
Solo da Barosa (S200)	Sem cal	2,02	3,20	0,21	0,56	5,99
	1,5	33,28	2,00	0,22	0,63	36,13
	2,5	37,76	1,73	0,21	0,70	40,40
Solo do Aeroporto (S300)	Sem cal	24,64	0,61	0,14	0,22	25,61
	1,5	35,52	0,75	0,13	0,25	36,65
	2,5	38,08	0,96	0,13	0,23	39,40
	4,0	48,64	1,20	0,12	0,26	50,22

Quadro 4.9 – Resumo dos valores de capacidade de troca catiónica para os solos naturais e com diferentes teores em cal

4.2.2.2. Determinação do pH;

O valor alto de pH numa solução cal e água é de grande importância na estabilização de solos, isto porque o elevado pH do meio, promove e aumenta a capacidade da cal reagir com os minerais do solo e produzir um produto cimentício, o qual pode estabilizar partículas “colando-as” umas às outras (Boynton, 1979).

O ensaio de pH (Eades e tal.,1962, Eades and Grim 1966) que foi recomendado em normas internacionais (Norma ASTM D6276) para determinar a quantidade de cal para o solo, entendendo como tal a quantidade de cal mínima para satisfazer a capacidade de absorção de cal por intercâmbio iónico. Este ensaio encontra-se orientado para os solos argilosos partindo da base que a capacidade de troca cationica dos minerais argilosos é a causa para desaparecimento dos iões Ca da solução aquosa. Quando se satisfaz a capacidade de troca, obtêm-se valores de pH na solução da ordem de 12, o qual corresponde à saturação da solução com hidróxido de cálcio.

O ensaio de determinação do pH foi realizado de acordo com a Especificação do LNEC E203 – 1967 “Solos – Determinação do pH”. A presente especificação fixa o modo de efectuar a determinação electrométrica do pH duma suspensão de solo.

Neste sentido, foram realizados ensaios para avaliar o pH do solo natural sobre as três amostras em estudo. Após a adição de 1,5, 2,5 e 4,0% foi também avaliada a variação do pH da mistura. Os valores obtidos nos ensaios são apresentados no quadro abaixo.

Ref. da amostra	Teor em cal (%)	Valor de pH	
		H ₂ O	KCl
Sola de Alter do Chão (S100)	Sem cal	8,1	5,8
	1,5	12,1	12,1
	2,5	12,3	12,3
	4,0	12,3	12,3
Solo da Barosa (S200)	Sem cal	5,4	3,8
	1,5	11,2	11,1
	2,5	11,9	11,9
	4,0	12,2	12,2
Solo do Aeroporto (S300)	Sem cal	8,5	7,8
	1,5	12,2	12,2
	2,5	12,3	12,3
	4,0	12,3	12,3

Quadro 4.10 – Resumo dos valores do pH do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal

De forma a visualizar a variação do pH com os teores em cal para cada uma das amostras ensaiadas apresentam-se nas figuras seguintes a sua variação.

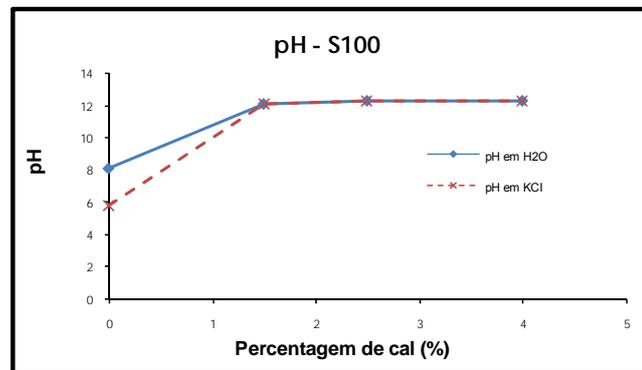


Figura 4.22 - Variação do pH em função da percentagem de cal - S100

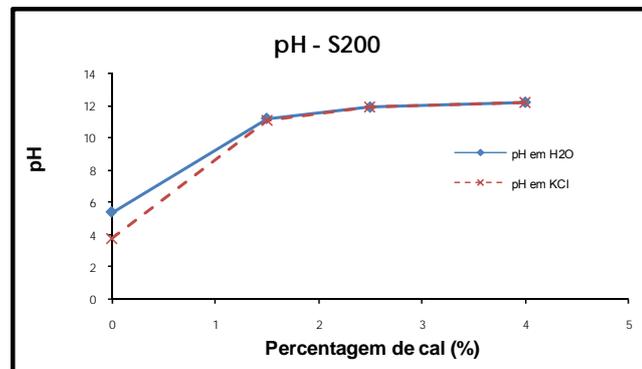


Figura 4.23 - Variação do pH em função da percentagem de cal – S200

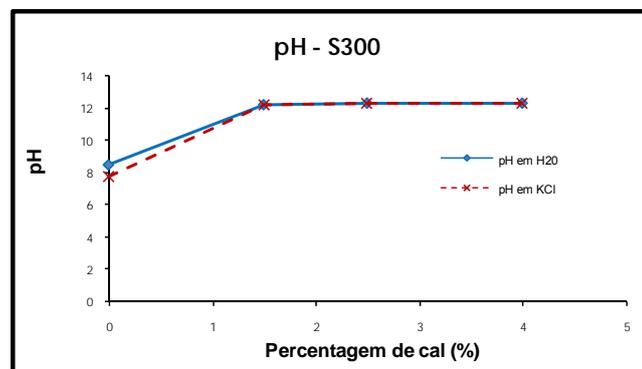


Figura 4.24 - Variação do pH em função da percentagem de cal – S300

4.2.2.3. Determinação do teor em matéria orgânica

O ensaio de determinação do teor em matéria orgânica foi realizado de acordo com a Especificação do LNEC E201 – 1967 “Solos – Determinação do teor em matéria orgânica”. A presente especificação fixa o modo de determinar o teor em matéria orgânica dum solo.

Assim, foram realizados ensaios para avaliar a percentagem de matéria orgânica do solo natural sobre as três amostras em estudo sem adição de cal. Os valores obtidos nos ensaios são apresentados no quadro seguinte.

Ref. da amostra	Matéria orgânica (%)
Sola de Alter do Chão (S100)	0,12
Solo da Barosa (S200)	0,06
Solo do Aeroporto (S300)	0,05

Quadro 4.11 – Resumo dos valores da matéria orgânica dos solos naturais

4.2.2.4. Determinação do teor de sulfatos

A presença de sulfatos solúveis num solo normalmente, representa um problema quando se pretende estabiliza-lo com cal.

A existência de sulfatos solúveis em concentrações elevadas pode interferir com as reacções pozolânicas, uma vez que podem conduzir à formação de um produto reactivo, que consiste em cálcio, alumina, água e sulfatos. Este cálcio-sulfato-aluminato hidratado pode ocorrer sobre a forma de etringite (elevada concentração de sulfato) ou sobre a forma de monossulfatoaluminato (baixa concentração de sulfato), e constitui um problema pelo seu potencial expansivo resultante do seu processo de formação e essa expansão pode ocorrer associada a um elevado potencial de pressão.

Não obstante esta consideração, certo é que o cálcio-sulfato-aluminato hidrato não é um problema se a sua formação ocorrer antes da compactação solo. Todavia, quando se forma depois da compactação, ou mesmo depois da estrada ser colocada em serviço, o resultado pode ser deveras destrutivo.

O ensaio de determinação do teor de sulfatos foi realizado de acordo com a Especificação do LNEC E202 – 1967 “Solos – Determinação da quantidade de sulfatos dum solo e da quantidade de sulfatos da água dum solo”. A presente especificação fixa o modo de determinar a quantidade de sulfatos solúveis em água dum solo, e a quantidade de sulfatos da água dum solo.

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos nos ensaios realizados sobre solo natural das três amostras em estudo.

Ref. da amostra	Teor de Sulfatos (%)
Sola de Alter do Chão (S100)	0,01
Solo da Barosa (S200)	0,01
Solo do Aeroporto (S300)	0,01

Quadro 4.12 – Resumo dos valores do teor em sulfatos dos solos naturais

4.2.2.5. Determinação do teor em cloretos;

O ensaio de determinação do teor de cloretos foi realizado de acordo com a Especificação do LNEC E253 – 1971 “Solos – _____” A presente especificação fixa o modo de determinação do teor de cloretos num solo. O ensaio consiste na extracção das matérias solúveis do solo por água em ebulição, filtração, acidificação do filtrado com ácido nítrico, adição, em excesso de solução de nitrato de prata e doseamento do excesso com solução de tiocianato de potássio.

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos nos ensaios realizados sobre solo natural das três amostras em estudo.

Ref. da amostra	Teor de cloretos (%)
Sola de Alter do Chão (S100)	0,2
Solo da Barosa (S200)	0,1
Solo do Aeroporto (S300)	0,1

Quadro 4.13 – Resumo dos valores do teor de cloretos dos solos naturais

4.2.2.6. Análise mineralógica – Difracção raio X;

A difracção por raio X consiste na análise do espectro que os diferentes planos estruturais, pertencentes a diferentes tipos de minerais argilosos, desenvolvem quando bombardeados por raios X. Como cada mineral possui a sua própria estrutura, e cada uma dessas estruturas responde de forma diferente aos raios emitidos, é possível comparar o perfil obtido com os picos já definidos para cada um dos minerais conhecidos. Mesmo uma complexa mistura de minerais diferentes não inibe a identificação de cada mineral. O resultado é posteriormente transformado em percentagem, sendo que o somatório de todas elas resulta num valor igual a 100% (Gomes, 1986).

As amostras foram submetidas a uma análise mineralógica semi-quantitativa, por difracção de raio X, onde se obtiveram os resultados apresentados no quadro seguinte.

Valores em percentagem (%)	Solo de Alter do Chão (S100)	Solo da Barosa (S200)	Solo do Aeroporto (S300)
Quartzo	12	75	39
Feldspato K	20	7	15
Feldspato Na	23	---	9
Micas	29	---	17
Calcite	---	---	20
Illite	---	6	---
Caulinite	13	12	---
Montmorilonite	3	---	Vestígios

Quadro 4.14 – Resumo dos valores da análise mineralógica dos solos naturais

4.2.2.7. Dosagem de elementos maiores – Fluorescência de raio X ;

Através da análise química por fluorescência de raio X determinou-se o teor de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅ e perda ao rubro (P.R) dos 3 solos naturais em estudo. Os resultados, em percentagens ponderais, são apresentados no quadro seguinte.

Valores em percentagem (%)	Solo de Alter do Chão (S100)	Solo da Barosa (S200)	Solo do Aeroporto (S300)
SiO ₂	62,7	81,5	62,8
Al ₂ O ₃	18,2	8,29	9,34
Fe ₂ O ₃	4,07	3,04	1,86
MnO	0,04	0,01	0,02
CaO	0,80	0,06	10,1
MgO	1,01	0,33	0,5
Na ₂ O	2,70	<0,2	0,97
K ₂ O	4,32	1,44	2,94
TiO ₂	0,61	0,49	0,56
P ₂ O ₅	0,31	0,04	0,23
P.R	5,28	4,51	10,7

Fe₂O₃ – Fe total; P.R – Perda ao Rubro

Quadro 4.15 – Resumo dos valores da análise química dos solos naturais

4.2.3. Ensaio de caracterização mecânica

A adição de cal ao solo como apresentado no ponto anterior 4.2.2. modifica por vezes de forma significativa as suas características. Essas modificações contribuem, em geral, para a criação de um novo solo com características mais adequadas à sua utilização como material de construção.

Como consequência das alterações físicas e também devido à acção de cimentação, descrita em 3.2.4., espera-se uma melhoria das suas características mecânicas, designada normalmente por “estabilização”.

Em geral, todos os solos tratados com cal exibem uma redução da plasticidade, diminuição da expansibilidade e melhoria das suas características de trabalhabilidade (TRB 1987). Contudo, nem todos os solos evidenciam um nível substancial de ganhos nos ganhos de resistência. A melhoria das propriedades mecânicas do solo é dependente do tipo do solo, tipo de cal, teor em cal e das condições de cura, i.e., tempo, temperatura e humidade.

Thompson (1966) definiu os solos reactivos, i.e., capazes de desenvolver reacções pozolânicas como aqueles que evidenciam um ganho de resistência à compressão simples de pelo menos 345 kPa superior ao solo não tratado.

De forma a avaliar e perceber a evolução do comportamento mecânico dos solos estabilizados foram realizados os seguintes ensaios:

- i. Ensaio de compactação;
- ii. Ensaio IPI;
- iii. Ensaio CBR;
- iv. Ensaio de compressão uniaxial;
- v. Ensaio de compressão diametral;
- vi. Ensaio triaxiais clássicos;
- vii. Ensaio triaxiais cíclicos;

4.2.3.1. Ensaio de compactação

O ensaio de compactação tem por objectivo principal a avaliação do valor máximo do peso volúmico (coloquialmente designado “baridade”) seco e do respectivo teor óptimo em água dos diferentes teores de cal utilizadas.

A preparação da mistura foi realizada através da adição de uma determinada quantidade de água ao solo de forma a atingir o teor em água pretendido e posteriormente adicionada cal ao solo procedendo-se de seguida à sua homogeneização de forma a garantir uma boa homogeneização da amostra. Após estes procedimentos, a mistura permaneceu em repouso dentro de recipientes hermeticamente fechados.

Os provetes do ensaio de compactação foram realizados com recurso a uma energia de compactação pesada em cinco camadas aplicando-se 55 pancadas em cada camada (PROCTOR modificado) segundo a metodologia de ensaio constante na Especificação do LNEC “E 197- 1971 - Ensaio de compactação”.

Com base nos valores obtidos nos ensaios de compactação realizados, 2 e 72 horas após a mistura do solo com a cal, apresenta-se no quadro seguinte um resumo dos pesos volúmicos secos máximos e respectivos teores óptimos em água para os diferentes solos e diferentes teores em cal

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Tempo após a mistura do solo com a cal (horas)	Peso volúmico seco máximo (kN/m ³)	Teor óptimo em água (%)
Sola de Alter do Chão (S100)	0,0	2	20,9	7,5
	1,5		20,4	8,0
	2,5		20,3	8,3
	4,0		20,1	9,0
	0,0	72	20,9	7,5
	1,5		20,3	8,7
	2,5		20,2	9,0
	4,0		20,1	9,0
Solo da Barosa (S200)	0,0	2	20,4	7,9
	1,5		20,2	9,4
	2,5		20,1	9,8
	4,0		19,6	11,0
	0,0	72	20,4	7,9
	1,5		20,0	10,0
	2,5		---	---
	4,0		19,5	11,1
Solo do Aeroporto (S300)	0,0	2	19,9	8,5
	2,0		19,2	12,5
	3,0		19,2	12,9

Quadro 4.16 – Resumo dos pesos volúmicos secos máximos e teores óptimos em água para os solos naturais e com diferentes teores em cal

O resultado das reacções imediatas (i.e., troca cationica, floculação, aglomeração e a formação inicial de aluminato de cálcio hidratado que se forma na superfície das partículas de argila) entre a cal e o solo contribuem para uma mudança substancial na relação entre o peso volúmico e o teor em água (Little et al., 1987).

A análise dos resultados evidencia uma diminuição do peso volúmico (baridade) seco máximo com o aumento da quantidade de cal e um aumento do teor óptimo em água com o respectivo aumento do teor em cal utiliza. Estas variações observadas estão de acordo com as referências bibliográficas (LCPC 2005) e segundo Dallas Little (1987) a redução do peso volúmico seco máximo é normalmente de 0,5 a 0,8 kN/m³ com um aumento típico do teor em água de 2 a 4%. Contudo, em argilas com elevada plasticidade o aumento do teor óptimo em água pode ser substancial.

Nas figuras seguintes, é possível constatar a diminuição do peso volúmico seco máximo e o aumento do teor óptimo em água em função do teor em cal para os três solos estudados, compactados 2 horas após a adição de cal ao solo.

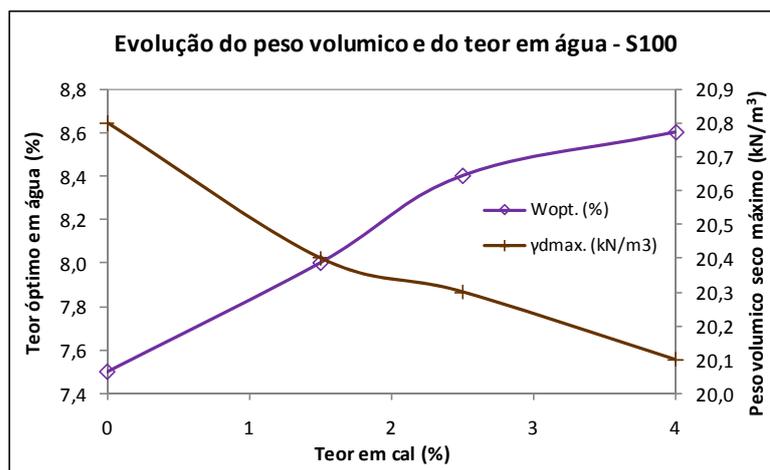


Figura 4.25 - Variação do teor óptimo em água e do peso volúmico seco máximo em função do teor em cal para t=2horas – S100

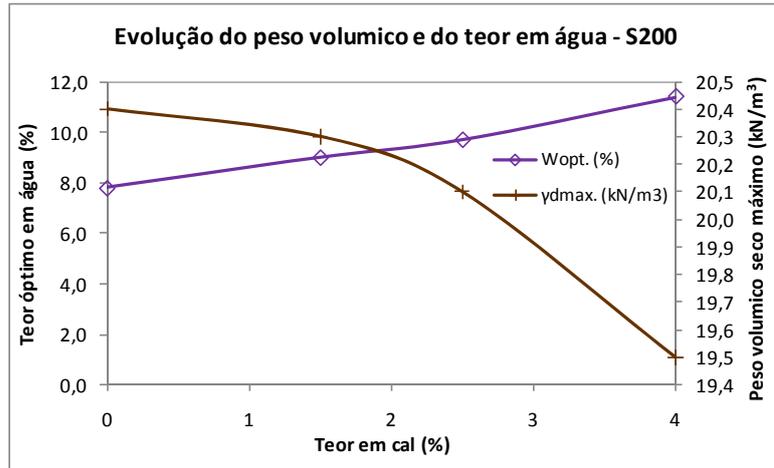


Figura 4.26 - Variação do teor ótimo em água e do peso volúmico seco máximo em função do teor em cal para $t=2$ horas – S300

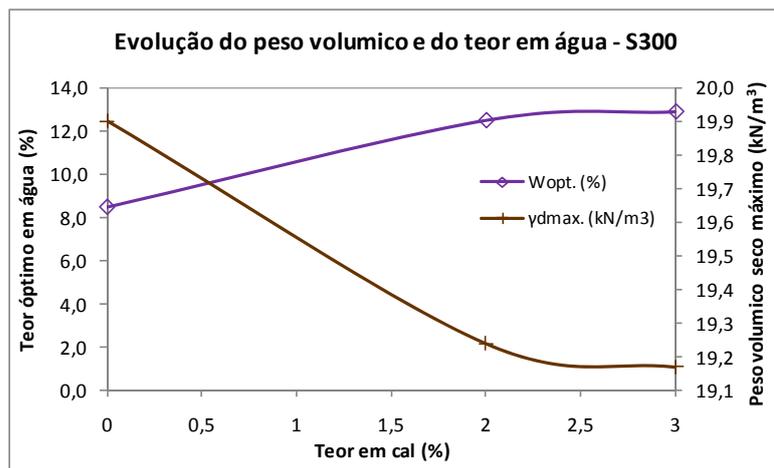


Figura 4.27 - Variação do teor ótimo em água e do peso volúmico seco máximo em função do teor em cal para $t=2$ horas – S300

A redistribuição das partículas em fracções de maior tamanho faz com que para uma mesma energia de compactação seja possível obter um menor peso volúmico seco máximo. A justificação é puramente geométrica, um maior tamanho de partículas médio supõe maiores vazios entre as partículas. Outra consequência nas propriedades de compactação é o aumento do teor ótimo em água para se obter o peso volúmico máximo (Castro e Serafim, 1974).

Estas alterações do peso volúmico seco e do teor em água reflectem a nova natureza do solo resultante da adição da cal, que evidencia ser um material com menor peso volúmico seco máximo e com teor óptimo em água superior à do solo natural. Nas Figura 4.28 a 4.30 apresentam-se as alterações registadas nos pesos volúnicos secos e teores em água nos três solos estudados para os diferentes teores em cal 2 horas após a mistura.

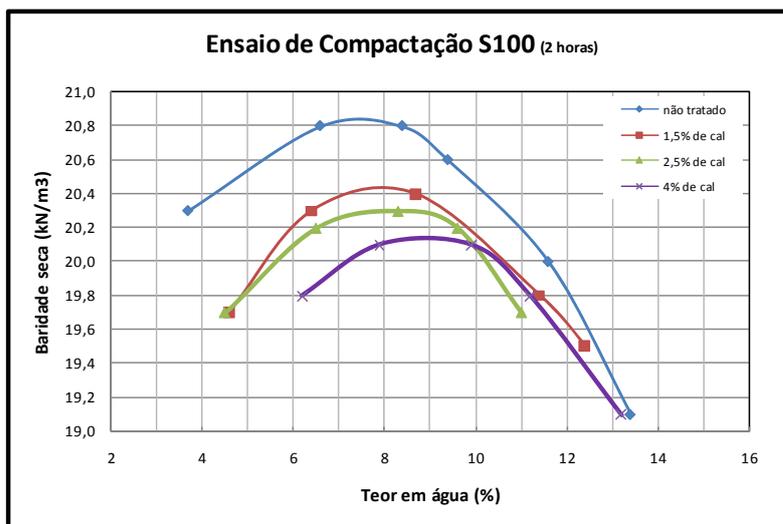


Figura 4.28 – Curva de compactação do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para $t = 2$ horas - S100

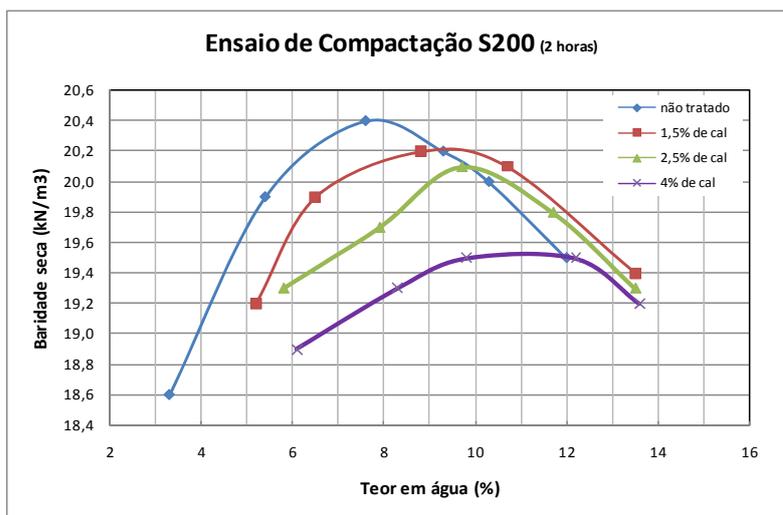


Figura 4.29 – Curva de compactação do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para $t = 2$ horas - S200

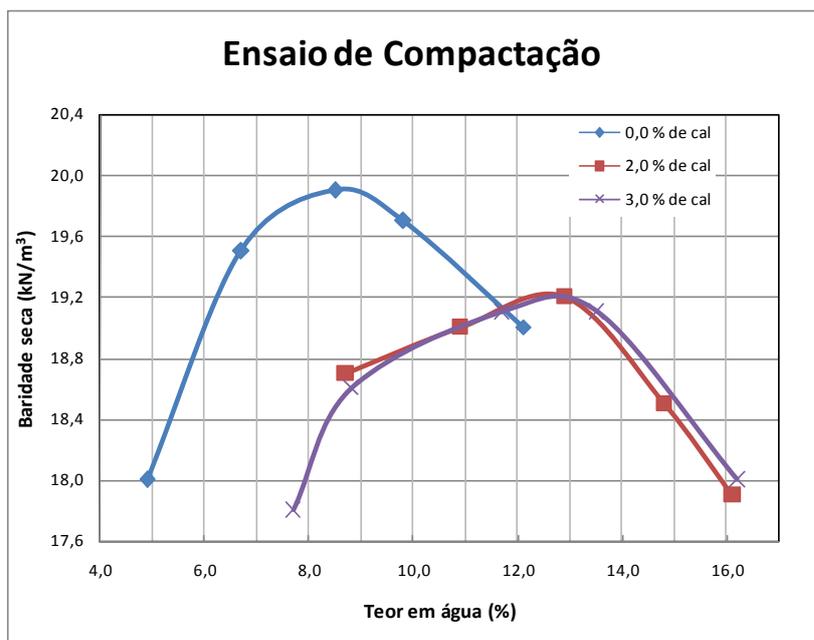


Figura 4.30 – Curva de compactação do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas – S300

Nas Figura 4.31 e 4.32 são apresentadas as curvas de compactação resultantes do ensaio realizado 72 horas após a mistura do solo com a cal.

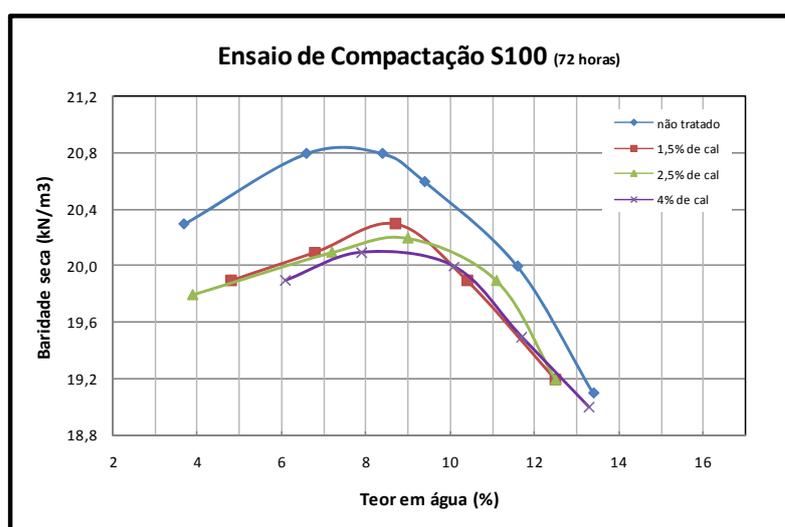


Figura 4.31 – Curva de compactação do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 72 horas - S100

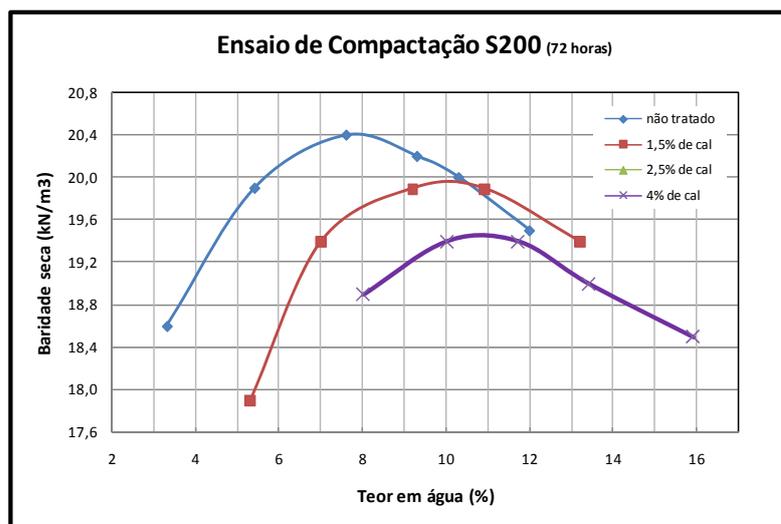


Figura 4.32 – Curva de compactação do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para $t = 72$ horas – S200

Quando a compactação é realizada após a um certo período de cura, mais precisamente após 72 horas, importa avaliar a alteração do peso volúmico seco máximo e do teor óptimo em água quer relativamente ao solo natural, quer comparativamente com os outros períodos de cura. A alteração do período de cura, nos dois solos em que foi avaliado, evidencia uma redução ligeira da peso volúmico seco máximo bem como um aumento ligeiro do teor óptimo em água.

A adição de cal ao solo, origina uma menor sensibilidade na compactação à quantidade de água, que se manifesta num aplainamento das curvas obtidas no ensaio de compactação PROCTOR, que se converte em outra mais aberta (Castro e Serafim, 1974). No caso dos solos estudados, o aplainamento das curvas de compactação é mais evidente nos ensaios realizados após 72 horas da mistura e para os teores em cal de 4%.

Já quando é permitido à mistura uma cura e ganho de resistência antes da compactação observa-se, uma redução adicional no peso volúmico seco máximo e um aumento do teor óptimo em água (Dallas Little, 1995).

Segundo Kézdy (1979), o comportamento geral das características de compactação deve-se, essencialmente, ao fenómeno de floculação das partículas argilosas: os grãos de partículas floculadas pela acção da cal são mais difíceis de “arrumar” pela acção mecânica de compactação.

Mitchell e Hooper (1961), Osinubi (1998) e Osula (1995) constataram que, à medida que o tempo de espera entre a mistura e a compactação aumenta há uma tendência para a diminuição do peso volúmico seco máximo. Osinubi (1998) observou ainda que se verifica uma redução do humidade

ótima da mistura com a espera na compactação, atribuindo esse fenómeno à ocorrência possíveis trocas catiónicas e floculação das partículas de argila.

4.2.3.2. Ensaio de IPI

Este ensaio é executado imediatamente após a compactação dos provetes, com diferentes teores em água e, conseqüentemente, com diferentes valores de peso volúmico seco, e sem placas de carga. A sua realização procura dar indicações mais precisas acerca das condições de compactação e de traficabilidade do material durante a fase de construção – fase que ocorre imediatamente após compactação da camada. Desta forma, com base neste ensaio podemos avaliar como se comportará o aterro quando tiver que suportar directamente sobre a sua superfície a circulação de equipamentos utilizados os trabalhos de terraplenagens.

Assim, sobre os diferentes provetes obtidos nos ensaios de compactação foram realizados ensaio de IPI segundo a norma “Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling” (EN13286-47, 2004).

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos de IPI para uma penetração de 2,5 e 5,0mm no solo de Alter do Chão (S100) com os diferentes teores em cal utilizadas, tendo-se realizado a compactação dos provetes 2 horas após a mistura do solo com a cal.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Teor em água (%)	Peso volúmico seco (kN/m ³)	IPI (2,5mm penetração) (%)	IPI (5mm penetração) (%)
Sola de Alter do Chão (S100)	Sem cal	3,7	20,3	67,1	65,0
		6,6	20,8	72,6	71,5
		8,4	20,8	30,9	41,9
		9,4	20,6	9,3	15,0
	1,5	4,6	19,7	33,2	50,3
		6,4	20,3	41,9	66,5
		8,7	20,4	17,8	43,6
		11,4	19,8	3,3	10,2
	2,5	4,5	19,7	41,1	50,4
		6,5	20,2	51,4	72,0
		8,3	20,3	39,4	65,1
		9,6	20,2	8,8	19,8
	4,0	6,2	19,8	52,5	65,2
		7,9	20,1	47,8	73,8
		9,9	20,1	21,6	43,4
		11,2	19,8	2,6	5,6

Quadro 4.17 - Valores do IPI do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas - S100

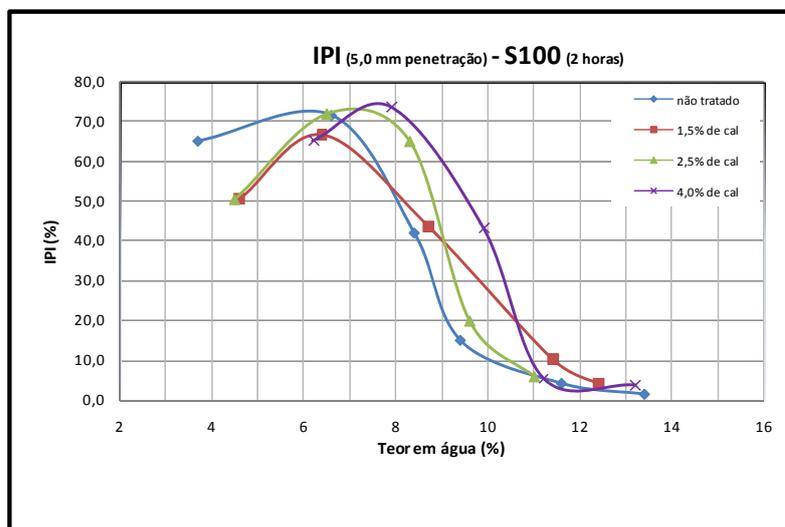


Figura 4.33 – Evolução do IPI com o teor em água do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas - S100

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos de IPI para uma penetração de 2,5 e 5,0mm no solo de Barosa (S200) com os diferentes teores em cal utilizadas, tendo-se realizado a compactação dos provetes 2 horas após a mistura do solo com a cal.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Teor em água (%)	Peso volúmico seco (kN/m ³)	IPI (2,5mm penetração) (%)	IPI (5mm penetração) (%)
Solo da Barosa (S200)	Sem cal	3,3	18,6	40,3	40,3
		5,4	19,9	56,5	66,6
		7,6	20,4	47,2	52,1
		9,3	20,2	30,1	31,4
		10,3	20	23,0	23,4
		12	19,5	12,4	11,9
	1,5	5,2	19,2	68,8	68,9
6,5		19,9	96,2	91,8	
8,8		20,2	98,2	90,7	
10,7		20,1	60,0	59,8	
13,5		19,4	18,8	20,6	
2,5		5,8	19,3	78,6	77,2
	7,9	19,7	103,1	99,2	
	9,7	20,1	101,6	98,3	

	11,7	19,8	60,0	55,9
	13,5	19,3	27,3	30,0
	8,3	19,3	64,0	86,9
	9,8	19,5	66,1	95,5
4,0	12,2	19,5	62,3	62,2
	13,6	19,2	32,1	31,4
	15,3	18,4	14,0	15,0

Quadro 4.18 - Valores do IPI do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas – S200

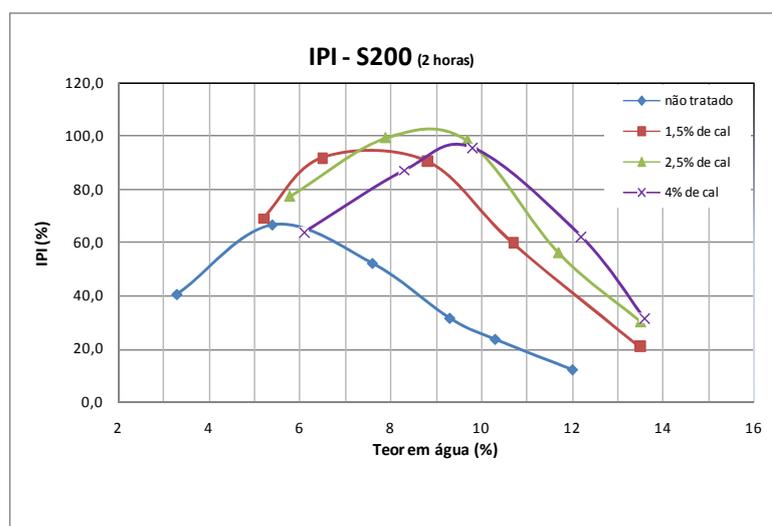


Figura 4.34 – Evolução do IPI com o teor em água do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 2 horas – S200

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos de IPI para uma penetração de 2,5 e 5,0mm no solo do Aeroporto (S300) com os diferentes teores em cal utilizadas, tendo-se realizado a compactação dos provetes 2 horas após a mistura do solo com a cal.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Teor em água (%)	Peso volúmico seco (kN/m ³)	IPI (2,5mm penetração) (%)	IPI (5mm penetração) (%)
Sola do Aeroporto (S300)	Sem cal	4,9	18,0	36,9	32,1
		6,7	19,5	74,8	72,3
		8,5	19,9	74,4	78,9
		9,8	19,7	43,5	54,9
	2,0	12,1	19,0	4,0	5,2
		8,7	18,7	72,4	67,6
		10,9	19,0	76,1	78,7

		12,9	19,2	63,0	71,5
		14,8	18,5	17,2	20,1
	3,0	16,1	17,9	6,0	7,0
		7,7	17,8	45,9	47,9
		8,8	18,6	60,3	65,0

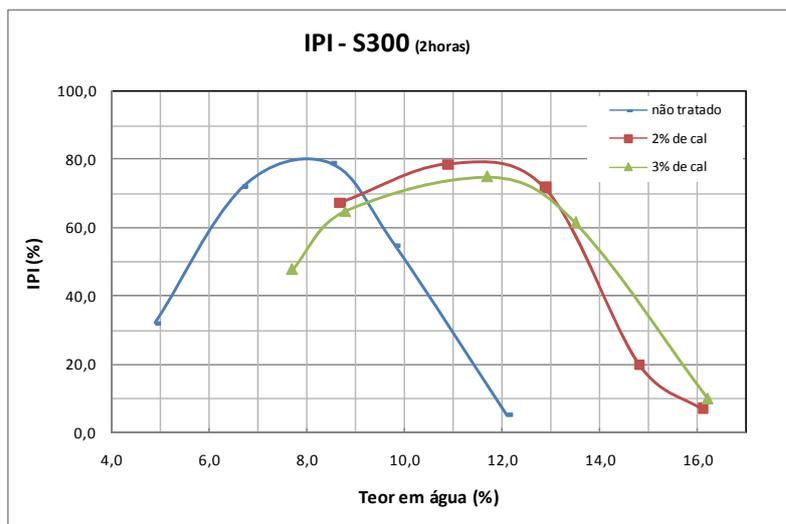


Figura 4.35 – Evolução do IPI com o teor em água do solo natural e com 2,0 e 3,0 % de cal para $t = 2$ horas – S300

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos de IPI para uma penetração de 2,5 e 5,0mm no solo de Alter do Chão (S100) com os diferentes teores em cal utilizadas, tendo-se realizado a compactação dos provetes 72 horas após a mistura do solo com a cal.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Teor em água (%)	Peso volúmico seco (kN/m^3)	IPI (2,5mm penetração) (%)	IPI (5mm penetração) (%)	
Sola de Alter do Chão (S100)	Sem cal	3,7	20,3	67,1	65,0	
		6,6	20,8	72,6	71,5	
		8,4	20,8	30,9	41,9	
		9,4	20,6	9,3	15,0	
	1,5	4,8	19,9	61,3	61,9	
		6,8	20,1	62,8	66,7	
		8,7	20,3	57,3	65,6	
		10,4	19,9	9,3	18,2	
		2,5	3,9	19,8	61,8	61,7

		7,2	20,1	49,2	66,9
		9,0	20,2	52,5	73,0
		11,1	19,9	7,8	16,6
		6,1	19,9	77,0	80,9
	4,0	7,9	20,1	90,2	99,7
		10,1	20	22,1	42,7
		11,7	19,5	2,9	6,2

Quadro 4.19 - Valores do IPI do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 72 horas - S100

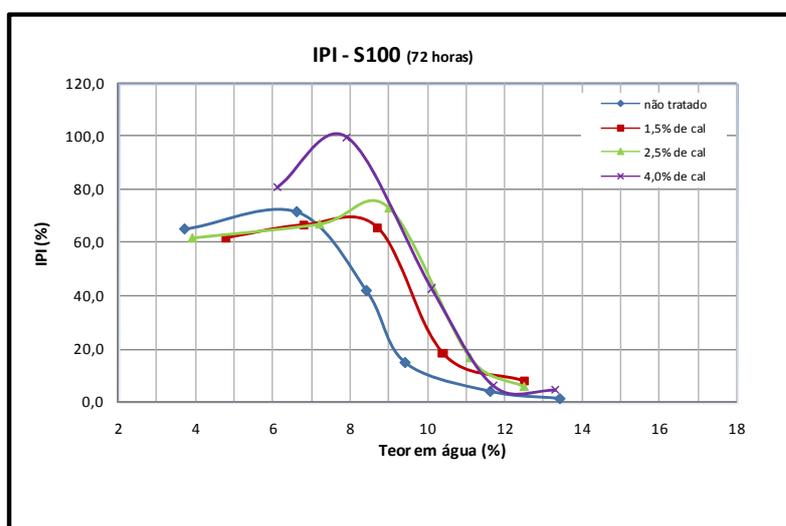


Figura 4.36 – Evolução do IPI com o teor em água do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para t = 72 horas - S100

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos de IPI para uma penetração de 2,5 e 5,0mm no solo da Barosa (S200) com aos diferentes teores em cal utilizadas, tendo-se realizado a compactação dos provetes 72 horas após a mistura do solo com a cal.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Teor em água (%)	Peso volúmico seco (kN/m ³)	IPI (2,5mm penetração) (%)	IPI (5mm penetração) (%)
		3,3	18,6	40,3	40,3
		5,4	19,9	56,5	66,6
Solo da Barosa (S200)	Sem cal	7,6	20,4	47,2	52,1
		9,3	20,2	30,1	31,4
		10,3	20	23,0	23,4

	12	19,5	12,4	11,9
	5,3	17,9	10,5	15,4
	7	19,4	68,3	75,3
1,5	9,2	19,9	89,4	90,1
	10,9	19,9	56,2	61,8
	13,2	19,4	41,5	40,1
	8	18,9	72,8	70,3
	10	19,4	91,8	85,8
4,0	11,7	19,4	88,5	81,9
	13,4	19	54,7	53,0
	15,9	18,5	24,9	26,6

Quadro 4.20 - Valores do IPI do solo natural e com 1,5 e 4,0 % de cal para $t = 72$ horas – S200



Figura 4.37 – Evolução do IPI com o teor em água do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal para $t = 72$ horas – S200

Os resultados obtidos evidenciam que o valor máximo de IPI ocorre para um teor em água inferior a cerca de 2% do teor ótimo para o respectivo teor em cal, ou seja, o maior valor de IPI ocorre para o provete compactado do “lado seco” da curva de compactação e não para o provete correspondente ao teor ótimo em água.

Verifica-se também um aumento dos valores de IPI, comparativamente ao solo não tratado, para teores de cal de 1,5 e 2,5% e 4%.

Desta forma, as alterações imediatas que a mistura de solo com cal evidencia, nomeadamente a diminuição da plasticidade e da expansibilidade, contribuem de forma acentuada para um aumento da resistência imediata da mistura. Os valores de IPI evidenciam um aumento da capacidade resistente do solo cal mesmo para pequenas dosagens de cal.

Na verdade, este aumento da resistência fica a dever-se ao facto da orientação e estrutura das partículas de argila envolvidas por uma camada de água fornecer uma resistência ao corte muito pequena. Ora, a única resistência ao movimento relativo deve-se à sobreposição e à interferência entre as camadas da água. Após o processo de floculação, verifica-se uma aproximação das partículas, provocando contacto entre os bordos de da cada partícula fornecendo uma força de corte mais acentuada, que se traduz num aumento da capacidade resistente do solo cal.

4.2.3.3. Ensaio de CBR

O ensaio CBR é um dos ensaios mais utilizados no dimensionamento de pavimentos flexíveis e trata-se de uma medida convencional aferida da capacidade de suporte de um solo.

O ensaio CBR foi realizado conforme o descrito na norma de ensaio EN13286-47, 2004 “Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling”.

Para os solos S100 e S200 a compactação dos provetes foi realizada com uma energia de compactação pesada e os provetes foram moldados sem variação de energia, ou seja, todos em 5 camadas com 55 pancadas por camada, variando-se apenas os teores em água da moldagem que consequentemente levou a que se obtivessem diferentes valores de peso volúmico seco para cada provete.

Após a moldagem dos provetes, os mesmos foram imersos em água por um período de 96 horas utilizando-se para o efeito duas placas de sobrecarga, durante esta fase de imersão avaliou-se a expansibilidade dos provetes.

No quadro seguinte apresenta-se um resumo dos valores obtidos nos ensaios CBR para os diferentes teores em cal utilizados.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Valores na moldagem		CBR (5mm de penetração) (%)	Expansibilidade (%)
		Teor em água (%)	Peso volúmico seco (kN/m ³)		
Solo de Alter do Chão (S100)	Sem cal	5,4	18,6	38	0,4
		7,6	21,0	34	0,1
		9,6	20,6	12	0,0
		11,0	19,9	5	0,1

		6,8	20,4	129	0,0
	1,5	8,9	20,6	95	0,0
		10,0	20,3	36	0,0
		12,3	19,5	14	0,0
		7,6	19,9	140	0,0
	4,0	9,4	20,1	82	0,0
		11,1	20,0	36	0,0
		13,5	19,5	18	0,0
		19,8	6,2	2	6,3
	Sem cal	20,0	7,2	3	4,1
		20,1	10,1	3	2,8
		19,7	13	2	0,9
		20,2	8,2	55	2,1
	1,5	20,3	10,4	72	1,1
		19,8	11,6	64	0,7
		19,5	13,2	45	0,5
Solo da Barosa (S200)		19,8	9,2	59	1,2
	2,5	19,9	10,7	105	0,2
		19,6	11,6	95	0,3
		19,2	13,3	62	0,2
		19,5	9,4	66	1,2
	4,0	19,6	11,4	77	0,7
		18,8	14,1	58	0,3
		18,1	15,7	37	0,2

Quadro 4.21 - Resumo dos valores obtidos no ensaio CBR com variação do teor para os solos naturais e com diferentes teores em cal

Os resultados obtidos nos ensaios evidenciam melhorias significativas para os valores de CBR após 96 horas de imersão. Como exemplo desse aumento podemos verificar que na Figura 4.39 para um teor em água de 10% os valores de CBR passam de 5% no solo natural para 70, 65 e 75% com 1,5, 2,5 e 4% de cal respectivamente. De referir que os incrementos representam entre 1200 a 1500 por cento de aumento quando comparados com o solo sem adição de cal.

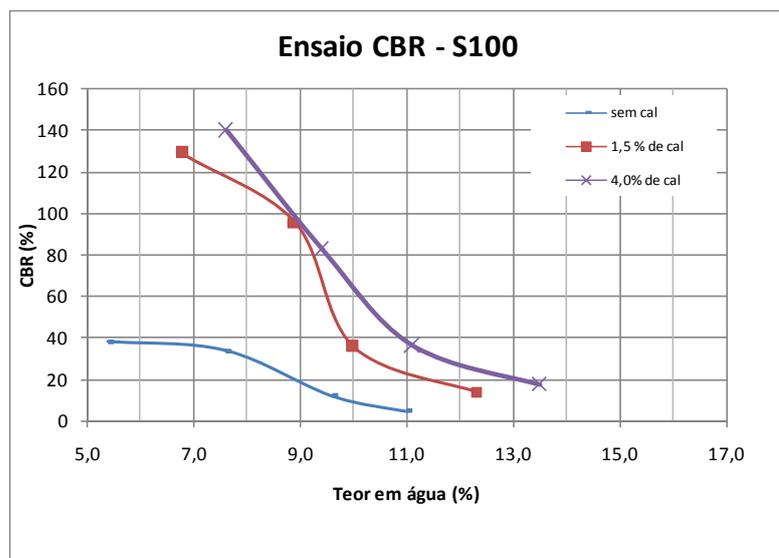


Figura 4.38 – Evolução do CBR com o teor em água do solo natural e com 1,5 e 4,0 % de cal – S100

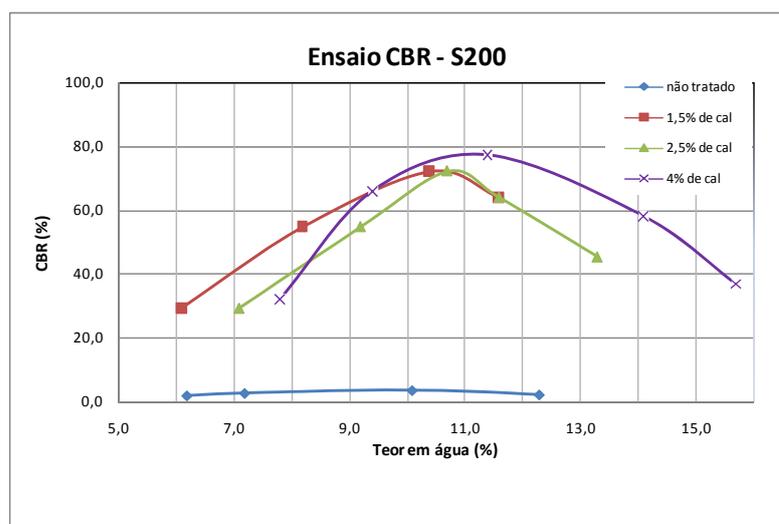


Figura 4.39 – Evolução do CBR com o teor em água do solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0 % de cal – S200

No caso do solo S300 os provetes foram moldados para o teor ótimo em água e procedeu-se à variação da energia, ou seja, os provetes foram compactados com 12, 25 e 55 pancadas por camada originando assim diferentes graus de compactação. No quadro seguinte apresenta-se um resumo dos valores obtidos nos ensaios realizados sobre o solo natural e com 2 e 3% de teor em cal.

Ref. do	Teor	Valores na moldagem	CBR (5mm de	Expansibilidade
---------	------	---------------------	-------------	-----------------

solo	em cal (%)	Teor em água (%)	Peso volúmico seco (kN/m ³)	Grau de compactação (%)	penetração (%)	(%)
Solo do Aeroporto (S300)	Sem cal	8,7	17,0	85,43	2	0,8
		8,5	18,0	90,45	11	0,8
		8,7	19,4	97,49	43	0,7
	2,0	13,2	17,3	90,1	29	0,00
		13,6	18,1	94,3	60	0,00
		13,6	18,8	97,9	82	0,02
	3,0	14,3	17,1	89,1	25	0,00
		14,4	18,0	93,8	62	0,00
		14,2	18,7	97,4	76	0,00

Quadro 4.22 – Resumo dos valores obtidos no ensaio CBR com variação de energia, para o solo natural e com 2 e 3 % de cal - S300

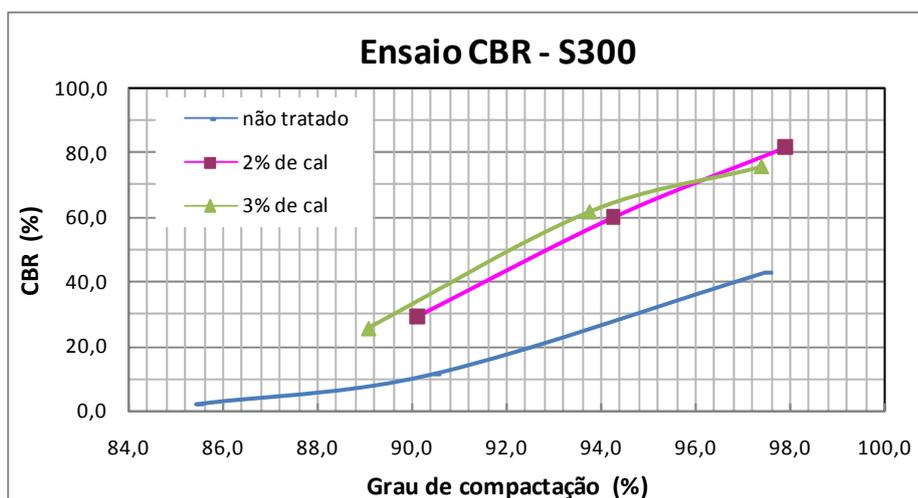


Figura 4.40 - Evolução do CBR para diferentes energias de compactação do natural e com 2,0 e 3,0% de cal – S300

Os valores obtidos evidenciam ganhos significativos no CBR dos solos com adição de 2 e 3% de cal comparativamente ao solo natural, não registrando contudo grande variação dos incrementos de resistência, entre si.

Com a finalidade de analisar a evolução dos valores de CBR apresenta-se na figura seguinte a variação dos valores máximos obtidos para o CBR correspondente a 5,0 mm de penetração dos três solos estudados em função do teor em cal.

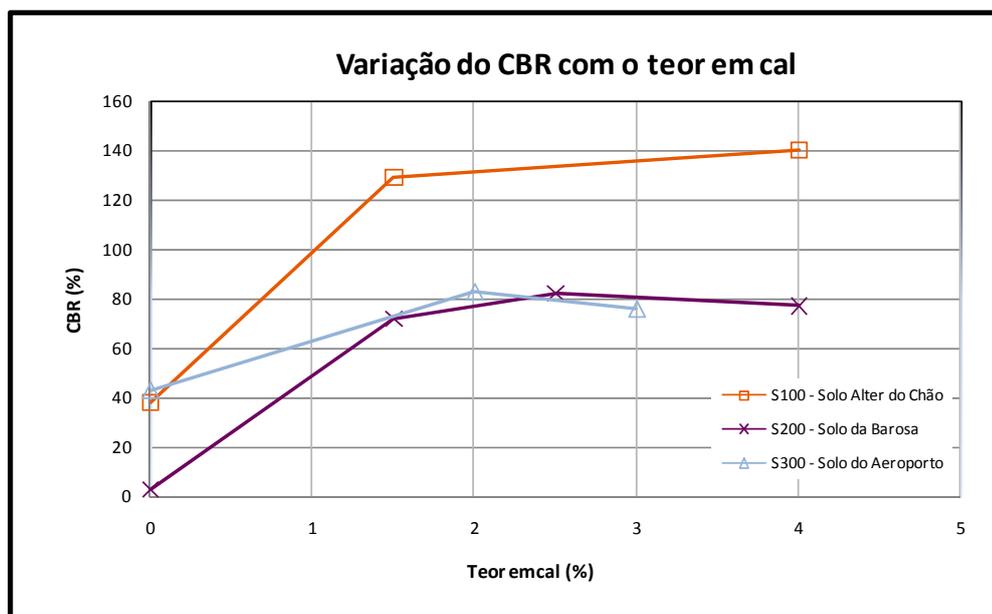


Figura 4.41 - Evolução do CBR em função do teor em cal para diferentes solos estudados – S100, S200 e S300

Através da análise da Figura 4.41 é possível constatar que em todos os solos estudados a adição de cal contribui para um aumento significativo dos valores de CBR. Verifica-se também que os maiores ganhos ocorrem para as misturas com teores de 1,5%, e para os teores subsequentes uma estabilização ou baixo crescimento nos valores.

Os solos referenciados por S100 e S200 são os que apresentam os maiores ganhos dos valores de CBR quando comparados com o solo natural, passando com um teor em cal de apenas 1,5% de CBR dos 38% para 129% e de 3% para 72% respectivamente para os solos S100 e S200.

Segundo (TRB 5, 1987) o ensaio CBR tem sido utilizado extensivamente para avaliar a resistência de solos estabilizados cal. Esta técnica foi adoptada arbitrariamente por causa da sua familiaridade com os valores do ensaio. Na realidade, entretanto, o teste de CBR não é o mais apropriado para caracterizar a resistência de misturas curadas de solo-cal.

4.2.3.4. Relação entre o IPI e o CBR

Com base nos valores obtidos nos ensaios CBR e IPI é possível estabelecer uma relação entre os respectivos valores com a finalidade de avaliar o aumento ou diminuição da sensibilidade do solo à água após o seu tratamento.

No quadro seguinte apresentam-se as relações CBR/IPI obtidas para os diferentes teores em cal utilizadas no caso do solo S200.

Referência do solo	Teor em cal (%)	Teor em água (%)	IPI (%)	CBR (%)	CBR/IPI
Solo da Barosa (S200)	0,0	6,2	62	2	< 0,1
		7,2	56	3	< 0,1
		10,1	25	3	0,12
		12,0	12	2	0,16
	1,5	8,2	90	55	0,6
		10,4	64	72	1,13
		11,6	50	64	1,28
		13,2	20	45	2,25
	2,5	9,2	100	59	0,59
		10,7	78	105	1,35
		11,6	56	95	1,70
		13,3	30	62	2,07
	4,0	9,4	70	66	0,94
		11,4	65	77	1,18
		14,1	32	58	1,81
15,7		10	37	3,70	

Quadro 4.23 – Resumo da relação entre os valores do CBR e IPI para teores em cal de 1,5, 2,5 e 4,0% – S200

Através das Figura 4.42 a 4.45 é possível visualizar a evolução do CBR e do IPI para os vários teores em cal aplicados ao solo referenciado por “S200 – Solo da Barosa”

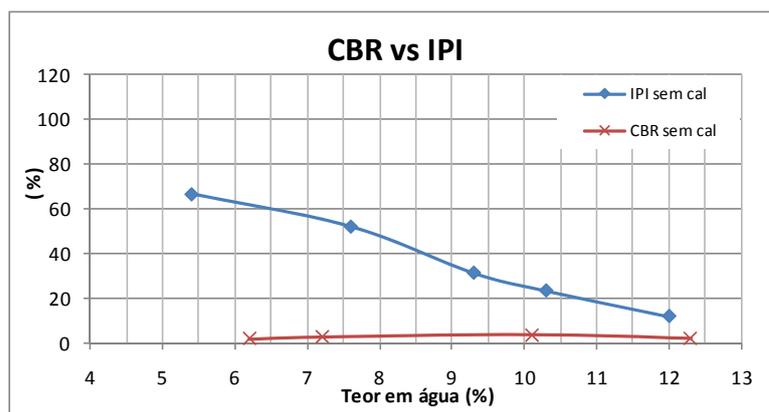


Figura 4.42 - Variação do IPI e do CBR com o teor em água para o solo natural – S200

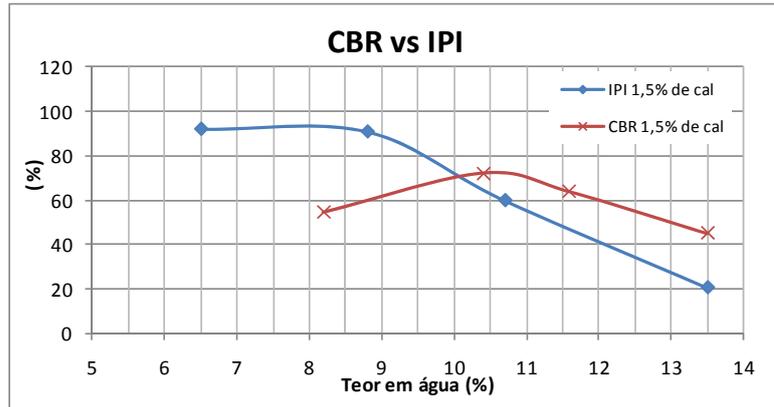


Figura 4.43 - Variação do IPI e do CBR com o teor em água para o solo com um teor em cal de 1,5% – S200

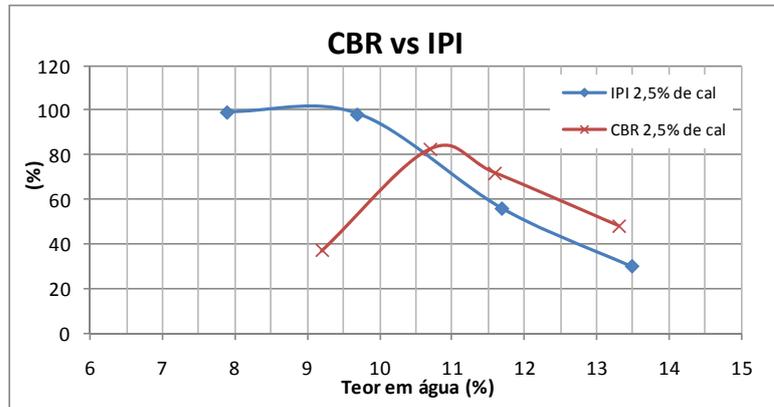


Figura 4.44 - Variação do IPI e do CBR com o teor em água para o solo com um teor em cal de 2,5% – S200

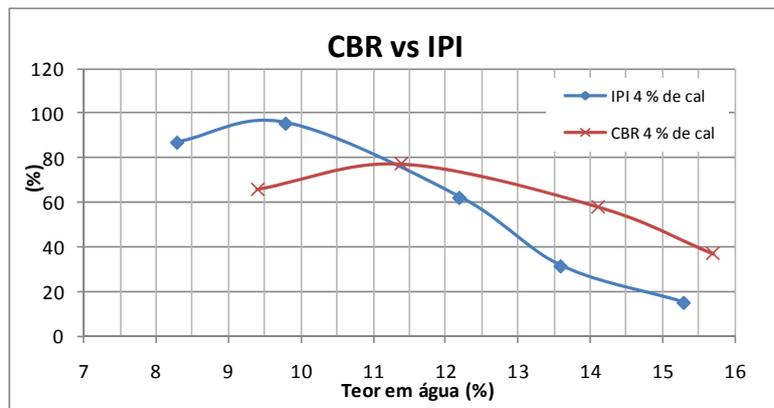


Figura 4.45 - Variação do IPI e do CBR com o teor em água para o solo com um teor em cal de 4,0% – S200

Analisando os valores do Quadro 4.23 observa-se que a relação entre o CBR/IPI é sempre inferior à unidade para o solo sem adição de cal, ou seja, o facto de os provetes serem sujeitos a um período de imersão de 96 horas diminui substancialmente a sua capacidade de carga. Sobre os solos tratados com as diferentes percentagens de cal, verifica-se que a partir de um determinado teor em água a relação entre CBR/IPI fica superior à unidade, evidenciando a diminuição da susceptibilidade à água por parte do solo tratado com cal.

A relação entre os valores de CBR e IPI com o aumento do teor em água apresenta valores superiores à unidade o que evidencia uma diminuição da susceptibilidade do solo na presença da água. Após um período de imersão de 4 dias verifica-se um aumento da relação entre o CBR e o IPI que constituem uma garantia da perenidade dos efeitos do tratamento.

4.2.3.4. Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial é o método mais utilizado para avaliar a resistência mecânica dos solos estabilizados com cal. Estes ensaios têm sido utilizados para avaliar a eficiência da reacção pozolânica, resultantes da interacção entre as argilas existentes no solo e a cal adicionada.

A diferença entre a resistência à compressão do solo natural e do solo estabilizado com cal pode ser utilizado como um indicador do modo como as reacções pozolânicas se processam entre o solo e a cal. Incrementos substanciais de resistência indicam que o solo é reactivo com a cal e, provavelmente, pode ser estabilizado, garantindo assim um material com boas características.

Estas reacções pozolânicas são criadas, através de reacções químicas entre os minerais argilosos e a cal, conforme descrito no ponto 3.2.4, e levam a que se verifique nos solos estabilizados com cal ganhos de resistência com uma taxa de crescimento mais lenta, por comparação com os solos estabilizados com cimento.

As reacções que levam à cimentação dependem essencialmente do tipo e da quantidade de cal, do teor em água e da compactação obtida na compactação, do tempo e das condições de cura, nomeadamente, a temperatura.

No presente trabalho a compactação dos provetes foi realizada para um teor em água superior em cerca de 2% ao respectivo teor óptimo e para um grau de compactação de 95%. A definição do teor em água para a moldagem dos provetes teve em consideração o facto de se garantir que toda a cal que foi adicionada ao solo será hidratada de forma a poder desenvolver as suas potencialidades reactivas com os minerais argilosos do solo, garantindo desta forma que não restarão núcleos de cal não hidratada, o que poderia levar à carbonatação e ao aparecimento de elementos fragilizantes na mistura. Os provetes após a compactação apresentam uma relação altura diâmetro de 2:1.

Com a finalidade de avaliar a influência no processo de cimentação das diferentes condições de cura foram utilizadas diferentes metodologias de cura dos provetes:

- i. Câmara húmida a $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ com humidade $\geq 95\%$;
- ii. Estufa a 40°C ;
- iii. Câmara húmida a $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ com humidade $\geq 95\%$, imersos até 1/3 da altura em água;

A metodologia seguida para a realização do ensaio foi a estabelecida na norma EN13286-41 “Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures”.

Os ensaios foram realizados para diferentes tempos de cura, ensaios aos 3, 7, 28, 60, 90 e 180 dias, o que permitiu avaliar o comportamento da resistência ao longo do tempo e evidenciar os seus ganhos a longo prazo. As reacções pozolânicas, responsáveis pelo processo de cimentação, que se desenvolvem nas misturas de solo-cal compactadas, tem um carácter lento mas podem levar, em condições apropriadas, a ganhos de resistência por períodos superiores a 10 anos.

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial sobre diferentes teores em cal, para provetes moldados com um teor em água superior a 2% ao W_{opt} . e para um grau de compactação de 95%. Os provetes foram curados em câmara húmida com temperatura $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e com humidade relativa $\geq 95\%$.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Idade (dias)	Módulo de deformabilidade (MPa)	Extensão na rotura (%)	Tensão de rotura (kPa)
Solo de Alter do Chão (S100)	Sem cal	---	6	1,15	56,3
		7	11	1,30	135,6
		30	24	1,24	269,5
		90	40	1,11	217,8
	1,5	7	20	1,24	172,2
		30	38	1,15	316,9
		90	58	1,15	542,8

Quadro 4.24 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial para o solo natural e com 1,5 e 4,0% de teor de cal – S100

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Idade (dias)	Módulo de deformabilidade (MPa)	Extensão na rotura (%)	Tensão de rotura (kPa)
Solo da Barosa (S200)	Sem cal	---	20	2,54	471,3
		7	271	0,47	906,9
	1,5	70	277	0,77	1267,0
		120	374	0,71	1913,0
		7	170	0,90	1144,6
	2,5	70	443	0,80	2072,5
		120	380	0,97	2076,6
		180	354	1,08	2811,8
		7	228	0,78	1434,3
	4,0	30	533	0,49	1624,4
		90	595	0,72	3019,2
		120	508	0,93	2905,3
		180	665	0,96	4047,8

Quadro 4.25 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial para o solo natural e com 1,5; 2,5 e 4,0% de teor de cal – S200

Com os dados obtidos nos ensaios de compressão simples e de forma a melhor visualizar o desenvolvimento da resistência mecânica com o tempo para os diferentes teores em cal, apresentam-se nas Figura 4.46 a Figura 4.55 gráficos de tensão deformação para os dois solos estudados com cura em câmara húmida a uma temperatura de $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa $\geq 95\%$.

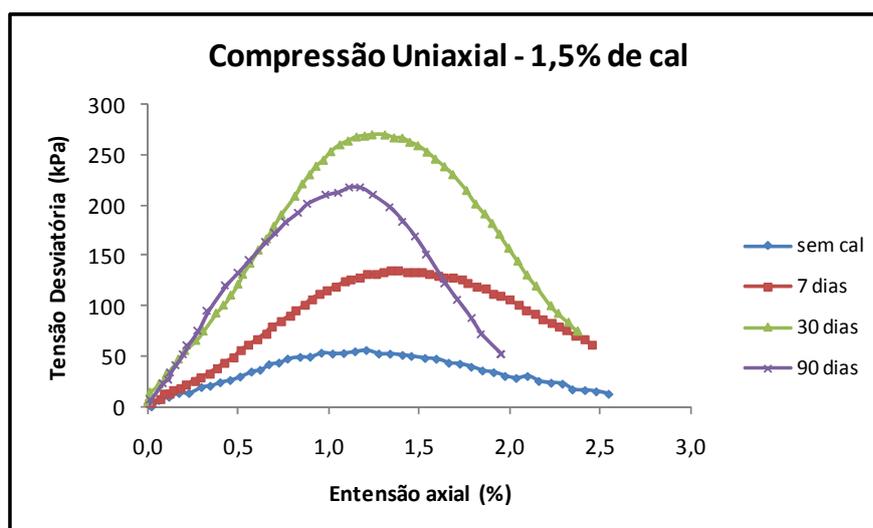


Figura 4.46 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S100 com teor em cal de 1,5% e cura em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $HR \geq 95\%$)

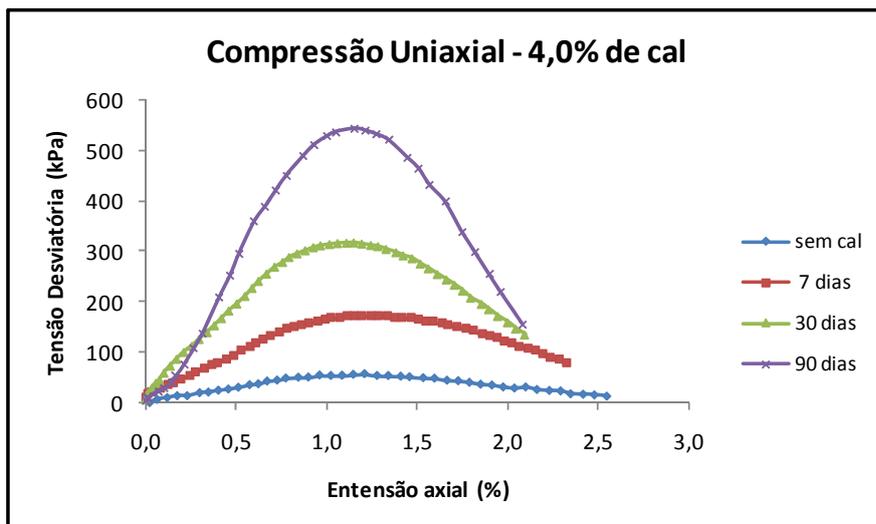


Figura 4.47 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S100 com teor em cal de 4,0% e cura em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$)

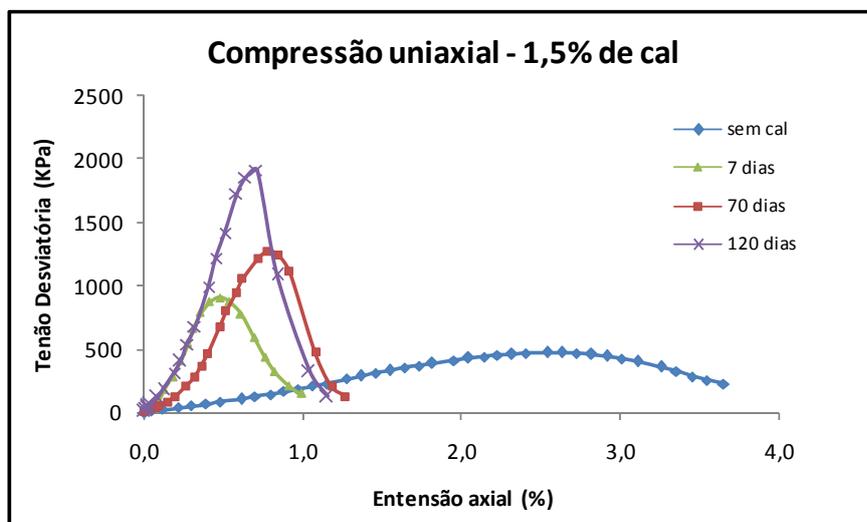


Figura 4.48 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S200 com teor em cal de 1,5% e cura em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$)

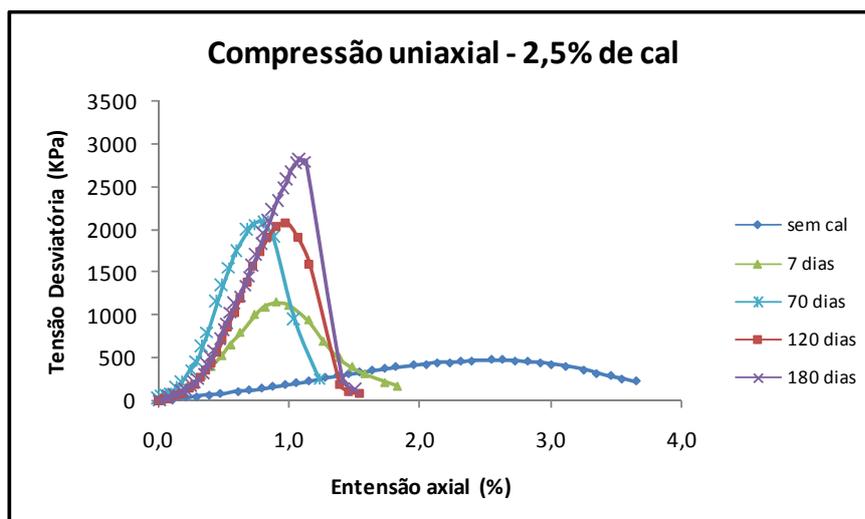


Figura 4.49 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S200 com teor em cal de 2,5% e cura em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $HR \geq 95\%$)

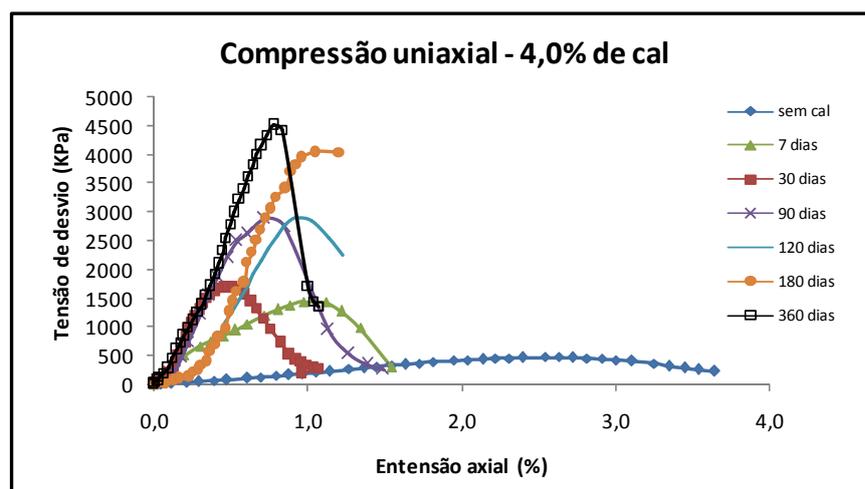


Figura 4.50 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S200 com teor em cal de 4,0% e cura em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $HR \geq 95\%$)

Com base nos valores obtidos nos ensaios tornam-se evidentes os ganhos de resistência à compressão simples. Os aumentos de resistência ocorrem logo aos 7 dias de idade, verificando-se aumentos significativos em ambos os solos objecto do estudo, mesmo nos provetes moldados com teor em cal de apenas 1,5%. Na verdade, este aumento de resistência quase imediato já havia sido observado através dos ensaios IPI realizados imediatamente após a compactação dos provetes e segundo o (TRB 5, 1987), em alguns casos os incrementos imediatos podem ser superiores a 100%.

Através da análise dos gráficos que contem as curvas tensão/deformação também é possível verificar que o aumento de resistência ao longo do tempo, para os teores em cal, é acompanhado de um aumento da rigidez dos provetes, o que se traduz num aumento do módulo de deformabilidade.

Nas figuras 4.42 a 4.44 apresentam-se os gráficos das resistências à compressão em função do tempo de cura, para os diferentes teores de cal, com a finalidade de avaliar o modo como evoluem os incrementos de resistência.

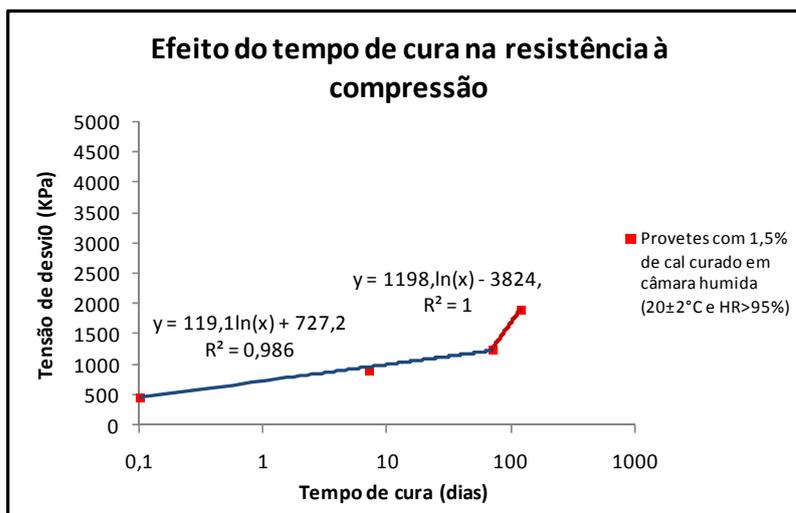


Figura 4.51 – Resistência a compressão em função do tempo de cura, para provetes com 1,5% de cal – Solo S200

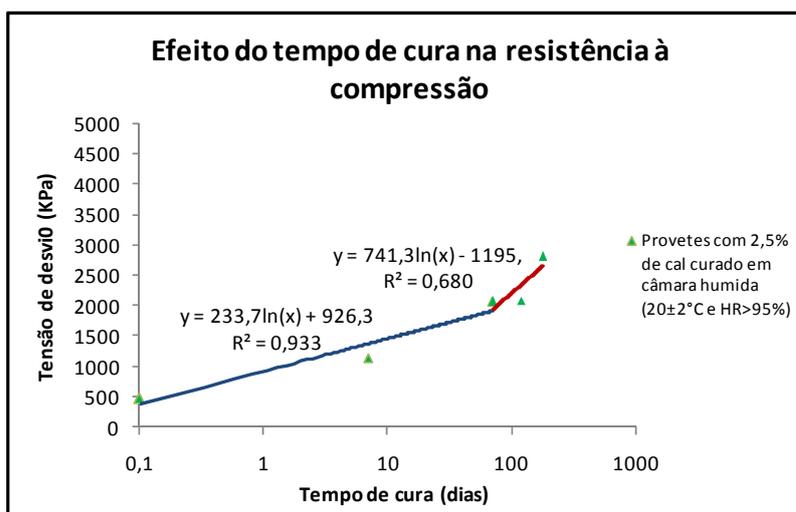


Figura 4.52 - Resistência a compressão em função do tempo de cura, para provetes com 2,5% de cal – Solo S200

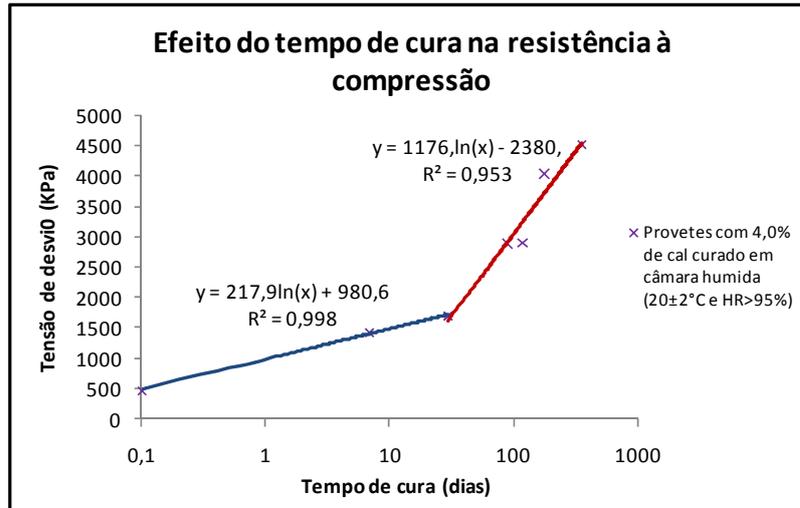


Figura 4.53 - Resistência a compressão em função do tempo de cura, para provetes com 4,0% de cal – Solo S200

Através da observação das figuras 4.42 a 4.44 é possível constatar que o aumento de resistência ocorre segundo em duas fases. Uma primeira fase com um crescimento mais lento da resistência e uma segunda fase em que o aumento da resistência ocorre de forma mais rápida.

Segundo Duvigneaud (2008) através de uma análise micro de consumos de cal e relação do comportamento mecânico com o consumo de cal, na primeira fase ocorrem os seguintes fenómenos:

- i. independente do teor inicial de cal;
- ii. valor de pH mantêm-se praticamente constante;
- iii. forte consumo de oxido de cálcio (CaO);
- iv. forte incremento da capacidade de troca cationica (CTC);
- v. formação de Ca Al carbohidratos e calcite;

Nesta fase ocorre a floculação e formação de uma fina camada na superfície das partículas de argila, mesmo para teores de cal de 1,5%.

Segundo o mesmo autor na segunda fase ocorrem os seguintes fenómenos:

- i. formação de fortes ligações entre as partículas de solo;
- ii. diminuição de carbonato de Ca, aluminatos e calcite;

- iii. diminuição do pH;
- iv. baixo consumo de oxido de cálcio (CaO);
- v. baixo incremento da capacidade de troca cationica (CTC);

Nesta fase regista-se uma evolução dos produtos pozolánicos formados durante a primeira fase com a criação de fortes ligações entre as partículas o que explica o comportamento “cimentado” dos solos tratados.

Na figura seguinte apresenta-se a evolução das duas fases de crescimento da resistência para os diferentes teores de cal utilizados.

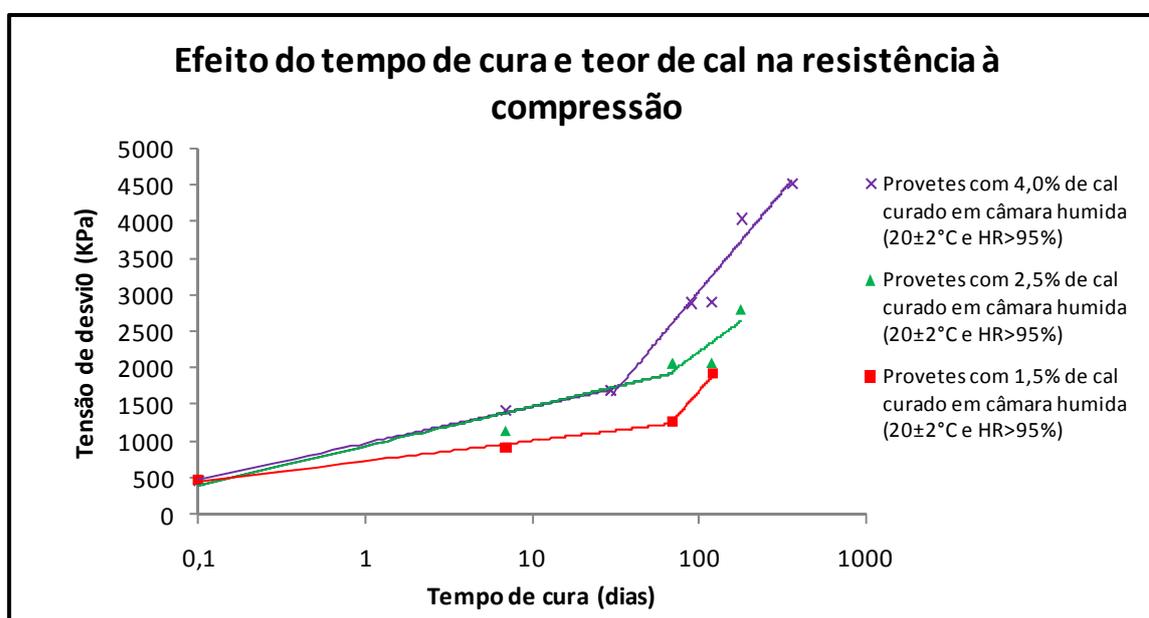


Figura 4.54 – Representação da resistência à compressão em função do tempo de cura para o solo S200 com 1,5, 2,5 e 4,0% de cal, curado em câmara húmida ($20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR} > 95\%$)

Nota-se, pela Figura 4.54, que na primeira fase de crescimento as rectas que traduzem o aumento de resistência em função do tempo para os teores de cal de 2,5 e 4,0% são muito similares e apresentam uma inclinação ligeiramente superior ao da mistura de 1,5%. É de notar também, que a primeira fase estende-se até aos 70 dias de cura no caso das misturas com teor de cal de 1,5 e 2,5%. No caso da mistura com 4% não foram realizados ensaios aos 70 dias de idade, pelo que não deverá ser considerado que a primeira fase só se estende até aos 30 dias de cura. Esta consideração também tem por base a “micro approach” levada a cabo por Duvigneaud (2008) em que conclui a independência da extensão da primeira fase relativamente ao teor de cal inicial.

A figura mostra também que a inclinação das rectas da segunda fase para um teor de cal de 4% e superior aos dois teores inferiores, evidenciando a dependência da evolução desta fase com o teor de cal inicial.

Com a finalidade avaliar o efeito da temperatura na aceleração das reacções químicas entre a cal e as partículas de argila, foram moldados provetes com teor em cal de 4% do solo referenciado por solo da Barosa (S200) e mantidos até á data de ensaio a uma temperatura de 40°C.

Nesse sentido, os provetes foram colocados dentro de sacos de plástico selados, de forma a manter o teor em água da moldagem, colocados dentro de uma recipiente com água e mantidos dentro de uma estufa capaz de manter a temperatura de 40°C.

De seguida, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples para períodos de cura de 3, 7, 30 e 90 dias de idade. Após os respectivos períodos de cura procedeu-se à realização do ensaio de compressão simples. No quadro seguinte apresenta-se um resumo dos valores da resistência à compressão obtidos nos diferentes períodos de cura em referência.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Condições de cura	Idade (dias)	Módulo de deformabilidade (MPa)	Extensão na rotura (%)	Tensão de rotura (kPa)
	Sem cal	---	---	20	2,54	471,3
Solo da Barosa (S200)	4,0	40°C	3	352	0,82	2184,5
			7	335	0,87	2998,7
			30	575	0,73	5114,7
			90	450	1,47	6433,4

Quadro 4.26 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial para o solo com 4,0% de teor de cal curados a uma temperatura de 40°C – S200

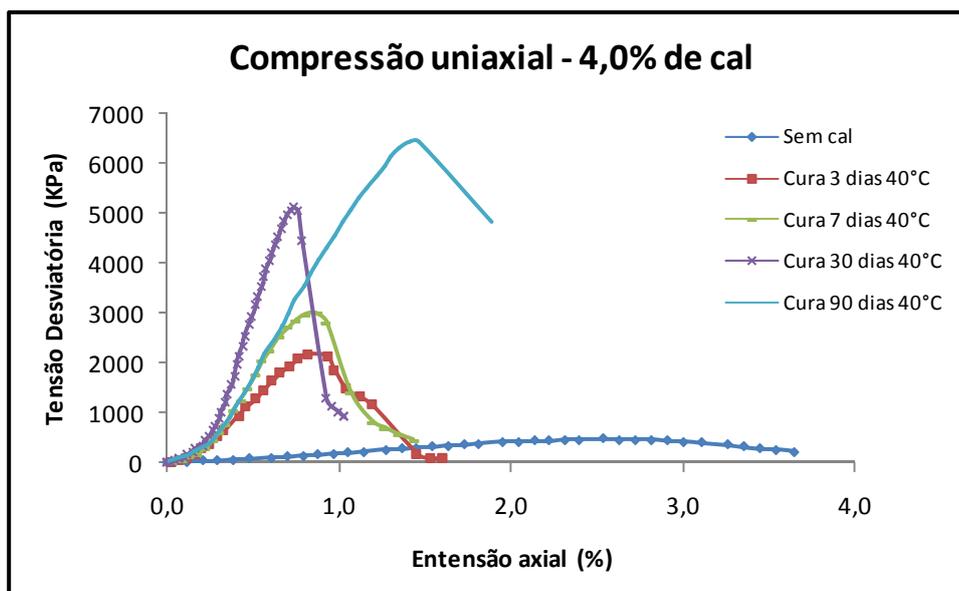


Figura 4.55 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S200 com teor em cal de 4,0% e cura em estufa a 40°C

Os valores obtidos nos ensaios de compressão permitem identificar um rápido crescimento das resistências mecânicas na mistura do solos cal que, logo aos 3 dias de idade apresentou um incremento de resistência 1713 KPa quando comparado com o solo não tratado, ou seja o solo estabilizado com cal apresenta um aumento de 463% em apenas 3 dias de cura nas condições descritas.

Através do gráfico tensão/deformação é possível verificar ainda um aumento da rigidez dos provetes, que se traduz através do valor da extensão axial na rotura, que vem diminuindo à medida que o tempo de cura aumenta.

A Figura 4.56 pretende evidenciar a forma de crescimento da resistência a compressão para um mesmo solo estabilizado com 4% de cal, mas em que a cura foi realizada de duas formas distintas, a 40°C em estufa e a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} > 95\%$.

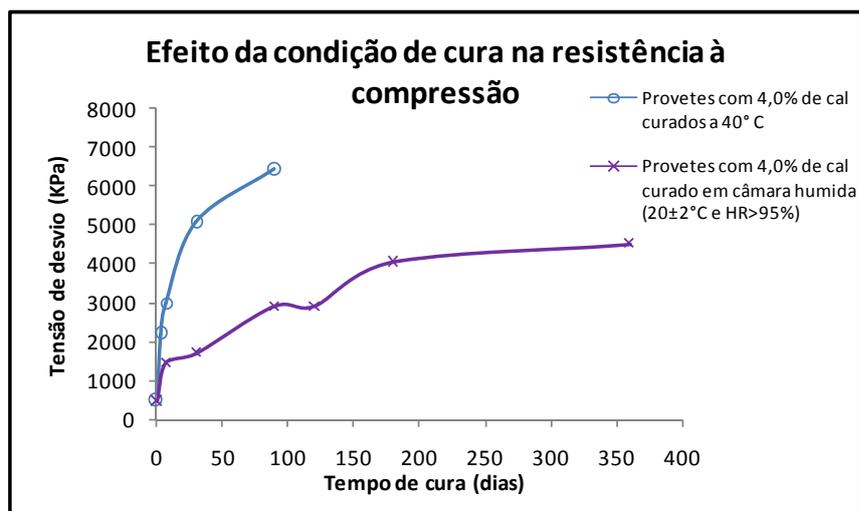


Figura 4.56 - Efeito do tipo de cura na evolução das resistências à compressão em função do tempo para uma mistura com 4% de cal – S200

Verifica-se que o aumento da temperatura, acelera as reacções químicas traduzindo-se em incrementos significativos na resistência à compressão mesmo para períodos de cura muito curtos, inferiores a 7 dias, quando comparados com o crescimento dos provetes curados a 20°C em câmara húmida. Os provetes curados a 20°C apresenta aos 30 dias de cura uma resistência de 1624 kPa, enquanto os provetes com idêntica idade, mas curados a 40°C registam valores de 5115 kPa, ou seja, uma diferença superior a 3400kPa. Na figura seguinte pretende-se ilustrar a evolução das fases de crescimento do solo – S200, estabilizado com 4% de cal, para as diferentes condições de cura.

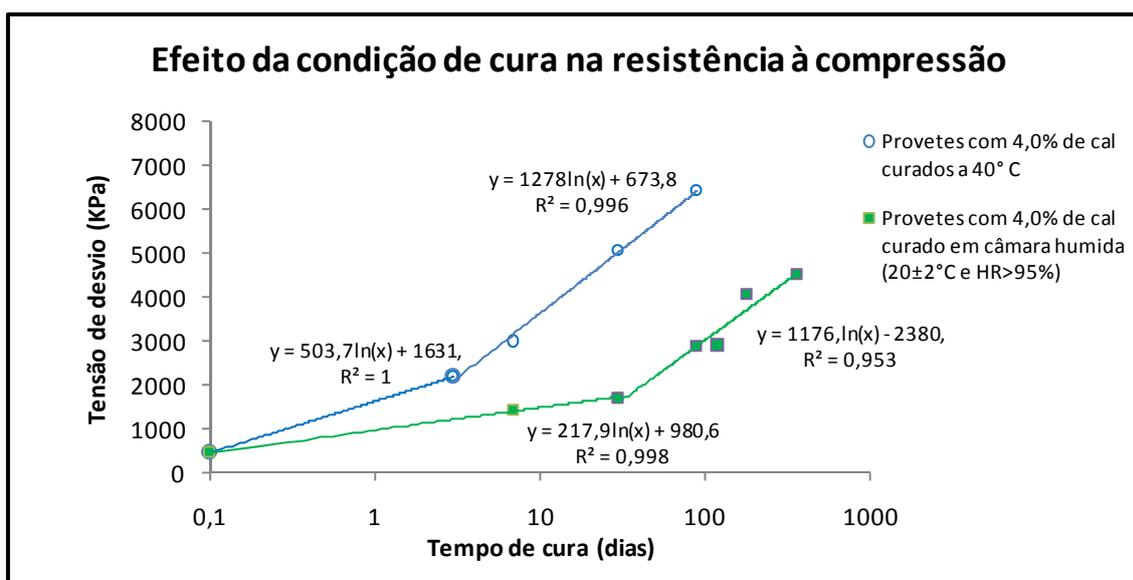


Figura 4.57 – Representação das duas fases de crescimento das resistências à compressão em função do tempo para diferentes condições de cura de uma mistura com 4% de cal – S200

Analisando a inclinação das rectas que traduzem o crescimento da resistência em função do tempo de cura para o solo estabilização com 4% de cal, com provetes curado a 20° C em câmara humidade e provetes curados em estufa a 40° C é possível constatar:

- i. maior inclinação da recta que representa os provetes curados a 40° C;
- ii. maior extensão da primeira fase para os provetes curados a 20° C;
- iii. inclinação das rectas correspondentes a segunda fase é muito semelhante para ambas as condições de cura.

Pelo exposto podemos também concluir que a primeira fase é dependente das condições de cura, mais concretamente da temperatura. Esta constatação é também corroborada por Duvigneaud (2008).

Conforme referido e verificado, um dos factores que influencia a resistência mecânica dos solos estabilizados com cal é o método de cura utilizado. Nas obras rodoviárias, por vezes as fundações dos aterros são executadas em zonas inundáveis, o que leva a alterações comportamentais do solo nomeadamente na sua resistência.

Foram moldados 8 provetes, sendo 4 deles estabilizados com 3% de cal e 4 com o solo natural, compactados com um grau de compactação de 95% do seu peso volúmico seco máximo e para um teor em água correspondente ao teor óptimo. Com a finalidade de conhecer a influência do contacto com a água do solo estabilizado com 3% de cal comparativamente ao solo não tratado, procedeu-se à cura dos provetes nas seguintes condições:

- 2 provetes de solo não tratado imersos em água 1/3 da sua altura (ver Figura 4.58);
- 2 provetes de solo estabilizado imersos em água 1/3 da sua altura (ver Figura 4.58);
- 2 provetes de solo não tratado conservados em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$);
- 2 provetes de solo estabilizado conservados em câmara húmida ($t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$);



Figura 4.58 – Cura de provetes de solo natural e estabilizado com 3% de cal imersos em água até 1/3 da sua altura – S300

Os provetes foram colocados sobre uma pedra porosa dentro de um recipiente em vidro e adicionada água em três fases, ou seja, até cerca de 1/8 da sua altura, passado 30 min. até 1/6 e passados mais 30 min. até 1/3 da sua altura. A água ao entrar em contacto com o solo natural evidenciava desde logo alguma turvação em volta dos provetes, ver Figura 4.59 b), o que não ocorria em torno dos provetes de solo estabilizado ver Figura 4.59 a).



a)



b)

Figura 4.59 – Pormenor com o aspecto dos provetes imediatamente após a imersão em água a 1/3 da sua altura. a) solo tratado, b) solo natural – S300

Cerca de 1 hora após a água se encontrar em contacto com 1/3 da altura dos provetes verificou-se a desagregação, quase simultânea, dos provetes fabricados com o solo natural, ver Figura 4.60, enquanto os provetes estabilizados não apresentavam qualquer alteração do seu aspecto.



Figura 4.60 – Desagregação dos provetes de solo natural após 1 hora de imersos em água até 1/3 da sua altura – S300

No quadro seguinte apresenta-se um resumo dos valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre os provetes de solo natural e estabilizado com 3,0 % de cal, a diferentes idades e com as diferentes condições de cura. Sobre os provetes de solo natural compactado não foi possível realizar qualquer ensaio devido, como já referido, à sua desagregação.

Ref. do solo	Teor em cal (%)	Condições de cura	Idade (dias)	Módulo de deformabilidade (MPa)	Tensão de rotura (kPa)
Solo do Aeroporto (S300)	Sem cal	Câmara húmida ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} > 95\%$)	---	28	256,6
		Câmara húmida ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$) e 1/3 do provete dentro de água	---	Ao fim de 1 hora os provetes desagregaram-se (Figura 4.60)	
	3,0	Câmara húmida ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} > 95\%$)	7	64	718,8
			30	75	1162,6
		Câmara húmida ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} \geq 95\%$) e 1/3 do provete dentro de água	7	36	465,2
			30	69	636,5

Quadro 4.27 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial para o solo natural e com 3,0% de teor de cal conservados em câmara húmida e imersos em água 1/3 da sua altura – S300

Na figura seguinte estão apresentadas as curvas de tensão/deformação obtidas nos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre os provetes de solo natural e solo estabilizado para diferentes idades e com diferentes condições de cura.

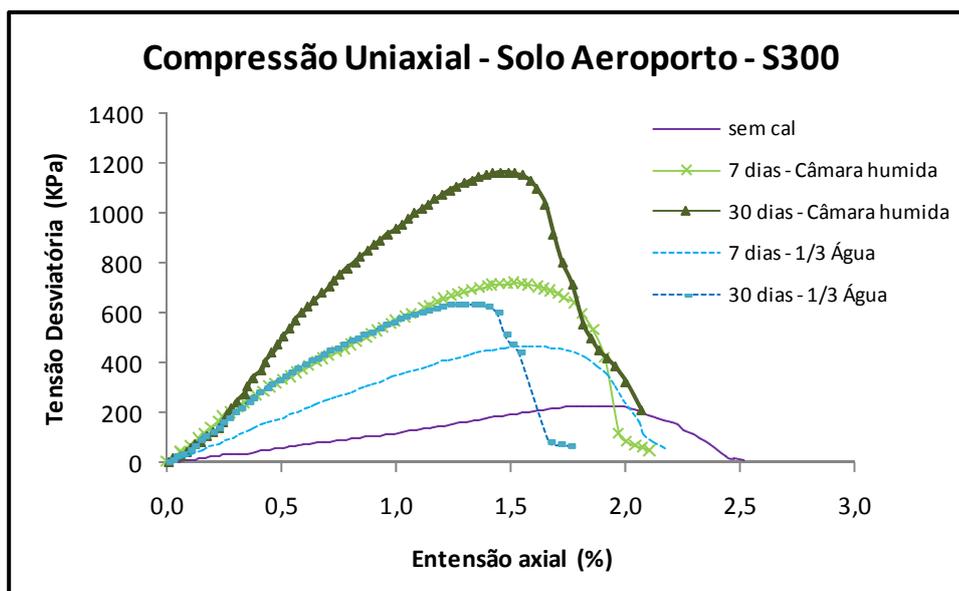


Figura 4.61 - Gráfico tensão deformação dos ensaios de compressão uniaxial realizados sobre o solo S300 com teor em cal de 3,0% e cura em câmara húmida e imersos 1/3 da sua altura em água

Os valores obtidos nos ensaios evidenciam, como seria de esperar, que nos provetes conservados com água até 1/3 da sua altura os ganhos de resistência com o tempo de cura não foram tão significativos quanto os provetes conservados em câmara húmida. Contudo, verifica-se que existiu um incremento de resistência logo aos 7 dias de idade de 208 kPa, ou seja, de 81% quando comparado com o solo natural conservado em câmara húmida e de 148% aos 30 dias de idade.

Segundo (Drake e tal 1972, Rosen e Marks, 1974, Townsend e Donague, 1976) sabe-se que a temperatura actua como agente importante no sentido de acelerar as reacções químicas.

As curvas de tensão deformação também permitem visualizar um aumento da rigidez, quer dos provetes conservados em câmara húmida quer dos provetes conservados com água até 1/3 da sua altura, comparativamente ao solo natural.

4.2.3.5. Resistência à tracção indirecta

De forma a avaliar a evolução da resistência à tracção indirecta foram moldados provetes com um teor em água correspondente ao teor óptimo e com um grau de compactação de 95% do peso volúmico seco máximo obtido no ensaio PROCTOR. Os provetes apresentavam uma relação altura/diâmetro próxima de 2.

Os ensaios foram realizados com base na norma de ensaio “EN 13286-42 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 42: Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulically bound mixtures”.

No quadro seguinte apresenta-se um resumo dos valores obtidos nos ensaios realizados sobre o solo S100 – Alter do Chão e S200 - Barosa com provetes moldados sem adição de cal e com 1,5; 2,5 e 4,0% de cal ensaiados com diferentes tempos de cura.

Ref. do solo	Percentagem de cal (%)	Condições de cura	Idade (dias)	σ_t - Tensão de rotura por tracção (kPa)
Solo de Alter do Chão (S100)	Sem cal	---	---	9,49
	1,5	Câmara húmida (20± 2°C e HR>95%)	7	21,5
			90	60,3
			150	92,1
	4,0	Câmara húmida (20± 2°C e HR>95%)	7	55,5
			90	159,4
150			236,2	
Solo da Barosa (S200)	Sem cal	---	---	127,2
	2,5	Câmara húmida (20± 2°C e HR>95%)	180	322,0
			90	521,3
	4,0	Câmara húmida (20± 2°C e HR>95%)	180	541,4

Quadro 4.28 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de tracção indirecta para o solo natural e com 1,5 2,5 e 4,0% de teor de cal conservados em câmara húmida – S100 e S200.

Assim como, a resistência à compressão dos solos estabilizados com cal aumenta, a tensão por tracção também regista incrementos nos seus valores de rotura.

4.2.3.6. Ensaio triaxiais clássicos

O principal objectivo da realização dos ensaios triaxiais foi a avaliação dos parâmetros de resistência do solo em duas situações distintas: em primeiro lugar, no seu estado natural, e depois com um teor em cal de 4% após 7 dias de cura. Para tal procedeu-se à moldagem dos provetes, de forma estática, para um teor em água idêntico ao óptimo e com um peso volúmico seco de 95% do peso volúmico seco máximo obtido nos respectivos ensaios de compactação pesado PROCTOR.

Deste modo, os ensaios realizados foram do tipo consolidado não drenado (CU), com consolidação isotropicamente, medição da pressão neutra, seguindo-se a trajectória de tensões clássica em que o provete é levado à ruptura por aumento da tensão axial.

Todos os provetes foram previamente saturados através da aplicação de acréscimos simultâneos de tensão confinante e de contra-pressão, mantendo-se sempre uma tensão efectiva constante de 10 kPa. Assim, o solo foi considerado saturado quando a parâmetro de pressão neutra B^2 , excedia os 92%, o que normalmente foi atingido para contra-pressão da ordem dos 290 kPa.

Após a saturação, os provetes foram consolidados para tensões efectivas de 20, 50 e 150 kPa através do aumento da pressão na câmara, mantendo-se os valores da contra-pressão atingidos no final da saturação. A consolidação deu-se por terminada, assim que se dissipou a totalidade do excesso de pressões neutras e se verificou, como consequência, uma estabilização de volume dos provetes.

Com o final da consolidação, iniciou-se a fase de corte. Nesta fase os provetes foram submetidos a um incremento de carga axial crescente, com controlo da velocidade de deformação e medição contínua das pressões neutras geradas durante o corte.

No quadro seguinte apresenta-se um resumo das características iniciais dos provetes do solo natural da Barosa – S200, que foram submetidos a ensaio.

Dados dos provetes	Unidades	Solo da Barosa S200 – sem cal		
		1	2	3
Diâmetro	(mm)	70,94	70,55	70,50
Altura	(mm)	143,95	145,43	145,57
Área	(mm ²)	3952,5	3909,6	3904,1
Volume	(mm ³)	568961,7	568572,7	568314,0
Massa húmida	(g)	1220,00	1221,90	1219,20
Massa seca	(g)	1122,40	1122,40	1122,4
Teor em água	(%)	8,7	8,9	8,6
Massa volúmica seca	(kN/m ³)	19,7	19,7	19,7
Porosidade		0,26	0,26	0,25
Índice de vazios		0,34	0,34	0,34
Grau de saturação	(%)	54,31	55,58	54,13
Peso específico	(kN/m ³)	26,5	26,5	26,5

Quadro 4.29 – Resumo das características dos provetes para triaxial do solo natural – S200

Nas Figura 4.62 e 4.48 são apresentadas as curvas tensão deformação e pressão neutra deformação para os três provetes do solo natural da Barosa ensaiados. Durante a fase de saturação do provete 2

² Parâmetro de pressão neutra, introduzido por Skempton em que, $B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$

foi necessário aumentar a contra pressão “back pressure” para 450 kPa de forma a obter 95% de saturação do provete.

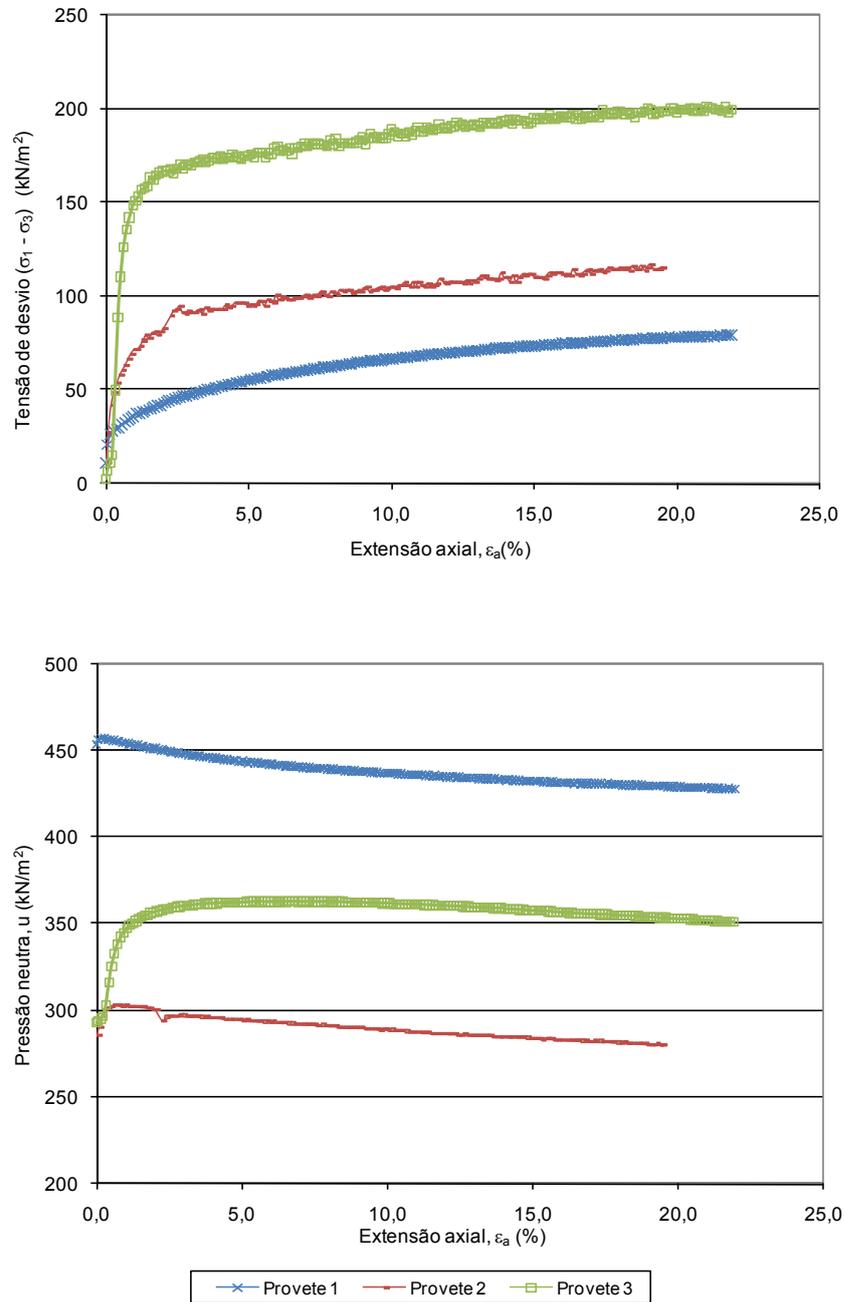


Figura 4.62 e 4.63 – Curvas tensão de desvio extensão axial e pressão neutra extensão axial do ensaio triaxial realizado sobre o solo natural – S200

Durante a fase de corte registou-se uma diminuição da pressão neutra nos provetes 1 e 2 e no caso do provete 3 um acréscimo do valor de pressão. Esta evidência deve-se ao facto dos provetes

compactados estarem fortemente sobre-adensados (95% da massa volúmica seca máxima do PROCTOR pesado), a que corresponderá a uma tensão de “pré-consolidação”. Os valores mais baixos de consolidação no ensaio, 20 e 50 kPa para os provetes 1 e 2, ficam aquém daquela tensão induzida no processo de compactação. No caso do provete 3 em que o valor da consolidação é de 150 kPa já se estará em níveis de tensão superiores aquela tensão de “pré-consolidação”.

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos no corte para o critério de rotura correspondente aos valores máximos de $(\sigma_1 - \sigma_3)$, assim como os parâmetros de resistência, ângulo de resistência ao corte e a coesão efectiva estimados em regressão linear sobre os valores de σ'_1 e σ'_3 , para o solo da Barosa sem adição de cal.

		Solo da Barosa S200 – sem cal		
Provete		1	2	3
Tensão radial, σ_3	kPa	470,0	341,00	441,00
Tensão axial total, σ_1	kPa	549,47	455,23	641,97
Pressão neutra, u	kPa	428,14	282,85	352,27
Tensão radial efectiva, σ'_3	kPa	41,86	58,15	88,73
Tensão axial efectiva, σ'_1	kPa	121,33	172,38	289,70
Extensão axial, ε_a	%	21,96	16,37	21,07
Parâmetro A na rotura		-0,32	-0,02	0,29
t	kPa	39,73	57,11	100,48
s'	kPa	81,59	115,26	189,21
Resistência não drenada, S_u	kPa	39,73	57,11	100,48
Ângulo de resistência ao corte, ϕ	°		32,2	
Coesão efectiva, c'	kPa		0	

Quadro 4.30 – Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$, solo natural - S200

Nas Figura 4.65 e Figura 4.65 apresentam-se as trajectória de tensões dos três provetes ensaiados e a envolvente de rotura para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$. obtidos no ensaio triaxial realizado sobre o solo natural da Barosa.

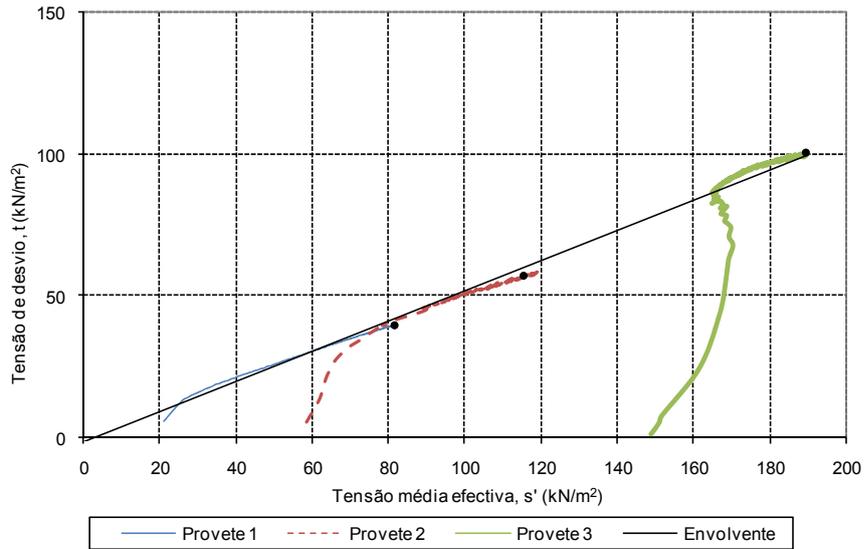


Figura 4.64 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$ do solo natural – S200

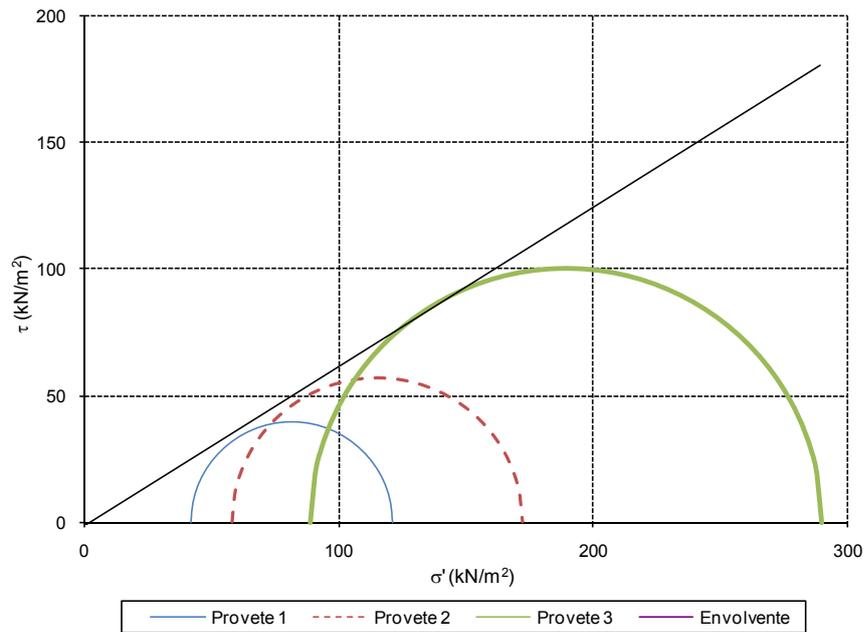


Figura 4.65 – Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$ do solo natural – S200

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos no corte para o critério de rotura correspondente aos valores máximos de (σ'_1 / σ'_3) , assim como os parâmetros de resistência, ângulo de resistência ao corte e a coesão efectiva estimados em regressão linear sobre os valores de σ'_1 e σ'_3 , para o solo da Barosa sem adição de cal.

Solo da Barosa S200 – sem cal				
Provete		1	2	3
Tensão radial, σ_3	kPa	470,00	341,00	441,00
Tensão axial total, σ_1	kPa	507,58	435,47	629,70
Pressão neutra, u	kPa	453,88	296,71	362,24
Tensão radial efectiva, σ'_3	kPa	16,12	44,29	78,76
Tensão axial efectiva, σ'_1	kPa	53,70	138,76	267,46
Extensão axial, ε_a	%	1,09	2,55	10,02
Parâmetro A na rotura		0,01	0,12	0,37
t	kPa	18,79	47,24	94,35
s'	kPa	34,91	91,53	173,11
Resistência não drenada, S_u	kPa	18,79	47,24	94,35
Ângulo de resistência ao corte, ϕ	°		33,1	
Coesão efectiva, c'	kPa		0	

Quadro 4.31 – Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max.}$, solo natural - S200

Na Figura 4.67 apresentam-se as trajectória de tensões dos três provetes ensaiados e a envolvente de rotura para $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max.}$ obtidos no ensaio triaxial realizado sobre o solo natural da Barosa.

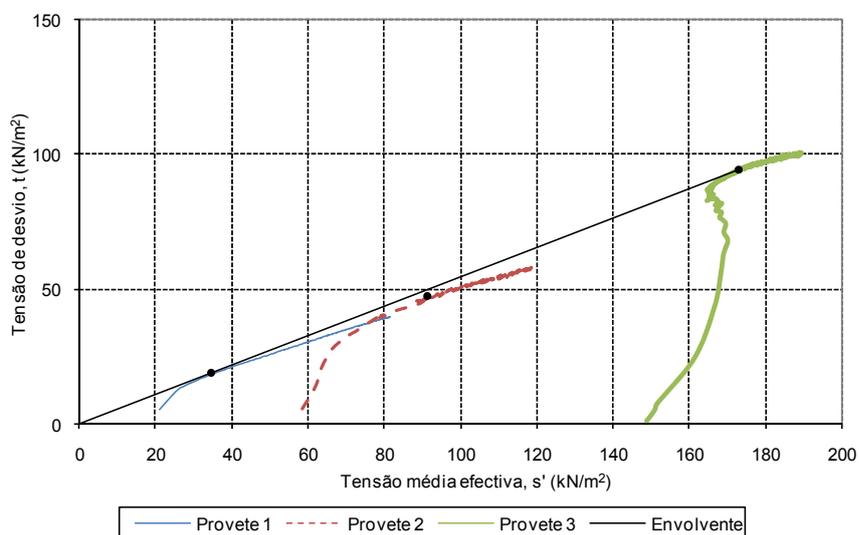


Figura 4.66 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max.}$ do solo natural – S200

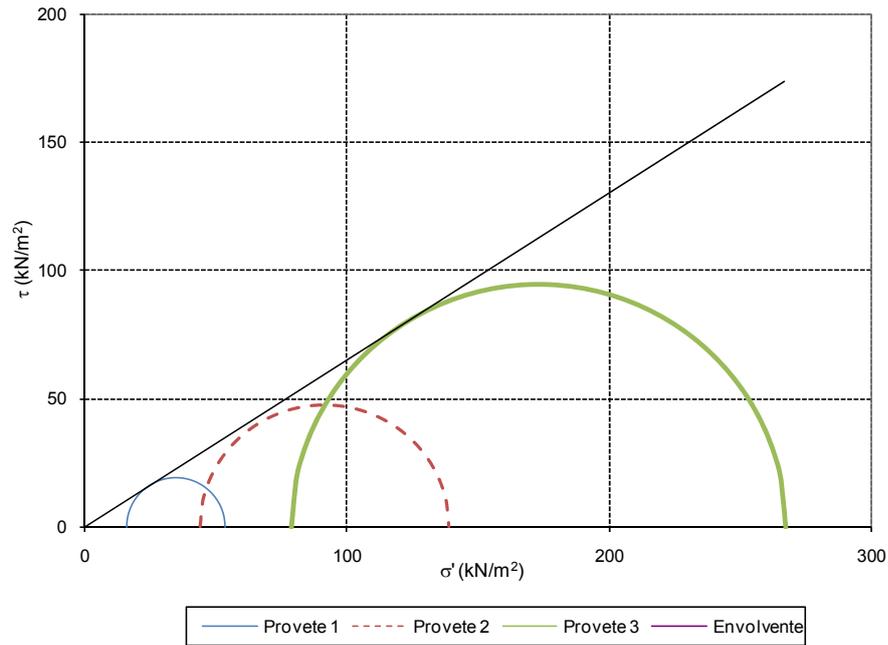


Figura 4.67 – Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ do solo natural – S200

		Solo da Barosa S200 – sem cal		
Provetes		1	2	3
Tensão radial, σ_3	kPa	470,00	341,00	441,00
Tensão axial total, σ_1	kPa	548,15	457,94	640,49
Pressão neutra, u	kPa	429,20	280,36	353,04
Tensão radial efectiva, σ'_3	kPa	40,80	60,64	87,96
Tensão axial efectiva, σ'_1	kPa	118,95	177,58	287,45
Extensão axial, ε_a	%	20,07	19,08	20,35
Parâmetro A na rotura		-0,31	-0,05	0,30
t	kPa	39,07	58,47	99,75
s'	kPa	79,87	119,11	187,71
Resistência não drenada, S_u	kPa	39,07	58,47	99,75
Ângulo de resistência ao corte, ϕ	°		32,2	
Coesão efectiva, c'	kPa		0	

Quadro 4.32 - Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\text{residual}}$, solo natural - S200

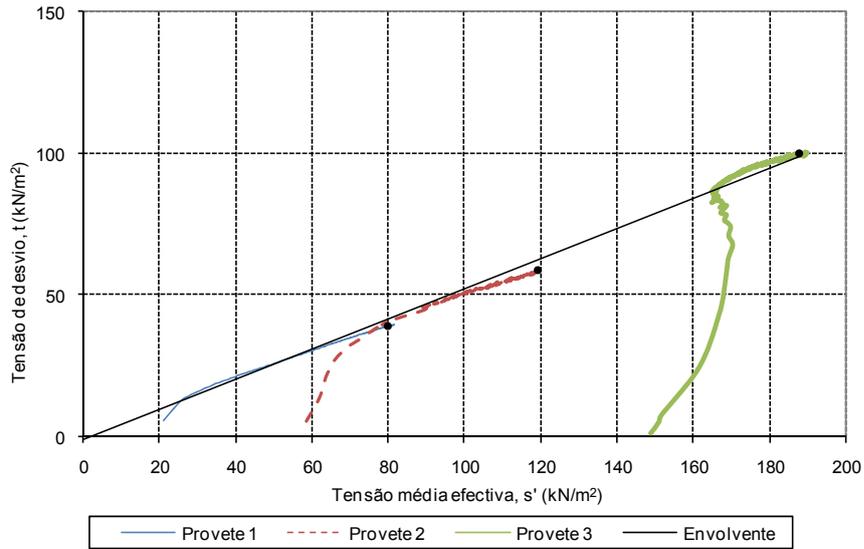


Figura 4.68 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$ do solo natural – S200

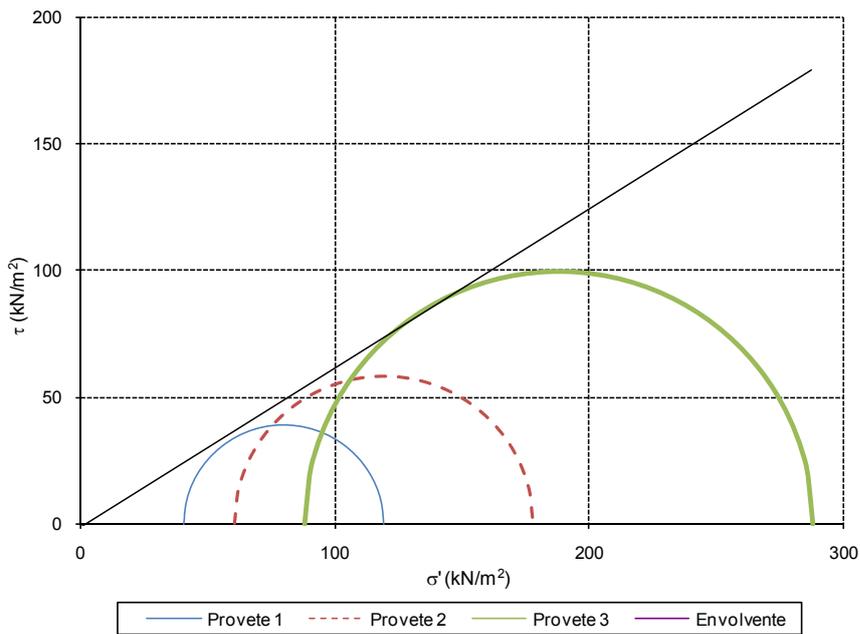


Figura 4.69 - Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$ do solo natural – S200

Com a finalidade de se avaliar a alteração dos parâmetros de resistência do solo após a adição da cal procedeu-se à moldagem de forma estática de provetes com um teor em cal de 4%, para um teor em água idêntico ao óptimo e com um peso volúmico seco de 95% do peso volúmico seco máximo obtido no ensaio de compactação PROCTOR pesado. Após a moldagem dos provetes, estes foram mantidos

dentro das câmaras triaxiais, devidamente encamisados, e após dois dias iniciou-se a fase de saturação com incrementos de contra pressão baixos e espaçados no tempo, mantendo sempre uma pressão de confinamento superior em 10 kPa ao valor da contra pressão. A fase de saturação dos provetes demorou cerca de 4 dias e quando terminada iniciou-se a fase de consolidação para valores de 20, 50 e 150 kPa.

No quadro seguinte apresenta-se um resumo das características iniciais dos provetes do solo da Barosa com um teor em cal de 4% que foram submetidos a ensaio após 7 dias de cura.

Dados dos provetes	Unidades	Solo da Barosa – com teor em cal de 4%		
		1	2	3
Diâmetro	(mm)	70,98	70,99	70,97
Altura	(mm)	144,03	144,04	144,19
Área	(mm ²)	3957,0	3958,1	3955,8
Volume	(mm ³)	569921,2	570121,4	570393,6
Massa húmida	(g)	1192,30	1191,50	1192,80
Massa seca	(g)	1065,40	1061,50	1064,50
Teor em água	(%)	11,91	12,25	12,05
Massa volúmica seca	(kN/m ³)	1,87	1,86	1,87
Porosidade		0,29	0,30	0,30
Índice de vazios		0,42	0,42	0,42
Grau de saturação	(%)	59,67	60,47	60,02
Peso específico	(kN/m ³)	26,5	26,5	26,5

Quadro 4.33 – Resumo das características dos provetes para triaxial do solo com 4% de cal – S200

Nas Figura 4.70 e 4.56 são apresentadas as curvas tensão deformação e pressão neutra deformação para os três provetes ensaiados aos 7 dias de idade, com 4% de teor em cal.

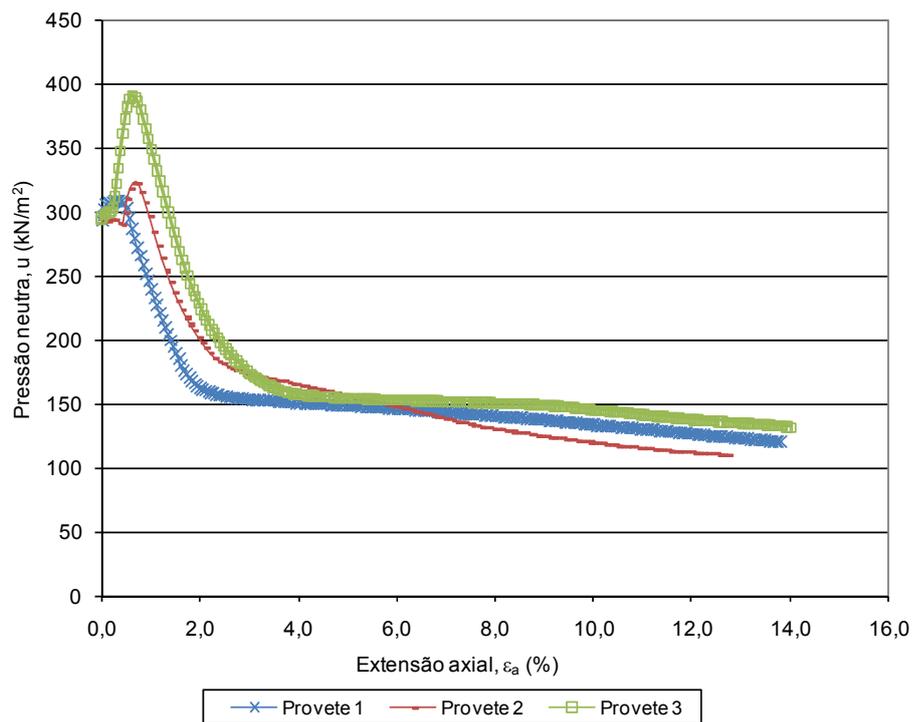
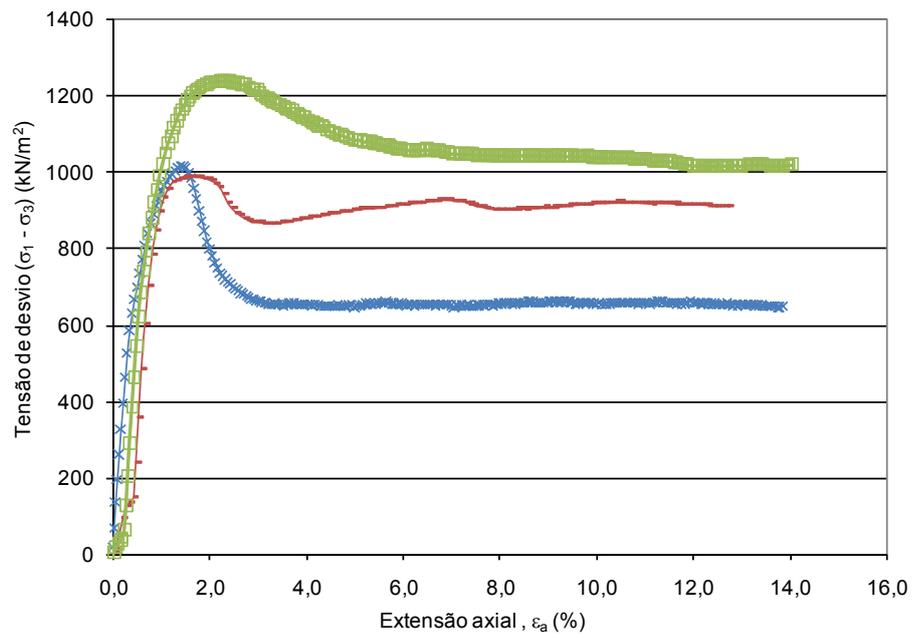


Figura 4.70 e 4.71 - Curvas tensão de desvio extensão axial e pressão neutra extensão axial do ensaio triaxial realizado sobre o solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200

As curvas de tensão de desvio extensão axial obtidas nos ensaios realizados sobre o solo com 4% de cal e aos 7 dias de idade demonstram um aumento da tensão de desvio com a extensão axial até que se atinge um valor de rotura, chamada resistência de pico, e após esta resistência ser alcançada verifica-se a sua diminuição gradual enquanto a extensão axial aumenta até que se atinge um valor praticamente constante designada normalmente por resistência residual ou última. Este comportamento é obtido em matérias sobre adensados ou com forte ligação entre partículas.

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos no corte para o critério de rotura correspondente aos valores máximos de $(\sigma_1 - \sigma_3)$, assim como os parâmetros de resistência, ângulo de resistência ao corte e a coesão efectiva estimados em regressão linear sobre os valores de σ'_1 e σ'_3 , para o solo da Barosa com um teor em cal de 4% e com 7 dias de cura.

Solo da Barosa S200 – 4% de cal e 7 dias de idade				
Provete		1	2	3
Tensão radial, σ_3	kPa	311,00	341,00	441,00
Tensão axial total, σ_1	kPa	1328,63	1328,59	1680,24
Pressão neutra, u	kPa	199,47	212,29	205,40
Tensão radial efectiva, σ'_3	kPa	111,53	128,71	235,60
Tensão axial efectiva, σ'_1	kPa	1129,16	1116,30	1474,84
Extensão axial, ε_a	%	1,40	1,78	2,30
Parâmetro A na rotura		-0,09	-0,08	-0,07
t	kPa	508,81	493,80	619,62
s'	kPa	620,34	622,51	855,22
Resistência não drenada, S_u	kPa	508,81	493,80	619,62
Ângulo de resistência ao corte, ϕ	°		32,7	
Coesão efectiva, c'	kPa		186,9	

Quadro 4.34 – Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$, solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200

Na Figura 4.73 apresentam-se as trajectória de tensões dos três provetes ensaiados e a envolvente de rotura para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$, obtidos no ensaio triaxial realizado sobre o solo da Barosa com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura.

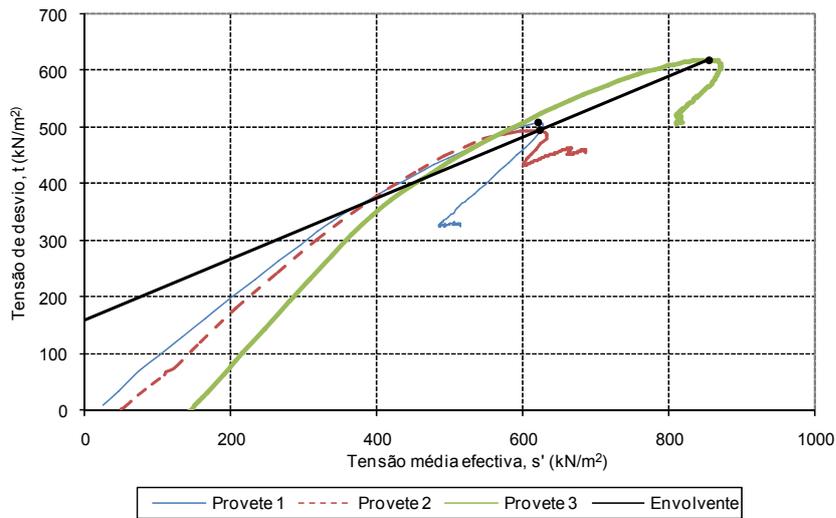


Figura 4.72 - Trajectória de tensões efectivas e envoltente para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200

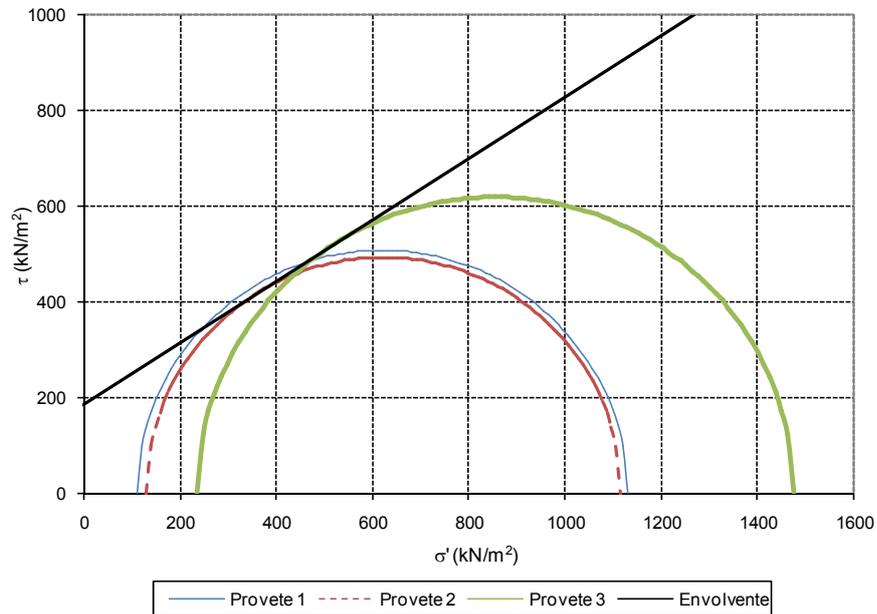


Figura 4.73 – Envoltente de Mohr para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos no corte para o critério de rotura correspondente aos valores máximos de (σ'_1 / σ'_3) , assim como os parâmetros de resistência, ângulo de resistência ao

corte e a coesão efectiva estimados em regressão linear sobre os valores de σ'_1 e σ'_3 para o referido critério de rotura.

Solo da Barosa S200 – 4% de cal e 7 dias de idade				
Provete		1	2	3
Tensão radial, σ_3	kPa	310,00	341,00	440,00
Tensão axial total, σ_1	kPa	774,09	1043,05	1231,63
Pressão neutra, u	kPa	307,92	322,44	389,91
Tensão radial efectiva, σ'_3	kPa	2,08	18,56	50,09
Tensão axial efectiva, σ'_1	kPa	466,17	720,61	841,72
Extensão axial, ε_a	%	0,25	0,72	0,69
Parâmetro A na rotura		0,03	0,04	0,12
t	kPa	232,05	351,03	395,81
s'	kPa	234,13	369,59	445,90
Resistência não drenada, S_u	kPa	232,05	351,03	395,81
Ângulo de resistência ao corte, ϕ	°		51,8	
Coesão efectiva, c'	kPa		83,2	

Quadro 4.35 – Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max.}$, solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200

Nas figuras seguintes apresentam-se as trajectória de tensões dos três provetes ensaiados e a envolvente de rotura para $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max.}$ obtidos no ensaio triaxial realizado sobre o solo da Barosa com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura.

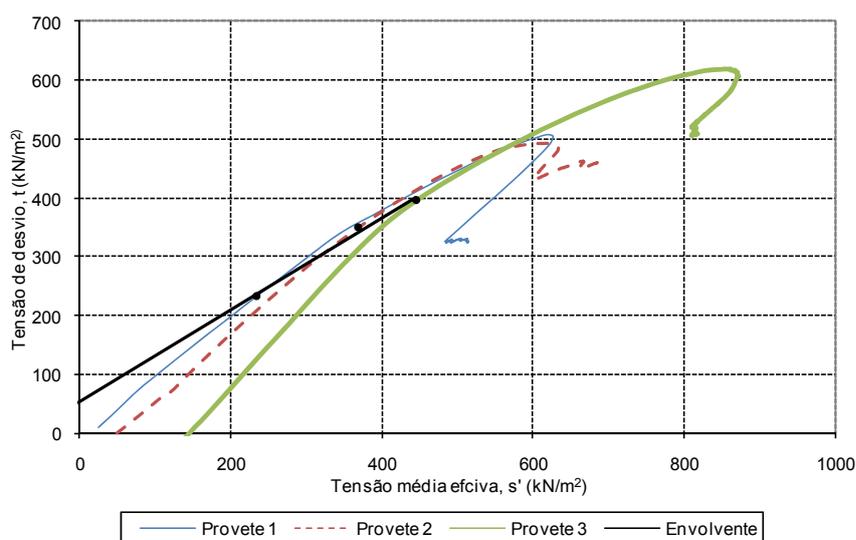


Figura 4.74 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max.}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200

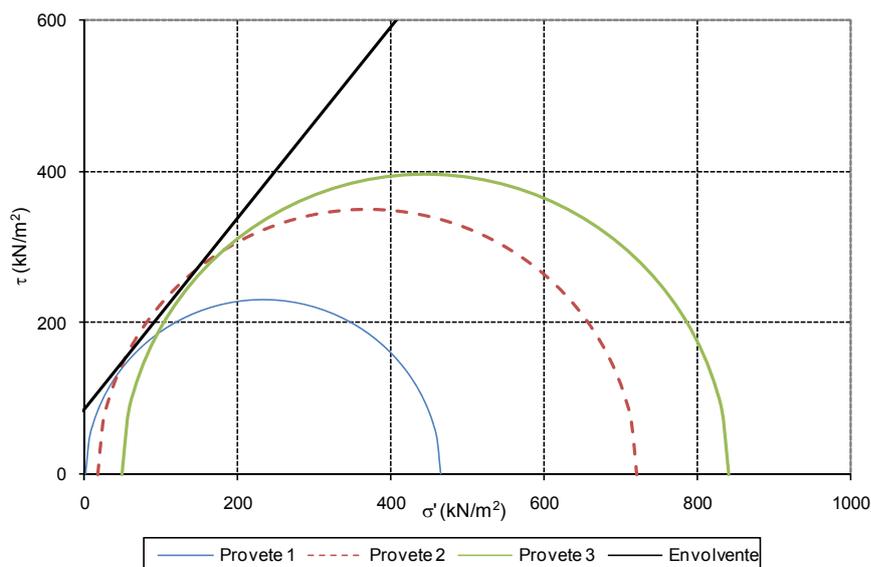


Figura 4.75 – Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200

No quadro seguinte apresentam-se os valores obtidos no corte para o critério de rotura correspondente aos valores máximos de $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\text{residual}}$, assim como os parâmetros de resistência, ângulo de resistência ao corte e a coesão efectiva estimados em regressão linear sobre os valores de σ'_1 e σ'_3 para o referido critério de rotura.

Solo da Barosa S200 – 4% de cal e 7 dias de idade				
Provete		1	2	3
Tensão radial, σ_3	kPa	311,00	341,00	441,00
Tensão axial total, σ_1	kPa	968,58	1260,09	1479,48
Pressão neutra, u	kPa	133,64	120,03	145,91
Tensão radial efectiva, σ'_3	kPa	177,36	220,97	295,09
Tensão axial efectiva, σ'_1	kPa	834,94	1140,06	1333,57
Extensão axial, ε_a	%	10,03	10,00	10,01
Parâmetro A na rotura		-0,24	-0,19	-0,14
t	kPa	328,79	459,54	519,24
s'	kPa	506,15	680,51	814,33
Resistência não drenada, S_u	kPa	328,79	459,54	519,24
Ângulo de resistência ao corte, ϕ	°		38,6	
Coesão efectiva, c'	kPa		24,7	

Quadro 4.36 – Resumo dos valores obtidos no corte e parâmetros de resistência para o critério de rotura $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\text{residual}}$, solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura – S200

Nas figuras seguintes apresentam-se as trajectória de tensões dos três provetes ensaiados e a envolvente de rotura para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$ obtidos no ensaio triaxial realizado sobre o solo da Barosa com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura.

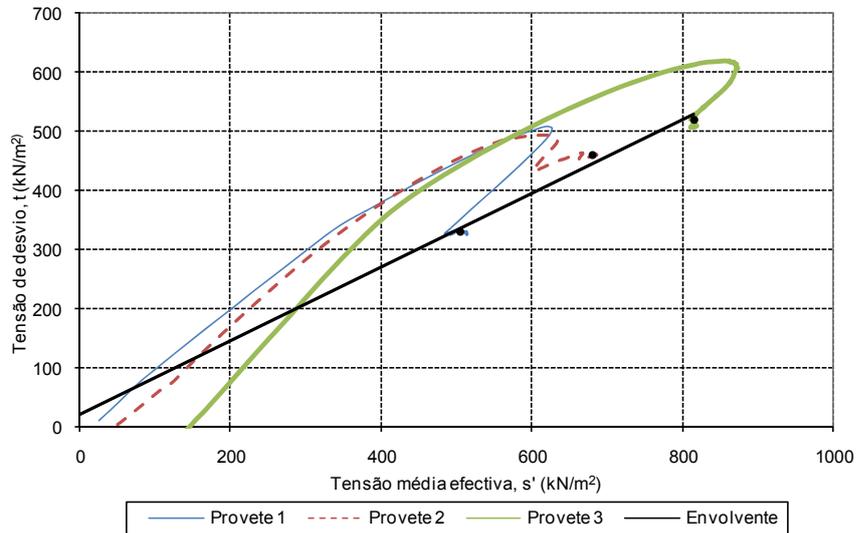


Figura 4.76 - Trajectória de tensões efectivas e envolvente para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura - S200

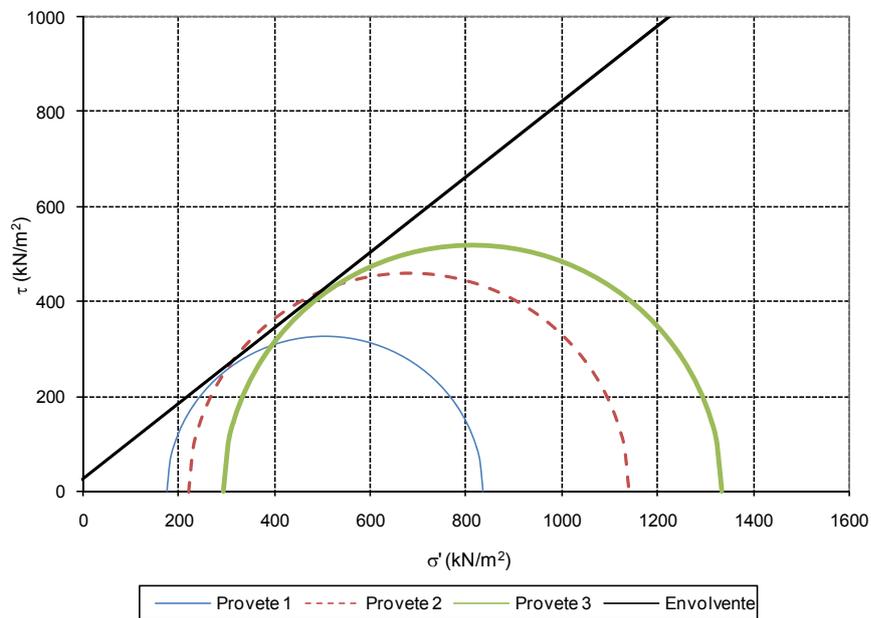


Figura 4.77 - Envolvente de Mohr para $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$ do solo com 4% de teor em cal e com 7 dias de cura - S200

No Quadro 4.37 apresenta-se um resumo dos parâmetros de resistência, ângulo de atrito e coesão efectiva, obtidos nos ensaios triaxiais realizados sobre o solo natural, ou seja sem adição de cal, e sobre o solo com um teor em cal de 4% ensaiado 7 dias após a preparação dos provetes.

		Critérios de rotura			
	Unid.	Teor em cal (%)	$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$	$(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$	$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$
Ângulo de resistência ao corte, ϕ	(°)	Sem cal	32,2	33,1	32,2
Coesão efectiva, c'	(kPa)		0	0	0
Ângulo de resistência ao corte, ϕ	(°)	4,0	32,7	51,8	38,6
Coesão efectiva, c'	(kPa)		186,9	83,2	24,7

Quadro 4.37 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais para os vários critérios de rotura – S200

Os valores obtidos para os parâmetros de resistência, no caso do solo natural, evidência que o início da plastificação e a resistência última estão muito próximos, ou seja, os valores de ângulo de atrito e coesão são praticamente idênticos para os critério de rotura de $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$, $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$ e $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$. Já no caso do solo com 4% de cal, os valores dos parâmetros de resistência, para os vários critérios e bastante distinto variando o ângulo de atrito desde os 32,7 até 51,8° e a coesão desde 24,7 até 186,9 kPa. Ou seja, no solo tratado com cal é evidente a existência de uma ligação estrutural, demonstrada quer através da existência de um pico no gráfico tensão de desvio / extensão axial da Figura 4.70, quer através da diferença dos parâmetros de resistência determinados pelas envolventes de rotura $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{max}$, e $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{residual}$.

Através da análise dos resultados dos ensaios triaxiais também é possível verificar um aumento do valor do ângulo de atrito residual entre o solo natural ($\phi' = 32,2^\circ$) e o solo tratado com 4% de teor em cal ($\phi' = 38,6^\circ$). Este incremento pode dever-se ao efeito da flocculação e á fixação do carbonato de cálcio à superfície das partículas alterando assim a sua forma e rugosidade.

5. CAPÍTULO – CASO DE OBRA

5.1. CASO DE OBRA

5.1.1. Introdução

De seguida apresenta-se o caso de obra que foi realizado no âmbito da execução de uma ampliação ao Aeroporto da Portela, referenciada por "ALS – Plataforma Sul" e executada pela empresa MOTA-ENGIL, Engenharia e Construção, S.A.. Uma vez que, os materiais provenientes das escavações efectuadas no local, não apresentavam características físicas e mecânicas que permitissem a sua utilização em camada de leito de pavimento e sub-base, torna-se necessário adquirir e transportar materiais apropriados em empréstimos, raros nas imediações da obra e transportar todo o material resultante das escavações a vazadouro. Ora, esta medida, além de ter impacto ambiental negativo, tem também custos associados elevados, já que o Aeroporto da Portela está situado numa zona de grande densidade populacional servido por acessos com grande congestionamento que dificultariam a circulação dos camiões de transporte de terras.

Assim sendo, efectuou-se um estudo laboratorial inicial com a finalidade de melhorar e estabilizar os solos existentes com cal cujos resultados estão apresentados no capítulo 4.

Posteriormente procedeu-se a execução de um aterro experimental em obra, com diferentes teores em cal para definir e validar a metodologia de execução do restante aterro, verificar a aplicação do estudo laboratorial ao caso de obra através da confirmação dos resultados obtidos na parte experimental e avaliar as características mecânicas do solo tratado. Após a realização do aterro experimental foram efectuadas recolhas de amostras do próprio aterro, com a finalidade de avaliar as alterações físicas e as melhorias mecânicas dos solos tratados e verificar a eficiência do espalhamento da cal para os diferentes teores estipulados.

5.1.2. Metodologia de execução do aterro experimental

A principal finalidade da execução do aterro experimental foi a definição de metodologias de trabalho no que respeita a: espessuras de camada, número de passagens de cilindro, espalhamento da cal, doseamento da cal, mistura da cal com o solo, avaliação do comportamento mecânico das camadas executadas e posterior aferição da fiabilidade dos resultados e das tendências obtidas no estudo laboratorial inicial.

O aterro experimental foi realizado um comprimento de 100 m, dividido de acordo com o esquema abaixo apresentado, com o objectivo de obter três faixas com diferentes teores em cal: 2,5, 3,0 e 3,5%.

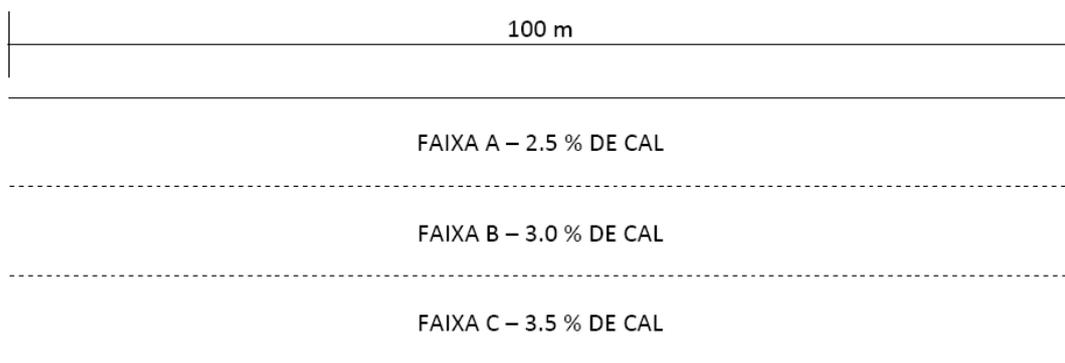


Figura 5.1 – Esquema dos trechos estudados no aterro experimental (Santos, 2009)

Assim, para a realização do aterro experimental procedeu-se, em primeiro lugar à regularização da zona recorrendo a uma motoniveladora, garantindo desta forma uma superfície devidamente nivelada e posteriormente procedeu-se à preparação da camada de fundação do respectivo aterro.



Figura 5.2 – Regularização da camada de fundação do aterro experimental (foto cedida por Santos, 2009)

De seguida, foram executadas três faixas de 5,0m de largura e 100 m de comprimento com as seguintes características:

- i. Uma faixa constituída por duas camadas de 0,30m de altura, espessura preconizada para leito de pavimento, sendo o solo misturado com 2,5% de cal – Faixa A;
- ii. Uma faixa constituída por três camadas de 0,20m de altura, espessura preconizada para sub-base, sendo o solo misturado com 3,0% de cal – Faixa B;
- iii. Uma faixa constituída por duas camadas de 0,20m de altura, espessura preconizada para base, sendo o solo misturado com 3,5% de cal – Faixa C;

As espessuras indicadas referem-se à espessura final da camada, ou seja, após a realização da compactação.

Com a finalidade de analisar as alterações do solo após a adição da cal foram inicialmente recolhidas três amostras, uma em cada uma das faixas antes da adição da cal, ou seja, do solo natural.

Imediatamente antes de se proceder ao espalhamento da cal, realizou-se a rega das camadas com quantidades de água que permitissem a obtenção dos respectivos teores óptimos em água para as diferentes dosagens de cal, contabilizando-se a água necessária para hidratar a cal e as perdas devidas ao aumento da temperatura resultantes da reacção exotérmica que se desenvolve durante o processo de hidratação. Pelo exposto, foram adicionadas diferentes quantidades de água a cada mistura:

- i. Adicionado mais 1,5% de água em relação ao teor óptimo da mistura, para 2,5% de cal;
- ii. Adicionado mais 2,0% de água em relação ao teor óptimo da mistura, para 3,0% de cal;
- iii. Adicionado mais 2,5% de água em relação ao teor óptimo da mistura, para 3,5% de cal;

No que diz respeito ao equipamento utilizado, de referir que o espalhamento da cal foi realizado por via seca com recurso a um espalhador munido de um sistema de doseamento volumétrico, controlado pela velocidade procurando garantir o teor em cal estabelecido. Desta forma, a mistura do solo com a cal realizou-se recorrendo a uma misturadora equipada com um disco de grades de eixo horizontal, com velocidade regulável. Esta máquina está também munida de um sistema de injeção de água e outros fluidos no tambor misturador de forma controlada, atingindo profundidades de mistura variáveis com um máximo de 50 cm.



a) Espalhamento da cal seguido da mistura



b) Pormenor da mistura do solo com a cal

Figura 5.3 – Espalhamento e mistura a cal no aterro experimental

Finalmente, a compactação da camada foi realizada através de um cilindro vibrador de rasto liso (monocilindro), com carga sobre o eixo do cilindro de frente 11700Kg e largura de laboração de 2160 m. Esta operação não decorreu imediatamente após a mistura permitindo assim que se completassem todas as reacções de hidratação da cal.



Figura 5.4 – Compactação das camadas estabilizadas com cal no aterro experimental

A velocidade média de circulação dos cilindros utilizada, durante a compactação das camadas, foi da ordem dos 3 Km/h. Considerou-se apenas a compactação terminada quando as passagens subsequentes do cilindro não se traduziam em incrementos no valor do peso volúmico seco. Após a

realização da compactação realizou-se a recolha, em cada uma das faixas, de uma amostra do solo estabilizado com a cal, para posteriormente proceder-se a sua caracterização em laboratório.

5.1.3. Ensaio de caracterização física e mecânica

5.1.3.1. Ensaio de laboratório

Com a finalidade de analisar as alterações do solo após a adição da cal foram recolhidas três amostras, uma em cada uma das faixas, do solo natural e posteriormente após o espalhamento e mistura da cal com o solo, recolher-se mais três amostras com diferentes teores em cal. As amostras foram referências de acordo com o apresentado no seguinte quadro.

Referência da amostra	Faixa	Teor em cal pretendido (%)
1	A	Sem cal
2		2,5
3	B	Sem cal
4		3,0
5	C	Sem cal
6		3,5

Quadro 5.1 – Referência das amostras recolhidas no aterro experimental

Sobre as seis amostras recolhidas no trecho em estudo, três sem cal e três com diferentes teores em cal, foram realizados os seguintes ensaios em laboratório:

- i. Ensaio de determinação de carbonato;
- ii. Teor em água;
- iii. Equivalente de areia;
- iv. Azul de metileno;
- v. Ensaio de compactação PROCTOR;
- vi. Ensaio CBR;
- vii. Análise granulométrica por peneiração húmida.

De modo a avaliar a eficiência do espalhamento da cal, uma vez que, os acréscimos entre faixas pretendidos não ultrapassam os 0,5% de diferença do teor em cal, foram recolhidas amostras após o espalhamento e mistura da cal com o solo, e procedeu-se à realização de ensaios de determinação de carbonato, tendo em vista a determinação do real teor em cal para cada uma das faixas em análise.

Os ensaios de determinação de carbonato realizados segundo a norma APHA 2430C “Portable and treated water – Total hardness”, tiveram como finalidade quantificar os teores em cal real das diferentes faixas realizadas. Os valores obtidos nos ensaios realizados assim como, os desvios relativamente ao teor em cal pretendido, são apresentados no quadro seguinte.

Referência da amostra	Faixa	Teor em cal pretendido (%)	Teor em cal real (%)	Diferença (%)
2	A	2,5	2,4	- 0,1
4	B	3,0	3,9	+ 0,9
6	C	3,5	3,3	- 0,2

Quadro 5.2 – Comparação entre a cal pretendida e real, com base nos ensaios de determinação de carbonatos

A análise dos resultados obtidos evidencia que as diferenças entre a cal pretendida e a quantidade real de cal que se encontra em cada uma das faixas não é superior a 1% em nenhum dos casos, apresentando aliás valores muito baixos, designadamente inferiores a 0,25% para as faixas referenciadas por A e C.

Esta análise é de grande importância, uma vez que, os valores de cal adicionados ao solo a tratar após a sua mistura, devem ser muito próximos dos pretendidos de forma a evitar uma sobredosagem do ligante, conduzindo a sobrecustos, ou por outro lado, no caso de a dosagem ser inferior ao definido, tornar-se contraproducente tecnicamente (Fortunato, 2008 in Santos 2009).

Para se poder constatar as modificações do solo após a adição dos diferentes teores em cal, foram realizados ensaios de teor em água, análise granulométrica por peneiração, equivalente de areia e azul de metileno. As metodologias seguidas na realização destes ensaios foram as mesmas já descritas para os ensaios referenciados no capítulo 4.

No quadro seguinte apresentam-se, de forma resumida, os valores obtidos nos ensaios de caracterização física quer para o solo natural, quer para cada uma dos diferentes teores reais em cal aplicados nas diferentes faixas.

Referência da amostra	Faixa	Teor em cal real (%)	Teor em água (%)	Equivalente de areia (%)	Azul de metileno (g/100g solo)	Granulometria (passado 0,075mm)
1	A	Sem cal	3,6	9	1,33	34,5
2		2,4	10,5	65	0,46	23,7
3	B	Sem cal	2,8	10	1,27	30,5
4		3,9	10,7	61	0,43	27,5
5	C	Sem cal	1,1	11	0,91	30,9
6		3,3	11,0	60	0,40	---

Quadro 5.3 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de caracterização física dos solos sem cal e com diferentes teores em cal recolhidos no aterro experimental

De modo a poder realizar uma análise comparativa entre os valores obtidos no estudo laboratorial inicial e os valores obtidos sobre as amostras recolhidas no aterro experimental, apresentam-se de forma resumida os mesmos parâmetros obtidos no estudo laboratorial inicial, para o solo referenciado por “S300 – Solo do Aeroporto”.

Referência da amostra	Teor em cal (%)	Equivalente de areia (%)	Teor em cal (%)	Azul de metileno (g/100g solo)	Granulometria (passado 0,075mm)
S300	Sem cal	13	Sem cal	1,22	32,5
	2,0	35	1,5	0,65	---
	3,0	51	2,5	0,52	---
	---	---	4,0	0,47	---

Quadro 5.4 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de caracterização física no estudo laboratorial inicial - S300

Os valores apresentados para o equivalente de areia e azul de metileno no Quadro 5.5 dizem respeito a ensaio realizados 72 horas após a adição de cal ao solo, pelo facto dos solos recolhidos no aterro experimental terem sido ensaiados cerca de 4 dias após a sua recolha.

O gráfico seguinte apresenta os valores obtidos através da adição de cal nas diferentes faixas do aterro experimental, permitindo visualizar e fazer uma análise comparativa entre estes valores ora obtidos e os valores resultantes do estudo laboratorial realizado inicialmente para o solo “S300”.

De notar que, os valores considerados para os parâmetros do solo sem cal, referentes ao aterro experimental dizem respeito ao valor médio das três amostras ensaiadas (referenciadas como 1,3 e 5).

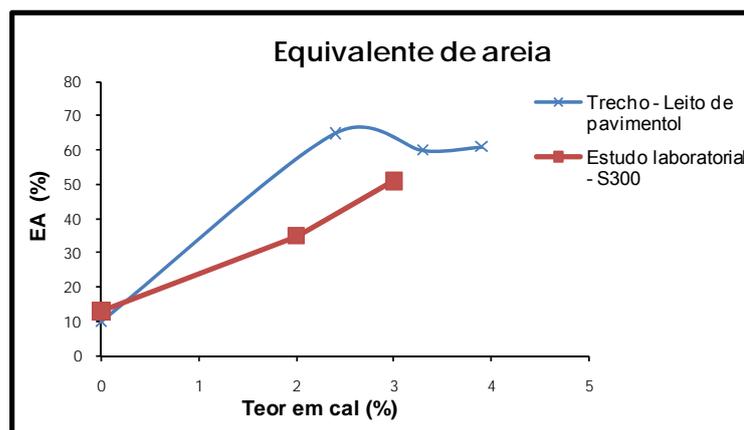


Figura 5.5 – Evolução do equivalente de areia com diferentes teores em cal para os solos do aterro experimental e estudo laboratorial do solo S300

A análise dos valores obtidos no ensaio evidencia o aumento do equivalente de areia, devido ao efeito da floculação e aglomeração das partículas mesmo para valores baixos de teor em cal, aumentando de forma menos significativa para os restantes teores, conforme já tinha sido identificado no estudo laboratorial realizado inicialmente.

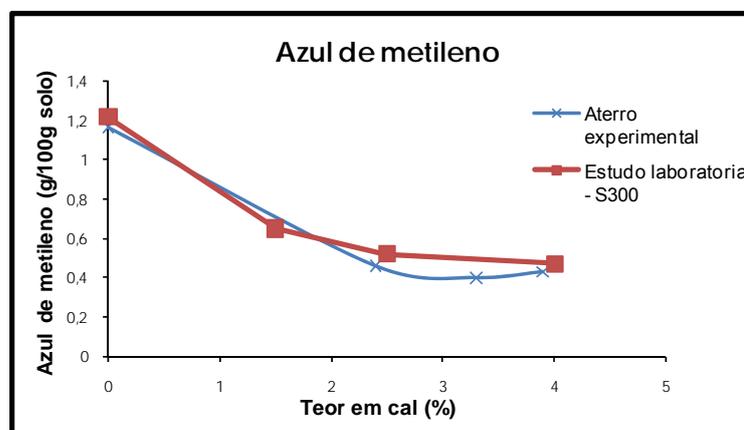


Figura 5.6 - – Evolução do azul de metileno com diferentes teores em cal para os solos do aterro experimental e estudo laboratorial do solo S300

Os valores obtidos no ensaio evidenciam uma diminuição do valor azul para baixos valores de teor em cal e à semelhança do que ocorreu no ensaio de equivalente de areia verifica-se uma estabilização para teores superiores a 2,5% de cal. A variação registada no estudo laboratorial inicial e os valores

obtidos em obra no aterro experimental são bastante praticamente iguais, o que de certa forma corrobora a importância do estudo laboratorial inicial e fornece importância aos valores aí obtidos.

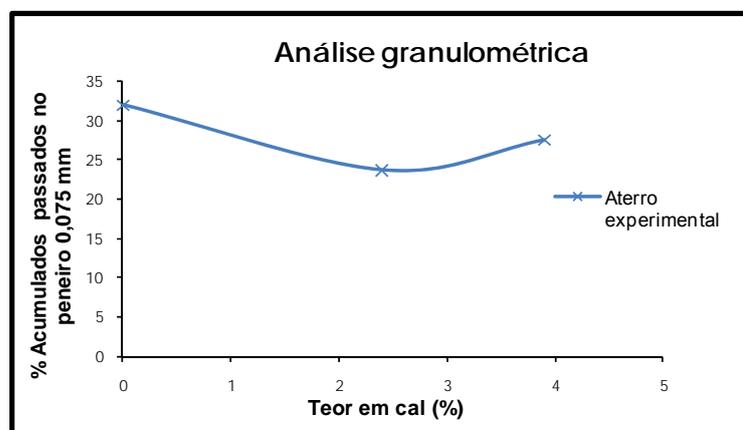


Figura 5.7 - Evolução da porcentagem de passados no peneiro de 0,075 mm em função da porcentagem de cal

Nas amostras ensaiadas, verificou-se uma diminuição da porcentagem de material passado no peneiro 0,075 mm. Contudo o efeito da floculação e aglomeração que conduz à redução dos finos é mais evidente nas partículas com dimensão inferior à da abertura deste peneiro. O ensaio de análise granulométrica por sedimentação teria sido mais eficiente nesta avaliação. O estudo laboratorial inicial realizado sobre o solo não contemplou a realização de ensaios de análise granulométrica sobre os solos estabilizados com cal, dado o curto período existente para a realização do estudo.

Dado tratarem-se de solos a aplicar em camada de leito e sub-bases de pavimento onde as características mecânicas assumem também um papel importante na selecção dos solos a utilizar, foram realizados ensaios de compactação, ensaios CBR sobre as amostras recolhidas das faixas do aterro experimental em estudo e posteriormente sobre as camadas executadas "in situ", foram realizados ensaios de carga em placa, segundo a norma DIN 18134 - 2001 "Determinatio of deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test".

No quadro seguinte apresentam-se de forma resumida os valores obtidos nos ensaios realizados sobre as seis amostras recolhidas nas faixas A, B e C.

Referência da amostra	Faixa	Teor em cal real (%)	Compactação		CBR ¹ (%)	
			γ_d max. (kN/m ³)	W _{opt.} (%)	5,0 mm	Expansão
1	A	Sem cal	19,7	9,3	15	0
2		2,4	18,1	12,2	38	0
3	B	Sem cal	19,8	9,1	15	0
4		3,9	17,8	12,8	52	0
5	C	Sem cal	20,1	9,1	16	0
6		3,3	18,3	13,1	54	0

¹ Provetes moldados com um grau de compactação de 95% do peso volúmico seco máximo

Quadro 5.5 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos solos sem cal e com diferentes teores em cal recolhidos no trecho do leito de pavimento

De modo a poder realizar uma análise comparativa entre os valores obtidos no estudo laboratorial inicial e os valores obtidos sobre as amostras recolhidas no aterro experimental, apresentam-se de forma resumida os mesmos parâmetros obtidos no estudo laboratorial inicial, para o solo referenciado por “S300 – Solo do Aeroporto”.

Referência do solo	Teor em cal (%)	Compactação		Teor em cal (%)	CBR ¹ (%)		
		γ_d max. (kN/m ³)	W _{opt.} (%)		G.C.	5,0 mm	Expansão
Solo do Aeroporto (S300)	Sem cal	19,9	8,5	Sem cal	85,4	2	0,8
	2,0	19,2	12,5		90,5	11	0,8
	3,0	19,2	12,9		97,5	43	0,7
	---	---	---	---	90,1	29	0,00
	---	---	---	2,0	94,3	60	0,00
	---	---	---	---	97,9	82	0,02
	---	---	---	---	89,1	25	0,00
	---	---	---	3,0	93,8	62	0,00
	---	---	---	---	97,4	76	0,00

Quadro 5.6 - Resumo dos valores obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos solos sem cal e com diferentes teores em cal recolhidos no trecho do leito de pavimento

Os ensaios CBR realizados sobre os solos recolhidos do aterro experimental, foram executados sobre provetes compactados para um grau de compactação de 95%, enquanto o estudo inicial os provetes foram compactados com variação de energia, 12, 25 e 55 pancadas, o que originou diferentes graus de compactação. Considerando o mesmo valor de grau de compactação, ou seja, 95% o CBR do estudo laboratorial inicial e o CBR do aterro experimental são bastante semelhantes.

De forma a melhor poder visualizar-se as modificações ocorridas com a adição dos diferentes teores em cal utilizados nas faixas do aterro experimental e comparar esses valores obtidos, com o estudo laboratorial realizado inicialmente sobre o solo referenciado por “Solo do Aeroporto – S300”, apresentam-se de forma gráfica os valores obtidos.

Os valores considerados para os parâmetros do solo sem cal, referentes ao aterro experimental, dizem respeito ao valor médio das três amostras ensaiadas (referenciadas por 1,3 e 5).

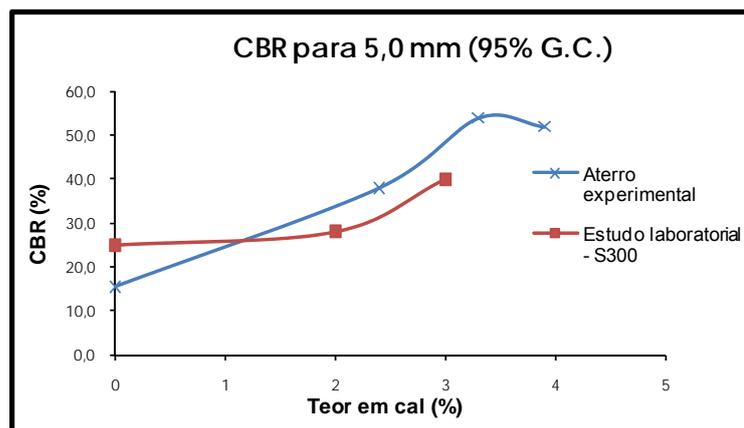


Figura 5.8 - - Evolução do peso volúmico seco máximo com diferentes teores em cal para os solos do aterro experimental e estudo laboratorial do solo S300

Os incrementos da capacidade de carga com a adição de cal ao solo são substanciais, verificando-se inicialmente um forte incremento. Dado tratar-se de uma resistência quase imediata, ou seja, apenas com 4 dias de cura, baixos teores em cal são muitas vezes suficientes para alterar as características mecânicas dos solos tratados.

Estas melhorias mecânicas devem-se essencialmente às modificações das características físicas dos solos como já podemos constatar, também ocorrem para baixos teores em cal.

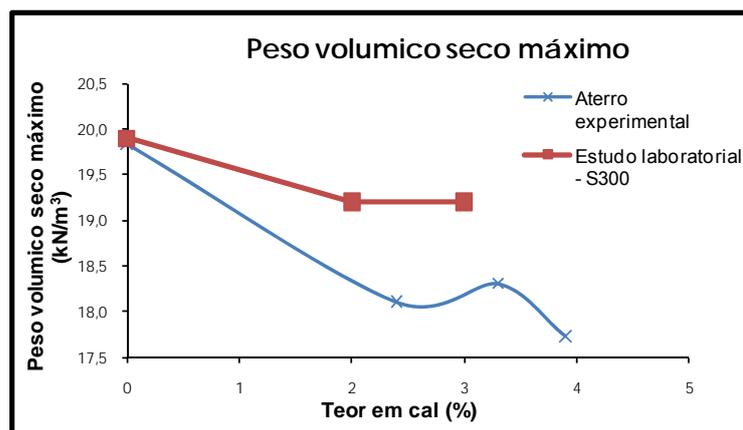


Figura 5.9 - - Evolução do peso volúmico seco máximo com diferentes teores em cal para os solos do aterro experimental e estudo laboratorial do solo S300

A análise do gráfico permite visualizar uma diminuição do peso volúmico seco máximo com o aumento do teor em cal. Verifica-se uma diferença entre os valores do peso volúmico seco máximo obtidos no estudo laboratorial inicial e os valores obtidos nos ensaios realizados em obra sobre as amostras recolhidas no aterro experimental. Tal situação pode estar associada aos seguintes pontos:

- i. Os ensaios inicialmente realizados em laboratório foram executados 2 horas após a adição da cal ao solo e no caso das amostras recolhidas no aterro experimental a sua execução foi passado 4 dias,
- ii. Diferenças entre as amostras de estudo inicial e as amostras do aterro experimental, nomeadamente na sua granulometria.

Tal situação pode explicar parte da diferença entre os valores do Trecho e do estudo de laboratório.

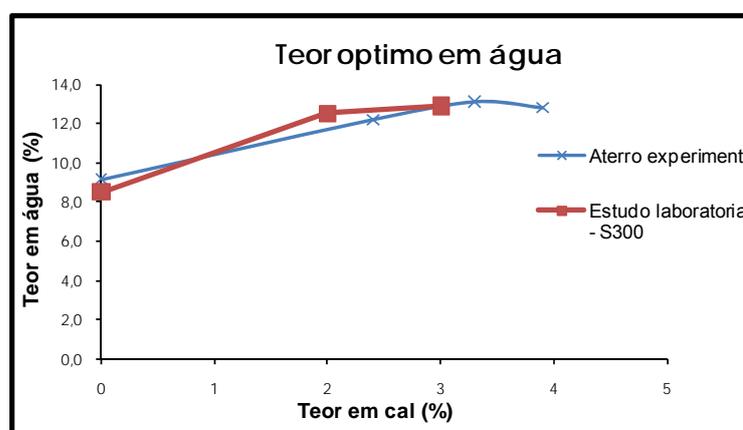


Figura 5.10 - Evolução do teor óptimo em água com diferentes teores em cal para os solos do aterro experimental e estudo laboratorial do solo S300

Relativamente ao teor óptimo em água, como seria de esperar, verifica-se um aumento, com o aumento do teor em cal. Neste caso os valores obtidos no estudo laboratorial inicial e os valores dos solos do trecho experimental são bastante semelhantes. O facto de os ensaios não terem sido realizados sobre amostras com o mesmo tempo de cura, conforme descrito anteriormente, não conferiu grandes alterações aos valores dos teores óptimos em água.

5.1.3.2. Ensaios “in situ”

O grau de compactação de cada faixa foi realizado com recurso ao gamadensímetro, de acordo com a metodologia de ensaio constante na norma ASTM D 6838 “Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods”, pontualmente aferido também pelo método da garrafa de areia de acordo com a Especificação do LNEC E204-1967 “Solo - Determinação da baridade seca “in situ” pelo método da garrafa de areia”.

Os valores obtidos pelo método da garrafa de areia, nas camadas do aterro experimental são resumidos no quadro abaixo.

Faixa	γ_w (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	GC – Grau de compactação (%)
A	20,1	12,9	17,8	98,8
B	19,8	12,1	17,6	99,9
C	19,7	12,6	17,5	98,2

Quadro 5.7 – Resumo dos parâmetros obtidos no ensaio de garrafa de areia

Considerando os valores do peso volúmico seco máximo obtidos sobre as amostras recolhidas nas faixas após a compactação, os valores do grau de compactação obtidos foram de 98,8, 99,9 e 98,2% respectivamente para as faixas A, B e C.

No quadro seguinte apresenta-se um resumo dos valores obtidos pelo método do gamadensímetro, nas camadas do aterro experimental.

Faixa	Prof. do ensaio (mm)	γ_w (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	GC – Grau de compactação (%)
A	200	20,9	13,2	18,5	96,2
	0	20,2	13,5	17,8	92,8
	200	20,8	12,4	18,5	96,2
	0	20,8	12,3	18,5	96,4
	200	20,6	14,7	17,9	93,4
	0	20,1	13,2	17,8	97,8
B	200	20,5	13,4	18,1	102,4
	0	19,7	15,2	17,1	96,8
	200	19,8	15,2	17,2	97,3
	0	19,6	13,1	17,3	97,9
	200	19,1	14,2	16,7	94,5
	0	19,3	13,9	17,0	96,2
C	0	19,8	14,1	17,4	97,5
	200	20,3	13,4	17,9	100,3
	0	19,5	14,5	17,1	95,9
	200	20,5	15,2	17,8	99,8
	0	19,2	13,2	17,0	95,3
	200	19,2	12,7	17,0	95,3

Quadro 5.8 – Resumo dos parâmetros obtidos no ensaio com gamadensímetro

Os valores obtidos nos ensaios com gamadensímetro evidenciam valores médios de 99,8, 97,4 e 97,6% de grau de compactação para as faixas A, B e C respectivamente. Estes valores de grau de compactação indicam que as faixas após compactação ficaram com um índice de vazios muito próximo do mínimo, para os solos em causa.

O ensaio de carga em placa consiste na aplicação de um conjunto conhecido de cargas a uma placa rígida, em regime de patamares, medindo os assentamentos que se verificam em consequência da aplicação das cargas.

O módulo de deformabilidade é dos parâmetros mais utilizados para traduzir as características mecânicas duma camada de pavimento na análise do seu comportamento. Em termos práticos, podemos dizer que este parâmetro é simultaneamente utilizado por donos de obra e por projectistas, quer para controlo de aterros, quer para o dimensionamento de pavimentos.

Os ensaios de carga em placa foram executados pela empresa MOTA-ENGIL, Engenharia e Construção, S.A., segundo a norma DIN 18134 - 2001 "Determinatio of deformation and strength

characteristics of soil by the plate loading test”, considerando-se escalões de carga máximos de 500 kPa e 450 kPa, na primeira carga e na recarga respectivamente.

Após a conclusão da execução do aterro experimental foram executados ensaios de carga em placa, ao fim de 1, 2 e 12 dias sobre o solo natural e com teores em cal de 2,0, 3,0 e 3,5%.

No quadro seguinte apresenta-se um resumo os valores obtidos nos ensaios de carga em placa executados no aterro experimental.

Tempo de cura (dias)	Teor em cal (%)	Módulo de deformabilidade (MPa)		K (EV ₂ / EV ₁)
		EV ₁	EV ₂	
1	Sem cal	38,8	90,9	2,3
	2,5	134,5	247,7	1,8
	3,0	224,1	434,2	1,9
	3,5	294,7	494,7	1,7
2	2,5	---	---	---
	3,0	335,5	511,7	1,5
	3,5	232,4	518,4	2,2
12	2,5	---	---	---
	3,0	425,4	797,5	1,9
	3,5	444,9	659,5	1,5

Quadro 5.9 – Resumo dos valores obtidos nos ensaios de carga em placa

Através da análise dos resultados obtidos na execução dos ensaios de carga em placa no trecho experimental, verifica-se um aumento da rigidez do material tratado com cal ao longo do tempo.

Na figura seguinte apresenta-se a evolução do módulo de deformabilidade em função do tempo e do teor em cal utilizado. De notar que, os ensaios de carga em placa foram executados tendo em consideração diferentes tempos de cura, designadamente um dia após a conclusão do aterro experimental no solo natural e com teores em cal de 2,5, 3,0 e 3,5% e ainda aos dois e doze dias, apenas para 3,0 e 3,5%. Não se efectuaram mais ensaios com diferentes tempos por impossibilidades logísticas e de obra.

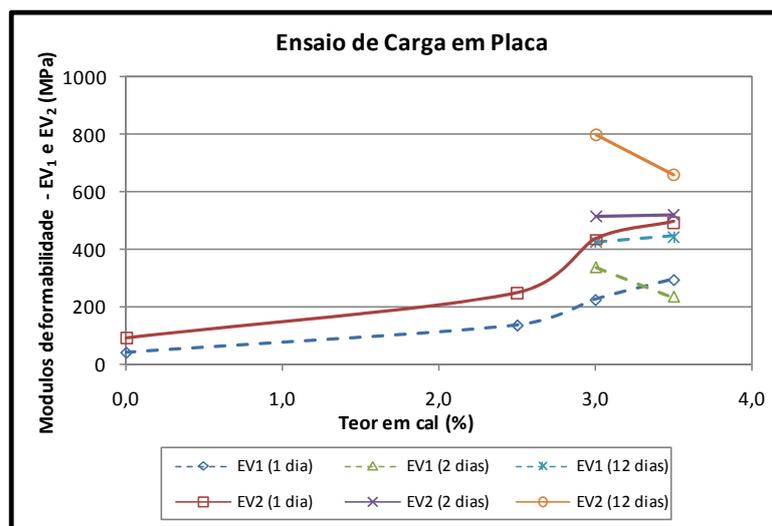


Figura 5.11 – Evolução da rigidez com o teor em cal em função do tempo de cura, para o aterro experimental

Tal como concluído por Cruz et al., 2008, as curvas dos ensaios executados um dia após a conclusão do aterro, evidenciam um aumento do módulo de deformabilidade mais acentuado de 2,5 para 3,0% de teor em cal, tendendo para o valor referente a 3,5% de cal, apresentando-se paralelas entre si.

Relativamente aos valores obtidos aos dois e doze dias de cura, verifica-se uma tendência de estabilização no módulo de deformabilidade em função do aumento de cal. O valor de EV_1 aos dois dias, para o teor em cal de 3,5%, não se revelou coerente, já que era de esperar que fossem superior assim como o valor de EV_2 aos doze dias para o teor em cal de 3,0%, que deveria ser inferior.

De uma forma global, verifica-se que os valores de EV_1 , que representam o modulo de deformabilidade real do material compactado, foram superiores a 130 MPa, enquanto os valores de EV_2 , que representam o valor limite de modulo de deformabilidade que o material pode atingir em condições de compactação ideais, foram sempre superiores a 254 MPa.

Já para teores em cal iguais ou superiores a 3,0%, verificou-se que os valores de EV_1 e EV_2 foram superiores a 220 MPa e a 430 MPa, respectivamente. Ao fim de 12 dias foi possível obter através dos ensaios executados valores de EV_1 e de EV_2 superiores a 400 MPa e 600 MPa, respectivamente.

Na figura seguinte apresenta-se a evolução da rigidez do material em função do tempo de cura para os maiores teores em cal estudadas, 3,0 e 3,5%, verificando-se um crescimento contínuo de ambos os módulos EV_1 e EV_2 .

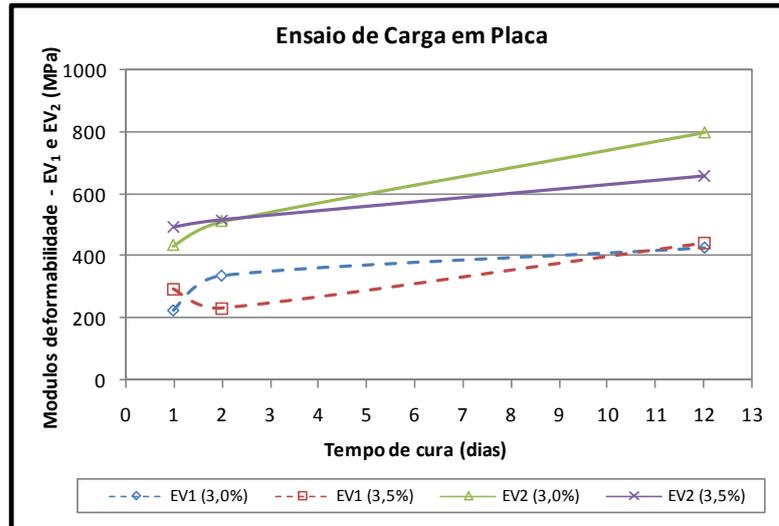


Figura 5.12 - Evolução da rigidez com o tempo de cura m função do teor em cal, para o aterro experimental

Os ensaios de campo, mais propriamente o ensaio de carga em placa, são de grande importância para a caracterização mecânica da camada e servem neste caso para comprovar que os ganhos de resistência verificados nos ensaios laboratoriais iniciais, nomeadamente os ensaios de compressão uniaxial, são reflectidos no material aplicado em obra.

6. CAPÍTULO – CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Introdução

Actualmente as dificuldades existentes e os custos acrescidos para substituir os solos existentes no local da obra por outros materiais de melhor qualidade obriga os donos de obra a procurarem soluções para melhorar os solos existentes. O tratamento de solos que em alguns casos não seriam nem sequer utilizados, ao serem melhorados com cal podem adquirir características muito superiores à dos materiais granulares tradicionalmente utilizados para a construção de leitos de pavimento. Apesar disso, nas obras portuguesas a construção de sub-bases e base de pavimentos rodoviários, continuam a ser realizadas com recurso a agregados de granulometria extensa (AGE) de origem granítica e calcária. Pese embora a existência no nosso país de um elevado número de unidades de extracção e produção destes materiais, esta não pode, nem deve ser encarada pela engenharia como a única solução técnica capaz de satisfazer as exigências de construção das infra-estruturas rodoviárias, uma vez que, apresenta claras desvantagens do ponto de vista económico.

Durante o processo de tratamento com cal são desencadeadas reacções predominantemente químicas entre os constituintes mineralógicos do solo e a cal. Estas reacções são responsáveis pela alteração de algumas características físicas como o teor em água, granulometria, plasticidade, compactação e resistência imediata, tendo reflexo na trabalhabilidade e, por isso, na boa gestão do estaleiro em obras de aterro.

Tendo em consideração as evoluções das resistências, verifica-se a possibilidade de estabilizar os tipos de solos estudados, que podem e devem ser encaradas com maior frequência, conseguindo-se assim projectos com melhor desempenho em termos de capacidade de carga e durabilidade e com menores custos ambientais devido à prevenção dos recursos naturais não renováveis. Os substanciais ganhos na resistência à compressão simples e a evolução dos parâmetros de resistência avaliados nos ensaios triaxiais, assim como o comportamento das curvas tensão deformação com a evolução do tempo de cura das misturas indicam que ocorre um processo interno responsável pelo desenvolvimento de ligações de cimentação entre partículas

Após a realização deste estudo fica a certeza que esta técnica de tratamento de solos deverá ser equacionada com maior frequência, evitando assim as soluções muitas vezes encontradas para trabalhar estes tipos de materiais, que passam por nada fazer e executar a obra com todas as limitações e dificuldades que estes tipos de materiais oferecem ao serem trabalhados no seu estado natural ou substituir estes solos por outros com melhores características ou por AGE's que conduzem normalmente a custos económicos e ambientais substancialmente superiores.

6.2. Principais conclusões

O trabalho desenvolvido procurou conhecer e avaliar as alterações, quer físicas quer mecânicas, de três tipos de solos, frequentemente encontrados nas obras geotécnicas em Portugal. A análise dos resultados obtidos na extensa campanha de ensaios laboratoriais de campo permitem tirar as seguintes conclusões:

- Modificação da granulometria dos solos no que diz respeito à sua fracção fina, mesmo no caso do solo mais arenoso (S100) em que a adição de cal praticamente eliminou a pequena fracção de partículas com dimensão inferior a 2 micros;
- Variação dos limites de consistência que em todos os casos levaram a uma diminuição dos índices de plasticidade. No caso do solo arenoso (S100) a adição de cal levou a que o solo se torne-se não plástico.
- Diminuição do índice de plasticidade mais evidente no caso dos ensaios realizados após 72 horas da mistura do solo com a cal, conseguida essencialmente pelo aumento do limite de plasticidade.
- O valor azul de metileno baixa com a adição da cal, registando-se uma diminuição significativa para teores em de 1,5% no caso do solos arenoso (S100) e siltoso (S300). As diferenças de valor de azul entre as 2 e as 72 horas apenas se registaram no caso do solo siltosos e com pequena variação de valores.
- Os valores de equivalentes de areia registam aumentos significativos com a adição da cal e diferenças de valor entre ensaios realizados 2 e 72 horas após a adição da cal, sendo os maiores valores observados para os ensaios realizados após 72 horas. Mesmo para os solos com uma componente arenosa importante (S100) os incrementos do valor de equivalente de areia são significativos.
- A adição de cal aos solos não contribui para uma diminuição ou aumento da densidade das partículas, mantendo-se os valores praticamente constantes com os diferentes teores em cal utilizados.
- Alterações da classificação passando estes a enquadrarem-se dentro de classes com melhores características e comportamento quando aplicados em camadas de aterros.
- Diminuição do peso volúmico secos máximo com o aumento da cal e um aumento do teor óptimo em água. Verificou-se também que os ensaios realizados após 72 horas da adição da cal apresentam valores de peso volúmico seco máximo inferiores e teores óptimos em água superiores aos solos compactados 2 horas após a adição de cal.

- Incrementa os valores de IPI mesmo com adições de apenas 1,5%, contudo os incrementos são mais significativos no solo de natureza argilosa (S200).
- Aumentos significativos dos valores de CBR. Estes aumentos são mais significativos no caso do solo argiloso (S200), contudo no caso do solo mais arenosos (S100) o valor praticamente triplica e quadruplica para teores de cal de 1,5 e 4,0% quando comparados com o solo natural.
- Diminuição da expansibilidade, registrando-se uma diminuição da ordem dos 40% no caso do solo mais argiloso (S200).
- Após um período de imersão de 4 dias verifica-se um aumento da relação entre o CBR e o IPI que constituem uma garantia da perenidade dos efeitos do tratamento.
- Desenvolvimento de reações pozolânicas que se traduzem em incrementos significativos das resistências à compressão simples.
- Os incrementos de resistência são dependentes da quantidade e tipo de argila presentes nos solos. Maiores incrementos para os solos de natureza argilosa (S200).
- O solo siltoso (S300), não plástico registou um aumento da resistência à compressão simples com o tempo de cura e com o teor em cal.
- Aumento dos valores de módulo de deformabilidade e diminuição da extensão axial na rotura com o tempo de cura e teor em cal.
- Influência das condições de cura no desenvolvimento das resistências mecânicas, nomeadamente o aumento da temperatura na aceleração as reações químicas;
- Existência de duas fases de crescimento da resistência à compressão simples e influência da temperatura no desenvolvimento da primeira fase;
- A imersão dos provetes em água a 1/3 da sua altura levou a quedas médias na resistência à compressão da ordem dos 50% no caso do solo estudado (S300).
- Incrementos dos valores de resistência à tracção com o tempo de cura e teor em cal.
- Os ensaios triaxiais realizados sobre o solo argiloso (S200) com adição de 4,0% de cal mostram:
 - Alteração do comportamento, passando a verificar-se uma resistência de pico e posteriormente uma resistência residual, comportamento típico dos solos sobre adensados ou com forte ligação entre partículas.

- Afastamento dos pontos onde se registam a plastificação e resistência última quando comparados com o solo natural.
- Aumento substancial dos parâmetros de resistência em especial do valor da coesão efectiva.

6.3. Desenvolvimentos futuros

Estudos comparativos de tratamento de solos versus utilização de materiais granulares sem tratamento, através de uma análise de custos económicos, energéticos e ambientais devem ser levados a cabo em obras de movimento de terras.

Tratamento de solos existentes em vazadouro com a finalidade de serem reutilizados em obras de aterros. Estes estudos ajudam a que sejam tomadas decisões mais fundamentadas e certamente contribuirão para a utilização mais frequente de técnicas de tratamento de solos.

Esta técnica tem actualmente uma larga utilização em inúmeros países, será sempre aconselhável importar o conhecimento já adquirido e reportar para a realidade dos solos existentes em Portugal.

Deve procurar-se estabelecer estudos enquadrando a adição de cimento, visando a sua aplicação em bases de pavimento, como substituição dos AGE's.

Estender os estudos a solos com diferentes tipos de argila de forma a avaliar a influência do tipo de mineral e avaliar a influência da quantidade de finos dentro do mesmo tipo mineralógico.

Alargar o estudo a solos residuais de xisto, dada a sua enorme frequência no país e não foi possível enquadrar neste trabalho.

Outro aspecto que parece igualmente importante para a utilização sustentada destes tipo de tratamento consiste no divulgar o conhecimento relativo à técnica de tratamento de solos com cal, seria então importante criar-se, a nível nacional, ou ao nível das entidades com mais relevo na contratação de obras de engenharia importantes, uma prática de identificação, estudo do comportamento e divulgação de informação relativa ao tratamento de solos com cal, como alias tem vindo a ser proposto a nível nacional (Fortunato, 2008). Um exemplo da importância desta realização, que levou a um aumento substancial destas técnicas de tratamento pode ser observado no caso do mercado Espanhol com a criação de associações do tipo das existentes, por exemplo em Espanha, como são a ANCADE e a ANTER.

Bibliografia

Duvigneaud, Paul-Henri (2008). Mineralogical and structural evolution. Communication du Seminário sobre Tratamento de solos com cal . Lisbon. Portugal

EVALUATION OF STRUCTURAL PROPERTIES OF LIME STABILIZED SOILS AND AGGREGATES
VOLUME 1: SUMMARY OF FINDINGS PREPARED FOR THE NATIONAL LIME ASSOCIATION by
Dallas N. Little January 5, 1999

TRB – State of the Art Report 5 – Lime Stabilization – Reactions, Properties, Design, and Construction
by Transportation Research Board Committee on Lime and Lime-Fly Ash Stabilization, Washington,
D.C. 1987

Little, D. N. (1995). Stabilization of Pavement Subgrades & Base Courses with Lime. Texas, USA.

Castelló, J. D. B. (2003). El tratamiento de suelos arcillosos mediante cal. Sevilha, Espanha

Coelho A.Z.; Torgal F.P.; Jalali S. (2009). A cal na construção , Edição TecMinho. ISBN:978-972-99179-8-1, Guimarães.

Matos Fernandes, M. (1994). Apontamentos de Mecânica dos Solos - Volume I. FEUP, Porto, Portugal.

Matos Fernandes, M. (1995). Apontamentos de Mecânica dos Solos - Volume II. FEUP, Porto, Portugal.

Elda de Castro e Antonio Serafim Luis (1974), Revista da SPG – Revista 10. “O solo cal na pavimentação de estradas e aeródromos”

Castelló J. D. B. (Madrid 2005) – “Crítérios de Selección y dosificación en lod tratamientos com cal”.

Normas e Especificações

AASHTO T 220 Standard Method of Test for Determination of the Strength of Soil-Lime Mixtures

ASTM D 6838 (2008) Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods”

DIN 18134 (2001) Determination of deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test

EN 13286-7:2004 “Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures

EN 13286-41 “Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures”

EN 13286-42 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 42: Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulically bound mixtures

EN 13286-47 (2004) “Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling”.

GTR (Septembre 1992a). Guide Technique: Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule I – Principes généraux. France.

GTR (Septembre 1992b). Guide Technique: Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule II – Annexes techniques. France

GTS (2000). Guide Technique: Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. France

LNEC (1966) – Especificação E196 – Solos. Análise granulométrica

LNEC (1971) – Especificação E 197 – Solos. Ensaio de compactação

LNEC (1967) Especificação E199 – Solos. Equivalente de areia

LNEC (1967) - Especificação E201 – Solos. Determinação do teor em matéria orgânica

LNEC (1967) Especificação E202 – Solos. Determinação da quantidade de sulfatos dum solo e da quantidade de sulfatos da água dum solo

LNEC (1967) - Especificação E203 – Solos. Determinação do pH

LNEC (1967) Especificação E204 – Solo. Determinação da baridade seca “in situ” pelo método da garrafa de areia

LNEC (1967) - Especificação E253 – Inertes para argamassas e betões. Determinação do teor em elementos solúveis

NF P 94-100 (1999). Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement.

NF P 11-300 -

NF P 94-068 -

NP 143 (1969) Solos. Determinação dos limites de consistência

NP EN 459-1 (2002) Cal de Construção: Definições, especificações e critérios de conformidade. Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 459-2 (2002). Cal de Construção: Métodos de ensaio. Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 459-3 (2002). Cal de Construção: Avaliação da conformidade. Norma Portuguesa. Instituto Português da Qualidade.

NP 83 (1965) Solos - Densidade das Partículas

Junta de Andalucía (2003). Consejería de Obras Públicas y Transportes - Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía. España.

Junta de Castilla y León (2004). Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos. España.

JAE (1998). Caderno de Encargos. Junta Autónoma de Estradas. Portugal.

PG3 (2004) – Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes.

TRB Report 5 (1987). Transportation Research Board - State of the Art Report 5. Lime Stabilization: Reactions, Properties, Design and Construction. Washington, USA.