

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Ciências da Terra

Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal

Mariana Fernandes da Silva
(Licenciada em Engenharia Geológica)

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas

Lisboa, Dezembro de 2010

Agradecimentos

Existem algumas pessoas e entidades que ajudaram a tornar possível a realização da presente dissertação. Gostaria de retribuir, agradecendo-lhes.

Ao professor Pedro Lamas, pelos ensinamentos e pela dedicação com que me orientou, sempre incansável na busca de um trabalho de qualidade superior.

À professora Teresa Santana, por me incitar a esforçar-me sempre mais.

À empresa Lusical, S. A., na pessoa do Dr. Mário Marques, pela prontidão com que se dispôs a fornecer informações e materiais essenciais para o desenvolvimento dos trabalhos laboratoriais.

Ao professor Fernando Pinho, pela disponibilidade demonstrada quando estabeleceu a ponte entre mim e a Lusical, S. A..

Ao professor Carlos Galhano, pelo auxílio nos trabalhos laboratoriais.

Ao Sr. Gaspar e ao Jorge, Técnicos do Departamento de Engenharia Civil, pela disponibilidade que sempre demonstraram em ajudar-me no decurso dos trabalhos laboratoriais.

Aos meus amigos, por fazerem parte da minha vida.

Quero dedicar um agradecimento especial ao meu colega e amigo Pedro Sousa por me ter ajudado em praticamente todas as fases deste processo, sempre com um sorriso.

E, por fim, aos meus pais, ao meu mano, e ao Luís, pelo apoio e paciência demonstrados ao longo do meu percurso académico, e por sempre me fazerem sentir capaz de tudo

Resumo

Com este trabalho pretende-se dar mais um contributo à temática da estabilização de solos com cal, não só no que diz respeito à sua evolução histórica e aos conceitos teóricos que a suportam, mas também apresentando casos práticos da sua aplicação.

A estabilização de solos com cal tem-se revelado um método eficaz, mas também ecológico e económico, na medida em que permite o aproveitamento dos solos existentes no local onde a obra será implementada, ao invés de substituí-los por outros, evitando despesas adicionais e impactes ambientais.

Neste estudo, foram utilizados dois solos argilosos de origens geocronológicas marcadamente distintas que, nas últimas décadas, têm sido cada vez mais solicitados por construções. Estes foram inicialmente caracterizados física e quimicamente de modo a determinar a sua adequabilidade a este tipo de estabilização. Numa segunda fase foi-lhes adicionada uma determinada quantidade de cal tendo sido, em seguida, sujeitos a uma cura acelerada a 40°C, de modo a potenciar o desenvolvimento das reacções químicas inerentes a este processo.

Foram então avaliadas as alterações ao nível da resistência mecânica dos solos imediatamente após a cura e também após um período de embebedimento de 24 horas de forma a simular a existência de condições ambientais adversas, tendo-se por fim verificado que um dos solos é francamente mais reactivo em relação ao efeito da cal do que o outro.

Abstract

The aim of this work is to contribute to the subject of soil stabilization with lime, not only in terms of its historical evolution and the theoretical concepts that support it, but also presenting some case studies of their application.

The soil stabilization with lime has proven to be not only an effective method, but also an ecologically and economically one, in the sense that it allows the use of “in situ” soils for constructions instead of replacing them with other soils, avoiding extra costs and environmental impacts.

In this study, two clayey soils with distinct geochronological origins were used, having both of them been increasingly requested by buildings during the last decades. These soils were initially physically and chemically characterized to assess their suitability for this type of stabilization. In a second phase, a certain amount of lime was added and, after that, the soils were cured, in an accelerated way, at 40°C, in order to promote the development of the chemical reactions involved in this process.

The mechanical strength changes of the soils were evaluated immediately after curing and also after a soakage period of 24 hours, to simulate the existence of adverse environmental conditions. It was found that one of the soils is clearly more reactive in relation to the lime effect than the other.

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

°C – grau Celsius

Å – angstrom (10^{-10} m)

cal – caloria

meq – miliequivalente

CBR – “Californian Bearing Ratio”

LL – limite de liquidez

LP – limite de plasticidade

IP – índice de plasticidade

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ASTM – “American Society for Testing and Materials”

NP – Norma Portuguesa

E – Especificação do LNEC

SIMBOLOGIA QUÍMICA

Ca – cálcio

Mg – magnésio

Al₂O₃ – óxido de alumínio

CaO – óxido de cálcio

CaCO₃ – carbonato de cálcio

Ca(OH)₂ – hidróxido de cálcio

CO₂ – dióxido de carbono

H₂O – água

MgCO₃ – carbonato de magnésio

MgO – óxido de magnésio

Mg(OH)₂ – hidróxido de magnésio

SiO₂ – dióxido de silício

Al³⁺ – ião alumínio

Ca²⁺ – ião cálcio

Cl⁻ - ião cloro

CO₃²⁻ – ião carbonato

Fe²⁺ – ião ferro

H⁺ – ião hidrogénio

HCO₃⁻ – ião bicarbonato

K⁺ – ião potássio

Li⁺ – ião lítio

Mg²⁺ – ião magnésio

Na⁺ – ião sódio

NH₄⁺ – ião amónio

NO₃⁻ – ião nitrato

O²⁻ – ião oxigénio

OH^- – ião hidróxilo

PO_4^{2-} – ião fosfato

Si^{4+} – ião silício

SO_4^{2-} – ião sulfato

Índice

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2	EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....	2
1.3	FORMAS DE APLICAÇÃO DA CAL NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	3
1.4	OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	5
2	MATERIAIS ENVOLVIDOS NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL.....	7
2.1	INTRODUÇÃO.....	7
2.2	PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ARGILAS.....	7
2.2.1	Generalidades.....	7
2.2.2	Unidades cristalinas básicas dos minerais argilosos	8
2.2.3	Minerais argilosos mais importantes.....	10
2.2.4	Outros minerais argilosos.....	14
2.2.5	Identificação dos minerais de argila através da difracção de Raios X.....	16
2.2.6	Superfície específica das partículas de argila.....	17
2.2.7	Suspensões coloidais de argila	17
2.2.8	Natureza eléctrica das partículas argilosas	18
2.2.9	Dupla camada iónica difusa	19
2.2.10	Capacidade de permuta iónica.....	20
2.2.11	Actividade das argilas	22
2.2.12	Expansibilidade	22
2.2.13	Interacção entre partículas argilosas.....	24

2.2.14	Floculação e dispersão.....	25
2.2.15	Hidratação das argilas.....	26
2.2.16	Potencial de sucção	27
2.3	PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA CAL	28
2.3.1	Generalidades.....	28
2.3.2	Caracterização dos diferentes tipos de cal	28
2.3.3	Propriedades mais importantes da cal para a estabilização de solos	30
3	MECANISMOS FÍSICO-QUÍMICOS ENVOLVIDOS NO TRATAMENTO DE UM SOLO COM CAL.....	33
3.1	INTRODUÇÃO.....	33
3.2	PRINCIPAIS REACÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS ENTRE O SOLO E A CAL	33
3.2.1	Generalidades.....	33
3.2.2	Permuta iónica e floculação	34
3.2.3	Acção de cimentação ou pozolânica	36
3.2.4	Acção de carbonatação.....	38
3.3	PRINCIPAIS CONDICIONALISMOS NO TRATAMENTO DE UM SOLO COM CAL.....	39
3.3.1	Generalidades.....	39
3.3.2	Tipo de solo.....	39
3.3.3	Tipo e quantidade de cal	40
3.3.4	Teor em água e peso volúmico	41
3.3.5	Condições de cura	42
3.3.6	Existência de sulfatos e matéria orgânica.....	43

3.3.7	Utilização de aditivos.....	44
3.3.7.1	Cloreto de sódio	44
3.3.7.2	Hidróxido de sódio.....	45
3.3.7.3	Carbonato de sódio	45
3.3.7.4	Cinzas volantes	45
3.4	MELHORAMENTO DE SOLOS COM CAL	46
3.4.1	Generalidades.....	46
3.4.2	Teor em água.....	46
3.4.3	Granulometria	46
3.4.4	Plasticidade.....	47
3.4.5	Expansibilidade	47
3.4.6	Compactação.....	48
3.4.7	Resistência mecânica e deformação.....	48
3.5	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL.....	50
3.5.1	Generalidades.....	50
3.5.2	Resistência mecânica	50
3.5.2.1	Resistência à penetração CBR.....	50
3.5.2.2	Resistência à rotura em compressão uniaxial.....	50
3.5.2.3	Resistência à rotura em compressão triaxial	52
3.5.2.4	Resistência à flexão	53
3.5.2.5	Resistência à tracção	53
3.5.2.6	Resistência à fadiga	54

3.5.3	Características elásticas.....	54
3.5.4	Permeabilidade	55
3.5.5	Durabilidade	56
4	MATERIAIS UTILIZADOS E METODOLOGIA ADOPTADA.....	59
4.1	INTRODUÇÃO.....	59
4.2	MATERIAIS UTILIZADOS.....	59
4.2.1	Solos argilosos.....	59
4.2.2	Cal	62
4.3	METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO ADOPTADA.....	63
4.3.1	Generalidades.....	63
4.3.2	Determinação do teor em matéria orgânica.....	64
4.3.3	Análise granulométrica e limites de Atterberg.....	65
4.3.4	Determinação da quantidade de cal necessária à estabilização.....	66
4.3.5	Ensaio de compactação	67
4.3.6	Ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial	67
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	71
5.1	INTRODUÇÃO.....	71
5.2	TEOR EM MATÉRIA ORGÂNICA.....	71
5.3	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E LIMITES DE ATTERBERG.....	73
5.4	QUANTIDADE DE CAL NECESSÁRIA À ESTABILIZAÇÃO.....	76
5.5	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	76
5.6	RESISTÊNCIA À ROTURA EM COMPRESSÃO UNIAXIAL	78

5.6.1	Análise individual de cada solo.....	79
5.6.2	Análise comparativa entre solos.....	81
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	85
	Bibliografia.....	87

Índice de figuras

Figura 1.1– Veículo munido com equipamento de mistura	3
Figura 2.1 – Unidade estrutural tetraédrica.....	8
Figura 2.2 – Unidade estrutural octaédrica.....	9
Figura 2.3 – Esquematização dos interestratificados regular e irregular.....	15
Figura 2.4 – Relação entre as forças e a distância entre partículas.....	25
Figura 3.1 – Diagrama da sequência das principais reacções físico-químicas que ocorrem na estabilização de um solo com cal.	34
Figura 3.2 – Ganhos imediatos na resistência CBR, em função do teor em água, num solo argiloso de baixa plasticidade.....	49
Figura 3.3 – Evolução da resistência à compressão uniaxial de uma mistura solo-cal	51
Figura 4.1 - Pormenor do local de recolha de amostras em Sesimbra.....	60
Figura 4.2 - Extracto da carta geológica de Portugal, na escala 1:50 000, com destaque na zona de recolha.....	60
Figura 4.3 - Pormenor do local de recolha de amostras nos Capuchos.....	61
Figura 4.4 - Extracto da carta geológica de Portugal, na escala 1:50 000, com destaque na zona de recolha.....	62
Figura 4.5 – Obtenção da granulometria da fracção fina pelo método de sedimentação.....	65
Figura 4.6 – Equipamento utilizado no ensaio de compactação e na fabricação dos provetes	67
Figura 4.7 – Alguns dos provetes ensaiados à rotura em compressão uniaxial: A – solo recolhido nos capuchos; B – Solo recolhido em Sesimbra; C – solo recolhido nos Capuchos com cal e sujeito a cura; D – solo recolhido nos Capuchos com cal, sujeito a cura e a 24 horas de embebedimento.....	69
Figura 4.8 – Pormenor do provete de solo recolhido em Sesimbra (fig. 4.7 – B), após a rotura	

.....	70
Figura 5.1 - Curvas granulométricas dos solos S e C.....	73
Figura 5.2 - Localização dos solos S e C na carta de plasticidade.....	75
Figura 5.3 - Curva de compactação do solo S.....	76
Figura 5.4 - Curva de compactação do solo C.....	77
Figura 5.5 - Gráfico tensão deformação obtido em ensaios de resistência à rotura em compressão uniaxial para os casos C, CC e CCE.....	80
Figura 5.6 - Gráfico tensão deformação obtido em ensaios de resistência à rotura em compressão uniaxial para os casos S, SC e SCE.....	80
Figura 5.7 - Gráfico tensão deformação obtido em ensaios de resistência à rotura em compressão uniaxial para os casos C, S, CC e SC.....	81
Figura 5.8 - Gráfico tensão deformação obtido em ensaios de resistência à rotura em compressão uniaxial para os casos CC, SC, CCE e SCE.....	82

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Superfície específica de alguns minerais argilosos.....	17
Quadro 2.2 – Capacidade de permuta catiónica de alguns minerais argilosos.....	21
Quadro 2.3 – Índice de actividade de alguns minerais argilosos.	22
Quadro 4.1 - Composição química da cal aérea hidratada - valores médios.....	63
Quadro 4.2 - Granulometria da cal aérea hidratada - valores médios.....	63
Quadro 5.1 – Nomenclatura adoptada para a identificação dos solos ensaiados.	71
Quadro 5.2 – Quantidade média (em percentagem) da mineralogia da fracção argilosa do solo S.....	72
Quadro 5.3 - Quantidade média (em percentagem) da mineralogia da fracção argilosa do solo C.....	73
Quadro 5.4 - Limites de consistência de ambos os solos.	74
Quadro 5.5 – Características físicas dos provetes sujeitos ao ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial.....	78
Quadro 5.6 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial.....	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desempenho a longo prazo de qualquer projecto construtivo depende da capacidade resistente do terreno subjacente. Solos instáveis podem criar problemas significativos quer em pavimentos quer em estruturas, e até pôr em risco a vida humana, daí advindo custos económicos e sociais elevados.

Os solos argilosos são materiais geotecnicaamente problemáticos cujo comportamento depende não só das suas características intrínsecas, mas também das condições do meio, muitas vezes sujeitas a alterações. Muitos dos problemas atribuídos aos solos argilosos advêm da forte interacção entre os minerais argilosos e a água.

Com vista a contrariar comportamentos geotécnicos deficientes dos solos argilosos, a cal pode ser utilizada para o seu tratamento a diferentes níveis, dependendo do objectivo a que estes se destinam.

O termo “tratamento de solos” é utilizado, geralmente, para designar um processo que consiste em modificar um determinado solo com o propósito de o utilizar para um fim específico. Consoante a finalidade do tratamento, a aplicação da cal pode consistir numa técnica de (Cruz, 2008):

- Melhoria – acção com resultados praticamente instantâneos, que consiste em melhorar as propriedades geotécnicas do solo. Esta operação permite apenas assegurar temporariamente determinados comportamentos dos materiais face a solicitações impostas.
- Estabilização – técnica utilizada para alterar significativamente, a médio e a longo prazo, as características dos solos, nomeadamente os argilosos. Traduz-se num endurecimento gradual da mistura ao longo do tempo, após a compactação.

A estabilização de solos com cal, para além de ser um método económico, permite obter melhorias ao nível da resistência mecânica, da deformabilidade e da permeabilidade, possibilitando a sua utilização, por exemplo, como camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Também se tem tornado um aspecto cada vez mais importante na concepção de projectos construtivos, na medida em que permite economizar e reduzir o impacte ambiental ao utilizar o solo existente no local de implantação da obra, ao invés de o substituir por outros de melhor qualidade. Não só se evita a extracção de matérias-primas não renováveis como se eliminam os malefícios ambientais decorrentes do transporte e

deposição dos materiais envolvidos.

1.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

O conjunto de técnicas que contribuem para o melhoramento geotécnico de solos é, provavelmente, um dos métodos construtivos mais antigos utilizados em Engenharia Civil e é ainda um dos que se encontra em maior desenvolvimento.

Actualmente, em todo o mundo, as técnicas de melhoramento de solos têm-se revelado cada vez mais importantes na resolução problemas graves de fundação, através da utilização de, por exemplo, explosivos ou energia de impacto, tratamento térmico do solo, ou sistemas de injeção de materiais cada vez mais engenhosos.

Van Impe (1989) distinguiu três grupos de técnicas de melhoramento de solos:

- Técnicas de melhoramento temporário de solo, ou seja, limitado ao período de construção;
- Melhoramento permanente de solo, em que as técnicas são aplicadas de forma a melhorar o solo natural sem a adição de materiais;
- Melhoramento permanente de solo recorrendo à adição de materiais.

No último grupo inclui-se a estabilização de solos com cal, técnica que remonta há cerca de 5000 anos atrás. As Pirâmides de Shersi no Tibete foram construídas utilizando misturas compactadas de argila e cal (Greaves, 1996).

No entanto, foi apenas no final dos anos 40 do século XX, nos EUA, que começaram a aplicar-se técnicas laboratoriais de Mecânica dos Solos para o estudo de misturas solo-cal. Algumas tentativas de empregar a estabilização com cal nos anos 20 e 30 falharam devido à falta de métodos de análise de solo e de controlo de construção.

A partir do início dos anos 50, esta técnica começou a ganhar popularidade, tendo sido empregue em milhares de quilómetros de auto-estradas e em grandes aeroportos. Desde então, propagou-se gradualmente para outros países, com especial destaque para a África do Sul, França e Japão. Outros países que empregam extensivamente esta técnica são o Brasil, a Austrália, Argentina, Alemanha, Bélgica e Suíça (Boynton, 1980).

Em Portugal, destacam-se os estudos desenvolvidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil durante as décadas de sessenta e setenta, visando a aplicação da cal na

construção de estradas e aeródromos. Mais recentemente, esta técnica de tratamento foi utilizada nas auto-estradas A2 (sublanço Almodôvar – São Bartolomeu de Messines) e A10 (sublanço Arruda dos Vinhos – IC11) realizadas pela Brisa em 2001 e 2005, respectivamente. Para além disso, pode-se indicar os trabalhos de terraplenagens envolvidos no projecto de modernização da Linha do Norte (sublanços Azambuja – Vale de Santarém e Entroncamento Norte – túnel de Albergaria) realizados em 2003 pela REFER (Cruz, 2008).

1.3 FORMAS DE APLICAÇÃO DA CAL NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

De um modo geral, a cal é utilizada para a construção e reparação de estradas, vias-férreas, plataformas industriais e comerciais, aeródromos, entre outros, melhorando as características mecânicas dos solos interessados.

Por regra, a cal é espalhada numa determinada área, adaptando-se o espalhamento ao modo de entrega: se a cal é disponibilizada em sacos, estes são repartidos e posteriormente abertos sobre a superfície a tratar; se a cal é fornecida em cisterna, ela é espalhada com o auxílio de um espalhador de dosagem volumétrica. Seguidamente, o solo é misturado com a cal através da utilização de um veículo munido com um equipamento de mistura (figura 1.1), sendo adicionada água caso seja necessária. Por fim, e após um período de espera, a mistura é compactada.



Figura 1.1– Veículo munido com equipamento de mistura (cortesia de Lusical, S. A.)

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem em conta o método acima descrito. No entanto, existem outras formas de aplicar a cal na estabilização de solos, nomeadamente

através da execução de estacas de cal e de colunas de solo estabilizado com cal.

As estacas de cal consistem em furos de pequeno diâmetro preenchidos com cal viva (CaO). Têm sido propostas como um método para melhorar a estabilidade de taludes e o seu efeito benéfico relaciona-se com o facto de estas secarem o solo envolvente. Este efeito vai-se dissipando com o tempo, ou seja, a longo prazo o solo irá retornar ao seu teor em água e pressão intersticial originais (Perry et al., 1996). Dados disponíveis acerca da migração da cal do furo para o solo envolvente sugerem que a cal apenas atravessa uma pequena distância. Assim, os benefícios causados pelas reacções solo-cal resumem-se a uma fina crosta em volta da estaca. Por estas razões, as estacas de cal apenas podem contribuir para a estabilidade de taludes a longo prazo em virtude de a resistência ao corte da estaca ser superior à resistência ao corte do solo onde estão instaladas (Perry et al., *op. cit.*).

Existem também estacas de cal reforçadas, isto é, que contêm uma barra de aço no centro. É evidente que estas estacas fornecem uma maior contribuição para a estabilização de taludes, devido à resistência ao corte adicional da barra de aço. Para além disso, a cal envolvendo a barra desempenha a útil função de oferecer alguma protecção contra a corrosão (Perry et al., *op. cit.*).

As colunas de solo estabilizado com cal foram desenvolvidas especificamente para melhorar a capacidade de carga e reduzir o assentamento de argilas moles. Este método consiste em remoldar solo *in situ* misturando-o, simultaneamente, com cal, através da utilização de injectores rotativos dotados de alhetas. A acção conjugada do remeximento e da injeção dá origem a uma coluna de solo estabilizado. O óxido e o hidróxido de cálcio são os produtos mais utilizados.

Na Europa é comum construírem-se colunas de solo-cal de 0,5m de diâmetro e até 10m de profundidade. No Japão, onde o método tem sido utilizado em importantes obras marítimas, as colunas de solo-cal chegam a atingir diâmetros de 1,75m e profundidades de 60m (LNEC, 1986).

No caso de se efectuarem aquelas colunas, é imperativo o estudo das características do solo. A existência de material orgânico é geralmente aceite como prejudicial e a presença de água intersticial numa quantidade moderada tem um efeito favorável. Nos últimos anos, para a estabilização de solos orgânicos, tem-se tentado, com sucesso, o uso de outros produtos tais como o gesso em mistura com a cal.

Devido ao facto de as colunas possuírem uma resistência ao corte maior do que a do solo onde estão instaladas, actualmente têm sido aplicadas em reforço de taludes e paredes de escavação. De facto, a resistência ao corte não drenada do solo estabilizado relativamente ao solo natural é cerca de 10 a 40 vezes superior, dependendo do valor inicial (Van Impe, 1989).

1.4 OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem como objectivo contribuir para a investigação da estabilização dos solos com cal. Mais especificamente, pretende-se analisar comparativamente a resposta de dois solos argilosos de origens geocronológicas distintas, quando sujeitos a este tipo de estabilização, de modo a determinar qual dos dois melhor reage a este tratamento e tentar descobrir as razões pelas quais tal acontece.

Para além do primeiro capítulo, o capítulo introdutório, onde este ponto se inclui, esta dissertação encontra-se organizada em mais 5 capítulos.

No segundo capítulo estão contempladas as características físico-químicas dos dois materiais envolvidos – solos argilosos e cal.

O terceiro capítulo diz respeito às reacções que ocorrem entre os referidos materiais, aos factores que as condicionam e aos seus efeitos práticos.

O quarto capítulo marca o início da parte prática deste estudo. Nele descrevem-se os materiais utilizados bem como os ensaios realizados no âmbito deste estudo.

No quinto capítulo é feita a apresentação e análise dos resultados dos ensaios descritos no capítulo anterior.

O sexto e último capítulo contém um resumo das principais conclusões e também recomendações para trabalhos futuros que possam complementar esta investigação.

2 MATERIAIS ENVOLVIDOS NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

2.1 INTRODUÇÃO

Gomes (1988) define solo como qualquer formação geológica superficial e móvel da crosta terrestre, originada por alteração mecânica, química e biológica das rochas.

Como neste estudo foram utilizados dois solos argilosos, neste capítulo serão apresentados os factores responsáveis pelo seu comportamento, nomeadamente os tipos de minerais argilosos existentes, bem como as suas características intrínsecas. Para além disso, serão também descritos os tipos de cal usualmente utilizados na estabilização de solos e as principais características que influenciam o referido tratamento.

A forma como se processam as reacções entre a cal e o solo na estabilização está dependente de todos estes parâmetros, tal como será explicado no decorrer desta dissertação.

2.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DAS ARGILAS

2.2.1 Generalidades

A definição de argila não consensual, adaptando-se à área de estudo de quem a define, mas pode ser descrita de uma forma genérica como uma rocha (no sentido geológico do termo) que, embora seja constituída essencialmente por minerais argilosos, pode conter outros minerais – minerais não argilosos – e também matéria orgânica e outras impurezas (Gomes, *op. cit.*)

Os *minerais argilosos* são os minerais constituintes e característicos das argilas, aos quais estas devem as suas propriedades. São geralmente cristalinos, tratando-se quimicamente de silicatos hidratados podendo conter catiões tais como Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , entre outros, e dispõem-se estruturalmente em camadas e folhas ou, mais raramente, em cadeias ou fitas. Gomes (*op. cit.*) salienta que, enquanto os minerais argilosos têm geralmente um diâmetro esférico equivalente (d.e.e.) $\leq 2 \mu m$, os minerais não argilosos estão praticamente ausentes nesta fracção granulométrica. Assim, uma forma de separar qualitativamente e, em certos casos, quantitativamente, estes dois grupos de minerais, é a separação granulométrica nas duas fracções: acima e abaixo de $2 \mu m$. Por outro lado, *material argiloso* pode ser definido como todo o material natural de granulometria

fina e de textura terrosa ou argilácea, independentemente de os minerais argilosos serem ou não seus componentes essenciais.

2.2.2 Unidades cristalinas básicas dos minerais argilosos

Para melhor compreender a sistemática dos minerais argilosos actualmente utilizada é necessário ter em conta algumas noções relativamente aos componentes básicos estruturais desses minerais.

Ao motivo básico que por repetição simétrica origina toda a estrutura do mineral dá-se o nome de *unidade estrutural*. Esta *unidade estrutural*, que pode ser tetraédrica ou octaédrica, compreende as *camadas estruturais* básicas e os *espaços intercamadas* ou *intercalares* e a ela corresponde a fórmula química unitária.

As *camadas estruturais* consistem no agrupamento de *folhas estruturais* que por sua vez compreendem átomos pertencentes a vários *planos atómicos*. Um *plano atómico* reúne os átomos que na estrutura do mineral argiloso se dispõem complanarmente.

Espaço intercamada é a designação do espaço existente entre *camadas estruturais* adjacentes, ocupado por certos catiões e/ou moléculas de água. A determinação por difracção de Raios X deste componente constitui o método mais importante utilizado na identificação dos minerais argilosos.

A unidade estrutural tetraédrica (figura 2.1) é constituída por quatro aniões de oxigénio, O^{2-} , igualmente distanciados de um catião de silício, Si^{4+} , formando um tetraedro. Assim, os átomos de oxigénio posicionam-se nos vértices do tetraedro e o de silício ocupa o seu centro. Os tetraedros dispõem-se hexagonalmente, de modo que as suas bases são complanares e os topos apontam todos na mesma direcção.

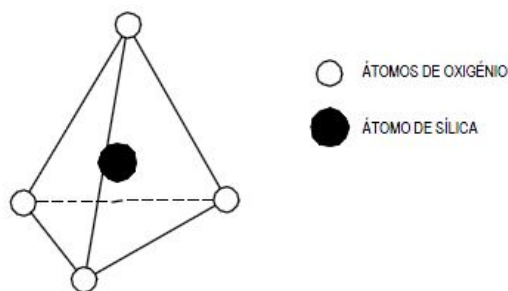


Figura 2.1 – Unidade estrutural tetraédrica (Cristelo, 2001).

Quanto à unidade estrutural octaédrica (figura 2.2), a mesma é constituída por seis aniões de oxigénio, O^{2-} , ou hidróxilo, OH^- , que se dispõem segundo os vértices de um octaedro, estando igualmente espaçados de um catião de alumínio, Al^{3+} , ou de magnésio, Mg^{2+} . Estas unidades básicas dispõem-se hexagonalmente através da partilha de hidróxilos ou oxigénios por octaedros vizinhos, dando origem a folhas estruturais octaédricas.

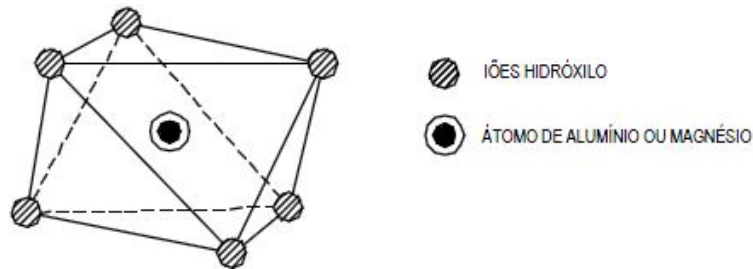


Figura 2.2– Unidade estrutural octaédrica (Cristelo, 2001).

As folhas octaédricas podem ser classificadas em folhas dioctaédricas ou folhas trioctaédricas. As primeiras são assim designadas quando os catiões trivalentes de alumínio ocupam dois terços das posições disponíveis, dando-se o nome de gibsite a cada camada estrutural assim obtida. Quando o magnésio ocupa todas as posições, as folhas chamam-se trioctaédricas e cada camada estrutural designa-se por brucite.

Com base no número e natureza das folhas estruturais existentes nas camadas estruturais estabelecem-se os tipos estruturais (1:1, 2:1, 2:1:1) (Gomes, 1988). Por exemplo, a combinação de uma folha tetraédrica com uma folha octaédrica dá origem a uma unidade estrutural do tipo 1:1, usualmente designada por unidade Te-Oc, enquanto que a combinação de duas folhas tetraédricas e uma folha octaédrica forma uma unidade estrutural do tipo 2:1 ou Te-Oc-Te.

Os minerais argilosos, geralmente cristalinos, são assim divididos em grupos sistemáticos consoante o modelo estrutural tridimensional segundo o qual os seus elementos mais frequentes – oxigénio, silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio, no estado iónico – se arranjam.

Dentro de cada um destes grupos, pode dar-se a substituição atómica isomórfica, muito comum nos minerais argilosos, que está na origem da diversidade de espécies existentes em cada grupo. Os parâmetros que condicionam a substituição iónica são a semelhança entre raios iónicos, cargas eléctricas e números de coordenação.

Todos os grupos de minerais argilosos são silicatos sendo que seis deles têm modelos

estruturais organizados em folhas e camadas, daí resultando a designação de filossilicatos, enquanto que o grupo restante, menos frequente, tem um modelo estrutural em forma de fita. A terminologia dos grupos está relacionada com a espécie mais comum e importante.

2.2.3 Minerais argilosos mais importantes

Os minerais argilosos podem ser cristalinos ou não cristalinos/fracamente cristalinos. Aqueles que foram considerados mais importantes para esta investigação incluem-se na categoria dos cristalinos e serão seguidamente descritos. Relativamente aos restantes far-se-à uma breve alusão.

Grupo da Caulinite

O grupo da caulinite compreende dois subgrupos: o subgrupo da serpentina, trioctaédrico, e o subgrupo da caulinite, dioctaédrico. No primeiro grupo, a antigorite e o crisótilo são as espécies mais frequentes enquanto que no segundo grupo, além da caulinite, a haloisite é outra espécie bastante frequente, tratando-se de uma forma hidratada. No conjunto, existem dez espécies distintas neste grupo, caracterizadas por diferirem em pequenos detalhes estruturais, na composição química e na morfologia (Gomes, 1988). Microfotografias obtidas com o microscópio electrónico revelam que as caulinites se apresentam na forma de cristais lamelares, geralmente com formas regulares pseudo-hexagonais, embora nalgumas espécies as lamelas tenham formas irregulares (Vallejo, 2002).

As camadas estruturais da caulinite são do tipo 1:1 (Te-Oc), constituídas pela associação de uma folha tetraédrica de sílica com uma folha octaédrica do tipo da gibsite ou da brucite. As camadas estruturais consecutivas estão ligadas através de ligações de hidrogénio entre átomos O^{2-} e grupos de OH^- de planos atómicos justapostos e o espaçamento entre elas é de cerca de 7\AA . Em média, num cristal de caulinite existem 40 a 50 camadas estruturais (Gomes, 1988).

As caulinites são argilas com poucas substituições isomórficas compensadas por catiões localizados exclusivamente à superfície das partículas. Este facto faz com que a caulinite tenha uma baixa capacidade de troca catiónica (cerca de 10 meq/100g) comparada com as outras argilas. Para a haloisite este valor é de cerca de 40 meq/100g. Embora a caulinite tenha uma baixa capacidade de troca catiónica, a sua capacidade de troca aniónica é maior

devido à presença de iões (OH)⁻ substituíveis e situados fora das lâminas estruturais (Deer et al., 2000).

Os minerais de caulinite têm um comportamento muito estável, uma vez que não é possível dar-se a hidratação das suas camadas estruturais. Isto acontece por duas razões: por um lado, o facto de a estrutura ser electricamente neutra ou de fraca electronegatividade perante a pequena, ou mesmo nula, substituição isomórfica dentro das camadas estruturais faz com que a adsorção superficial seja fraca; por outro lado, a pequena distância reticular não permite a entrada de água por entre as camadas estruturais. Assim, estes minerais são pouco ou nada expansivos.

A caulinite encontra-se preferencialmente em solos de regiões de climas quentes e húmidos de abundante precipitação e formam-se em ambientes de água ácida e de boa drenagem, com uma baixa relação sílica/alumina (Mineiro, 1978). Os minerais deste grupo formam-se principalmente por alteração hidrotermal ou por meteorização de feldspatos, de feldspatóides e de outros silicatos ou, de um modo geral, por alteração de rochas de tipos mais ácidos. A caulinite ocorre por vezes *in situ* mas, mais frequentemente, é um produto de alteração e transporte.

Grupo da Illite

Os minerais deste grupo são os mais frequentes nas argilas. As diferentes espécies deste grupo diferem entre si pelo tipo e grau de substituição isomórfica e no arranjo estrutural das suas camadas. A morfologia destes minerais ao microscópio electrónico mostra estruturas lamelares de forma alongada com bordos geralmente irregulares (Gomes, 1988).

As camadas estruturais da illite são do tipo 2:1, ou seja, consistem em estratos com um plano de catiões em coordenação octaédrica entre duas lâminas de tetraedros unidos e apontando para cima. As sucessivas camadas estruturais ligam-se entre si por catiões monovalentes, normalmente K⁺ e/ou Na⁺ (Neves, 1993). O módulo de repetição interestratos é de cerca de 10Å (Deer et al., 2000).

As illites têm uma baixa capacidade de troca de iões devido à presença de um número considerável de iões de potássio interestratos que impede a entrada na estrutura, não só de água e líquidos orgânicos, mas também de outros catiões. Admite-se que as trocas que se efectuam se dão, em grande medida, nas arestas dos cristais, onde há valências não completas. A capacidade de troca catiónica das illites varia geralmente entre 10 e 40

meq/100g e é, portanto, maior do que a da maior parte das caulinites mas menor que as da halosite, montmorilonite e vermiculite (Deer et al., *op. cit.*). Contudo, as ilites no solo são frequentemente formas degradadas deficientes em potássio, o que lhes confere uma elevada capacidade para retirar e fixar esse elemento.

As ilites são os minerais das argilas dominantes nos xistos argilosos e argilitos e ocorrem, também, noutras rochas sedimentares, tais como os calcários. As ilites dos sedimentos podem ter-se depositado como tal, depois da sua formação por meteorização de silicatos, principalmente feldspatos, mas em algumas ocorrências derivaram de alteração de outros minerais argilosos durante a diagénese. Estes minerais podem, também, ocorrer por degradação da moscovite ou por recristalização de sedimentos coloidais em condições apropriadas ou podem ter, também, origem hidrotermal, encontrando-se frequentemente nas zonas de alteração, nas imediações de nascentes termais ou de filões metalíferos (Deer et al., *op. cit.*). As experiências laboratoriais sugerem que a sua formação é geralmente favorecida por concentrações elevadas de alumínio e potássio e por condições alcalinas.

Grupo da Montmorilonite

Neste grupo, estão incluídas diversas espécies distribuídas por dois subgrupos: um dioctaédrico ao qual pertence a montmorilonite, espécie mais comum e importante, e outro trioctaédrico. Este grupo é também denominado grupo das esmectites devido à sua estrutura esméctica ou lamelar. O exame ao microscópio electrónico revela que as partículas fundamentais são lamelas extremamente finas que, na montmorilonite e na saponite, têm um contorno quase sempre irregular (Deer et al., 2000).

A estrutura das esmectites é do tipo 2:1, ou seja, compreende duas folhas tetraédricas de sílica que intercalam uma folha octaédrica em que o catião coordenado é normalmente o Al^{3+} ou o Mg^{2+} .

Os minerais deste grupo exibem uma propensão para fenómenos de expansibilidade intracristalina que tanto pode ser consequência da entrada de moléculas de água no interior das camadas estruturais como da substituição dessa água intercalar por moléculas orgânicas. Quando este fenómeno acontece dá-se a expansão da estrutura da montmorilonite, o que faz com que o espaçamento entre camadas estruturais adjacentes seja variável. Assim, a gama de espaçamentos basais que pode ser encontrada é contínua desde 10Å até aproximadamente 21Å.

Nestes minerais ocorrem substituições isomórficas que conduzem a um excesso de

cargas negativas que tende a ser equilibrado pela adsorção de catiões. Segundo Gomes (1988), os catiões de troca mais vulgares são Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Assim, as montmorilonites têm uma elevada capacidade de troca catiónica – geralmente da ordem de 80-150 meq/100g, – devido ao alto grau de substituição isomórfica.

As esmectites ocorrem como produtos de acção hidrotermal, em torno de filões ou jazigos metalíferos ou próximo de nascentes termais e “geysers”, mas também se encontram abundantemente em solos e em xistos argilosos (muitas vezes misturadas com ilites) que resultaram da meteorização de rochas básicas. Outros factores que favorecem a formação de esmectites são um ambiente alcalino, a disponibilidade de cálcio e a escassez de potássio. Particularizando, pode dizer-se que a montmorilonite resulta da meteorização de rochas básicas em condições de fraca drenagem, onde o magnésio não é removido; a saponite ocorre principalmente associada a filões de minérios mas também em cavidades amigdalóides em basaltos e a nontronite encontra-se tanto em filões mineralizados, como sob a forma de um produto de alteração de vidros vulcânicos (Deer et al., 2000).

Grupo da Clorite

As camadas estruturais da clorite são do tipo 2:1 (Te-Oc-Te), intercaladas de uma forma regular com outra folha octaédrica (folha intercamada) em que o catião coordenado é, normalmente, Mg^{2+} , podendo ser também Fe^{2+} ou Al^{3+} e, menos frequentemente, Li^+ ou Mg^{2+} . As clorites são, na sua maioria, trioctaédricas mas também podem ser di-trioctaédricas ou ainda, mais raramente, dioctaédricas. As camadas estruturais consecutivas estão fortemente ligadas umas às outras por iões hidratados de Mg, Al ou Fe. O espaçamento entre camadas estruturais é de cerca de 14Å (Gomes, 1988).

Devido à substituição nas folhas tetraédricas de Si^{4+} por Al^{3+} , as camadas estruturais de clorite têm pequena carga eléctrica negativa. Essa carga é compensada pela substituição de iões bivalentes por trivalentes nas folhas intercamadas. As clorites têm baixa capacidade de troca iónica (Neves, 1993).

Nas argilas, a clorite ou é um mineral herdado das rochas magmáticas e metamórficas ou é produto secundário formado pela alteração da biotite, hornblenda ou outros silicatos ferromagnesianos (Gomes, 1988).

Grupo da Vermiculite

A estrutura da vermiculite consiste na repetição de folhas trioctaédricas de alumina entre duas folhas tetraédricas de sílica, separadas por moléculas de água orientadas que podem solvatar determinados catiões permutáveis. A maior parte das vermiculites são trioctaédricas (Gomes, *op. cit.*).

O espaçamento entre camadas estruturais sucessivas modifica-se consoante o grau de solvatação do catião de troca, podendo variar entre 10Å e 15Å.

A vermiculite possui a capacidade de troca iónica mais elevada de entre todos os minerais de argila.

Existem dois modos principais de ocorrência da vermiculite. Um deles é como produto de alteração da biotite, tanto por meteorização como por acção hidrotermal, surgindo na forma de grandes cristais pseudomórficos ou como constituinte argiloso de certos solos. O outro modo é na região de contacto entre rochas intrusivas ácidas com básicas ou ultrabásicas. Mais raramente, surgem em sedimentos marinhos derivando de origens não micáceas tais como materiais vulcânicos, clorite e hornblenda e também se encontram associadas com carbonatitos e em calcários metamorfizados (Deer et al., 2000).

2.2.4 Outros minerais argilosos

Existem outros grupos de minerais argilosos que, tais como os anteriores, são cristalinos, como é o caso do grupo dos interestratificados e do grupo da paligorskite e sepiolite. A alofana e imogolite são minerais argilosos fracamente cristalinos. São escassos os minerais argilosos não cristalinos ou fracamente cristalinos e, como tal, deficientemente caracterizados. Tratam-se de silicatos hidratados de alumínio e ferro com conteúdos de água variável.

O grupo dos interestratificados compreende modelos estruturais variados que são intermediários ou mistos dos 5 grupos anteriormente descritos e que representam estados metaestáveis ou de transição que surgem geralmente na evolução ou transformação de um mineral noutro. Os minerais interestratificados são aqueles que resultam do empilhamento de duas ou mais camadas estruturais próprias dos diferentes grupos supracitados.

Os interestratificados podem ser regulares ou irregulares, conforme se esquematiza na

figura 2.3, onde A e B representam duas camadas estruturais-tipo distintas. Os interestratificados regulares possuem uma estrutura com organização periódica própria das espécies minerais reais e, portanto, são designados por nomes específicos. Por outro lado, na nomenclatura dos interestratificados irregulares intervêm os nomes ou as iniciais dos nomes das espécies identificadas como intervenientes na sua organização, escrevendo-se em primeiro lugar a mais participativa (Gomes, 1988).

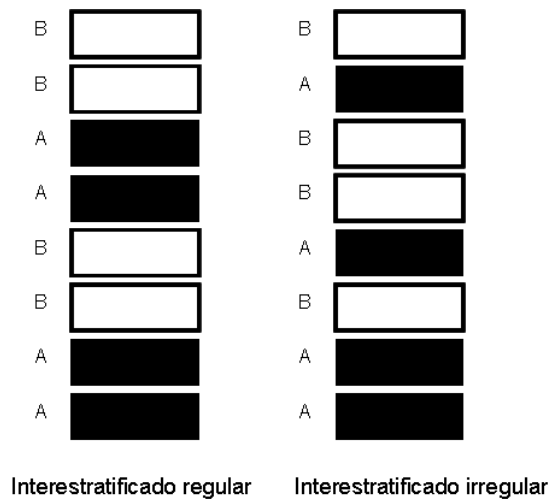


Figura 2.2 – Esquematização dos interestratificados regular e irregular (adaptado de Gomes, 1988).

Os modelos estruturais da paligorskite e sepiolite são bastante diferentes dos grupos anteriores uma vez que os seus cristais têm hábitos fibrosos. Ao invés de camadas, as unidades estruturais são uma espécie de fitas que estão ligadas entre si pelas arestas longitudinais, apresentando uma estrutura semelhante à de um conjunto de calhas dispostas paralelamente ao comprimento e, alternadamente, com a concavidade para cima e para baixo. Entre as cadeias de sílica existem vazios que constituem canais geralmente ocupados por moléculas de H₂O. Esta estrutura confere aos minerais propriedades coloidais de absorção específicas.

Quando a paligorskite e a sepiolite, que ocorrem muitas vezes associadas, formam capas à superfície do solo, tal tipo de ocorrência é conhecido pela designação de lã ou couro das montanhas. O tipo maciço de sepiolite é denominado “meerscham”.

A alofana é um alumino-silicato hidratado com modelo estrutural semelhante ao da caulinite mas com defeitos, tais como omissões de Si nas folhas tetraédricas. Morfologicamente apresenta-se sob a forma de pequeníssimas esférulas (Gomes, 1988). As

suas partículas têm uma elevada capacidade de permuta iónica, conferindo-lhes uma elevada actividade e sensibilidade (Mineiro, 1978).

Os minerais de alofana surgem muitas vezes associados aos minerais de haloisite (subgrupo da caulinite) e resultam da alteração de cinzas vulcânicas em condições de boa drenagem.

A imogolite é um alumino-silicato hidratado, em que a relação entre folhas tetraédricas de sílica e folhas octaédricas de gibsite varia entre 1-1,5 e o número de moléculas de água varia entre 2-3 (Gomes, 1988). Apresenta-se sob a forma de fibras muito finas (cerca de 20Å de diâmetro), devendo possuir, deste modo, uma estrutura em cadeia. Desenvolve-se particularmente através da meteorização de cinzas vulcânicas.

2.2.5 Identificação dos minerais de argila através da difracção de Raios X

Os minerais argilosos, devido à pequena dimensão dos seus cristais, associada à variabilidade das suas respectivas formas e arranjos estruturais, necessitam do emprego de várias técnicas e métodos analíticos para a respectiva identificação, caracterização e quantificação.

A difracção de Raios X (DRX) é a técnica que fornece informações mais amplas, precisas e detalhadas quanto à qualificação, caracterização e quantificação dos minerais presentes numa argila (Gomes, 1988). Para além disso, trata-se de um método de análise não destrutivo, versátil e rápido. A única limitação da DRX é não ser adequada a minerais não cristalinos ou fracamente cristalinos.

O mecanismo de difracção das ondas electromagnéticas ocorre porque os elementos (átomos) das partículas argilosas absorvem a radiação X incidente e depois tornam-se em fontes secundárias emissoras de electrões.

Cada mineral possui a sua própria estrutura e o diagrama de DRX respectivo, denominado difractograma, mostra o modelo de difracção da radiação X nos planos estruturais. A cada espécie mineral cristalina corresponde um modelo de difracção específico, a partir do qual ela pode ser identificada.

A determinação das quantidades dos minerais presentes na amostra baseia-se na relação existente entre a proporção em peso de um mineral na mistura com outros minerais

e a sua intensidade de difracção, embora, na prática, esta relação seja difícil de determinar. Existem alguns tratamentos a que as amostras necessitam de ser submetidas de modo a melhorar a definição dos difractogramas. Entre esses tratamentos inclui-se a extracção de carbonatos e de matéria orgânica.

Os difractogramas são interpretados recorrendo a quadros, fichas e informação suplementares, disponíveis em publicações diversas.

2.2.6 Superfície específica das partículas de argila

A superfície específica das argilas define-se como a área da superfície externa somada à área da superfície interna (caso esta exista) das partículas constituintes, por unidade de massa (Vallejo, 2002) e é expressa em m^2/g .

As argilas possuem superfícies específicas elevadas devido à forma lamelar das suas partículas e às suas pequenas dimensões. O quadro 2.1 mostra o valor das superfícies específicas de alguns minerais argilosos. Verifica-se que a esmectite possui uma superfície específica total muito superior às dos restantes minerais argilosos apresentados.

Quadro 2.1 – Superfície específica de alguns minerais argilosos
(adaptado de Vallejo, 2002).

Mineral	Superfície específica (m^2/g)		
	Externa	Interna	Total
Esmectite	50	750	800
Illite	25	2	27
Caulinite	15	0	15

2.2.7 Suspensões coloidais de argila

A adição de uma determinada quantidade de argila a uma certa quantidade de água leva à formação de uma solução do tipo coloidal, visto que as partículas argilosas não se

depositam imediatamente.

Os colóides podem ser liofílicos (atraídos ou com afinidade para o meio dispersante) ou liofóbicos (repelidos pelo meio dispersante). Os primeiros são muito estáveis, adsorvem o meio dispersante e desenvolvem viscosidades elevadas. Os segundos são menos estáveis, não adsorvem o meio dispersante e desenvolvem viscosidades reduzidas (Gomes, 1988). Quando o meio dispersante é a água, os colóides designam-se por hidrofílicos e hidrofóbicos e as soluções coloidais por hidrofílicas e hidrofóbicas. De um modo geral, as argilas comportam-se como colóides liofóbicos, embora algumas possuam certas propriedades dos colóides liofílicos.

As suspensões coloidais argilosas exibem os efeitos Tyndall e Browniano. O efeito Tyndall consiste num efeito óptico observado nas soluções coloidais. Quando estas são observadas à transparência contra uma fonte luminosa, parecem perfeitamente límpidas mas, observando-as contra um fundo escuro, verifica-se a existência de alguma perturbação. Este fenómeno é o efeito da dispersão, em todas as direcções, de parte da luz incidente sobre as partículas.

Por seu lado, o efeito Browniano consiste na movimentação das partículas sólidas da suspensão. Isto acontece porque as moléculas do meio dispersante exibem movimentos térmicos, com amplitudes dependentes da temperatura e, ao embaterem nas partículas sólidas, provocam a sua deslocação.

Assim, as partículas colidem umas com as outras, separando-se em seguida. No entanto, a adição de um determinado tipo de sal faz com que, ao invés de se separarem, as partículas se aglomerem em flocos que irão sedimentar mais rapidamente. Este fenómeno denomina-se floculação ou coagulação.

2.2.8 Natureza eléctrica das partículas argilosas

No interior de uma partícula argilosa as cargas estão em equilíbrio. Isso não acontece à superfície visto que não existem iões no exterior que permitam equilibrar os iões adjacentes à superfície. Assim, na superfície das partículas existem cargas eléctricas por equilibrar.

Os cristais dos minerais argilosos exibem uma carga eléctrica globalmente negativa. Isto pode ser demonstrado através do fenómeno de electroforése. Quando é aplicado um campo eléctrico a uma suspensão coloidal de argila, observa-se que as partículas de argila se

dirigem para o pólo positivo.

Segundo Gillot (1987, *in* Neves, 1993), esta carga eléctrica pode resultar de certas imperfeições, tais como posições incompletas ou valências não equilibradas causadas por substituições isomórficas na estrutura cristalina, da adsorção física ou química de iões em radicais activos e da adsorção de iões na estrutura da partícula. Embora, teoricamente, as cargas devessem estar uniformemente distribuídas pelo exterior da partícula, verifica-se que, nas argilas, isso não acontece.

Às faces dos cristais lamelares estão associadas cargas negativas, enquanto que os bordos dos cristais podem ser globalmente neutros, positivos ou negativos (Gomes, 1988). Uma vez que a superfície das faces é muito maior do que a dos bordos, a comparticipação da carga eléctrica negativa é muito maior. Assim se explica a electronegatividade global das partículas argilosas.

2.2.9 Dupla camada iónica difusa

A pequena dimensão, grande superfície específica e elevada carga das partículas argilosas conferem-lhes a possibilidade de adsorver catiões disponíveis existentes no ambiente ou líquidos polarizáveis como a água.

Os catiões são atraídos para a superfície das partículas argilosas devido à carga predominantemente negativa que estas apresentam, de modo a promover o equilíbrio de cargas. Estes iões não estão dispostos de forma ordenada na superfície da partícula, mas antes de forma difusa. Esta difusão deve-se à repulsão entre cargas do mesmo sinal que gera uma agitação térmica dos catiões (Neves, 2009).

As moléculas de água têm uma estrutura dipolar, o que faz com que sejam atraídas tanto pelos catiões como pela superfície das partículas argilosas carregadas negativamente. Para além disso, o facto de a concentração iónica em torno das partículas de argila se tornar superior à concentração do ambiente circundante gera um gradiente proporcional à diferença de concentrações.

Segundo Neves (*op. cit.*), como resultado destes fenómenos gera-se uma camada difusa que rodeia as partículas argilosas e que é constituída por:

- água retida por ligações de hidrogénio e/ou atraída pelo gradiente de difusão;

- uma camada difusa de catiões, atraídos pela carga negativa da superfície de argila, e aniões, atraídos pelos catiões e pelas moléculas dipolares de água.

Algumas propriedades das argilas, tais como a expansibilidade, a plasticidade e a hidratação podem ser interpretadas com base no conceito da dupla camada iónica difusa.

O conjunto formado pela partícula argilosa e respectiva camada iónica denomina-se micela. A solução micelar é a solução que contém os iões da dupla camada e a solução intermicelar é a solução exterior contendo os iões livres (Castro, 1974 *in* Neves, 1993).

É de salientar que a espessura da camada difusa de água depende do tipo e concentração de catiões existentes no meio. Os catiões com maior valência são mais eficazes a equilibrar as cargas negativas das partículas argilosas. Assim, por exemplo, uma camada difusa constituída por catiões divalentes e água é mais pequena do que outra formada por catiões monovalentes e água.

2.2.10 Capacidade de permuta iónica

A capacidade de troca catiónica de um mineral argiloso corresponde ao quantitativo máximo de catiões que ele pode permutar. De modo a equilibrar as cargas negativas que predominam nas partículas argilosas, estas tendem a atrair catiões existentes nos sais dissolvidos na água intersticial. Estes mantêm-se ligados à superfície das partículas por ligações débeis, podendo assim ser facilmente substituídos por outros (Lemos, 1999 *in* Cristelo, 2001). A grande superfície específica dos minerais argilosos e a possibilidade de rotura das estruturas laminares em partículas pequenas contribuem para aumentar a possibilidade de adsorver catiões permutáveis.

Aqueles catiões permutáveis possuem diferentes valências, o que condiciona a facilidade com que são atraídos. Por norma, são preferidos os de valência superior. No caso de estarem presentes iões com a mesma valência, os menos hidratados (raio iónico maior no estado não hidratado) são os que têm maior poder de substituição, ou seja, os de maiores dimensões são os de mais difícil permuta. Assim, podem ordenar-se os catiões de forma crescente, quanto à sua capacidade de permuta (Neves, 1993):



Isto significa que qualquer ião à direita pode substituir outros situados à sua esquerda. A

este processo dá-se o nome de permuta de catiões.

A capacidade de permuta catiónica exprime-se normalmente em miliequivalentes por 100g de solo seco (meq/100g) e varia consoante a natureza dos minerais argilosos. O número de catiões permutáveis que são substituídos depende ainda do nível de concentração de iões na solução envolvente e do pH do meio.

No quadro 2.2 apresentam-se os valores da capacidade de permuta catiónica para alguns dos minerais argilosos mais importantes.

Quadro 2.2 – Capacidade de permuta catiónica de alguns minerais argilosos
(adaptado de Vallejo, 2002).

Mineral	Capacidade de troca catiónica (meq/100g)
Esmectite	80 – 150
Illite	10 – 40
Caulinite	1 – 10

As reacções de permuta aniónica consistem na substituição de aniões existentes na solução micelar por outros aniões contidos na solução intermicelar. Segundo Jeremias (1991), os aniões mais frequentes nos minerais das partículas argilosas são SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{2-} e NO_3^- . De um modo geral, o mecanismo de permuta aniónica dá-se, principalmente, nos grupos de hidróxidos da superfície das partículas argilosas e está condicionado pela geometria do anião relativamente à geometria da unidade estrutural do cristal de argila (Neves, 1993). Se os aniões possuírem um tamanho ou uma geometria que não permita a sua integração no interior das folhas tetraédricas, então não poderão ser absorvidos.

A capacidade de permuta aniónica das argilas tem uma importância menor do que a capacidade de permuta catiónica, o que leva a que esse tema esteja menos estudado. Na verdade, em alguns minerais argilosos, como é o caso dos filossilicatos com uma estrutura do tipo 2:1, a capacidade de troca aniónica é muito inferior à capacidade de troca catiónica. Este é o caso das montmorilonites, por exemplo. No caso das caulinites, as permutas catiónica e aniónica são semelhantes.

2.2.11 Actividade das argilas

Raramente um solo é constituído apenas por argilas puras, possuindo geralmente granulometrias extensas onde a argila ocupa apenas uma parte. No entanto, muitos solos são vulgarmente designados como argilas, uma vez que basta uma pequena fracção desse material para influenciar o seu comportamento, embora essa influência seja atenuada pelas fracções mais grosseiras.

Skempton, em 1953 (*in* Vargas, 1978), sugeriu uma forma de quantificar a influência da fracção argilosa no comportamento do solo, introduzindo a noção de actividade coloidal (A_c). A actividade coloidal relaciona o carácter plástico do solo, traduzido no valor do seu índice de plasticidade, com a fracção argilosa que os mesmos contêm, sendo definida pela seguinte expressão:

$$A_c = \frac{IP}{\% \text{ argila} (< 2 \mu m)} \quad (2.1)$$

A actividade do solo depende também da sua história geológica, da presença de matéria orgânica e também da composição textural.

A noção de actividade das argilas está relacionada com o conjunto de propriedades específicas do comportamento destes minerais, sendo que uma argila é tanto mais activa quanto maior é a sua expansibilidade, deformabilidade e resistência. O quadro 2.3 mostra os valores mais frequentes de actividade de alguns dos minerais argilosos mais importantes.

Quadro 2.3 – Índice de actividade de alguns minerais argilosos (Gomes, 1988).

Mineral	Índice de actividade de Skempton
Esmectite	0,5 – 7
Ilite	0,23 – 0,58
Caulinite	0,01 – 0,41

2.2.12 Expansibilidade

A expansão de um solo pode ser definida como o aumento do seu volume por absorção de água, sendo a fracção argilosa do solo a responsável por este fenómeno. A secagem do

solo origina por sua vez a sua retracção, o fenómeno inverso.

A expansibilidade é, essencialmente, um fenómeno físico-químico de grande complexidade, embora também possa estar associada a causas mecânicas. O fenómeno de expansibilidade nas argilas é explicado com base nas forças existentes entre partículas e entre camadas estruturais.

Os mecanismos de expansibilidade físico-químicos podem ser intercrystalinos ou intracrystalinos e osmóticos.

A expansibilidade intercrystalina dá-se quando a absorção de água se faz através das superfícies externas dos cristais dos minerais argilosos e dos vazios entre esses cristais. A expansibilidade intracrystalina ocorre quando a absorção de água é possível no interior dos cristais, entre as camadas estruturais. A água absorvida forma sucessivas monocamadas sobre as partículas dos minerais argilosos, afastando as partículas ou as unidades estruturais daqueles minerais (Neves, 1993). A ilite apresenta expansibilidade intercrystalina devido à forte atracção electroestática gerada pelos iões monovalentes K^+ que ligam as camadas estruturais e não permitem a entrada de água. A expansibilidade intracrystalina é exibida pela montmorilonite, vermiculite, clorite expansiva e alguns minerais interestratificados.

A interacção entre as duplas camadas eléctricas dos minerais argilosos é o principal mecanismo responsável pelas pressões de expansão que constituem a expansibilidade osmótica. Este tipo de expansibilidade é o que origina as maiores variações de volume.

A expansibilidade osmótica depende da natureza dos catiões permutáveis. As argilas em que o catião permutável é o sódio exibem uma expansibilidade muito maior de que aquelas em que esse papel é assumido pelo cálcio. Assim, a adição de produtos à base de cálcio, nomeadamente a cal, é um dos processos existentes para diminuir a expansibilidade das argilas, embora nem todos os minerais argilosos apresentem este tipo de expansibilidade, especialmente os minerais de maiores dimensões.

As argilas montmoriloníticas são as que apresentam maior expansibilidade. Isto pode ser explicado pelo facto de, quando uma partícula de montmorilonite contacta com água, as moléculas de água penetrarem entre as camadas estruturais, fazendo aumentar o espaçamento basal de tal modo que o volume da partícula pode duplicar.

As caulinites são argilas que não exibem expansibilidade de natureza físico-química. A reduzida distância entre camadas estruturais impede a entrada de água e o fraco

potencial eléctrico implica uma fraca adsorção superficial. Se ocorrer expansão nas caulinites, ela será de origem mecânica.

Como nos solos tendem a existir vários tipos de argilas em proporções variáveis, existe uma vasta gama de expansibilidades. O interesse do seu conhecimento reside em permitir uma avaliação quantitativa dos problemas que possam advir da utilização de solos expansivos como material de construção.

2.2.13 Interação entre partículas argilosas

As forças internas entre partículas argilosas podem ser de dois tipos: atractivas ou repulsivas. Para um dado solo, as cargas eléctricas que se estabelecem na superfície das partículas estão directamente relacionadas com a área dessas superfícies. No entanto, a influência daquelas cargas sobre o comportamento das partículas tem uma relação directa com a superfície específica. Ou seja, quanto maior a superfície específica, maior a tendência para o comportamento das partículas ser controlado pelas forças superficiais em detrimento das forças mássicas (Cristelo, 2001).

As forças atractivas entre partículas argilosas devem-se principalmente às forças de Van der Waals. Estas são forças atractivas que existem entre todas as moléculas de uma partícula mas também entre as moléculas de cada partícula e as de outra partícula vizinha.

Para pequenas distâncias as forças de Van der Waals variam inversamente com o cubo da distância enquanto que, para distâncias maiores, variam inversamente com a quarta potência. Assim, embora este tipo de ligações moleculares tenham pequena energia, desempenham um papel essencial na formação da resistência estrutural dos minerais argilosos, podendo atingir um raio de acção da ordem dos milhares de Å (Neves, 1993).

As forças repulsivas existentes entre as partículas argilosas são de natureza eléctrica e têm origem na interpenetração das camadas difusas de partículas adjacentes. A intensidade da repulsão depende directamente da espessura dessas mesmas camadas.

Se o espaçamento entre partículas for inferior a 15Å não é possível a formação da camada difusa em torno de cada partícula e a atracção devida às forças de Van der Waals aumenta. Se o espaçamento entre partículas exceder esse valor, dá-se a formação da camada difusa em torno de cada partícula, o que irá causar um excesso de concentração de cations entre as duas superfícies, relativamente à solução exterior. Assim, a água passa a

mover-se por actividade osmótica e é atraída para a superfície das partículas, originando forças repulsivas.

2.2.14 Floculação e dispersão

Numa suspensão de partículas argilosas em água, as partículas apresentam um movimento Browniano (movimento livre), cujo resultado é a variação da distância entre as partículas. Dependendo da distância entre duas partículas, a força resultante entre elas pode ser de natureza repulsiva ou atractiva, conforme é demonstrado no gráfico da figura 2.4.

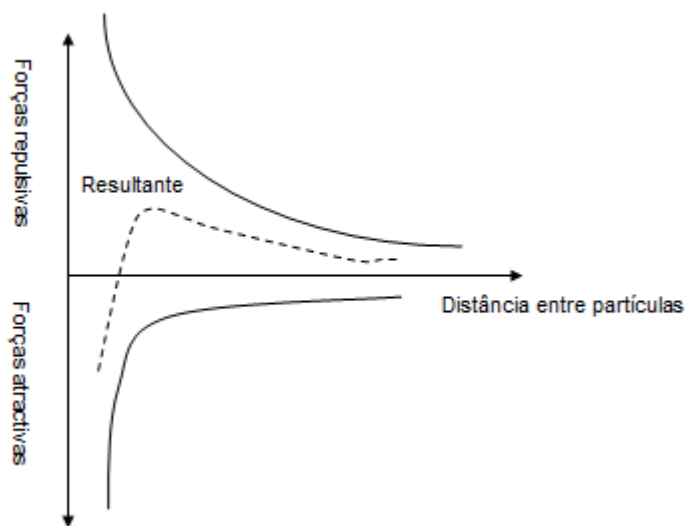


Figura 2.3 – Relação entre as forças e a distância entre partículas (Cristelo, 2001).

No caso de se verificar a repulsão, as partículas argilosas assentam individualmente, formando uma camada densa, embora se encontrem separadas das partículas vizinhas. A este tipo de arranjo dá-se o nome de estrutura aleatória (Mineiro, 1978).

Se as forças atractivas prevalecerem, dá-se a formação de flocos, originando a chamada estrutura floculada. Neste tipo de estrutura as partículas estão em contacto mas não têm orientação específica. Num estado floculado podem ocorrer três tipos de associações entre as lamelas de argila: face-com-face (FF), bordo-com-face (BF) e bordo-com-bordo (BB). Dos três casos, apenas os dois últimos correspondem ao que normalmente se designa por

“flocos” e o processo de destruição destas duas associações denomina-se desfloculação.

As associações do tipo FF dão origem a partículas mais espessas que constituem a chamada estrutura orientada. À destruição deste tipo de estrutura corresponde o fenómeno de dispersão.

Nas argilas naturais, embora o arranjo estrutural possa ser extremamente complexo, existe uma tendência para a formação de agregados de partículas, geralmente com uma orientação do tipo FF. A estrutura aleatória é rara e é característica de argilas activas com um elevado índice de vazios, cuja sedimentação ocorreu em água salinas e que não sofreram fortes tensões de compressão.

2.2.15 Hidratação das argilas

As partículas argilosas estão sempre hidratadas uma vez que se encontram envolvidas por camadas de moléculas de água. Estas moléculas são parte constituinte da própria partícula visto que influenciam o seu comportamento e características.

Uma vez que as moléculas de água são dipolares, existem três formas possíveis de atrair estas moléculas em direcção à superfície das partículas argilosas (Cristelo, 2001):

1) atracção entre a face da partícula de argila carregada negativamente e o lado positivo do dipolo;

2) atracção entre os catiões presentes na camada dupla e os lados dos dipolos carregados negativamente. Estes catiões são atraídos pelas cargas negativas na face da partícula de argila;

3) os átomos de hidrogénio das moléculas de água são compartilhados, através de uma ligação de hidrogénio, pelos átomos de oxigénio das próprias moléculas de água e os átomos de oxigénio das partículas de argila.

Não existe uma fronteira nítida entre a água de hidratação e a água livre visto que, conforme aumenta a distância à superfície das partículas, a força de atracção vai diminuindo gradualmente.

Segundo Mineiro (1978), as moléculas de água que constituem a camada de água adsorvida podem mover-se facilmente num plano paralelo à superfície das partículas, mas

estão impedidas de o fazer na direcção perpendicular. A facilidade destes movimentos aumenta com a distância à partícula e dependem da natureza dos catiões permutáveis.

A água ligada à superfície das partículas apresenta algumas diferenças em relação à água livre: maior densidade média e resistência ao corte, elevada viscosidade, constante dieléctrica e tensão de vapor menores.

2.2.16 Potencial de sucção

O mecanismo de sucção do solo faz com que exista água no solo acima do nível freático que se encontra a uma pressão inferior à atmosférica. Essa sucção representa a força com que o solo retém a água, sendo que os valores desta podem variar entre zero e centenas de MPa para solos secos em estufa (Castro, 1974 *in* Cristelo, 2001).

Devido à vasta gama de valores que a sucção pode apresentar, Schofield (*in* Cristelo, 2001) introduziu o conceito de potencial de sucção (pF) ao sugerir a utilização de uma escala logarítmica para a caracterização dessa força. O potencial de sucção corresponde ao logaritmo decimal da sucção, que é expressa pela altura, em centímetros, de uma coluna de água capaz de exercer uma pressão equivalente, mas de sinal contrário.

Existem curvas de sucção que relacionam o teor em água do solo com a sucção desenvolvida. No entanto, e devido a um fenómeno de histerese, um valor do potencial de sucção não corresponde apenas a um valor de teor em água no solo, mas sim a dois, consoante se trata de uma fase de molhagem ou secagem. No processo de secagem o teor em água é superior. Isto acontece porque no processo de secagem de um solo húmido os capilares mais finos retêm água mas, durante o processo de molhagem, não podem absorvê-la uma vez que estão separados da água livre pelos capilares mais grossos.

A água movimenta-se dos pontos com menor sucção para os pontos com sucção superior até que seja atingido um equilíbrio nos valores de sucção ao longo da massa de solo.

O potencial de sucção é uma característica importante nos solos argilosos uma vez que atinge valores elevados devido à reduzida dimensão das partículas constituintes, à adsorção de água pelas partículas e aos fenómenos de capilaridade.

2.3 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA CAL

2.3.1 Generalidades

O termo “cal” pode ser utilizado para designar uma variedade de produtos derivados do calcário, que apresentam características distintas conforme o fim a que se destinam.

Para a estabilização de solo com cal pode ser utilizada cal aérea, tanto viva como hidratada, em pó ou na forma de leite de cal. Geralmente, a maioria dos tipos de cal utilizados na estabilização de solos têm em comum o facto de possuírem um elevado teor em cálcio, com os óxidos e hidróxidos de magnésio a não ultrapassarem os 5%. Para além deste factor, existem outros que influenciam o desenvolvimento das reacções entre a cal e o solo, sendo a superfície específica um dos mais importantes.

Refira-se ainda a existência de um segundo tipo de cal, a cal hidráulica, que não é geralmente utilizada na estabilização de solos.

2.3.2 Caracterização dos diferentes tipos de cal

A cal aérea é um ligante que resulta da calcinação, a uma temperatura compreendida entre 900°C e 1100°C, duma rocha com percentagem mínima de 95% de carbonato de cálcio ou de carbonato de cálcio e magnésio. Este tipo de ligante não apresenta propriedades hidráulicas: o seu endurecimento é feito através da reacção lenta de carbonatação, pela acção do ar atmosférico.

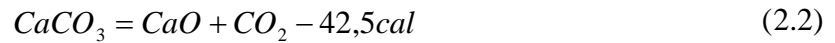
As cals aéreas podem ser divididas em gordas e magras, consoante o teor de impurezas, e quanto ao teor de óxido de magnésio, em cals calcíticas, cálcico-dolomíticas e cals dolomíticas.

As cals aéreas gordas derivam de calcários quase puros com teores de carbonatos não inferiores a 99% enquanto que as cals aéreas magras derivam de calcários com teores de argila e outras impurezas compreendidos entre 1 e 5% (Coutinho, 1997).

Uma vez que o cálcio e o magnésio surgem muitas vezes associados, são frequentes na natureza calcários com percentagens variáveis de dolomite. A calcinação desses calcários pode dar origem a cals calcíticas ($\%MgO < 2\%$), cálcico-dolomíticas ($2 < \%MgO < 20$) ou dolomíticas ($20 < \%MgO < 45$).

Existem dois tipos de cal aérea - a cal viva e a cal apagada ou hidratada – e a diferença entre as duas reside da sua susceptibilidade à água.

Dá-se o nome de cal viva (óxido de cálcio) ao produto obtido pela cozedura dos calcários e a expressão dessa reacção é:



Esta reacção verifica-se a cerca de 894°C, temperatura à qual a pressão de dióxido de carbono que sai do calcário (pressão de dissociação do carbonato de cálcio) é um pouco superior à pressão atmosférica.

A cal apagada ou hidratada tem origem na extinção por imersão ou aspersão com água da cal viva. A reacção de extinção é apresentada da seguinte forma:



A cada uma das designações, cal viva ou cal apagada, surge associada uma gama de diferentes quantidades de óxido de cálcio e hidróxido de cálcio, respectivamente, que corresponde a uma variedade de produtos com diferentes propriedades físico-químicas que os tornam mais ou menos aptos para uma determinada aplicação (Coutinho, 1997).

O leite de cal é um produto obtido a partir da cal aérea, viva ou hidratada e consiste somente numa suspensão da cal, com teores compreendidos entre 30 e 150 g/l.

A obtenção de leite de cal a partir de cal viva requer uma quantidade de água muito superior àquela que é necessária para satisfazer a afinidade química da cal à reacção de hidratação. As características do leite de cal assim obtido dependem da composição química e grau de calcinação da cal viva e da qualidade da água.

A obtenção do leite de cal por dissolução de cal hidratada é facilitada pelo facto desta já se encontrar na forma de pó e completamente extinta.

Quanto às cais hidráulicas, estas obtêm-se por cozedura de calcários com percentagens de argilas geralmente compreendidas entre 5% e 20% a uma temperatura entre 1200°C e 1500°C. Para além da formação do óxido de cálcio, dá-se a combinação deste com a sílica e a alumina, resultando na presença de silicatos e aluminatos que, quando hidratados, dão

origem a produtos que endurecem tanto na água como no ar. Assim, a cal hidráulica pode ser considerada como um produto intermédio entre a cal aérea e o cimento (Coutinho, 1997).

Segundo Choquet (1972, in Neves, 1993) a cal hidráulica pode classificar-se em função do teor em elementos argilosos e em carbonato de cálcio da rocha calcária. Assim, por ordem decrescente do teor em carbonato de cálcio da rocha calcinada, as cals classificam-se como fracamente hidráulicas ($90 < \%CaCO_3 < 95$), medianamente hidráulicas ($75 < \%CaCO_3 < 90$) ou fortemente hidráulicas ($40 < \%CaCO_3 < 75$).

2.3.3 Propriedades mais importantes da cal para a estabilização de solos

As principais propriedades que afectam as reacções entre os solos e a cal e, consequentemente, a qualidade da estabilização, são a granulometria, a superfície específica, a reactividade, o peso volúmico, a solubilidade e o teor em cálcio.

i. A granulometria da cal é uma característica física que influencia outras propriedades da cal tais como a velocidade de hidratação e a homogeneidade da mistura, quando usada na estabilização de solos.

De um modo geral, a cal obtida por calcinação em fornos verticais possui uma granulometria mais grosseira. Por outro lado, o processo de hidratação a que a cal hidratada é sujeita confere-lhe uma granulometria mais fina do que a da cal viva.

ii. A superfície específica é uma das características físicas mais importantes da cal, visto estar directamente relacionada com algumas das suas propriedades tais como a facilidade de homogeneização e de reacção da cal com outros elementos (Boynnton, 1980). Superfícies de contacto maiores dão origem a melhores misturas com o solo e a água.

Devido à estrutura porosa da cal, a água contacta não só com a superfície exterior das partículas, mas também com parte da superfície interior, através de reacções de absorção e adsorção.

iii. A reactividade da cal está relacionada com a eficiência e rapidez da sua acção estabilizante e está associada a outras características físicas e químicas, nomeadamente com a superfície específica. Este parâmetro permite prever a duração das reacções e, no caso destas serem exotérmicas, o aumento de temperatura produzido (Cristelo, 2001).

Os métodos existentes para avaliar esta característica na cal viva consistem na medição da temperatura ao longo do tempo de soluções aquosas de cal em condições bem definidas. Uma vez que a cal hidratada não sofre a reacção de extinção na presença de água, foram criados outros ensaios com a mesma finalidade, como o da capacidade de neutralização em função do tempo, na presença de um ácido.

A presença de elementos argilosos influencia negativamente a reacção de hidratação. Um armazenamento inadequado da cal, expondo-a ao dióxido de carbono do ar leva à sua carbonatação. Do ponto de vista calorífico, o carbonato de cálcio é inerte, pelo que a sua presença diminui a reactividade. A presença de sais pode acelerar ou retardar a reacção de extinção da cal, consoante o tipo de sal.

De um modo geral, a cal calcítica possui uma maior reactividade do que a cal dolomítica.

iv. Relativamente ao peso volúmico verifica-se que, de um modo geral, a cal viva possui um valor desta grandeza superior ao da cal hidratada. A presença de impurezas influencia o peso volúmico mas, enquanto que no caso da cal viva se verifica uma diminuição deste parâmetro, na cal hidratada ocorre o efeito contrário. O peso volúmico aparente depende da origem da cal e do seu modo de armazenamento (Neves, 1993).

v. Embora a cal seja, de um modo geral, pouco solúvel em água, a solubilidade é um parâmetro que interessa conhecer quando se utilizam soluções aquosas.

A solubilidade da cal decresce com a temperatura e também varia com a composição. A cal viva é ligeiramente menos solúvel do que a cal apagada e a cal calcítica é mais solúvel do que a cal dolomítica.

vi. Por último, o teor em cálcio é a característica química mais importante da cal. Este pode ocorrer livre (não combinado) na forma de óxido de cálcio, no caso da cal viva, ou de hidróxido de cálcio, no caso da cal apagada; ou combinado, na forma de carbonatos, silicatos e aluminatos ou, mais raramente, sulfatos e fosfatos. A presença de carbonatos pode estar associada à existência de calcário de origem ou a recarbonatações por contacto com o ar.

A soma do cálcio livre e combinado constitui a totalidade de cálcio existente na cal.

3 MECANISMOS FÍSICO-QUÍMICOS ENVOLVIDOS NO TRATAMENTO DE UM SOLO COM CAL

3.1 INTRODUÇÃO

A adição de cal a solos finos na presença de água desencadeia diversas reacções que podem resultar na modificação ou estabilização de um solo. Neste capítulo, serão primeiramente abordadas as principais reacções físico-químicas envolvidas no tratamento de um solo com cal, seguindo-se os principais factores que influenciam essas reacções bem como as melhorias esperadas e as aplicações deste tipo de misturas.

3.2 PRINCIPAIS REACÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS ENTRE O SOLO E A CAL

3.2.1 Generalidades

As reacções que levam à estabilização de um solo através da adição de cal são normalmente agrupadas em três categorias:

- 1) Permuta iónica e floculação;
- 2) Acção de cimentação (também denominada reacção pozolânica);
- 3) Acção de carbonatação.

A ocorrência destas reacções não é simultânea. A permuta iónica e a floculação ocorrem imediatamente e estão relacionadas com a acção imediata da cal na estabilização do solo. Seguidamente ocorre a acção de cimentação que é responsável pela influência a longo prazo da cal no mecanismo de estabilização. Por fim, dá-se a carbonatação, reacção indesejada neste tipo de tratamento. Estas reacções serão explicadas em seguida mais em pormenor.

A figura 3.1 mostra as principais reacções físico-químicas que ocorrem numa mistura de solo com cal e água, bem como a sua sequência:



Figura 3.1 – Diagrama da sequência das principais reacções físico-químicas que ocorrem na estabilização de um solo com cal (adaptado de Arman, 1988 *in* Neves, 1993).

3.2.2 Permuta iónica e floculação

Estas são as primeiras reacções que ocorrem após a adição de cal. A floculação, consequência da permuta iónica, consiste na aglomeração das partículas finas do solo em flocos estáveis. Este fenómeno é, assim, responsável pelas alterações nas seguintes características geotécnicas do solo: granulometria, plasticidade, compactação, trabalhabilidade e resistência mecânica imediata.

As partículas de argila encontram-se carregadas electricamente, com predominância de cargas negativas distribuídas nas faces, enquanto que as cargas positivas se encontram na sua maioria nos bordos, mas em quantidades consideravelmente inferiores, pelo que as partículas se comportam, de modo geral, como electricamente negativas, tal como referido no ponto 2.2.8. Esta característica das argilas confere-lhes a capacidade de adsorver cations permutáveis na sua superfície, estabelecendo-se uma troca contínua entre os iões adsorvidos, contidos na dupla camada iónica (solução micelar), e outros com a mesma carga eléctrica pertencentes à solução exterior onde estão os iões livres (solução intermicelar). A este fenómeno dá-se o nome de permuta iónica.

Se à solução intermicelar forem adicionados íões de tipo diferente dos da solução micelar, então irá gerar-se um novo estado de equilíbrio à custa de uma reacção de troca entre o novo tipo de íão introduzido entre os minerais argilosos e os íões já existentes na solução micelar, que passarão a ser livres na solução intermicelar. Os catiões de valência mais elevada são geralmente preferidos em relação aos íões de menor valência nas reacções de permuta iónica.

Quando a cal apagada é adicionada a um solo, as moléculas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ entram em contacto com as partículas argilosas e a fase líquida do solo, dissociando-se em catiões Ca^{2+} e em aniões OH^- segundo a reacção:



Esta reacção traduz-se num excesso de catiões alcalino-terrosos Ca^{2+} na solução intermicelar. Desencadeiam-se então processos de troca entre os catiões alcalinos de valência inferior existentes na solução micelar (Na^+ , K^+) e os catiões Ca^{2+} . Quando os catiões de troca adsorvidos na superfície das partículas argilosas são fortemente electropositivos (como por exemplo: Na^+ ou K^+) a ionização da argila é forte, mas quando os catiões são menos electropositivos (como por exemplo: H^+ , Ca^{2+} ou Mg^{2+}) a ionização é fraca (Gomes, 1988). Quanto mais fraca for a ionização da argila, menor será a carga negativa das suas partículas em suspensão e, conseqüentemente, a repulsão entre as partículas é menor. Esta fraca repulsão traduz-se num menor afastamento entre as partículas, permitindo que estas se aglomerem em partículas maiores, dando origem a uma estrutura floculada e porosa. No caso da solução intermicelar se encontrar saturada em íões Ca^{2+} previamente à adição de cal, então a troca iónica será mínima ou inexistente.

A quantidade mínima de cal a adicionar de forma a desenvolver ao máximo os efeitos da floculação situa-se normalmente abaixo de 3%, embora quantidades de cal na ordem de 1% ou inferiores produzam um estado metaestável. O valor exacto depende da quantidade de minerais argilosos presentes no solo (Cristelo, 2001).

Segundo Hilt (1960, *in* Cristelo, *op. cit.*) as alterações às propriedades dos solos argilosos provocados pela adição de cal dependem largamente da quantidade de catiões inicialmente adsorvidos na superfície das partículas de argila e do tipo de fracção argilosa. Enquanto que argilas expansivas contendo montmorilonite reagem rapidamente com a cal, perdendo elasticidade e ganhando lentamente resistência pozolânica, argilas à base de illite, clorite,

vermiculite ou caulinite são geralmente estabilizadas pela cal de forma menos eficaz.

3.2.3 Acção de cimentação ou pozolânica

Após a rápida acção inicial entre o solo e a cal e, quando esta se encontra em excesso, continuam a verificar-se novas reacções químicas. A permuta iónica é relativamente rápida comparativamente à acção de cimentação, o que faz com que, inicialmente, todos os iões de cálcio presentes na solução estejam envolvidos nessa troca. Deste modo, a reacção pozolânica não pode ser iniciada antes que a permuta iónica esteja completa. Isto implica que, caso a cal seja totalmente consumida na permuta iónica, não se formem produtos da reacção pozolânica. Esta acção de cimentação consiste na reacção lenta dos constituintes da argila, nomeadamente a sílica e a alumina, com a cal, dando origem a materiais cimentícios dentro das partículas de argila e nos espaços entre as mesmas.

As pozolanas são materiais naturais ou artificiais que possuem constituintes passíveis de reagir com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formarem, em presença da água, novos compostos estáveis de poder aglomerante e endurecedor, tais como os aluminatos e os silicatos de cálcio hidratado (Neves, 1993). Os minerais de argila são pozolanas naturais que têm a capacidade de reagir com a cal adicionada ao solo formando materiais cimentícios. Este processo, que resulta em consideráveis ganhos de resistência, é relativamente lento uma vez que a cal disponível tem de se difundir através da estrutura do solo, atacando e removendo a sílica das partículas argilosas. A velocidade do aumento de resistência depende do tipo de solo a estabilizar.

A reacção de cimentação pode ser explicada da seguinte forma: a presença da cal no solo faz aumentar o pH do meio, o que promove a dissolução tanto da sílica (SiO_2) como da alumina (Al_2O_3), uma vez que ambas são altamente solúveis em meios fortemente básicos ($\text{pH} \gg 7$). Os catiões Ca^{2+} reagem com a sílica e a alumina dissolvidas criando novos compostos minerais: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. É expectável que em solos ácidos a estabilização com cal se desencadeie de uma forma mais lenta. Estas reacções estão assim relacionadas com a quantidade de sílica e alumina solúveis presentes na argila e podem escrever-se da seguinte forma:





em que:

CSH → Silicato de cálcio hidratado

CAH → Aluminato de cálcio hidratado

Os elementos assim formados encontram-se inicialmente sob a forma de um gel insolúvel em água, revestindo as partículas do solo. A cristalização deste gel leva à cimentação das partículas entre si, resultando um endurecimento global da mistura de solo com cal compactada. A formação deste gel está dependente da existência de água suficiente de modo a que seja possível a transferência dos iões Ca^{2+} e OH^{-} para a superfície das partículas.

O único factor que limita a velocidade da reacção de cimentação é a própria concentração da solução. No entanto, as misturas solo-cal apresentam uma estagnação no ganho de resistência mecânica ao fim de um determinado tempo de cura que pode ser explicada de duas formas:

- A cal foi totalmente consumida, não estando disponível para reacções pozolânicas posteriores;
- O pH da cal em excesso na mistura não é suficientemente elevado para permitir a dissolução da sílica e alumina das partículas argilosas.

O óxido de magnésio, como componente da cal ou como aditivo à cal calcítica, aumenta a resistência do solo estabilizado com cal. Uma provável explicação para este facto consiste em admitir que este componente actua como um catalisador da reacção entre o hidróxido de cálcio e os minerais pozolânicos. Contudo, alguns estudos demonstram a existência de uma razão Ca/Mg para a qual a resistência devida à cimentação é máxima, o que sugere que o MgO faz parte da reacção pozolânica, tornando-se um constituinte da estrutura cristalina dos materiais cimentícios resultantes. Estes materiais cristalizam com maior facilidade e possuem uma estrutura cristalina mais estável.

3.2.4 Acção de carbonatação

A carbonatação é um mecanismo de alteração química dos minerais argilosos que consiste na reacção do ião carbonato (CO_3^{2-}) ou bicarbonato (HCO_3^-) com qualquer substância mineral, em particular, com os iões Ca^{2+} contidos nos materiais para formar carbonatos de cálcio (Jeremias, 1991).

A referida reacção só pode ocorrer se existir CO_2 no interior da mistura solo-cal, se esta estiver exposta ao ar atmosférico e se existir cal disponível que não tenha reagido com as partículas do solo. Este último caso pode ocorrer quando as partículas argilosas não apresentam afinidade à reacção de cimentação promovida pela cal e/ou quando a quantidade de cal adicionada ao solo é excessiva, não permitindo que esta seja totalmente dissociada para poder reagir com as partículas argilosas do solo.

Os carbonatos de cálcio e magnésio são cimentos fracos que prejudicam o normal desenvolvimento das reacções pozolânicas, impedindo que se atinja a resistência mecânica pretendida. Para além disso, o carbonato de cálcio é uma substância que possui um carácter plástico elevado, o que faz com que a plasticidade do solo aumente e as partículas da cal se agreguem, não permitindo a reacção com as partículas argilosas. Estes nódulos de cal carbonatados constituem elementos fragilizantes da mistura de solo com cal (Neves, 1993).

Em circunstâncias adversas, o dióxido de carbono também pode reagir com os produtos de hidratação dos solos estabilizados com cal, causando uma redução na resistência e aumento de plasticidade. Embora este aspecto não seja geralmente relevante, certos casos demonstram que a rotura é possível devido a este fenómeno que, pensa-se, terá origem na decomposição da matéria orgânica presente no solo, resultando num aumento do teor em dióxido de carbono nos vazios.

Como forma de prevenir a carbonatação da mistura, Paige-Green et al. (1990, *in* Cristelo, 2001) sugerem que se deve manter o material sempre húmido, durante a cura, evitando ciclos de molhagem-secagem; manter afastado o dióxido de carbono, minimizando o tempo de exposição da mistura ao ar; e melhorar a prática construtiva, compactando logo que possível, de forma a obter densidades superiores e permeabilidades inferiores, e até serem atingidos volumes de vazios reduzidos.

3.3 PRINCIPAIS CONDICIONALISMOS NO TRATAMENTO DE UM SOLO COM CAL

3.3.1 Generalidades

Quando se pretende formular uma mistura solo-cal com o intuito de modificar o solo de modo a que este satisfaça determinados critérios relacionados com o fim a que se destina, deve considerar-se a existência de uma variedade de factores que influenciam o nível de alteração das suas características. Os principais aspectos que serão abordados neste ponto são, nomeadamente, o tipo de solo a tratar, o tipo e quantidade de cal a utilizar, o teor em água e o peso volúmico seco de compactação da mistura, as condições de cura, a utilização de aditivos e a existência de sulfatos ou matéria orgânica nos solos a tratar. Contudo, é necessário ter em conta que existem outros factores que condicionam o sucesso do tratamento, como por exemplo os equipamentos utilizados ao longo do processo.

3.3.2 Tipo de solo

O principal critério de avaliação da susceptibilidade do solo à estabilização com cal é a sua plasticidade. Quanto mais plástico for o solo, maiores os benefícios devidos à adição de cal (Neves, 1993).

Outra característica importante a ter em conta, especialmente quando o objectivo do tratamento consiste em melhorar as características resistentes do solo, é a percentagem de argila que o solo apresenta, uma vez que são as partículas de argila que fornecem a sílica e a alumina necessárias ao desenvolvimento das reacções pozolânicas.

Deve também ser determinado o pH inicial do solo. Quanto mais reduzido este for, maior será a quantidade de cal necessária para tornar o meio básico, de forma a promover o desenvolvimento de reacções pozolânicas. Para que estas possam ocorrer a longo prazo, o valor do pH deve ser superior a 12. A introdução do teor óptimo em cal num solo eleva os valores de pH da mistura para 12,4 (Hill and Davidson, 1960 *in* Khattab, 2007).

A capacidade de troca catiónica do solo está também directamente relacionada com a sua aptidão à estabilização com cal pois, tal como foi referido no ponto 3.2.2, a floculação está dependente da troca entre os iões cálcio fornecidos pela cal e os iões adsorvidos pelas partículas argilosas. Assim, as argilas do tipo caulinite são menos sensíveis à acção da cal, por oposição as argilas à base de montmorilonite, que possuem uma elevada capacidade de

permuta catiónica.

Existem vários critérios na bibliografia para avaliar a viabilidade da estabilização de um solo com cal, nomeadamente quanto ao índice de plasticidade e à quantidade de partículas argilosas. Nesta investigação, foram adoptados os critérios da “National Lime Association” americana que sugere um valor mínimo de passados no peneiro nº200 (75µm) igual ou superior a 25 % e um índice de plasticidade mínimo de 10%.

Apesar de se notar uma tendência para privilegiar a utilização do tratamento com cal em solos argilosos, não se deve descartar a possibilidade da sua aplicação em solos não plásticos, tais como os de natureza siltosa ou arenosa. A aptidão do solo ao tratamento com cal deve ser avaliada tendo em vista o objectivo desse tratamento e com recurso a ensaios laboratoriais que revelem a resposta do solo ao tratamento.

A experiência tem demonstrado que a cal poderá reagir com solos de granulometria média, moderadamente fina e fina, conduzindo a uma diminuição de plasticidade, aumento da trabalhabilidade, redução da expansibilidade e aumento da resistência. Segundo a Classificação Unificada de solos (Correia, 1988) são CH (argila gorda), CL (argila magra), MH (silte plástico), SC (areia argilosa), SM (areia siltosa), GC (cascalho argiloso), SW-SC (areia bem graduada com argila), SP-SC (areia mal graduada com argila), SM-SC (areia argilo-siltosa), GP-GC (cascalho mal graduado com argila) ou GM-GC (cascalho argilo-siltoso) e podem ser potencialmente capazes de ser estabilizados com cal (Little, 1995 *in* Neves, 2009).

3.3.3 Tipo e quantidade de cal

Actualmente os especialistas defendem que o valor do teor óptimo em cal em relação à massa de solo seco deve ser definido tendo em conta os objectivos que se pretendem obter com o tratamento, quer quanto às características físicas, quer quanto às mecânicas. O tipo de cal a utilizar é também relevante porque as diferenças entre os vários tipos confere-lhes uma maior ou menor eficácia.

Nos seus estudos, Lu (1957) e Laguros (1960) (*in* Cristelo, 2001) compararam os teores óptimos em cal necessários para atingir a densidade e resistência da mistura solo-cal máximas e uma das mais importantes conclusões a que chegaram foi o facto de ser possível adicionar cal em demasia, no que diz respeito à resistência mecânica.

Provavelmente a cal, quando em excesso, actua como um material fino, separando as

partículas minerais. Também se deve ter em conta a possibilidade de se desenvolverem reacções de carbonatação, capazes de provocar diminuições na resistência, tal como referido no ponto 3.2.4.

Quanto aos tipos de cal, todos apresentam vantagens e desvantagens. A cal hidratada possui uma granulometria mais fina do que a cal viva, o que facilita a homogeneização das misturas com a água e o solo. No entanto, cria mais pó aquando da mistura, o que poderá tornar o seu uso desadequado em áreas populosas. A cal viva não apresenta esse problema mas a sua granulometria mais grosseira dificulta o processo da mistura solo-cal-água. De acordo com a National Lime Association (2004), a cal viva possui a vantagem de ser uma forma de cal mais concentrada, o que faz com que cerca de 3% desta equivalham a 4% de cal hidratada. O leite de cal não produz pó e facilita o processo de homogeneização. Contudo, a sua taxa de aplicação é mais lenta.

O tipo de cal mais correcto a utilizar em cada situação pode ser escolhido tendo em conta os seguintes casos:

- solos argilosos com teor em água acima do valor óptimo para compactação: será mais vantajosa a utilização de cal viva nesta situação, uma vez que as reacções de hidratação conduzem a uma secagem rápida do solo, reduzindo assim a quantidade de água até valores próximos do teor óptimo;
- solos argilosos cujo teor em água é ligeiramente inferior ao seu valor óptimo: neste caso será mais indicado utilizar cal hidratada, uma vez que a utilização de cal viva implicaria a adição de uma determinada quantidade de água, necessária para hidratar a cal e promover as reacções físico-químicas de estabilização. Isso levaria à formação de uma mistura grosseira não homogénea e, assim, menos eficiente.
- solos argilosos com um teor em água muito inferior ao valor óptimo para compactação: é recomendada a utilização de leite de cal uma vez que assim se incrementará a quantidade de água presente no solo, facilitando a homogeneização da mistura e a sua posterior compactação.

3.3.4 Teor em água e peso volúmico

A água é um elemento fundamental para o desenvolvimento das reacções entre a cal e os minerais argilosos sendo que a influência do teor em água no consumo da cal nessas

reações é tanto mais expressiva quanto maior for a quantidade de água e cal presentes no solo.

Perret (1977, *in* Neves, 1993) constatou que, a curto prazo, é possível, para um teor em cal inicial médio e um teor em água elevado, ter consumos de cal superiores aos verificados para um teor em cal elevado e um teor em água menor. Isto realça a importância de um teor em água adequado e relativamente elevado para permitir o desenvolvimento pleno das potencialidades reactivas da cal com os minerais argilosos.

Quando é utilizada cal viva deve adicionar-se uma quantidade de água considerada suficiente para hidratar toda a cal, de modo a impedir a formação de núcleos de cal não hidratada que podem conduzir a reações de carbonatação e consequente fragilização da mistura.

O peso volúmico obtido na compactação também influencia a eficiência da estabilização, visto que a compactação das misturas do solo com a cal é imprescindível para o desenvolvimento das reações pozolânicas e também para evitar o surgimento de fenómenos de carbonatação.

3.3.5 Condições de cura

Geralmente os solos tratados com cal apresentam um aumento rápido de resistência no início do período de cura, diminuindo essa taxa de crescimento com o decorrer do tempo de cura.

As reações pozolânicas dependem do tempo e da temperatura. Temperaturas inferiores a 16°C – 18°C retardam as reações enquanto que temperaturas superiores aceleram-nas (Mallela et al., 2004). O calor promove a conservação de um ambiente de elevado pH no sistema solo-cal-água durante um período de tempo mais longo e, no caso de ser utilizado um aditivo secundário, mantém a sua alcalinidade. Assim, dá-se uma extensão da dissolução da sílica e alumina das partículas de argila.

Quanto à duração do período de cura, pode dizer-se que existe um valor óptimo a partir do qual se verifica um retrocesso das modificações já obtidas. Este retrocesso deve-se, por um lado, à carbonatação da cal pelo anidrido carbónico do ar e, por outro, à diminuição de pH ao longo do tempo, conduzindo a uma tendência para a recuperação da expansibilidade

inicial dos solos.

No entanto, Castro (1969, *in* Cristelo, 2001) revela que este efeito não se produz em provetes compactados e parafinados, nos quais as características conferidas pela adição de cal se mantiveram ao longo de um período de tempo considerável. Este facto permite admitir que, em obra, quando o solo tratado com cal estiver protegido por, por exemplo, outra camada de pavimento, o mesmo se irá verificar.

3.3.6 Existência de sulfatos e matéria orgânica

Os sulfatos reagem com o cálcio proveniente da cal, a água e a alumina da argila, resultando em problemas para os solos estabilizados com cal, visto essa reacção ser muito expansiva. A expansão do composto recém-formado após a compactação pode resultar em perdas de resistência (National Lime Association, 2004).

A presença de matéria orgânica num solo a tratar com cal influencia o normal e eficaz desenvolvimento da acção de cimentação.

O fenómeno é muito complexo e está fortemente condicionado pelo tipo de solo e pela natureza da matéria orgânica presente. Embora não esteja definida nenhuma regra que indique a percentagem de matéria orgânica a partir da qual surgem problemas, pode dizer-se que conteúdos inferiores a 1% são inofensivos

Normalmente, são considerados três mecanismos básicos envolvidos na reacção da matéria orgânica com o solo estabilizado com cal:

- Reacção de troca entre os catiões orgânicos e os iões de cálcio da cal;
- Reacção química entre a matéria orgânica activa e os iões de cálcio;
- Efeito de “máscara” provocado pelos catiões orgânicos sobre as partículas de argila, impedindo a dissolução da sílica e alumina.

A matéria orgânica é constituída por partículas complexas que possuem uma elevada capacidade de troca de base. Assim, podem adsorver catiões de cálcio para satisfazer essa capacidade de troca, reduzindo a quantidade de cal disponível para o desenvolvimento de reacções pozolânicas.

No entanto, se esse fosse o único processo responsável pela perda de reactividade do solo em relação à cal, aumentos na sua percentagem poderiam compensar os iões Ca^{2+}

utilizados nas reacções com os catiões orgânicos. No entanto, investigações conduzidas por Thompson (1966, *in* Cristelo, 2001) mostram que isso não se verifica. Assim, este considera que apenas o terceiro mecanismo é válido.

3.3.7 Utilização de aditivos

Alguns aditivos químicos, quando utilizados conjuntamente com a cal, optimizam o tratamento dos solos. Esta optimização verifica-se tanto na velocidade com que se processam os melhoramentos das características da mistura, como nos resultados obtidos: resistências superiores e menor deformabilidade.

De um modo geral as reacções pozolânicas desenvolvem-se lentamente, embora o aumento de temperatura as possa acelerar, tal como foi referido no capítulo anterior. Assim, em alguns países de clima frio foram testados vários aditivos químicos com o fim de acelerar as reacções pozolânicas entre a argila e a cal, permitindo alguns ganhos de resistência na fase inicial do processo.

Existe uma grande variedade de aditivos sendo que, entre os mais utilizados, os que mostram uma eficácia superior são o cloreto de sódio, o hidróxido de sódio e o carbonato de sódio. No entanto, a eficácia dos aditivos de sódio é muito influenciada pelo tipo de solo e pelo tipo e quantidade de aditivo, para além de também depender do tipo de cal e do tempo de cura.

3.3.7.1 Cloreto de sódio

Os ganhos de resistência devido à presença de cloreto de sódio na mistura solo-cal dependem do tipo de fracção argilosa presente no solo. Embora tanto nos solos montmoriloníticos como nos caulíníticos se verifique um aumento do peso volúmico seco máximo e uma ligeira diminuição do teor óptimo em água, nos primeiros os ganhos de resistência são superiores.

Cristelo & Jalali (2004) utilizaram este aditivo na estabilização com cal de solos residuais graníticos e concluíram que este funciona como um catalisador, acelerando a reacção pozolânica. A taxa de crescimento da resistência nas misturas que continham cloreto de sódio foi significativamente superior em relação àquelas que não continham este aditivo. Para além disso, ao acelerar o desenvolvimento de material cimentício, o cloreto de sódio conduziu a uma diminuição da susceptibilidade à água da mistura. Foi possível verificar

também que, no que diz respeito à compressão simples, adicionar um teor em cal de 10% a este tipo de solo é o equivalente a adicionar 6% de cal e 0,12% de cloreto de sódio, o que se revela mais rentável.

3.3.7.2 Hidróxido de sódio

O efeito da adição de pequenas quantidades de hidróxido de sódio a misturas solo-cal depende da actividade das argilas envolvidas. Enquanto que em misturas pouco activas resulta em pequenos aumentos no peso volúmico seco máximo, em misturas mais activas verifica-se o efeito contrário.

O hidróxido de sódio, utilizado como aditivo da cal, conduz também a um aumento das reacções pozolânicas, o que se traduz em ganhos na resistência.

3.3.7.3 Carbonato de sódio

A adição de pequenas quantidades de carbonato de sódio resulta numa diminuição da baridade seca máxima, até se atingir um valor mínimo a partir do qual um novo aumento na quantidade de aditivo conduz a um aumento da baridade seca da mistura (Abouzakhm, 1979, *in* Cristelo, 2001).

A utilização deste aditivo químico em misturas solo-cal à base de montmorilonite provoca uma diminuição nos ganhos obtidos apenas com cal. No entanto, está provada a sua eficácia em solo arenosos.

3.3.7.4 Cinzas volantes

As cinzas volantes constituem uma pozolana artificial, sendo adicionadas à cal uma vez que esta é deficiente em material pozolânico natural. Assim, a utilização deste aditivo melhora as propriedades físicas do solo. No entanto, a actividade pozolânica das cinzas volantes depende da sua granulometria. Quanto mais finas forem as cinzas, melhor será o seu desempenho na estabilização de solos com cal.

Este aditivo permite ainda a estabilização com cal de materiais granulares contendo finos não plásticos, visto que promove as reacções pozolânicas de modo a desenvolver uma mistura rígida.

3.4 MELHORAMENTO DE SOLOS COM CAL

3.4.1 Generalidades

O melhoramento ou modificação de solos com cal consiste numa alteração temporária das suas características de modo a permitir um processo construtivo mais rápido, poupando tempo e dinheiro.

As principais características que sofrem alterações são o teor em água, a granulometria, a plasticidade, a expansibilidade, a compactação, a resistência mecânica imediata e a deformabilidade.

3.4.2 Teor em água

A redução do teor em água natural de um solo após a sua mistura com cal deve-se essencialmente à adição de material seco (cal), ao arejamento provocado pelo processo de mistura e à reacção de hidratação, no caso da cal viva.

Gomes Correia (1990, *in* Neves, 1993) estimou que a redução global do teor em água da mistura solo-cal é da ordem de 0,6 a 1,5% do teor em água inicial do solo, por cada 1% de cal viva adicionada.

3.4.3 Granulometria

A alteração da composição granulométrica de um solo através da adição de cal é resultado das reacções físico-químicas de permuta iónica e floculação, descritas no ponto 3.2.2. Estas floculações e aglomerações dão-se principalmente nas fracções finas dos solos e, combinadas com as alterações provocadas nos limites de consistência, levam a uma modificação na classificação do solo.

Os aglomerados criados não possuem uma resistência tão elevada quanto a dos grãos individuais, podendo ser desagregados com alguma facilidade, embora resistam à acção da água. Devido a este facto, o processo de análise granulométrica das misturas solo-cal não é consensual, uma vez que o método usual da peneiração requer a desagregação prévia do material, impossibilitando a avaliação do verdadeiro nível de agregação das partículas.

3.4.4 Plasticidade

A adição de cal a um solo provoca a alteração das suas características de plasticidade cujo efeito global se traduz na diminuição do índice de plasticidade devido a duas possíveis razões: ou aumento do limite de plasticidade e redução do limite de liquidez; ou aumento proporcionalmente superior do limite de plasticidade relativamente ao aumento do limite de liquidez.

Segundo Van Impe (1989), a variação do limite de liquidez é afectada pela composição mineralógica da fracção argilosa do solo: a cal viva conduz a um aumento do limite de liquidez em argilas de componente mineralógica predominantemente caulinítica; em argilas expansivas, caso típico de argilas montmoriloníticas, a acção da cal viva leva a uma diminuição do limite de liquidez.

Quanto ao limite de plasticidade, verifica-se um aumento para qualquer tipo de solo, à excepção de siltes e areias ricos em cálcio em que o valor se mantém praticamente constante. No caso dos solos argilosos, a evolução depende da componente argilosa do solo. As argilas caulínitas são as mais estáveis, por oposição às argilas montmoriloníticas, que apresentam as maiores variações. As argilas do grupo da ilite e da clorite apresentam um comportamento intermédio. Esta relação está relacionada com a diminuição da capacidade de troca iónica de cada um dos diferentes tipo de argilas. Hilt (1960, *in* Cristelo, 2001) demonstrou que o limite de plasticidade aumenta com a adição de pequenas quantidades de cal (2 a 3%).

Segundo Kézdy (1979, *in* Neves, 1993) a cal viva conduz a uma diminuição mais rápida da plasticidade, sendo a redução maior no caso de se tratar de uma cal calcítica.

3.4.5 Expansibilidade

Castro (1969, *in* Cristelo, 2001), após determinar a variação máxima da expansibilidade obtida pela adição de cal para cada solo, correlacionou este valor com a expansibilidade do solo sem cal, e verificou tratar-se de uma relação linear. Constatou também que o tempo de cura influi significativamente na expansibilidade dos solos estabilizados com cal visto que, quando se excede o tempo de cura óptimo, verifica-se o retrocesso das modificações, sendo a causa deste fenómeno a carbonatação da cal pelo anidrido carbónico do ar.

Os solos com valores de expansibilidade a ordem dos 10% não são modificados pela

adição de cal calcítica ou dolomítica, mas os solos com valores de expansibilidade superiores sofrem uma redução dessa expansibilidade tanto maior quanto mais expansivos forem inicialmente. Os solos com expansibilidade inferior a 10% sofrem um acréscimo da mesma.

3.4.6 Compactação

A alteração das características de compactação de um solo através da adição de cal reflecte a nova natureza do solo e constitui evidência das modificações nas suas propriedades físicas. Geralmente, à medida que o teor em cal aumenta, para um esforço específico de compactação, o solo estabilizado com cal apresenta densidades sucessivamente inferiores e teores óptimos em água superiores ao verificado no solo original. A curva de compactação exhibe uma concavidade cada vez menor, ou seja, a variação da densidade é menos acentuada e menos dependente do teor em água de compactação. Dallas (1995, *in* Cristelo, *op. cit.*) refere um intervalo na redução da massa volúmica seca máxima entre 0,048 g/cm³ e 0,080 g/cm³ e um aumento do teor em água óptimo tipicamente entre 2 a 4%.

Para além do teor em cal, o tempo de cura inicial das misturas solo-cal-água também influencia as características de compactação. Se a mistura curar e ganhar resistência antes da compactação, podem verificar-se posteriores reduções no peso volúmico seco máximo e aumentos adicionais no teor em água óptimo. Isto acontece porque, para além da mistura ser mais resistente e menos plástica do que o solo original, é também menos densa e reage de forma diferente à molhagem.

Segundo Kézdy (1979, *in* Neves, 1993), esta tendência geral das características de compactação deve-se, essencialmente, ao fenómeno de floculação das partículas argilosas: os grãos de partículas floculadas devido à cal são mais difíceis de arrumar pela acção mecânica da compactação. Para além disso, no caso da utilização de cal viva, a reacção de hidratação consome uma parcela importante da água contida no solo que já não poderá ser utilizada na redução de fricção entre os grãos, de forma a facilitar a sua arrumação.

3.4.7 Resistência mecânica e deformação

A adição de cal ao solo produz melhorias imediatas nas características de resistência e

deformação das misturas “não curadas”. Tomando o valor do ensaio de resistência à penetração CBR como índice da resistência das misturas solo-cal, a figura 3.2 ilustra a sua evolução em função do teor óptimo em água e do teor em cal. Anote-se que o teor óptimo em água de cada mistura aumenta com o incremento do teor em cal.

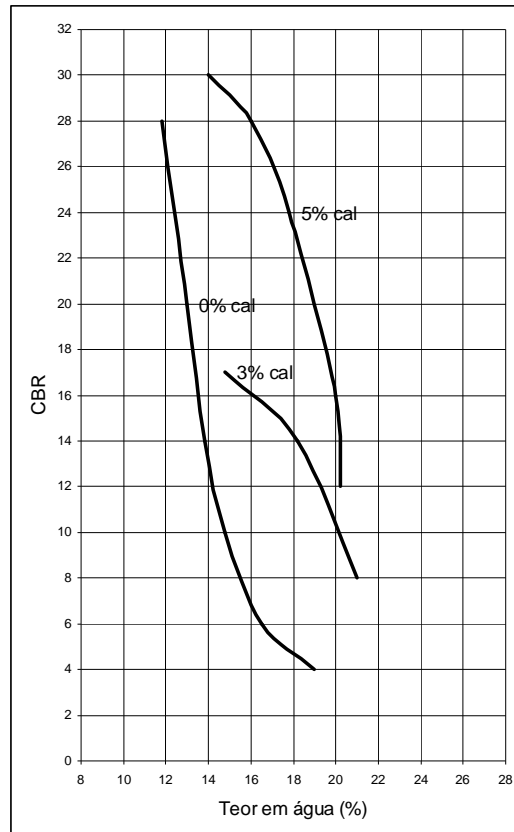


Figura 3.2 – Ganhos imediatos na resistência CBR, em função do teor em água, num solo argiloso de baixa plasticidade (Little, 1995 in Cristelo, 2001).

De um modo geral, a resistência e a densidade têm uma relação directa, isto é, uma maior densidade conduz a uma maior resistência e vice-versa. Contudo, vários estudos demonstram que a resistência aumenta com a quantidade de cal adicionada, até um valor óptimo, enquanto que a densidade máxima diminui na proporção inversa, devido às razões referidas no ponto acima. Isto indica que a cimentação pozolânica compensa largamente a perda de resistência devido à diminuição da densidade.

3.5 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

3.5.1 Generalidades

A estabilização de solos com cal ocorre quando a cal é adicionada ao solo de modo a produzir ganhos na resistência a longo prazo através das reacções pozolânicas. Estas reacções podem-se prolongar durante grandes períodos de tempo – décadas até – desde que haja cal disponível e o pH se mantenha elevado.

As alterações do solo a longo prazo relacionam-se com a sua resistência mecânica e com as suas características elásticas e de permeabilidade.

Neste capítulo também é feita uma alusão à durabilidade desses efeitos benéficos nas misturas pois é importante conhecer a forma como o solo estabilizado com cal se comporta a longo prazo.

3.5.2 Resistência mecânica

3.5.2.1 Resistência à penetração CBR

O ensaio de resistência à penetração CBR (Californian Bearing Ratio) é largamente utilizado na avaliação da resistência mecânica das misturas solo-cal, visto tratar-se de um ensaio simples e amplamente divulgado no dimensionamento de pavimentos. Para além disso constitui uma medida indirecta da resistência ao corte e é um ensaio de referência no projecto e no controlo de qualidade da construção de camadas compactadas de solos estabilizados com cal, através da realização de ensaios de laboratório em amostras carotadas. Contudo, de um modo geral, este ensaio não é considerado apropriado para caracterizar a resistência obtida a longo prazo para solos estabilizados com cal.

3.5.2.2 Resistência à rotura em compressão uniaxial

Um melhor indicador do aumento da resistência mecânica, comparativamente ao ensaio de CBR, e um dos parâmetros mais utilizados para avaliar a qualidade de misturas solo-cal é o ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial. Constitui uma medida da resistência ao corte e apresenta-se em unidades correntes em engenharia, o que possibilita a utilização dos resultados obtidos em cálculos, análises e projectos de engenharia. Para além disso, a partir deste ensaio podem ser deduzidas, com alguma confiança, outras propriedades tais como a resistência à flexão e à tracção (Little, 1995 *in* Cristelo & Jalali,

2002).

Segundo Cristelo & Jalali (2004), a resistência da mistura solo-cal depende de factores como a mineralogia, tipo e teor em cal, tempo e temperatura da cura, teor em água e grau de compactação inicial.

Os mesmos autores desenvolveram um modelo da evolução da resistência à compressão simples de uma mistura solo cal (figura 3.3) onde são definidas quatro fases distintas.

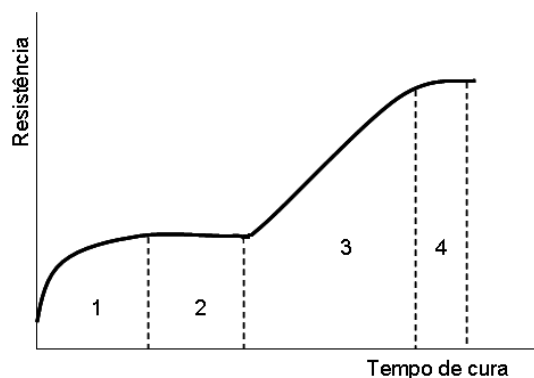


Figura 3.3 – Evolução da resistência à compressão uniaxial de uma mistura solo-cal (Cristelo &Jalali, 2004).

- Na fase 1 verifica-se um aumento da resistência devido à troca iónica e à flocculação das partículas do solo, o que faz com que a fracção argilosa passe a comportar-se como um solo mais granular. Este processo não está directamente relacionado com os ganhos de resistência a longo prazo, embora seja responsável por um acréscimo de resistência devido ao aumento do ângulo de atrito.

- O intervalo 2 é denominado período de indução. Nesta fase inicia-se a formação dos núcleos de silicato de cálcio hidratado nos pontos de contacto entre as partículas argilosas. Estes núcleos iniciam o processo de dissolução dos constituintes minerais da argila. Nesta fase, o aumento de resistência é praticamente nulo uma vez que, enquanto a quantidade de núcleos já estabelecidos não for significativa, as ligações desenvolvidas não são suficientes para tornar perceptível um aumento de resistência.

- A 3ª fase representa o processo que conduz à formação dos materiais cimentícios responsáveis pelos ganhos de resistência e durabilidade mais importantes. Corresponde ao aumento do volume dos núcleos, quer através da aglomeração de mais partículas de cálcio,

a partir da cal livre que ainda se encontra na mistura, quer através da referida dissolução da sílica e alumina presente nos minerais argilosos.

- Na fase 4 dá-se um abrandamento nos ganhos de resistência, quando o volume dos núcleos já é tal que não permite a sua expansão, ou quando a cal disponível já não é suficiente para que mais cálcio possa continuar a ser adicionado aos núcleos. O crescimento dos núcleos cessa quando estes entram em contacto.

O aumento da resistência à compressão não confinada é tanto maior quanto maior for a actividade de um solo.

Cristelo & Jalali (2002) verificaram que a resistência à rotura em compressão uniaxial de solos residuais graníticos estabilizados com cal aumenta com o período de cura e o teor em cal. Para além disso, concluíram também que, entre os referidos solos graníticos, aqueles que possuíam uma matriz arenosa mais densa atingiram valores de resistência máxima superiores, o que pode ser explicado pelo facto de uma estrutura granular mais compacta necessitar de menos material cimentício para intensificar as ligações entre as partículas.

Uma vez que o aumento da temperatura acelera a velocidade de reacção da cal com os minerais argilosos do solo, isso também se traduz num acréscimo da resistência à rotura em compressão uniaxial, para um teor em cal e tempo de cura constantes.

Num estudo conduzido no Illinois, E. U. A., concluiu-se que a relação entre a resistência à rotura em compressão de provetes de misturas de solo-cal saturados e não saturados é bastante elevada, aproximadamente entre 0,7 e 0,85 (Thompson, 1970 *in* Mallela et al., 2004).

3.5.2.3 Resistência à rotura em compressão triaxial

Do ponto de vista dos parâmetros de resistência ao corte determinados em ensaios triaxiais, a adição da cal manifesta-se num aumento da resistência ao corte devido a um aumento mais significativo da coesão e a um ligeiro incremento do ângulo de atrito interno, comparativamente ao solo não estabilizado. Em situações práticas de aplicações rodoviárias, onde predominam baixas tensões de confinamento nas camadas do pavimento, o acréscimo de resistência ao corte é devido, essencialmente, ao aumento do valor da coesão.

Segundo Thompson (1966, *in* Neves, 1993), o ângulo de atrito interno de misturas compactadas de solo-cal (em termos de tensões efectivas) pode variar entre 25° e 35°.

No seu estudo, Alcântara et al. (1997) obtiveram resultados em ensaios triaxiais do tipo

“não consolidado-não drenado” em solos lateríticos estabilizados com cal que evidenciavam que, para maiores períodos de cura e maiores teores em cal, a variação das tensões de confinamento perde gradualmente importância com a evolução das reacções pozolânicas.

3.5.2.4 Resistência à flexão

Os pavimentos constituídos por camadas de elevada resistência mecânica e altos módulos de deformabilidade exibem, em geral, um comportamento de placa, o que reduz consideravelmente as pressões transmitidas às camadas inferiores. No entanto, a relação elevada entre os módulos de deformabilidade das camadas inferiores do pavimento e das misturas solo-cal que constituem a base e sub-base pode gerar tensões de flexão consideráveis no material estabilizado (Mendonça et al., 2001). A camada estabilizada com cal comporta-se, na estrutura do pavimento, como uma laje funcionando à flexão, em cuja face inferior desenvolvem tensões de tracção.

Thompson (1970, *in* Neves, 1993) estima a resistência à flexão em 25% da resistência à compressão simples. Esta relação é semelhante à de outras misturas estabilizadas com ligantes, nomeadamente a mistura solo-cimento.

3.5.2.5 Resistência à tracção

É importante a consideração da resistência à tracção das misturas solo-cal devido às razões apresentadas no ponto anterior. Esta propriedade é normalmente determinada através do ensaio de compressão diametral, também designado ensaio brasileiro, que constitui uma medida indirecta dessa propriedade.

Existe uma relação entre a resistência à tracção e a resistência à compressão uniaxial que, segundo Little (1995, *in* Cristelo, 2001), é de 0,13. A correlação entre as duas grandezas é suficientemente forte para que este valor possa ser utilizado em projecto.

Brandl (1981, *in* Neves, 1993) concluiu, através de ensaios de tracção directa em provetes cilíndricos de solos argilosos, que um teor em cal relativamente baixo reduz a resistência à tracção. Este fenómeno deve-se ao facto de a quantidade de cal não ser suficiente para desencadear a cimentação. À medida que o teor em cal aumenta, a resistência também é maior, embora exista um valor óptimo a partir do qual a cal em excesso sofre carbonatação, provocando uma queda na resistência.

3.5.2.6 Resistência à fadiga

O mecanismo de rotura de uma camada estabilizada com cal sob o pavimento está associado ao fenómeno de fadiga devido à acção de cargas repetidas que induzem esforços de flexão.

As curvas de resposta da fadiga à flexão de misturas solo-cal curadas são similares às geralmente obtidas com materiais idênticos, tais como mistura de cal e cinzas ou misturas de solo-cimento e betão.

Como já foi referido, a resistência mecânica dos solos estabilizados com cal evolui, de um modo geral, continuamente devido ao desenvolvimento das reacções pozolânicas. Se se admitir que a intensidade das cargas repetidas se mantém constante, pode dizer-se que a resistência à fadiga da mistura solo-cal aumenta ao longo do tempo uma vez que a razão entre a tensão de cada ciclo e a resistência máxima ao carregamento diminui (TRC, 1976 *in* Neves, 1993).

3.5.3 Características elásticas

O módulo de deformabilidade de uma camada de solo estabilizada com cal é indispensável como parâmetro para o dimensionamento estrutural de pavimentos rodoviários. O seu valor pode mesmo ser útil como indicador da vantagem em utilizar a estabilização com cal em detrimento de outras soluções.

Na bibliografia consultada surgem conclusões obtidas acerca deste assunto que apontam para o facto da evolução deste parâmetro depender, essencialmente, do teor em cal e do tempo de cura.

Cristelo & Jalali (2002) concluíram, através de curvas tensão-deformação obtidas através do ensaio de compressão simples que, para o caso de um solo residual granítico, cuja rotura é típica de um material dúctil, após a sua mistura com cal, essa ductilidade torna-se inversamente proporcional ao tempo de cura e ao teor em cal.

Num estudo realizado por Alcântara et al (1997) foram obtidas curvas de tensão-deformação a partir de ensaios triaxiais “não consolidados-não drenados” de um solo que apresenta um comportamento essencialmente dúctil, para diferentes tempos de cura. Verifica-se que, com a adição de cal e com o aumento do período de cura da mistura, o solo

sofre mudanças nos seus parâmetros elásticos, caminhando para um comportamento frágil que pode ser considerado um efeito do desenvolvimento das reacções pozolânicas.

Quanto ao coeficiente de Poisson, outro parâmetro mecânico, verifica-se que, de um modo geral, o seu valor diminui com a estabilização com cal (Neves, 1993).

3.5.4 Permeabilidade

De acordo com a bibliografia consultada, a cal provoca variações nas características de permeabilidade de um solo. De um modo geral, a estabilização com cal de um solo essencialmente argiloso faz aumentar o valor do coeficiente de permeabilidade, enquanto que em solos mais granulares produz o efeito contrário, isto é, induz a diminuição do coeficiente de permeabilidade.

Nos solos com uma fracção silto-argilosa importante, a permeabilidade aumenta com a adição de cal uma vez que esta promove a criação de uma estrutura agregada mais porosa, com um índice de vazios maior através, inicialmente, das reacções de flocculação e, posteriormente, das reacções pozolânicas. Em solos mais grosseiros, a diminuição da permeabilidade deve-se ao facto de as partículas finas da cal reduzirem o índice de vazios desse solo.

A permeabilidade dos solos silto-argilosos não é influenciada pelo teor em cal para misturas solo-cal cujo teor em água é inferior ao valor óptimo, provavelmente por esses solos já possuírem uma estrutura flocculada. O teor em cal tem uma influência significativa no coeficiente de permeabilidade quando o teor em água é o óptimo ou superior.

Com o aumento do tempo de cura, tanto em solos coesivos como granulares a permeabilidade da mistura solo-cal diminui. Este fenómeno explica-se fundamentalmente pela acção de cimentação que se processa ao longo do tempo: o gel produzido pela reacção da sílica preenche os poros do solo, constituindo um obstáculo à percolação. Por outro lado, outra explicação pode ser dada pelas reacções de carbonatação que resultam na precipitação do carbonato de cálcio nos poros do solo.

Cardoso et al. (2008) verificaram que, para o caso de uma marga estabilizada com cal, a permeabilidade diminuiu ligeiramente e as características de retenção alteraram-se pouco, o que pode ser explicado pelo facto de a dimensão média dos poros não se ter alterado

significativamente, como ficou comprovado pela porosimetria por intrusão de mercúrio.

No caso de um solo bentonítico estabilizado com cal, Khattab et al. (2007) demonstraram que o coeficiente de permeabilidade aumenta inicialmente até um valor máximo, a partir do qual diminui até atingir um valor constante ao fim de 42 dias. Este estudo vem reforçar a teoria de que as reações desenvolvidas entre a cal e a argila ao longo do tempo reduzem a permeabilidade, quer modificando o tamanho dos poros através do seu preenchimento e cimentação, quer diminuindo a acessibilidade da água a esses poros.

3.5.5 Durabilidade

A capacidade dos materiais estabilizados com cal resistirem aos efeitos prejudiciais da humidade e dos ciclos de congelamento-descongelamento ao longo do tempo, tem sido avaliada de várias formas tanto em laboratório como no campo. Os resultados dessas avaliações têm frequentemente mostrado apenas um ligeiro efeito negativo do ambiente nos níveis de resistência /rigidez produzidos pela adição de cal.

Khattab et al. (2007) estudaram a eficiência a longo prazo da estabilização de um solo plástico com cal, tendo em conta a influência de ciclos de secagem-molhagem nas características de expansibilidade. Concluíram que essas condições de desgaste diminuem a eficiência do tratamento mas que a sua evolução depende da forma como o ciclo é iniciado. No caso dos ciclos iniciados com a molhagem, as variações volumétricas tendem a estabilizar após alguns ciclos em valores significativamente inferiores aos do solo não estabilizado. Por outro lado, no caso em que os ciclos foram iniciados com a secagem, as variações volumétricas aumentam progressivamente, levando à perda da maioria dos efeitos benéficos do tratamento. Este fenómeno pode ser explicado devido à secagem prévia conduzir a uma contracção do provete, possivelmente acompanhada da formação de microfissuras e, para além disso, também interrompe as reações pozolânicas, que necessitam de um certo grau de humidade para se desenvolver.

Os mesmos autores procederam também à execução de ensaios de lixiviação como outra forma de avaliar a durabilidade da estabilização do solo com cal. Para esse efeito permitiram que água destilada percolasse através dos provetes durante um determinado período de tempo, com um gradiente tal que simulasse condições extremas, tal como uma inundação. Após analisarem o lixiviado, concluíram que a lixiviação não reduz a eficiência do tratamento, uma vez que a quantidade de cal deslocada pelo fluxo de água, calculada

com base na concentração de iões Ca^{2+} do lixiviado, é reduzida, quando comparada com a quantidade inicialmente adicionada.

Cristelo & Jalali (2004) desenvolveram um trabalho de investigação envolvendo a estabilização com cal de solos cujo mineral argiloso predominante é a caulinite. Tendo em vista o estudo do efeito da água na durabilidade, realizaram-se ensaios à compressão uniaxial em amostras próximas da saturação. Verificou-se que a perda de resistência, relativamente aos valores obtidos para as misturas não saturadas, é tanto menor, em termos percentuais, quanto maior o período de cura da amostra saturada. Este fenómeno pode ser explicado pelo facto de o material cimentício, que impede a entrada de água nos vazios, se desenvolver ao longo do tempo de cura.

As misturas solo-cal apresentam propriedades de auto-regeneração intrínsecas, ou seja, o solo estabilizado pode, com o tempo, recuperar a resistência perdida. Isto significa que possíveis perdas durante o Inverno, devidas aos ciclos naturais de gelo-degelo não serão acumuladas. Esta auto-regeneração só é possível se estiverem reunidas as condições favoráveis à continuação do desenvolvimento das reacções pozolânicas, nomeadamente uma temperatura adequada, uma quantidade de cálcio disponível suficiente e um pH elevado.

4 MATERIAIS UTILIZADOS E METODOLOGIA ADOPTADA

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicia-se a descrição da fase mais prática deste estudo. No âmbito da presente dissertação foi conduzida uma investigação laboratorial com o fim de caracterizar física e quimicamente dois solos argilosos, bem como as alterações nas suas características resistentes, decorrentes da estabilização com cal.

Primeiramente faz-se uma caracterização sumária dos materiais utilizados: dois solos argilosos e hidróxido de cálcio. Foram escolhidos solos argilosos para a realização desta investigação, uma vez que constituem terrenos geralmente problemáticos quando solicitados por construções, devido à sua baixa resistência, alta deformabilidade e forte interacção com a água.

Numa segunda fase, são descritos os procedimentos laboratoriais efectuados bem como a preparação e as condições a que os solos foram sujeitos antes da realização desses ensaios.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1 Solos argilosos

Neste estudo foram utilizados dois tipos de solos argilosos, recolhidos em locais distintos que, nas últimas décadas, têm vindo a sofrer cada vez mais solicitações por parte de construções.

Um dos locais de recolha foi Sesimbra (figuras 4.1 e 4.2), tendo-se aí obtido amostras de solos pertencentes ao Complexo Pelítico – Carbonatado – Evaporítico (*Margas de Dagorda*). Segundo a Notícia Explicativa da Folha 38 – B – Setúbal, da Carta Geológica de Portugal, este complexo é constituído essencialmente por pelitos vermelhos, esverdeados e cinzentos, siltosos, nos quais se intercalam evaporitos, essencialmente gesso, e diversos estratos margo-dolomíticos. Esta unidade ocupa o fundo do vale diapírico de Sesimbra, cujo nome tem origem no facto de ser resultante da evolução de uma estrutura anticlinal complexa, o diapiro. O comportamento plástico do referido complexo permitiu a sua ascensão através da cobertura de terrenos sedimentares, deformando-a (Kullberg, 2000).

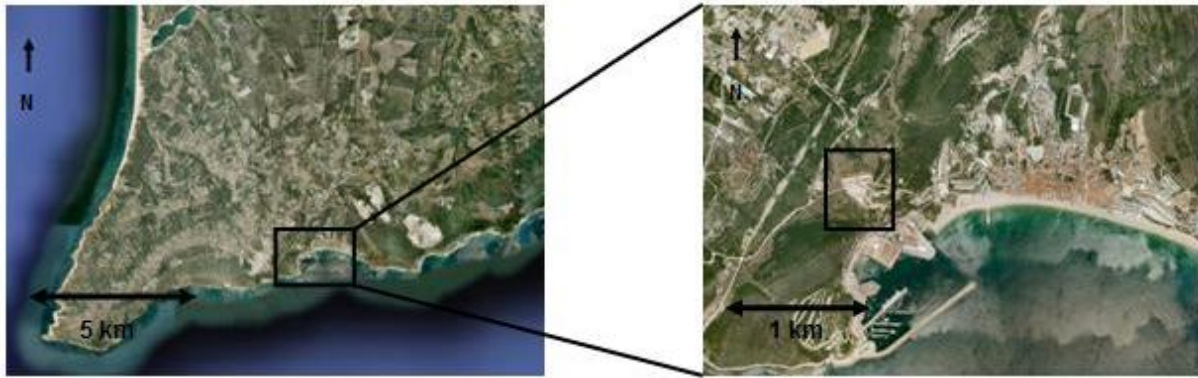


Figura 4.1 - Pormenor do local de recolha de amostras em Sesimbra (Google Earth, 2010).

A principal razão da escolha deste solo prende-se, neste caso, com o facto de estar a ocorrer actualmente uma crescente ocupação urbana do fundo do vale diapírico de Sesimbra, que se prolonga numa direcção aproximadamente NE-SW, como é típico neste género de estruturas, desde Santana até ao local de Palames, próximo do mar. De facto, nos últimos 30 anos tem-se verificado que aqueles terrenos pelíticos, originalmente aproveitados para a pastorícia e para uma agricultura pobre, têm-se tornado atractivos para a ocupação de habitação de lazer, facto a que não são alheias tanto as praias da região como a relativa proximidade da capital. Ultimamente, no lugar de vivendas unifamiliares, têm começado a construir edifícios de habitação com 5 ou mais pisos. Uma observação atenta nalgumas construções mais antigas, cujas paredes se apresentam muitas vezes fendilhadas, parece demonstrar as deficientes características geotécnicas destas argilas como terrenos de fundação.



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

As amostras foram obtidas com o auxílio de um trado manual, na quantidade julgada necessária para a realização dos ensaios laboratoriais. Estas foram cuidadosamente armazenadas em sacos plásticos bem fechados de modo a evitar perdas de água.

O solo recolhido neste local apresentava um teor em água natural médio de 27,50%.

O outro local de recolha foi nos Capuchos, no concelho de Almada (figuras 4.3 e 4.4), onde os solos pertencem à unidade de Cotter (1956) das *Argilas azuis de Xabregas*. De acordo com a Notícia Explicativa da Folha 34 – D – Lisboa, da Carta Geológica de Portugal, trata-se de um conjunto silto-argiloso, por vezes com areias finas, de cor cinzento azulado. Esta unidade representa a maior transgressão de todo o Miocénico e data do *Serravaliano*.



Figura 4.3 - Pormenor do local de recolha de amostras nos Capuchos (Google Earth, 2010).

Este solo foi escolhido por duas razões. A primeira foi, sem dúvida, a proximidade geográfica dos locais de amostragem em relação à FCT/UNL. A segunda tem um cariz mais utilitário: estes terrenos pelíticos estendem-se entre a auto-estrada A2 e a Costa de Caparica ao longo de grande parte da superfície planáltica das colinas de Almada e, a partir daí, ocupam a encosta suave que desce sobre a via rápida IC 20. Toda esta área apresenta uma morfologia suave, favorecida pela estrutura das camadas miocénicas inclinando 5° a 8° para SSE, o que a torna particularmente atractiva para a construção. De facto, é sobre estes terrenos que, desde há algumas décadas, a cidade de Almada tem vindo a crescer, na sua expansão para leste na direcção da Costa de Caparica.

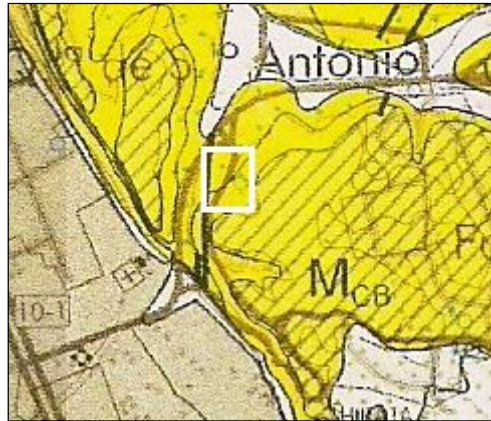


Figura 4.4 - Extracto da carta geológica de Portugal, na escala 1:50 000, com destaque na zona de recolha.

As amostras foram obtidas com o auxílio de uma pá na quantidade julgada necessária para a realização dos ensaios laboratoriais e foram acondicionadas da mesma forma que as anteriores.

O solo recolhido neste local continha um teor em água natural médio de 26,06%.

4.2.2 Cal

Para a realização das misturas solo-cal foi utilizada cal aérea hidratada (hidróxido de cálcio), com o nome comercial Proviacal® H, gentilmente cedido pela empresa Lusical, S.A.. Segundo a ficha do produto fornecida pela empresa esta cal preenche os requisitos da norma NFP 98-101.

Apesar de ser um produto fabricado a partir de materiais naturais, é alvo de exames constantes de modo a manter uma certa uniformidade do produto e a garantir a sua qualidade. Assim, são apresentadas as suas características químicas e físicas (respectivamente quadros 4.1 e 4.2) que, apesar de terem sido determinadas há alguns anos atrás, não sofreram alterações significativas até aos dias de hoje.

Quadro 4.1 - Composição química da cal aérea hidratada- valores médios (Pinho, 2007).

Composto		Quantidade média [%]
Hidróxido de cálcio	Ca(OH) ₂	93,5
Carbonato de cálcio	CaCO ₃	3,86
Hidróxido de magnésio	Mg(OH) ₂	0,52
Sulfato de cálcio	CaSO ₄	0,51

Quadro 4.2 - Granulometria da cal aérea hidratada– valores médios (Pinho, 2007).

Análise	Quantidade média (retido) [%]
2 µm	85,10
5 µm	57,00
10 µm	32,60
40 µm	14,40
50 µm	12,80
80 µm	9,23
125 µm	5,68
200 µm	2,50
315 µm	0,54
500 µm	0,00
Diâmetro médio	6,07 µm

Ambos os solos apresentam um teor em água natural superior ao teor em água ótimo de compactação, como se poderá verificar mais adiante. Estas condições sugerem que seria mais indicada a utilização de cal viva (óxido de cálcio) conforma já explicado no ponto 3.3.3. No entanto, foi preferida a cal aérea hidratada (hidróxido de cálcio) visto ser mais segura e mais fácil de utilizar no estado pulverulento.

4.3 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO ADOPTADA

4.3.1 Generalidades

Neste estudo foram consideradas as recomendações da National Lime Association (2006) no que diz respeito à concepção das misturas solo-cal e aos procedimentos

utilizados para testar as suas características. Os procedimentos descritos nessa publicação não são destinados à secagem ou modificação de solos com cal mas sim à sua estabilização. Têm como objectivo avaliar se um solo é adequado à estabilização com cal, determinar a quantidade mínima de cal necessária para esse efeito e estimar a resistência a longo prazo e a durabilidade das misturas. Estes objectivos são alcançados através de três etapas:

- 1) Avaliação da aptidão do solo para a estabilização com cal;
- 2) Determinação do teor óptimo em água e da quantidade mínima de cal necessária para a estabilização;
- 3) Avaliação da resistência do solo estabilizado com cal a longo prazo no seu ambiente de exposição, em especial atenção para períodos de imersão prolongada;

Para avaliar a aptidão dos solos amostrados a este tipo de tratamento (etapa 1) procederam-se aos ensaios conducentes à determinação do teor em matéria orgânica, granulometria e limites de consistência.

Na segunda etapa, para além de se determinar o teor mínimo em cal a utilizar na estabilização dos solos, efectuaram-se ensaios de compactação.

Por fim, a etapa 3 constou da execução de ensaios de resistência à rotura em compressão uniaxial.

A realização dos referidos ensaios foi dividida entre alguns dos laboratórios existentes na FCT-UNL, nomeadamente os de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil, o de Geologia de Engenharia e o de Rochas Industriais e Sedimentologia, estes últimos inseridos no Departamento de Ciências da Terra.

4.3.2 Determinação do teor em matéria orgânica

Este ensaio tem como objectivo determinar a quantidade, em massa, de matéria orgânica numa amostra de solo. Para tal foi seguido um protocolo interno do Departamento de Ciências da Terra da FCT-UNL que consiste, de uma forma sucinta, na queima da matéria orgânica a 450°C e que compreende os seguintes passos:

- 1) Secar amostras de solo com cerca de 20g na estufa a 110°C durante, pelo menos, 48

horas, de forma a extrair a água por evaporação. As amostras são pesadas após arrefecimento;

2) Queimar a matéria orgânica existente nas amostras, colocando-as na mufla a 450°C durante, pelo menos, 1 hora. As amostras são pesadas após arrefecimento.

A diferença entre as duas pesagens corresponde à massa de matéria orgânica contida nas amostras.

Solos com teores em matéria orgânica acima de 1-2% do seu peso seco podem revelar-se inadequados a este tipo de estabilização, uma vez que podem ser incapazes de alcançar a resistência à compressão uniaxial desejada para um solo estabilizado com cal.

4.3.3 Análise granulométrica e limites de Atterberg

Previamente à realização da análise granulométrica e da determinação dos limites de Atterberg, as amostras dos dois solos em estudo foram preparadas segundo a especificação LNEC E 195 – 1966.

A análise granulométrica é uma ferramenta que permite determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas constituintes de um solo. A análise granulométrica das partículas com diâmetro superior a 0,075mm foi executada de acordo com a especificação LNEC E 239 – 1970. A fracção restante foi analisada recorrendo ao método de sedimentação (figura 4.5), descrito na especificação LNEC E 196 – 1966.



Figura 4.5 – Obtenção da granulometria da fracção fina pelo método de sedimentação.

Os limites de consistência, ou de Atterberg, foram obtidos segundo o procedimento descrito na norma portuguesa NP 143 (1969).

O limite de plasticidade (LP) corresponde ao teor em água que indica a passagem do estado semi-sólido para o estado plástico, enquanto que o limite de liquidez (LL) representa o teor em água que indica a passagem do estado plástico para o estado líquido.

Da diferença entre LL e LP obteve-se o índice de plasticidade (IP) que corresponde à variação de teores em água na qual o solo apresenta um comportamento moldável.

Recorrendo à análise granulométrica e ao IP é possível determinar o índice de actividade de Skempton (1953, *in* Vargas, 1978) através da expressão 4.1:

$$Ac = \frac{IP}{\% \text{ argila}(<2\mu m)} \quad (4.1)$$

Geralmente, um solo passível de ser estabilizado através da adição de cal é aquele cuja fracção de diâmetro inferior a 0,075mm é igual ou superior a 25% e cujo IP é igual ou superior a 10%.

Tal como foi abordado no ponto 2.5.2.2, o aumento da resistência à compressão não confinada é tanto maior quanto maior for a actividade de um solo. Assim, o índice de actividade de Skempton também constitui uma medida para avaliar a adequabilidade de um solo à estabilização com cal.

4.3.4 Determinação da quantidade de cal necessária à estabilização

A quantidade de cal mínima para estabilizar os solos em estudo foi determinada através do método sugerido por Hill & Davidson (1960, *in* Khattab, 2007). Este método consiste numa expressão empírica que relaciona o chamado “ponto de fixação da cal” ou a percentagem mínima de cal (L_m) com o teor em argila de um solo (expressão 4.2).

$$L_m = \frac{\% \text{ argila}(<2\mu m)}{35} + 1.25 \quad (4.2)$$

O valor obtido da expressão anterior corresponde ao teor em cal (relativamente à massa de solo seco) que eleva acima de 12 o pH da mistura possibilitando, como explicado no capítulo anterior, a ocorrência de reacções pozolânicas, responsáveis pelos ganhos de resistência a longo prazo.

4.3.5 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação têm como objectivo a determinação da relação entre o teor em água e a massa volúmica seca dos solos. Para além disso, permite fixar um termo de comparação para o controle da massa volúmica e de humidade no campo.

Estes ensaios foram efectuados de acordo com a especificação LNEC E 197 – 1966, na modalidade “compactação pesada em molde pequeno” (figura 4.6), uma vez que a compactação pesada é usualmente utilizada para o estudo de solos a utilizar em camadas de leito de pavimento, uma das aplicações mais comuns da estabilização de solos com cal.



Figura 4.6 – Equipamento utilizado no ensaio de compactação e na fabricação dos provetes.

4.3.6 Ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial

O principal objectivo deste ensaio é a determinação da resistência à rotura em compressão de provetes cilíndricos de misturas solo-cal não confinados, quando sujeitos a uma carga axial de compressão.

Estes ensaios foram realizados de acordo a norma ASTM D 5102 – 04, que contempla dois procedimentos que diferem na relação altura-diâmetro dos provetes ensaiados. Foi adoptado o procedimento B, que prevê a realização de ensaios em provetes cilíndricos com uma relação altura-diâmetro de cerca de 1,15, moldados directamente nos moldes pequenos de compactação (com 102 mm de diâmetro interno e 117 mm de altura), conforme a especificação LNEC E 197 – 1966 (Ensaio de Compactação). Segundo a

norma, este procedimento permite efectuar análises comparativas de resistência mais correctas quando o número de resultados é reduzido, dada a pequena dispersão de resultados.

Previamente à fabricação das misturas, foi extraída a água dos solos por secagem ao ar e, posteriormente, foram-lhes adicionadas determinadas quantidades de água e cal correspondente aos teores óptimos.

Foram considerados os seguintes casos:

- Solo sem cal. Após a fabricação dos provetes, estes foram acondicionados em película plástica e colocados num recipiente hermético e impermeável de modo a evitar a modificação das suas características até à execução do ensaio;

- Mistura solo-cal com percentagem de cal definida através do método de Hill & Davidson (1960, *in* Khattab, 2007). A mistura foi armazenada durante cerca de 1 hora à temperatura ambiente num recipiente hermético e impermeável antes da fabricação dos provetes. Imediatamente após a fabricação dos mesmos, estes foram envolvidos numa película plástica e colocados num recipiente hermético e impermeável durante 7 dias a 40°C. Estas condições de cura têm como objectivo acelerar o desenvolvimento das reacções pozolânicas, responsáveis pelo processo de cimentação.

- Provetes fabricados e curados do mesmo modo que os anteriores mas sujeitos a embebedimento capilar durante 24 h antes do ensaio. Após a remoção dos provetes do recipiente e da película, estes foram envolvidos num tecido absorvente molhado que permaneceu em contacto com água no decorrer do embebedimento capilar. Os provetes não estiveram em contacto directo com a água.

Foram fabricados 2 provetes para cada caso (figuras 4.7 e 4.8), nas condições óptimas de compactação, recorrendo à compactação pesada, conforme referido no ponto 4.3.5. A taxa de deformação axial utilizada foi de 1,25 mm/min (1,07% da altura inicial do provete) em todos os provetes, excepto nos provetes sem cal das *argilas de Xabregas*, que apresentavam um comportamento mais dúctil. Neste caso, a taxa de deformação axial utilizada foi de 8,25mm/min (7,05% da altura inicial do provete).

Este tipo de ensaio é um dos mais utilizados para avaliar a resistência mecânica dos solos estabilizados com cal, uma vez que, para além da simplicidade de execução, fornece toda a informação necessária ao projecto de uma mistura solo-cal visto que a resistência à

flexão e à tracção podem ser deduzidas, com confiança, a partir dele (Little, 1995 *in* Cristelo & Jalali, 2002).

Este ensaio pode também funcionar como um índice da reactividade do solo em relação à cal. Ganhos de resistência consideráveis indicam que o solo é reactivo com a cal, dando origem a um material com boas características de aplicabilidade.

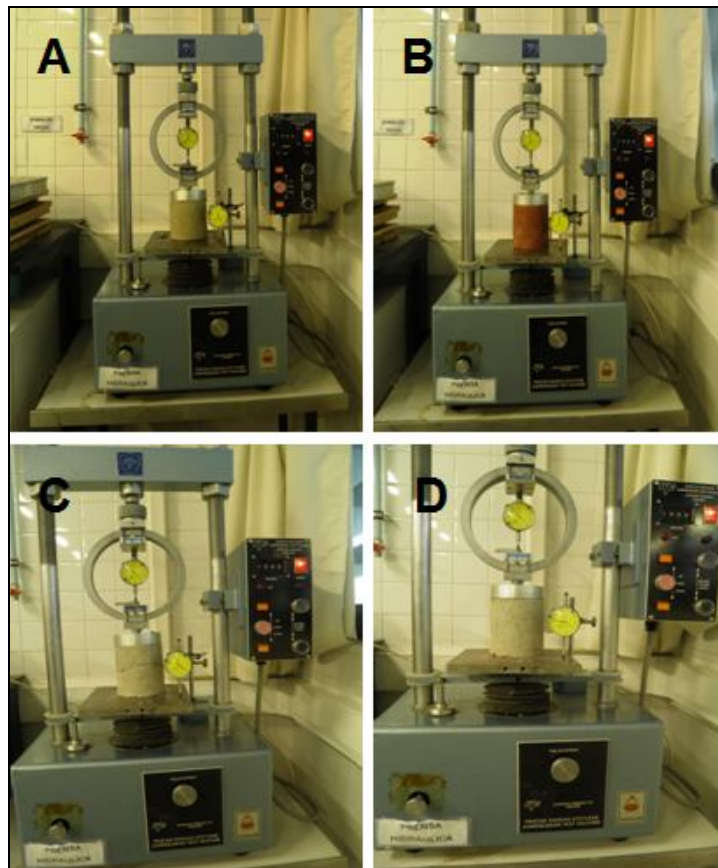


Figura 4.7 – Alguns dos provetes ensaiados à rotura em compressão uniaxial: A – solo recolhido nos capuchos; B – Solo recolhido em Sesimbra; C – solo recolhido nos Capuchos com cal e sujeito a cura; D – solo recolhido nos Capuchos com cal, sujeito a cura e a 24 horas de embebimento.

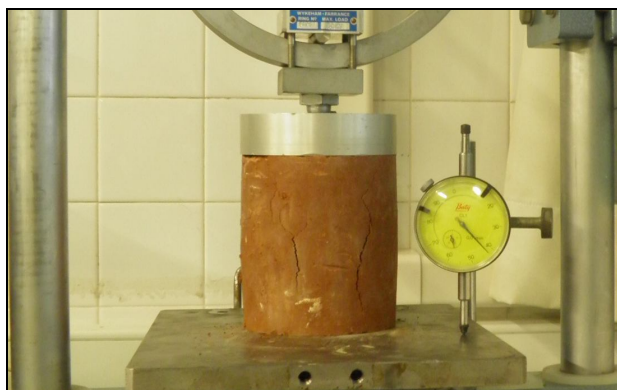


Figura 4.8 – Pormenor do provete de solo recolhido em Sesimbra (figura 4.7 – B), após a rotura.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios descritos no capítulo anterior, não só no que diz respeito a cada solo individualmente, mas também comparando-os entre si. Esta análise irá permitir, numa primeira fase, decidir acerca da adequabilidade dos solos à estabilização com cal, determinar o teor em cal adequado e as condições óptimas de compactação a aplicar. Posteriormente, serão avaliadas as alterações nas características de resistência mecânica dos solos.

De modo a facilitar a compreensão deste capítulo foi criada uma nomenclatura dos solos, tendo em conta o local onde foram recolhidos e as condições a que foram sujeitos (quadro 5.1).

Quadro 5.1 – Nomenclatura adoptada para a identificação dos solos ensaiados.

	Sem cal	Com cal, após o período de cura	Com cal, após o período de cura e sujeito a embebimento durante 24 horas
Solo recolhido nos Capuchos	C	CC	CCE
Solo recolhido em Sesimbra	S	SC	SCE

5.2 TEOR EM MATÉRIA ORGÂNICA

O solo S apresenta um teor em matéria orgânica de 0,68% e o solo C 0,86%.

Quanto a este parâmetro, segundo as directivas da National Lime Association ambos os solos são aptos à estabilização com cal visto o teor em matéria orgânica não ultrapassar 1%.

Esta foi a única análise química a que os solos amostrados foram sujeitos no âmbito deste estudo. Contudo, é importante conhecer os tipos e quantidades relativas de filossilicatos presentes nas amostras, uma vez que esses parâmetros condicionam a resposta do solo à estabilização com cal.

Como foi dito anteriormente, os diferentes filossilicatos presentes nos solos argilosos possuem diferentes valores de capacidade de troca catiónica. Tais valores podem ser comparados, para três dos tipos mais comuns de minerais argilosos, no quadro 2.2. Neste

quadro verifica-se que as esmectites apresentam os maiores valores, enquanto que a caulinite apresenta os menores.

Quanto maior a capacidade de permuta catiónica, maior a propensão para trocas de catiões entre os solos argilosos e a cal, o que favorece o processo de estabilização.

Por razões de ordem diversa, a que não foram alheios os prazos de entrega deste trabalho, não foi possível realizar a difracção de Raios X das amostras recolhidas. No entanto, existem publicadas algumas determinações da mineralogia dos dois solos estudados, que a seguir se apresentam.

Os quadros 5.2 e 5.3 mostram as quantidades médias, em percentagem, dos minerais argilosos presentes, respectivamente, nos solos S e C, determinadas com base na leitura dos picos dos difractogramas.

Deve-se ter com conta que, para além do número de ensaios não ser representativo, eles provêm de amostras recolhidas noutros pontos que não os correspondentes aos do presente estudo. Em todo o caso, é possível observar tendências quanto à composição mineralógica.

Quadro 5.2 – Quantidade média (em percentagem) da mineralogia da fracção argilosa do solo S (Lamas et al., 2008).

Mineral	S1	S2	S3	S4
Clorite	26	-	-	-
Esmectite	-	2	-	-
Ilite	23	31	62	39
Caulinite	51	67	38	60

Verifica-se que existe um predomínio da caulinite em três das amostras, secundada pela ilite. A esmectite é o filossilicato menos presente.

Quadro 5.3 - Quantidade média (em percentagem) da mineralogia da fracção argilosa do solo C (Lamas, 1998).

Mineral	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Ilite	53	43	42	37	32	38
Esmectite	25	31	38	39	49	42
Caulinite	22	26	20	24	19	20

Embora a ilite seja, de um modo geral, a mais abundante, a esmectite, o mineral mais activo, também ocupa uma percentagem importante, enquanto que a caulinite, o menos activo dos minerais presentes na fracção argilosa, é o menos representado.

À partida, e tendo em conta estes elementos, pode-se admitir que o solo recolhido nos Capuchos irá responder melhor ao tratamento por estabilização.

5.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E LIMITES DE ATTERBERG

São apresentadas as curvas granulométricas de ambos os solos (figura 5.1):

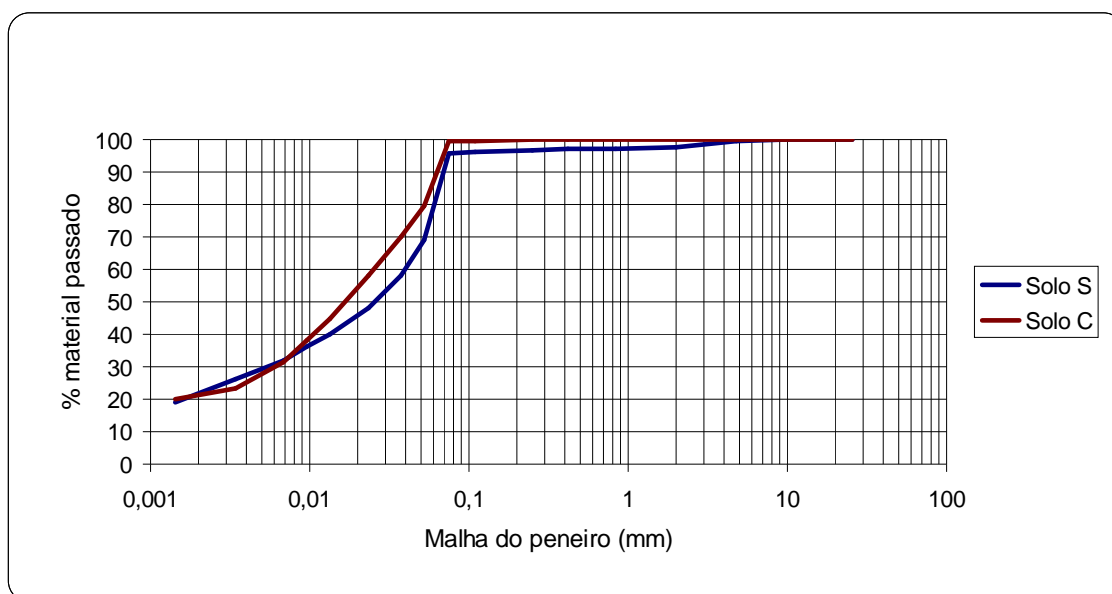


Figura 5.1 - Curvas granulométricas dos solos S e C.

Através da análise das curvas granulométricas pode-se verificar que o solo S apresenta cerca de 95,7% de partículas de tamanho inferior a 0,075mm, enquanto que, para o solo C,

essa percentagem eleva-se a 99,7%.

Quanto aos limites de consistência, são apresentados no seguinte quadro resumo (quadro 5.4):

Quadro 5.4 - Limites de consistência de ambos os solos.

Solo	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)	Índice de actividade (%)
S	44	27	16	0,71
C	39	25	14	0,69

Ambos os solos são classificados como inactivos, uma vez que o índice de actividade é inferior a 0,75. Quanto ao índice de plasticidade, os solos também apresentam valores semelhantes embora, segundo a classificação atribuída a este índice, o solo S apresente um comportamento altamente plástico ($IP > 15\%$), enquanto que o solo C é considerado medianamente plástico ($7\% < IP < 15\%$).

Através dos dados acima enunciados é possível classificar os solos, quer utilizando a Classificação para fins rodoviários (LNEC E 240 - 1970), quer utilizando a Classificação Unificada (Correia, 1988).

Colocando esses dados numa carta de plasticidade, o resultado que se obtém é o que se apresenta na figura 5.2. A carta de plasticidade é utilizada para a classificação de solos finos, do ponto de vista da sua plasticidade, e utiliza os símbolos da Classificação Unificada de solos. Assim, embora tenham origens muito distintas, pode verificar-se que ambos os solos possuem comportamentos semelhantes, uma vez que se encontram na mesma fronteira definida na carta pela recta que separa os solos de comportamento tipicamente argiloso dos de comportamento siltoso.

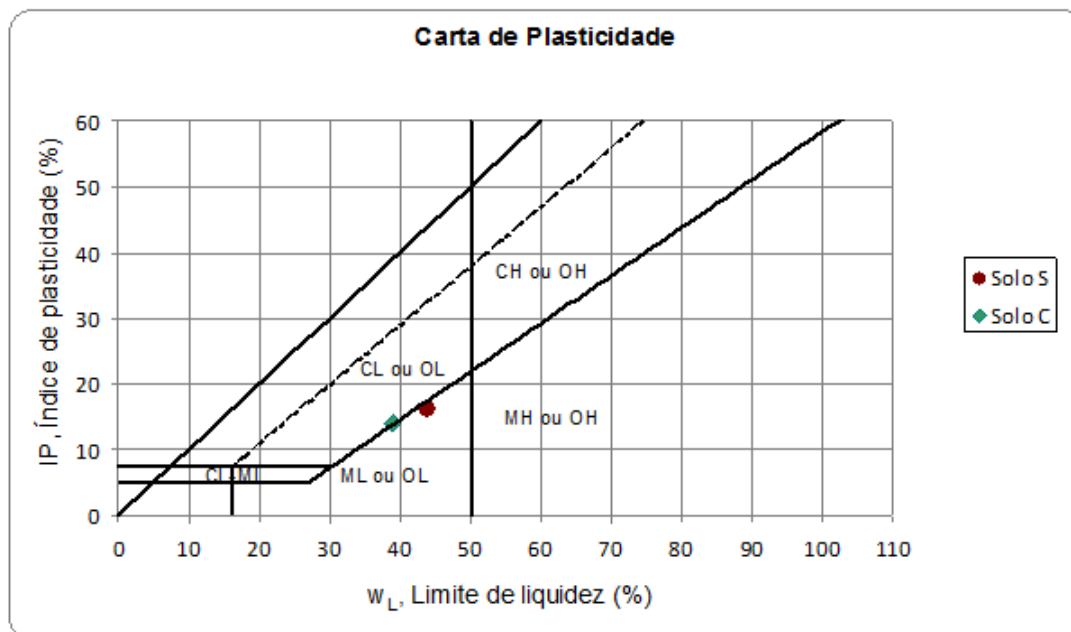


Figura 5.2 - Localização dos solos S e C na carta de plasticidade.

Pela Classificação Unificada de solos, e sabendo que nenhum dos solos é orgânico, o solo S pertence à classe ML – Silte e o solo C à classe CL – Argila Magra. Por se encontrarem numa zona de fronteira da carta de plasticidade, e segundo Correia (1988), será mais correcto classificar o solo S como ML/CL e o solo C como CL/ML. A trabalhabilidade do solo S, como material de construção, é descrita como “razoável” e a do C como “boa a razoável”.

Quanto à Classificação para fins rodoviários, o solo S insere-se na classe A-7-6 (11) e o solo C na classe A-6 (10), ou seja, são ambos solos argilosos. O comportamento na camada sob o pavimento dos terrenos que se inserem nestes grupos é descrito como “muito mau”. O índice de grupo, que varia entre 0 e 20, tem uma relação inversa com a capacidade de suporte do material, em condições de boa drenagem e perfeita compactação. Pode dizer-se que, dentro dos respectivos grupos, ambos os solos possuem características medianas no que respeita a este parâmetro.

Reunindo os resultados de todos os ensaios acima analisados verifica-se que, segundo as recomendações da National Lime Association (2006), ambos os solos são aptos à estabilização com cal, visto possuírem uma fracção de partículas que passam no peneiro n.º200 (ASTM) superior a 25%, apresentarem um IP superior a 10% e conterem uma percentagem de matéria orgânica inferior a 1%. A diferença ao nível do índice de actividade é mínima, incluindo-se ambos os solos na mesma classe de actividade.

5.4 QUANTIDADE DE CAL NECESSÁRIA À ESTABILIZAÇÃO

Utilizando a expressão 4.2 verifica-se que a percentagem mínima de cal, em relação à massa de solo seco, que o solo S necessita para ser estabilizado é de 1,89%, enquanto que o solo C necessita de 1,83%. Aquando da fabricação dos provetes, ambos os valores foram arredondados para 2%.

Os valores determinados a partir da expressão acima referida vão de encontro às dosagens correntes utilizadas pela empresa Lusical, que forneceu a cal para este estudo, conforme a ficha do produto disponibilizada pela mesma.

5.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

São apresentadas as curvas de compactação para ambos os solos (figuras 5.3 e 5.4):

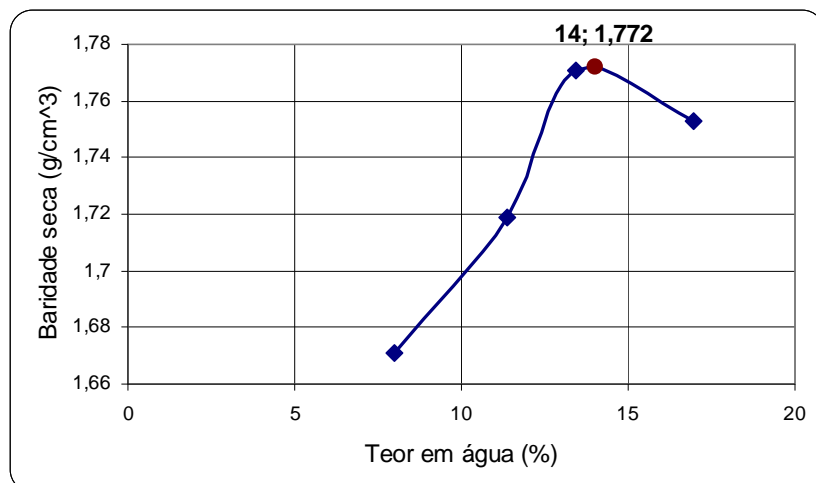


Figura 5.3 - Curva de compactação do solo S.

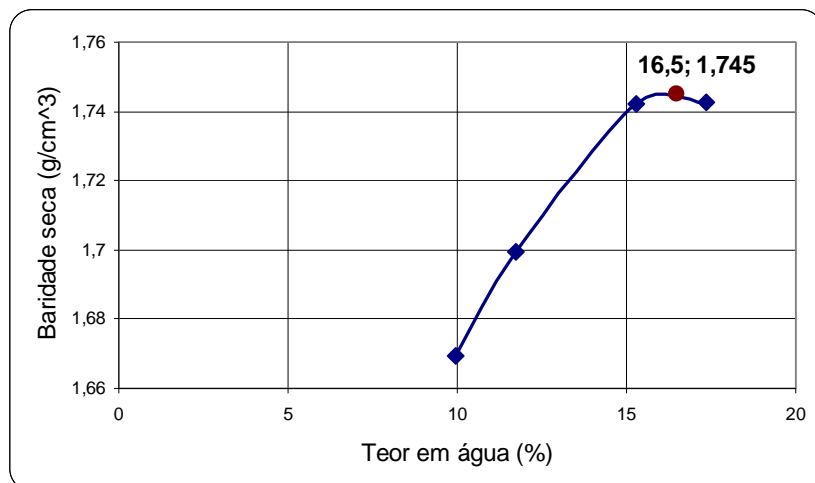


Figura 5.4 - Curva de compactação do solo C.

Verifica-se que o solo S possui um teor em água óptimo de compactação de cerca de 14% e uma baridade seca máxima de $1,772 \text{ g/cm}^3$. O solo C possui um teor em água óptimo de compactação de 16,5% e uma baridade seca máxima de $1,745 \text{ g/cm}^3$.

Como o objectivo desta dissertação não está relacionado com a modificação dos solos com cal, mas sim com a estabilização, não foram determinadas as alterações relacionadas com as características de compactação após a mistura dos solos com a cal. De acordo com a literatura consultada (Cardoso et al., 2008, Cristelo, 2001), para o valor do teor óptimo em cal obtido, o teor óptimo em água após a adição de cal ao solo aumenta em cerca de 2% em relação ao do solo original. Assim, foram esses os valores adoptados para a realização dos provetes de solo-cal sujeitos ao ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial, ou seja, para o solo S foi utilizado um teor em água de 16% e para o solo C de 18,5%.

Para atingir os teores em água acima referidos os solos foram secos ao ar, tendo-lhes sido posteriormente adicionada a cal nas percentagens referidas em 5.4. Seguidamente, foi adicionada a água na proporção de 160g por cada quilograma de mistura de solo recolhido em Sesimbra com cal e 185g por cada quilograma de mistura de solo recolhido nos Capuchos com cal.

5.6 RESISTÊNCIA À ROTURA EM COMPRESSÃO UNIAXIAL

No quadro 5.5 apresentam-se os valores reais de teor em água (w), densidade húmida (γ) e densidade seca (γ_d) de todos os provetes sujeitos ao ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial.

Quadro 5.5 – Características físicas dos provetes sujeitos ao ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial.

	Solo recolhido nos Capuchos						Solo recolhido em Sesimbra					
	Sem cal (C)		Com cal (CC)		Com cal e após embebimento (CCE)		Sem cal (S)		Com cal (SC)		Com cal e após embebimento (SCE)	
Provete	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
w (%)	18,25	19,04	18,18	19,83	20,98	20,51	18,08	16,16	18,22	20,13	21,56	20,09
γ (g/cm ³)	1,96	1,98	2,03	2,02	2,04	2,03	2,04	2,06	2,02	2,02	2,02	2,04
γ_d (g/cm ³)	1,66	1,66	1,72	1,69	1,68	1,68	1,73	1,77	1,71	1,68	1,66	1,70

No quadro 5.6 estão sintetizados os resultados obtidos no ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial para todas as situações descritas no ponto 4.3.6.

Quadro 5.6 – Resumo dos resultados obtidos no ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial.

Situação	Tensão de rotura (kPa)	Deformação axial na rotura (%)
C	159,3	8,75
CC	1393,5	2,57
CCE	663,5	2,16
S	522,8	5,98
SC	1118,6	2,11
SCE	528,0	1,62

Como já foi referido no início deste capítulo, para tornar mais clara a compreensão do significado dos resultados, estes foram estudados de duas formas distintas: inicialmente foi feita uma análise da evolução das características resistentes de cada solo individualmente e, posteriormente, foram comparados entre si. Nos gráficos seguintes irá manter-se a nomenclatura apresentada no quadro 5.1.

5.6.1 Análise individual de cada solo

Na figura 5.5 está representada a relação entre a tensão e a deformação axial dos provetes de solo recolhido nos Capuchos, quando sujeitos a compressão uniaxial, nas seguintes situações: sem adição de cal (C); com 2% de cal e após os 7 dias de cura acelerada (CC); com 2% de cal, após o período de cura e sujeitos a embebimento durante 24 horas (CCE).

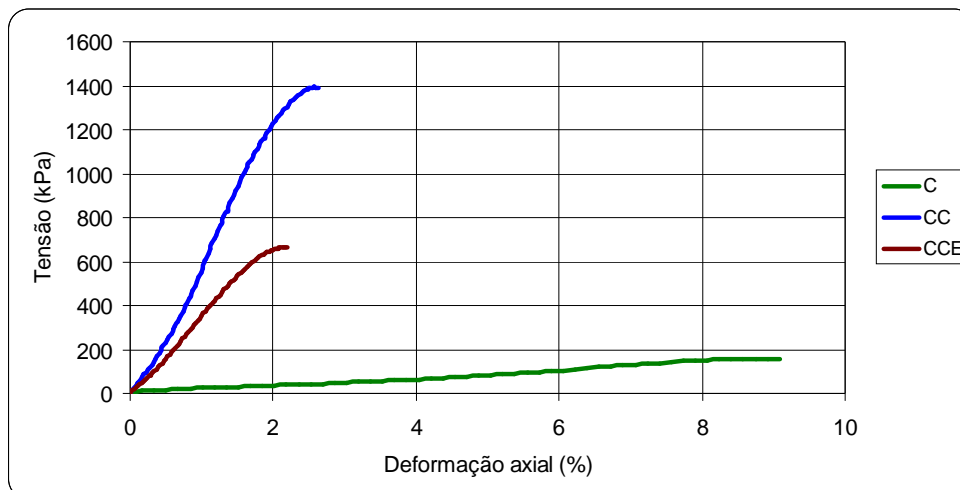


Figura 5.5 – Gráfico tensão deformação obtido em ensaios de resistência à rotura em compressão uniaxial para os casos C, CC e CCE.

Como se verifica na figura 5.5, a adição de cal provoca no solo uma diminuição da ductilidade e um ganho de resistência de cerca de 775%. Após o período de embebedimento, verifica-se um retrocesso destas melhorias. A ductilidade aumenta, embora sendo ainda muito inferior à do solo original, e a resistência fica reduzida a um pouco menos da metade da atingida pelo solo com cal que não foi sujeito a embebedimento.

A figura 5.6 representa as mesmas situações que a figura anterior, mas para o solo recolhido em Sesimbra.

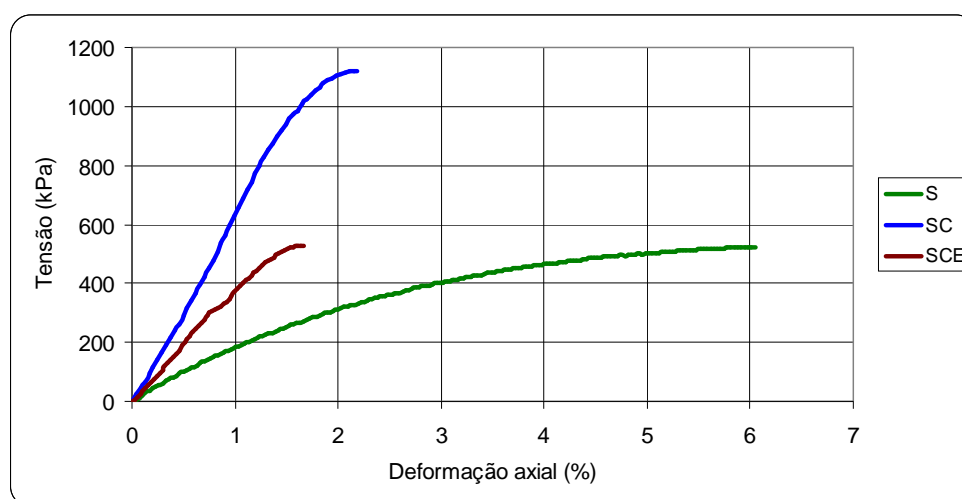


Figura 5.6 - Gráfico tensão deformação obtido em ensaios de resistência à rotura em compressão uniaxial para os casos S, SC e SCE.

A evolução das características de ductilidade é muito semelhante à do caso

anteriormente exposto. Quanto à resistência, o solo com cal sofreu um ganho de cerca de 115% em relação ao solo original. No entanto, após o período de embebedimento, a resistência sofreu uma diminuição, tomando um valor idêntico ao da resistência do solo sem cal.

5.6.2 Análise comparativa entre solos

Na figura 5.7 compara-se a evolução da relação entre a tensão e a deformação axial dos provetes dos dois solos argilosos, quando sujeitos ao ensaio de resistência à rotura em compressão uniaxial, antes e depois da adição de cal.

Como já foi exposto anteriormente (ponto 4.3.6), após a adição da cal o solo foi sujeito a uma cura durante 7 dias a 40°C num ambiente hermético e impermeável, de modo a acelerar o desenvolvimento das reacções que conduzem à cimentação.

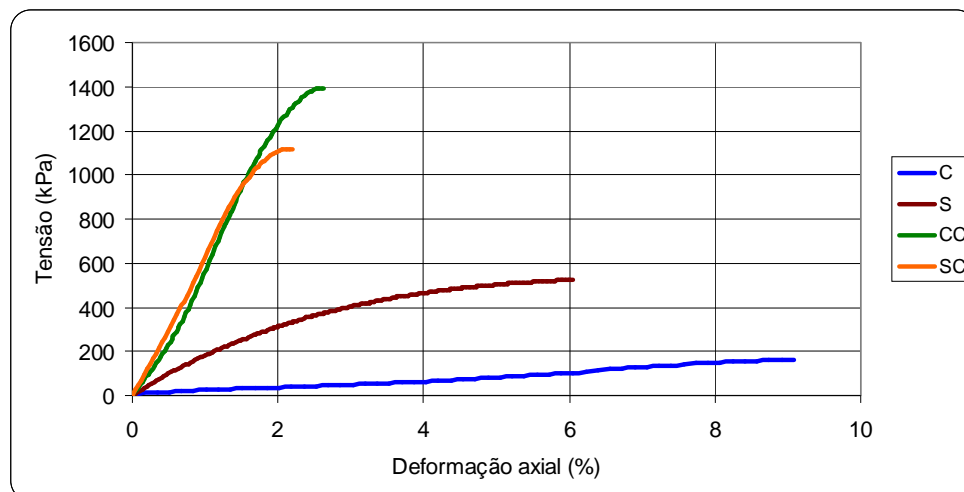


Figura 5.7 - Gráfico tensão deformação obtido em ensaios de resistência à rotura em compressão uniaxial para os casos C, S, CC e SC.

Antes da adição da cal, o solo S (Sesimbra) apresenta uma resistência à rotura em compressão simples cerca de 230% superior em relação à do solo C (Capuchos) e, simultaneamente, uma menor deformação na rotura. Ainda em relação à resistência na rotura, ambos os solos beneficiam da adição da cal e consequente cura de 7 dias sendo, contudo, as melhorias muito mais expressivas no caso CC.

Note-se que ambos os solos possuem teores em matéria orgânica inferiores a 1% e possuem uma percentagem em argila muito semelhante, foram tratados com o mesmo tipo

e igual percentagem de cal, e foram sujeitos às mesmas condições de cura.

Observando a plasticidade dos dois solos argilosos, seria previsível que fosse o solo recolhido em Sesimbra a sofrer os maiores incrementos de resistência, uma vez que é o mais plástico dos dois. Visto que isto não se verificou, pensa-se que a natureza dos minerais argilosos presentes nos dois solos seja a chave para esta questão.

Segundo o ponto 5.2 verifica-se que o solo S será constituído maioritariamente por minerais argilosos com fraca capacidade de troca catiónica – caulinite e ilite. Por outro lado, o solo C apresenta em abundância um mineral que possui uma grande capacidade de troca catiónica, a esmectite, o que facilita as reacções entre a cal e o solo e explica os maiores ganhos de resistência.

Uma vez que os incrementos na resistência à rotura em compressão simples funcionam como um índice de reactividade do solo em relação à cal, pode dizer-se que o solo C é o mais reactivo dos dois.

Na figura 5.8 estão representadas os efeitos decorrentes do embebimento, durante 24 horas, dos provetes curados para ambos os solos.

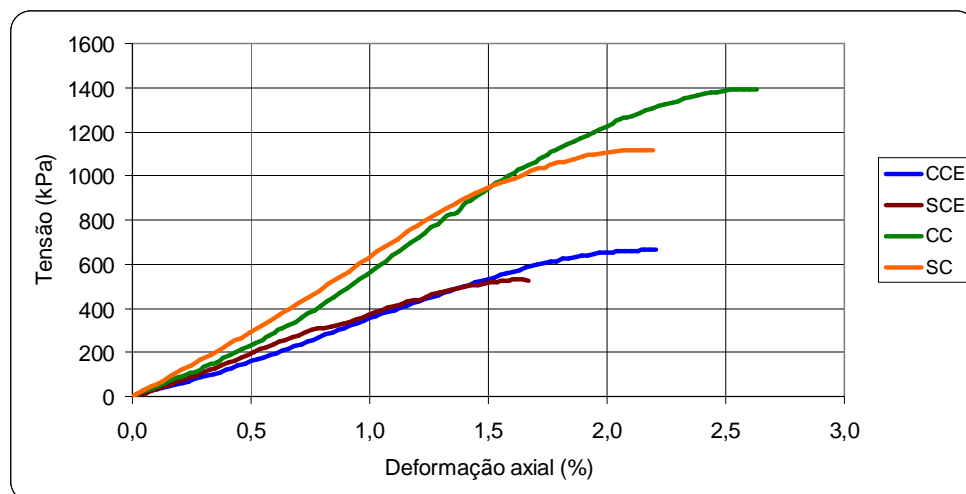


Figura 5.8 - Gráfico tensão deformação obtido em ensaios de resistência à rotura em compressão simples para os casos CC, SC, CCE e SCE.

Após o período de embebimento, a resistência à rotura em compressão uniaxial dos dois solos argilosos ficou reduzida a cerca de metade da atingida inicialmente com adição de cal.

Contudo, este facto tem um significado distinto para cada um dos solos.

No caso SCE, o solo praticamente volta à sua resistência inicial, previamente à adição de cal. Contudo, no caso CCE o solo ainda retêm alguma da resistência ganha ao longo do período de cura, permanecendo com uma resistência cerca de 315% superior à do solo original.

Uma explicação para este fenómeno pode estar no facto de o desenvolvimento do material cimentício, característico da acção de cimentação, ter sido menor no caso SCE, o que o tornou mais susceptível à entrada de água nos vazios.

Por último, tendo em conta a análise dos gráficos das figuras 5.7 e 5.8, verifica-se que, para as três situações distintas a que os dois solos foram sujeitos, a ductilidade do solo recolhido em Sesimbra é sempre menor do que a do solo obtido nos Capuchos. No entanto, relativamente à diferença entre deformações axiais na rotura dos solos sem cal, aquela diferença atenua-se sensivelmente após a adição de cal e do período de cura. Após as 24 horas de embebimento que se seguiram à cura, a diferença entre deformações axiais na rotura parece não sofrer alteração significativa.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os objectivos inicialmente estabelecidos foram atingidos, na medida em que foi possível analisar os efeitos da estabilização com cal em dois solos argilosos, cujas respostas a este tratamento foram distintas.

Os resultados dos ensaios laboratoriais realizados ao longo desta investigação permitem tirar as seguintes conclusões:

1) Através da caracterização física e química dos solos argilosos, e segundo as recomendações da National Lime Association (2006), ambos os solos demonstram ser aptos à estabilização com cal, visto possuírem uma fracção de partículas que passam no peneiro n.º200 superior a 25%, apresentarem um IP superior a 10% e conterem uma percentagem de matéria orgânica inferior a 1%.

2) A evolução das características de resistência e deformabilidade é análoga em ambos os solos: dá-se um acréscimo da resistência à rotura em compressão uniaxial e uma diminuição da ductilidade após a adição de cal e o período de cura. No entanto, existe uma regressão nessas melhorias após o período de embebimento a que os provetes curados foram sujeitos.

3) Apesar da evolução ser semelhante, os valores dos ganhos e perdas de resistência diferem: o solo C (proveniente dos Capuchos) apresenta ganhos superiores relativamente ao solo S (obtido na vale diapírico de Sesimbra). Admite-se que esse fenómeno se deva ao facto de o solo C possuir um teor em minerais argilosos com uma grande capacidade de troca catiónica superior ao solo S, o que potencia as reacções entre o solo e cal.

4) O solo C também apresenta perdas inferiores de resistência após o período de embebimento, relativamente ao solo S. Tal poder-se-á dever ao facto de o desenvolvimento do material cimentício ter sido mais activo no solo C, o que o tornou menos vulnerável à entrada de água nos vazios.

De um modo geral, tendo em conta os factos acima mencionados, considera-se que o solo C é o mais reactivo dos dois em relação à cal, o que implica que seria o que teria a beneficiar mais com este tipo de tratamento.

O presente trabalho seguiu uma directriz orientada para a vertente da estabilização de solos argilosos com cal, ao invés do melhoramento ou modificação. Para isso, foi dada ênfase aos efeitos da adição da cal nos solos ao nível do comportamento mecânico. A

análise das diferenças entre os dois solos estudados, relativamente a esses efeitos, teve como objectivo dar uma noção de adequabilidade relativa ao que a este tipo de estabilização concerne.

Devido a restrições temporais, não foi possível variar diversos parâmetros de modo a examinar exaustivamente as alterações das características dos solos decorrentes da estabilização com cal. Futuramente seria interessante aprofundar o conhecimento acerca de cada solo, individualmente, quando sujeito a este tipo de estabilização, nomeadamente:

- Variando o teor em cal, uma vez que o teor óptimo em cal utilizado nesta investigação foi obtido através de uma expressão que contém apenas uma variável. Pela leitura desta tese torna-se claro que existem mais factores em jogo;
- Variando as condições de cura. As condições de cura aplicadas neste trabalho tiveram como objectivo potenciar as reacções pozolânicas. Contudo, existem condições óptimas que devem ser determinadas;
- Sujeitando o solo a outro tipo de solicitações de modo a melhor prever a sua resposta quando utilizado numa obra;
- Aplicando esta técnica de estabilização *in situ*. Embora as técnicas laboratoriais tenham sido desenvolvidas para reproduzir o mais fidedignamente as condições do local de implementação da obra, os resultados de campo são mais fidedignos e mais próximos da realidade;
- Avaliando a durabilidade das misturas de outras formas, sujeitando-as a esforços cíclicos ou a ensaios de lixiviação, por exemplo.

A aplicação destas recomendações conduziria a uma maior contribuição para o conhecimento das características geotécnicas destes terrenos.

BIBLIOGRAFIA

Alcântara, M. A. M., Lima, D. C., Bueno, B. S. & Costa, L. M. (1997) Estabilização de solos com cal em regiões tropicais: Aplicação a solos de Ilha Solteira-SP, Brasil. *Acta do 6º Congresso Nacional de Geotecnia*, 211-220.

Boynton, R. S. (1980). *Chemistry and technology of lime and limestone*. United States of America: John Wiley & Sons.

Cardoso, R., Godinho, N. Faria, F. L. & Neves, E. M. (2008). *Estudo do comportamento hidro-mecânico de uma marga compactada antes e depois do seu tratamento com cal*. Consultado em 16 de Março de 2010:
http://www.civil.ist.utl.pt/~rafaela/Curriculum_files/11CNG-RCardoso_Solocal_revisto.pdf.

Correia, A.G. (1988). Revisão da classificação de solos para propósitos de engenharia, Geotecnia. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 52, 75-90.

Costa, C., Clavijo, E., Dias, R. P. & Kullberg, J. C. (Coord.), Pais, J. & Kullberg, J. C. (Coord. Carta) (2005) – “*Carta geológica de Portugal na escala 1: 50 000*”, Folha 38-B (Setúbal), Protocolo Colab. Desenv. Cart. Geol. da Área Metropolitana de Lisboa, Inst. Geol. Mineiro.

Cotter, J.C.B. (1956). *O Miocénico marinho de Lisboa (obra póstuma)*, Com. Serv. Geológicos de Portugal, Lisboa, supl. Ao tomo XXXVI. Lisboa.

Coutinho, A. S. (1997). *Fabrico e propriedades do betão- Volume I*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Cristelo, N. M. C. (2001). *Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho.

Cristelo, N. & Jalali, S (2002). Avaliação do melhoramento e estabilização de solos graníticos com cal e um activador químico. *Acta do 8º Congresso Nacional de Geotecnia*, 1515-1524.

Cristelo, N. & Jalali, S. (2004). Estabilização química de solos residuais graníticos. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 101, 25-40.

Cruz, J. F. S. (2008). *Avaliação do estado da arte da aplicação de solos tratados com cal no âmbito das infra-estruturas de transporte*. Dissertação de Mestrado. Univ. de Coimbra.

Deer, W. A., Howie, R. A. & Zussman, J. (2000). *Minerais Constituintes das rochas – Uma introdução* (Trad. C. Macedo). London: Addison Wesley Longman. (Edição original 1992). 367-396.

Gomes, C.F. (1988). *Argilas – O que são e para que servem*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

Greaves, H. M. (1996). An introduction to lime stabilisation. *Proceedings of the seminar “Lime Stabilisation”, 25 September, East Midlands Geotechnical Group of the Institution of Civil Engineers*. New York: Thomas Telford.

Jeremias, F. T. S. A. A. (1991). *Importância da expansibilidade na durabilidade dos materiais rochosos e técnicas laboratoriais para a sua avaliação*. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa.

Khattab, S. A. A., Al-Mukhtar, M. & Fleureau, J.-M. (2007). Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4, 358-366.

Kullberg, M. C., Kullberg, J. C. R., Terrinha, P. (2000). *Tectónica da cadeia da Arrábida in Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida*, Mem. Geociências, Museu Nac. Hist. Nat. Univ. Lisboa, n.º2, 35-84.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (1986). *Melhoria de solos*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Lamas, P.C. (1998). *Os taludes da Margem Sul do Tejo – Evolução geomorfológica e mecanismos de rotura*. Dissertação de Doutoramento. Universidade Nova de Lisboa.

Lamas, P., Santana, T. (2008). Contribuição para um melhor conhecimento do comportamento geotécnico dos terrenos argilosos do vale diapírico de Sesimbra. *Acta do 11º Congresso Nacional de Geotecnia*.

Mallela, J., Von Quintus, H., Smith, K. L. (2004). *Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design*. Arlington, Virginia: The National Lime Association.

Manuppella, G., Antunes, M. T., Pais, J., Ramalho, M. M., Rey, J. (1999). *Notícia explicativa da folha 38-B Setúbal*. Lisboa: Instituto Geológico e Mineiro.

- Mendonça, A. A., Lima, D. C., Bueno, B. S., Fontes, M. P. F. & Couto, L. G. (2001). Mistura solo-cal: Efeito da cal, tempo de cura e imersão na resistência. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 91, 57-68.
- Mineiro, A.J.C. (1978). *Mecânica dos Solos e Fundações*, Vol. 2 – Origem e Classificação dos Solos. Universidade Nova de Lisboa.
- National Lime Association. (2004). *Lime-treated soil: Construction Manual. Lime stabilization & lime modification*. Consultado em 16 de Março de 2010.
<http://www.lime.org/Construct104.pdf>.
- National Lime Association. (2006). *Mixture design and testing procedures for lime stabilized soil*. Consultado em 16 de Março de 2010: <http://www.lime.org/Oct2006VerMixDesign.pdf>.
- Neves, E. N. S. A. C. (2009). *Estudo laboratorial de solos tratados com cal: Modelos de comportamento*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto.
- Neves, J. M. C. (1993). *Estabilização de solos com cal – Estudo e aplicações rodoviárias*. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa.
- Pais, J., Moniz, C., Cabral, J., Cardoso, J. L., Legoinha, P., Machado, S., Morais, M. A., Lourenço, C., Ribeiro, M. L., Henriques, P., Falé, P. (2006). *Notícia explicativa da folha 34-D Lisboa*. Lisboa: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.
- Pais, J., Moniz, C., Clavijo, E., Dias, R., Manuppella, G. & Machado, S. (2005) – “*Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000*”, Folha 34-D, Lisboa, INETI.
- Perry, J., Macneil, D. J., Wilson, P. E. (1996). The uses of lime in ground engineering: a review of work undertaken at the transport research laboratory. *Proceedings of the seminar “Lime Stabilisation”, 25 September, East Midlands Geotechnical Group of the Institution of Civil Engineers*. New York: Thomas Telford.
- Pinho, F. (2007). *Paredes de Alvenaria Ordinária: Estudo Experimental com modelos simples e reforçados*. Tese de Doutoramento. Universidade Nova de Lisboa.
- Vallejo, L. I. G. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- Van Impe, W. F. (1989). *Soil improvement techniques and their evolution*. Rotterdam: A. A. Balkema.

Vargas, M. (1978). Introdução à Mecânica dos Solos, Mc Graw Hill do Brasil Ltda., SP.

Normas e Especificações

ASTM D 5102 – 04 - *Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures*. United States: ASTM International.

E-195 – 1966, *Solos – Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*, Especificação LNEC, MOP.

E-196 – 1966, *Solos – Análise granulométrica*, Especificação LNEC, MOP.

E-197 – 1966, *Solos – Ensaio de compactação*, Especificação LNEC, MOP.

E-239 – 1970, *Solos – Análise granulométrica por peneiração húmida*, Especificação LNEC, MOP.

E-240 – 1970, *Solos – Classificação para fins rodoviários*, Especificação LNEC, MOP.

NF P 98 – 101 (1991). *Assises de chaussées. Chaux aérienne calcique pour sols et routes*. AFNOR. France

NP-143, 1969, *Solos – Determinação dos limites de consistência*, Norma portuguesa definitiva.

