

## 5.1 INTRODUÇÃO

A formulação de misturas estabilizadas com cal, a partir de ensaios laboratoriais, visa determinar a quantidade de cal a utilizar em função do tipo de cal disponível, da natureza e condições do solo natural (nomeadamente o teor em água), e da utilização pretendida para a camada estabilizada.

O problema com qualquer ensaio, laboratorial ou de campo, é a determinação dos efeitos que as condições reais têm sobre o comportamento a longo prazo. Assim, a questão da verosimilhança em ensaios laboratoriais permanece um desafio. A ferramenta mais eficiente será provavelmente o ensaio triaxial simples. Este ensaio é uma solução de compromisso visto que a rotação das tensões principais não é possível, mas fornece um meio para determinar, de forma muito aproximada, a rigidez e resistência do material sob uma larga gama de tensões aplicadas.

Contudo, o ensaio de compressão simples é aquele que melhor simula as condições que se verificam na fundação de um pavimento rodoviário. Em resultado, e visto ser este o tipo de utilização mais comum de camadas estabilizadas com cal, a resistência das misturas com teores em cal mais elevados (C6, C10 e C6A) foram determinadas através do ensaio à compressão não confinada.

Segundo as recomendações francesas SETRA-LCPC (1972, in Neves, 1993), os ensaios de laboratório devem focar os seguintes aspectos:

- ? Identificação e caracterização dos solos;
- ? Identificação e caracterização da cal;
- ? Estudo da mistura estabilizada.

O Comitê Técnico nº 12 da PIARC (1990, in Neves, 1993) recomenda que a formulação varie consoante a utilização pretendida para a mistura solo-cal, o que permite classificar as principais finalidades das misturas da seguinte forma:

- ? Melhoramento com vista à utilização em aterros;

- ? Estabilização para utilização como camada de coroamento de aterros ou como fundação de pavimentos.

No primeiro caso o objectivo do estudo de formulação visa determinar o valor mínimo do teor em cal a adicionar ao solo para que este possa ser compactado ou sobre ele se possa circular. Assim, o estudo laboratorial deve consistir sobretudo na determinação dos limites de consistência e dos parâmetros de compactação.

Quando o objectivo é a estabilização a longo prazo dos solos, o estudo laboratorial a levar a cabo deve ser mais aprofundado, visando determinar a evolução das características de resistência em função do teor em cal e do período de cura. Serão então necessários, para além daqueles já referidos, os ensaios de resistência mecânica que melhor simulam as condições reais a que os solos serão submetidos.

Os ensaios de identificação mineralógica, nomeadamente os ensaios de difracção de raios x e as análises químicas, foram realizados no Laboratório de Solos do Departamento de Geociências da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Os restantes ensaios levados a cabo, nomeadamente os de identificação e determinação das características de compactação, bem como os ensaios de resistência mecânica, foram realizados no Laboratório de Materiais e Solos do Departamento de Engenharias da mesma instituição.

Este capítulo inicia-se com a descrição dos ensaios realizados no âmbito deste trabalho de investigação, e nos quais se incluem os ensaios de identificação e caracterização, os ensaios de compactação e os ensaios de resistência mecânica. Em seguida são identificados os materiais envolvidos: os solos, a cal e o cloreto de sódio.

## **5.2 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EFECTUADOS**

Os solos utilizados neste trabalho foram “fabricados” em laboratório, de forma a reproduzirem as principais características dos solos residuais graníticos, cuja estabilização com cal se procurou estudar. Esta simulação foi conseguida através da mistura de areia fina e caulino, nas seguintes proporções:

SOLO	CAULINO	AREIA
S1C0	65%	35%
S2C0	35%	65%

Quadro 5.1: Proporção dos constituintes dos dois solos estudados

Este procedimento pretendeu garantir a homogeneidade das características das várias misturas efectuadas, o que implicava que as diferenças nos resultados obtidos em cada ensaio resultavam apenas da variação controlada dos parâmetros cuja influência na estabilização se procurou estudar, como a quantidade de cal, o período de cura, o uso de aditivos, etc.

Os ensaios realizados podem classificar-se em ensaios de identificação e caracterização, de compactação e de avaliação da resistência mecânica:

- ? ensaios de identificação:
  - ? composição granulométrica
  - ? composição mineralógica
  - ? composição química
  - ? limites de consistência
  - ? capacidade de permuta catiónica
  - ? pH
- ? ensaios de compactação pesada
- ? ensaios de resistência mecânica:
  - ? ensaios de resistência à compressão simples;
  - ? ensaios de resistência à compressão triaxial.

### 5.2.1 ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de identificação das misturas solo-cal são realizados de acordo com as especificações e normas existentes relativamente aos solos. Contudo, Neves (1993) destaca alguns requisitos a respeitar na preparação das misturas utilizadas nos referidos ensaios laboratoriais:

- ? Antes da adição da cal, o solo deve ser misturado com a quantidade de água previamente definida e permanecer num recipiente fechado durante 24 horas, de modo a permitir a homogeneização do teor em água;
- ? A cal adicionada deve ser convenientemente homogeneizada na mistura e armazenada durante um período de tempo suficientemente extenso para permitir o desenvolvimento das reacções entre a cal, o solo e a água.

As misturas solo-cal foram homogeneizadas manualmente, tendo em alguns casos sido utilizada uma misturadora mecânica que, no entanto, não dispensou nunca uma posterior homogeneização manual das misturas.

#### 5.2.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Foram realizadas análises granulométricas, por peneiração e sedimentação, aos solos naturais (S1C0 e S2C0), e às misturas com 2% de cal (S1C2 e S2C2). Não foi analisada a granulometria das misturas com 6 e 10% de cal visto que se verificam alterações significativas à dimensão das partículas com pequenos teores em cal, não sendo essas alterações proporcionais à quantidade de cal. Sendo assim, não seriam de esperar importantes variações na granulometria das amostras C6 e C10 em relação à granulometria das amostras C2.

A determinação das curvas granulométricas das misturas S1C2 e S2C2 foi conseguida da seguinte forma: prepararam-se aproximadamente 200g de cada mistura, com um teor em água correspondente ao teor óptimo de compactação, previamente determinado. Após a correcta homogeneização, as amostras foram

colocadas a curar em câmara húmida durante 8 dias, a uma temperatura de 25°C e 105% de humidade, de forma a que ocorressem as reacções de permuta iónica e flocculação.

Decorrido o período de cura, secaram-se as amostras em estufa durante 48 horas a uma temperatura de 100°C, findo o qual o material foi desagregado e passado no peneiro N° 40 da série ASTM. Em seguida foram efectuados os ensaios de peneiração e sedimentação de cada uma das amostras, de acordo com a especificação E196 (1967).

#### **5.2.1.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MINERAIS ARGILOSOS POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X**

A estabilização com cal de solos argilosos depende significativamente da composição mineralógica das partículas argilosas, com dimensões inferiores a 2 $\mu$ m. Procedeu-se assim à análise dos materiais através do método de difracção de raios X, descrito no Capítulo 3.2.2.3. As análises incidiram sobre as amostras S1C0 e S2C0, tendo posteriormente sido efectuados os registos difractométricos das amostras S1C2 e S2C2, para efeitos de comparação. Notar que a montagem das amostras analisadas, sob a forma de pó, foi feita de modo a evitar uma orientação uniforme dos seus cristais.

#### **5.2.1.3 LIMITES DE CONSISTÊNCIA**

As reacções de permuta iónica e flocculação, descritas no Capítulo 4.2.2, são responsáveis pelas alterações dos limites de consistência. Assim como no caso das alterações à granulometria do solo, as condições de plasticidade das misturas solo-cal alteram-se com reduzidos teores em cal, não existindo uma relação significativa entre o aumento da quantidade de estabilizante e a redução da plasticidade. Este fenómeno, referenciado exaustivamente na bibliografia, motivou a determinação dos limites de plasticidade apenas nas amostras S1C2 e S2C2, visto que as reduções na plasticidade das misturas com um teor em cal mais elevado não seriam substancialmente diferentes. Foram também determinados, para efeitos de comparação, os limites de consistência para as amostras dos solos originais, sem qualquer adição de cal.

Para a determinação dos limites de liquidez e plasticidade das amostras S1C2 e S2C2, prepararam-se aproximadamente 200g de cada uma delas, de modo em tudo idêntico ao descrito no Capítulo 5.2.1.1, respeitante às análises granulométricas efectuadas. Os limites de liquidez e plasticidade foram então determinados de acordo com a norma NP-143 (1969).

#### **5.2.1.4 ANÁLISE QUÍMICA**

O conhecimento de determinadas características químicas do material natural e estabilizado representa um importante contributo para a compreensão do comportamento dos solos durante o processo de estabilização com aditivos. As análises químicas a que foram submetidos, quer os solos naturais quer as misturas solo-cal, foram feitas através do método de espectrofotometria de absorção atómica.

A determinação do pH de uma suspensão de solo ou de uma amostra de água está dependente das condições do ensaio. A determinação dos valores de pH de cada uma das amostras, através do método electrométrico, foi feita com 10 g de material (seco ao ar e passado no peneiro nº 40 da série ASTM), submersas durante 30 minutos numa solução com 25 ml de água destilada e outros 30 minutos em 25 ml de cloro.

Os métodos utilizados na determinação da capacidade de permuta catiónica de uma argila consistem normalmente na sua saturação, com um catião adequado, e na posterior determinação analítica da quantidade desse catião que foi fixada pelos minerais argilosos. Neste estudo recorreu-se à saturação dos solos com iões amónio ( $\text{NH}_4^+$ ), por tratamento da amostra com solução saturada de acetato de amónio, tendo sido medidos os valores de iões cálcio, magnésio, potássio e sódio.

#### **5.2.2 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO**

Foram efectuados ensaios de compactação Proctor aos solos naturais (S1C0 e S2C0), e às misturas com um teor em cal de 2% (S1C2 e S2C2) e 6% (S1C6 e S2C6). Estes ensaios foram efectuados de acordo com as especificações correntemente utilizadas para a compactação de solos, nomeadamente a especificação do LNEC E197-1971.



Figura 5.1: Preparação do material a utilizar no ensaio de compactação



Figura 5.2: Execução de um ensaio de compactação pesado e aspecto final do solo no molde Proctor

Neves (1993) destaca a experiência francesa no que respeita ao tipo de ensaio e período de cura, em função da utilização pretendida para o solo estabilizado. Assim, o ensaio de compactação leve será mais adequado para o estudo de solos a utilizar em aterros, sendo a compactação pesada mais indicada para o caso dos

solos utilizados em camadas de leito do pavimento.

O período de cura da mistura, antes do ensaio de compactação, deve ser de ½ hora no caso da aplicação em aterros e de 2 horas para a aplicação em pavimentos. Contudo, e visto que neste estudo não foi particularizado nenhum tipo de utilização, foram executados ensaios de compactação pesada em amostras com um período de cura de aproximadamente 45 minutos.

### 5.2.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA

Segundo Fernandes (1994), a filosofia subjacente aos métodos e ensaios de caracterização mecânica de solos em laboratório consiste em simular de forma tão aproximada quanto possível as condições mais significativas nos maciços terrosos antes e após o carregamento. Foi com base neste princípio que foram definidos os ensaios a realizar sobre os provetes de solo-cal.

A resistência das misturas com um teor em cal de 6 e 10% foi determinada através de ensaios de compressão simples. Isto porque a principal aplicação da estabilização de solos com cal é, como foi já referido, a construção de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários, pelo que este ensaio se apresenta normalmente como o mais adequado à determinação da resistência mecânica destas misturas.

Para a determinação da resistência das misturas S1C2 e S2C2 utilizaram-se ensaios triaxiais clássicos (tensão de confinamento constante, aumento da pressão no êmbolo), confinados e não drenados. A opção por este tipo de ensaio, em detrimento dos ensaios de compressão simples utilizados para as misturas com 6 e 10% de cal, deve-se ao facto da quantidade de cal adicionada ao solo não ser suficiente para se desenvolverem, de forma significativa, as acções de cimentação, já descritas no Capítulo 4.2.3. Sendo assim, foi necessário aplicar alguma tensão de confinamento durante a aplicação da carga axial, de modo a avaliar correctamente as alterações nos parâmetros de resistência. Notar que o objectivo da adição ao solo de uma quantidade de cal tão reduzida (2%), não é o aumento significativo da sua resistência mecânica. Contudo, este parâmetro também é melhorado, sobretudo devido ao aumento do ângulo de atrito entre as partículas,



sendo que estes ensaios triaxiais foram executados tendo em vista a quantificação dos referidos ganhos de resistência.

### 5.2.3.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Um dos ensaios mais divulgados na literatura, para as misturas solo-cal, é o ensaio de resistência à compressão simples, realizado sobre amostras com vários teores em cal e com diferentes tempos de cura.

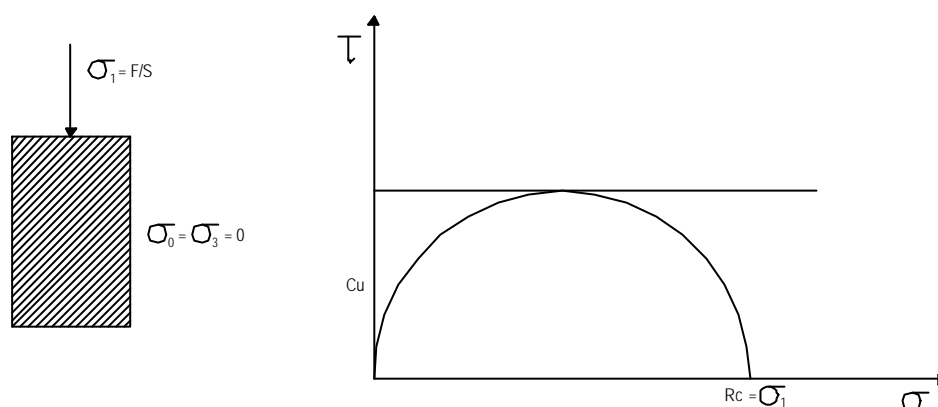


Figura 5.3: Representação, num diagrama de Mohr, dos resultados de um ensaio à compressão simples

O ensaio de compressão simples consiste em levar à rotura um provete intacto por aumento da carga axial. Fazendo a analogia aos ensaios triaxiais, trata-se de um ensaio não consolidado, não drenado, mas com a particularidade das tensões confinantes serem nulas. Como se deduz facilmente do círculo de Mohr (Figura 5.3), e considerando que  $R_c$  é a resistência à compressão simples, ou seja, a tensão axial instalada no provete no momento da rotura, a resistência à coesão não drenada ( $C_u$ ) pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$C_u \geq \frac{R_c}{2}$$

Estes ensaios devem ser realizados de acordo com as normas ASTM D 5102-90 e BS 1377, e permitem obter o valor da resistência à compressão de provetes cilíndricos não confinados, definida como a carga axial máxima de compressão por unidade de área. Se o ensaio se realiza sobre um material com comportamento dúctil, poderá não ser reconhecível um pico na curva tensão/deformação. Neste caso, o valor da resistência à compressão simples será tomado como a carga por unidade de área correspondente a uma deformação axial de 5%.

Foram realizados ensaios à compressão simples sobre os solos naturais (S1C0 e S2C0), e sobre todas as misturas com cal (S1C6, S2C6, S1C10, S2C10, S1C6A e S2C6A), sendo que os provetes utilizados foram compactados nas seguintes características (Quadro 5.2):

AMOSTRA	TEOR EM ÁGUA (%)	BARIDADE SECA (KN/m³)
S1C0	24,0	15,0
S1C6 S1C6A S1C10	26,0	14,6
S2C0	14,8	17,2
S2C6 S2C6A S2C10	16,0	16,9

Quadro 5.2: Parâmetros de compactação dos provetes ensaiados à compressão simples

Estes valores são ligeiramente diferentes dos valores obtidos nos ensaios de compactação Proctor, realizados sobre as amostras com um teor em cal de 0 e 6% (Capítulo 5.3.1.4). Isto porque a quantidade de água correspondente ao teor de humidade óptimo não era suficiente para permitir a correcta homogeneização das misturas, pelo que foi necessário aumentar ligeiramente o teor em água, reduzindo assim a baridade seca correspondente.

De modo a evitar os efeitos indesejáveis do contacto com o  $\text{CO}_2$ , capazes de alterar as características da mistura na altura da moldagem, os provetes foram acondicionados em plástico transparente e colocados em câmara húmida a uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$  e 105% de humidade. Segundo a norma ASTM D 5102-90 (in Neves, 1993), os provetes não devem ser guardados em recipientes em zinco ou alumínio, porque a cal pode reagir com estes metais. A mesma norma refere ainda uma temperatura ideal na câmara de  $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ . Em relação à humidade, é aconselhado um valor relativamente elevado, sem que tal seja porém uma exigência.

Os períodos de cura dos provetes foram de uma, duas, três, quatro, seis, oito e dez semanas. Para os períodos de cura de 6, 8 e 10 semanas foram realizados ensaios adicionais sobre amostras saturadas. A saturação destas amostras foi obtida através da sua submersão em água durante um período nunca inferior a 24 horas.

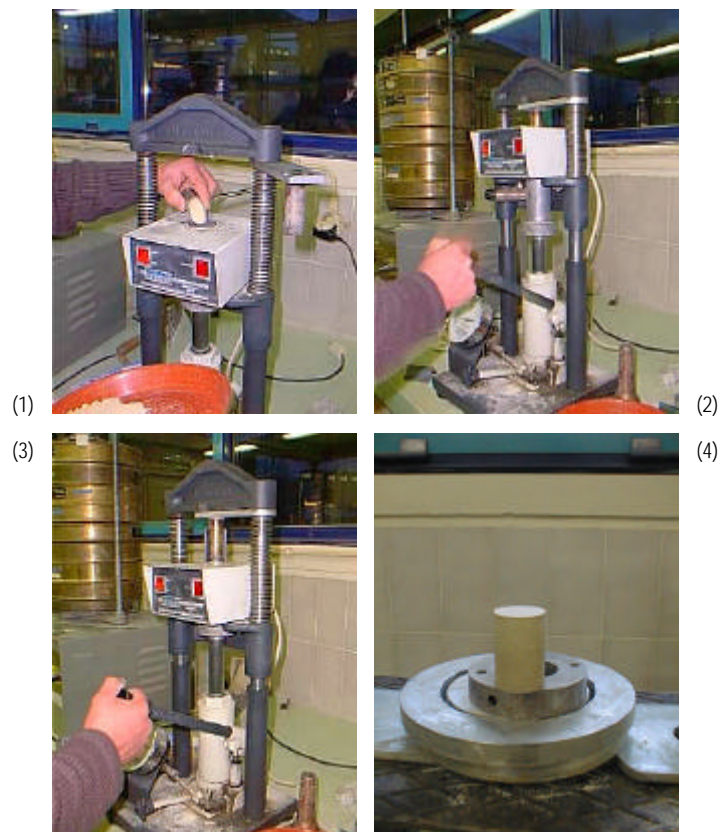


Figura 5.4: Preparação de um provete de 45x30 mm para ensaio à compressão simples

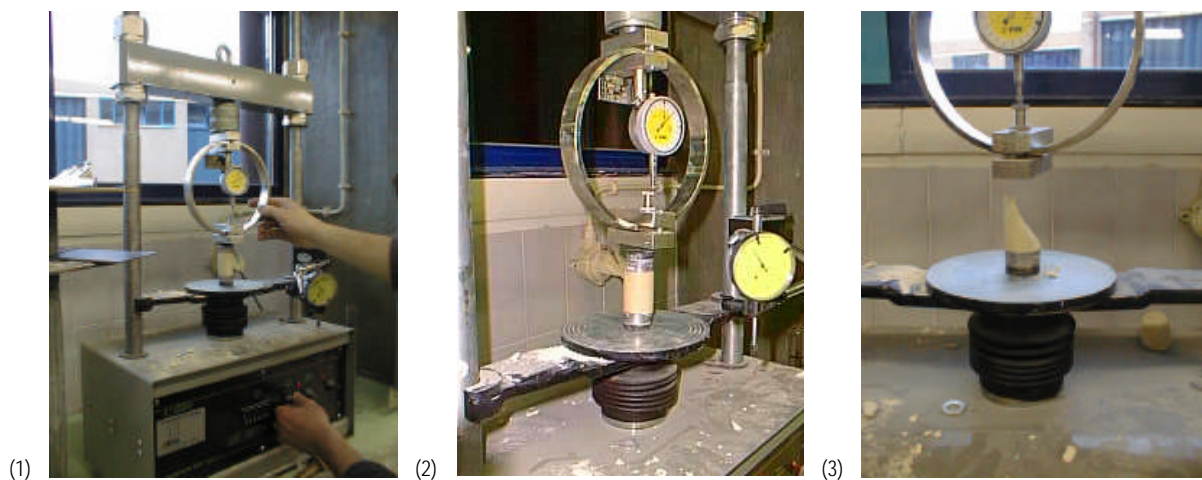


Figura 5.5: Execução de um ensaio de compressão simples

Os ensaios (Figura 5.5) foram realizados sobre provetes cilíndricos com 45mm de altura e 30mm de diâmetro, numa prensa dotada de anel dinamométrico com sensibilidade adequada às resistências a medir. A velocidade de aplicação da carga axial foi de 0.7 mm/min, o que corresponde a 1.6% da altura inicial do provete.

#### 5.2.3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO TRIAXIAL

Foram realizados 18 provetes para ensaios triaxiais de compressão clássica, não consolidados - não drenados, com dimensões 38 x 76 mm. Neste ensaio, também designado por “não consolidado – rápido”, não é permitida qualquer drenagem, quer em fase de consolidação quer em fase de corte, pelo que não ocorre dissipação de pressão intersticial durante o ensaio. Para além de três provetes de cada uma das misturas sem cal (S1C0 e S2C0), foram ensaiados, após períodos de cura de 3 e 7 dias, três provetes de cada mistura com cal (S1C2 e S2C2). Obtiveram-se assim os valores da coesão não drenada ( $C_u$ ).



Figura 5.6: Preparação dos provetes para os ensaios de compressão triaxial

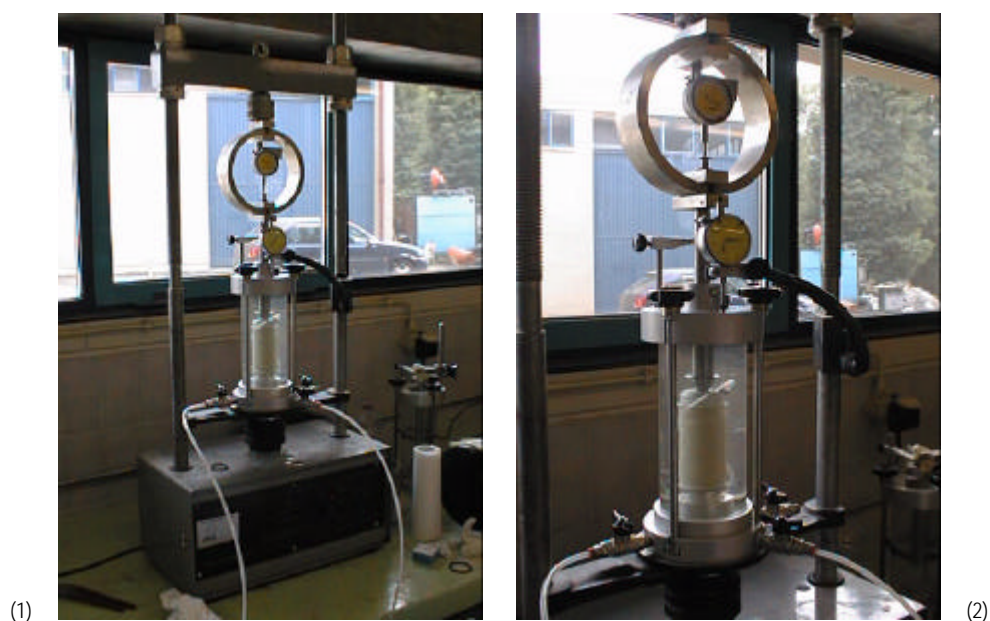


Figura 5.7: Execução dos ensaios de compressão triaxial

A saturação dos provetes revelou-se muito complicada, pelo que se optou por ensaiar os provetes no grau de saturação em que se encontravam. Os ensaios foram executados sem consolidação prévia dos provetes, sendo que na fase de corte se utilizaram as pressões de confinamento ( $\sigma_3$ ) indicadas no quadro 5.3.

PROVETE	$\sigma_3$
1	50 KPa
2	100 KPa
3	200 KPa

Quadro 5.3: Pressões de confinamento utilizadas nos ensaios de compressão triaxial

As pressões de confinamento utilizadas pretendiam simular uma gama de tensões que englobe os níveis de tensão mais comuns nos pavimentos rodoviários, do ponto de vista de um limite superior. Os ensaios foram executados a uma velocidade de 0,7 mm/min.

### 5.3 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Grande parte do território nacional é constituído por rochas ígneas de natureza granítica, nomeadamente o Minho, Douro, Trás-os-Montes, Beiras e Alto Alentejo (Lemos e Pais, 2000). Esta dissertação pretende estudar a estabilização de um solo residual granítico, abundante no norte do país. A frequência com que se encontra este solo no nosso território, a falta de estudos publicados acerca da viabilidade da sua estabilização e o seu comportamento singular, justificaram esta escolha.

Este capítulo é constituído pela apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios efectuados aos solos S1C0 e S2C0, e pela descrição da cal utilizada na estabilização dos referidos solos. Assim, e para além dos ensaios de identificação e caracterização, efectuaram-se ensaios de resistência à compressão simples e à compressão triaxial.

#### 5.3.1 ANÁLISE DOS SOLOS NATURAIS S1 E S2

##### 5.3.1.1 ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO

Realizaram-se ensaios para determinação dos limites de consistência (LL e LP) dos solos S1C0 e S2C0, tendo sido obtidos os resultados apresentados no Quadro 5.4. Em relação à granulometria, na Figura 5.8 estão representadas as curvas granulométricas destes solos.

SOLO	GRANULOMETRIA				PLASTICIDADE		
	AREIA 2 mm	SILTE 0,06 mm	ARGILA <0,002	PERCENTAGEM PASSADA NO PENEIRO	LL	LP	IP



	a 0,06 mm	a 0,002 mm	mm	Nº 10 (2,00mm)	Nº 40 (0,425mm)	Nº 200 (0,074mm)			
S1C0	34%	15%	51%	100%	89%	69%	35,7%	18,2%	17,5%
S2C0	62%	8%	30%	100%	86%	43%	27,6%	13,3%	14,3%

Quadro 5.4: Síntese das características de granulometria e plasticidade dos solos originais

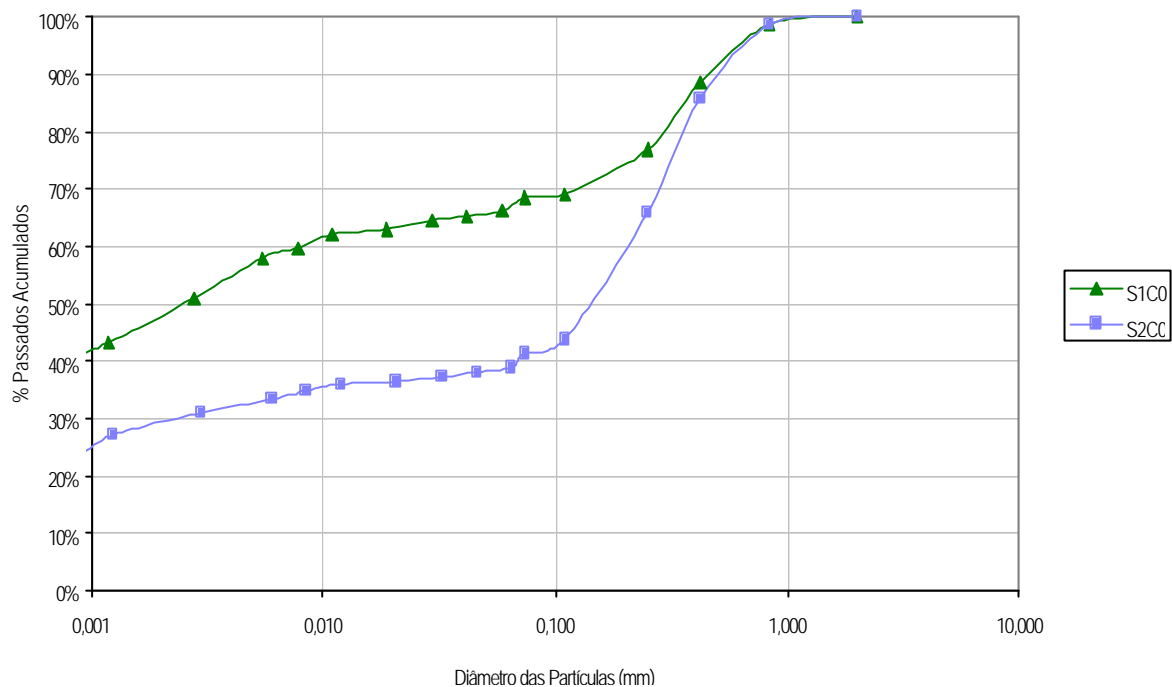


Figura 5.8: Curvas granulométricas dos solos S1C0 e S2C0

O solo S1C0 possui um índice de plasticidade ( $I_p=18\%$ ) maior do que o do solo S2C0 ( $I_p=14\%$ ). De notar que, embora as frações argilosas dos solos S1C0 e S2C0 sejam de 65 e 35%, respectivamente, estas são constituídas maioritariamente por caulinite, o que justifica a reduzida diferença entre os índices de plasticidade dos solos estudados. Isto porque a plasticidade deste mineral argiloso não é elevada quando comparada, por exemplo, com a plasticidade de uma montmorilonite. Neste caso, um aumento na fração argilosa de 35 para 65% conduziria certamente a uma subida mais significativa do índice de plasticidade do solo.

CLASSIFICAÇÃO	SOLO
---------------	------



	S1C0	S2C0
UNIFICADA (ASTM-D2487/85)	CL	SC
RODOVIÁRIA (AASHTO)	A – 6 (Ig = 9)	A – 2 – 6 (Ig = 1)

Quadro 5.5: Classificação dos solos originais

Na classificação unificada os solos residuais graníticos são normalmente identificados, segundo Martins (1989), por SM, ML e SC. O solo S1 (maior percentagem de argila) é classificado, segundo a norma ASTM-D2487/85, como um CL - Argila Magra Arenosa. O solo S2 é classificado, pela mesma norma, como um SC - Areia Argilosa (Quadro 5.5).

Relativamente à classificação rodoviária, efectuada segundo a norma “American Association of State Highway and Transportation Officials” AASHTO M145–42 (Correia, 1996), verifica-se que o solo S1 é classificado como pertencente ao grupo A – 6 (índice de grupo igual a nove), cujo material característico é um solo argiloso plástico, tendo usualmente 75% ou mais de partículas passando no peneiro nº 200 (ASTM), podendo o referido grupo incluir ainda misturas de solo argiloso com areia e cascalho retidos neste peneiro, desde que não excedam 64% da mistura. O solo S2, com maior percentagem de areia, é classificado como A – 2 – 6, com índice de grupo igual a um. Este grupo engloba os solos constituídos por vários materiais granulares, contendo 35% ou menos de partículas passando no peneiro nº 200 (ASTM), e em que a fracção passando no peneiro de nº 40 (ASTM) é não plástica ou moderadamente plástica.

### 5.3.1.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS SOLOS

A análise dos difractogramas (Capítulo 3.3.2.3) dos solos S1C0 e S2C0 (Figura 5.9) permite detectar, através dos picos desenvolvidos a 7.08, 3.56, 2.33 e 1.67 Å, a presença de minerais argilosos do grupo da caulinite. Em ambos os difractogramas se detecta ainda, de forma bem visível, a presença de quartzo.

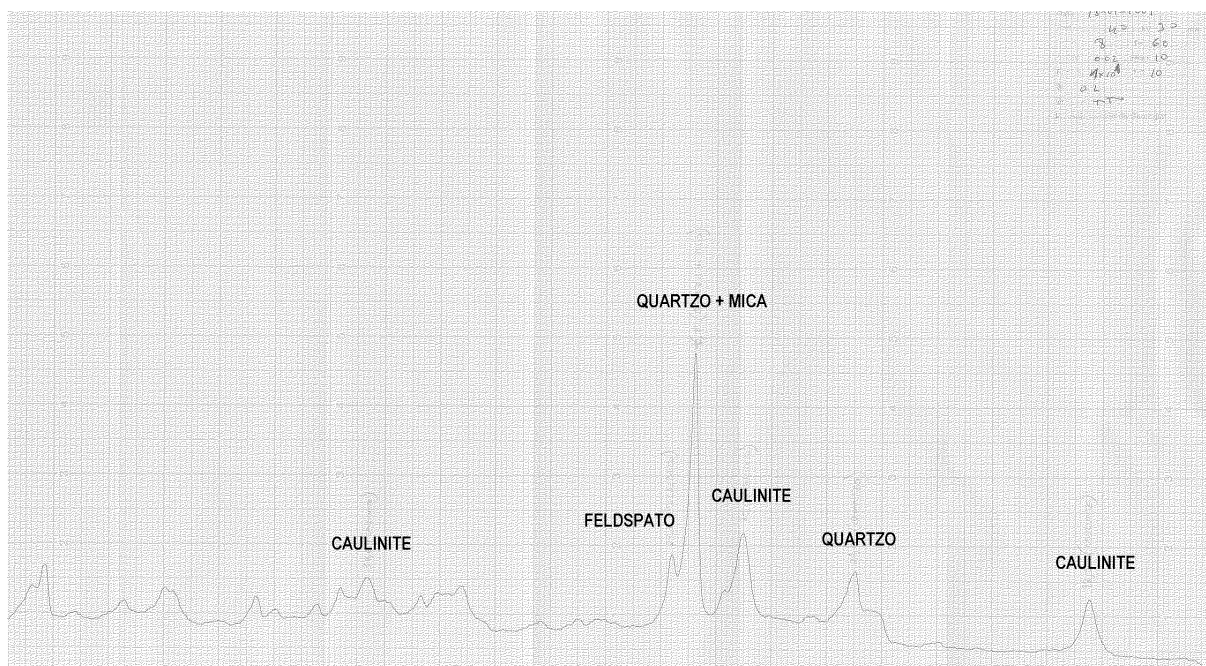


Figura 5.9 (a): Difractograma do solo S1C0

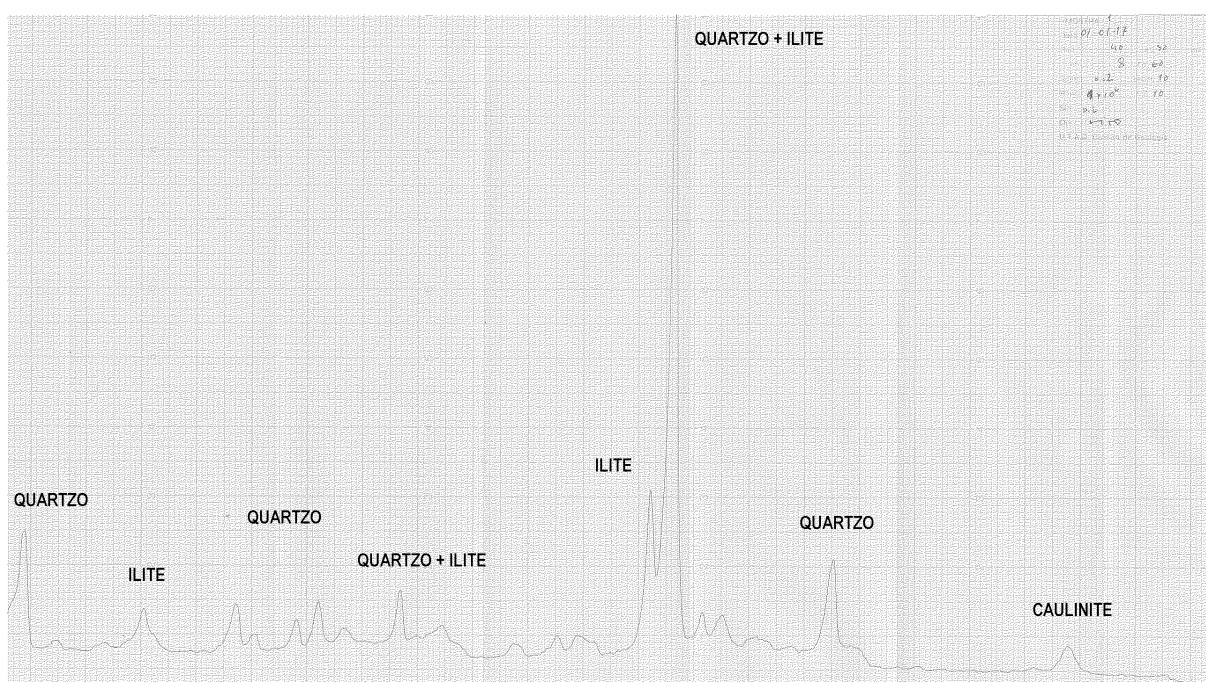


Figura 5.9 (b): Difractograma do solo S2C0

As reflexões de caulinite aparecem também muito intensas e bem definidas no difractograma correspondente à análise do caulino utilizado (Figura 5.10), o que traduz uma estrutura bem cristalizada. Também neste caso é possível detectar quartzo, embora as reflexões correspondentes sejam menos intensas do que nos solos S1C0 e S2C0.

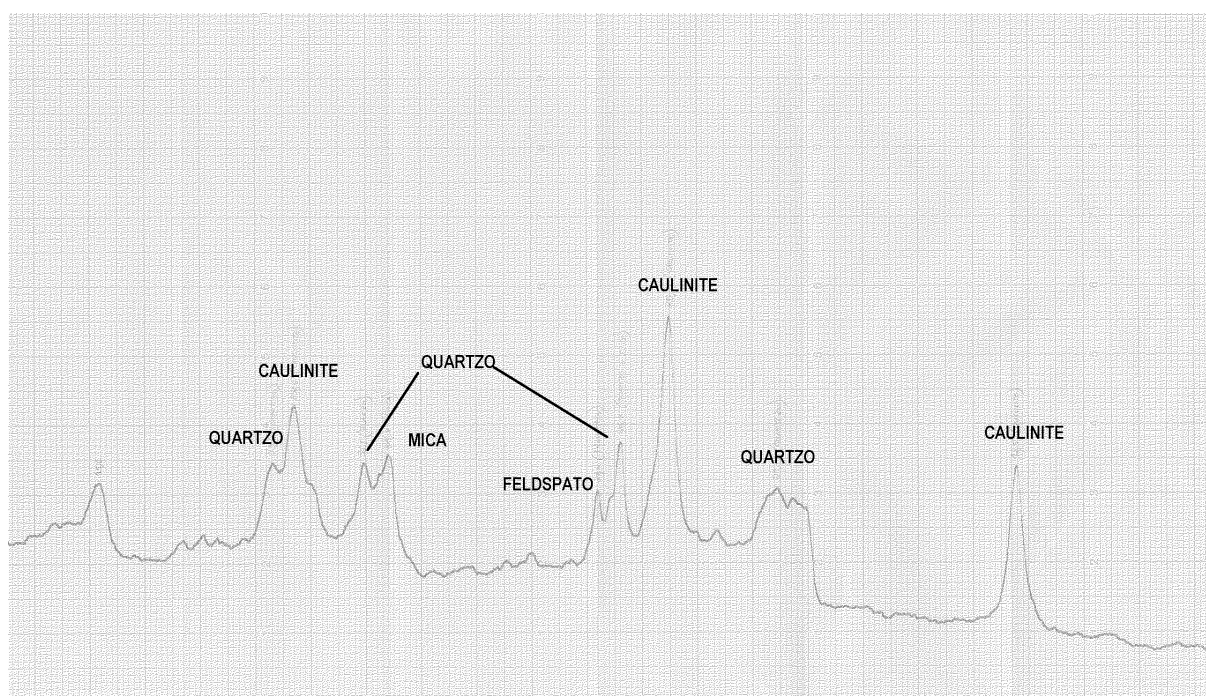


Figura 5.10: Difractograma da fracção fina dos solos S1 e S2

### 5.3.1.3 ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas do solo seco a 105°C, efectuadas no Departamento de Química da UTAD, e cujos resultados são apresentados no Quadro 5.6, revela que os constituintes se encontram no solo em percentagens semelhantes às que normalmente se verificam numa rocha granítica. Contudo, e segundo Fonseca (1988), a percentagem de sílica diminui, neste tipo de solos, com o nível de alteração da rocha mãe.

A alumina, e sobretudo a sílica, importantes para o desenvolvimento do gel cimentício responsável pelos ganhos de resistência mecânica de um solo estabilizado com cal, encontram-se em elevadas quantidades nos dois solos estudados.

Em relação à capacidade de troca iónica, verifica-se que esta é consideravelmente reduzida, o que pode ser justificado pelo facto dos constituintes mineralógicos dos solos em questão possuírem valores de capacidade de troca catiónica baixos. Visto que ambos os solos são neutros, a capacidade de permuta é igual à soma dos valores obtidos para cada uma das bases de troca (cálcio, magnésio, potássio e sódio).

SOLO	PRINCIPAIS COMPONENTES QUÍMICOS	SOLOS	CAPACIDADE DE TROCA IÔNICA (mE/100g)					VALOR DO pH	
			Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	SOMA	H <sub>2</sub> O	KCL
S1C0	SÍLICA (SiO <sub>2</sub> )	54.60 %	1.15	0.24	0.08	0.06	1.53	6.7	5.5
	ALUMINA (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	28.69 %							
	FERRO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.44 %							
	CÁLCIO (CaO)	0.02 %							
	MAGNÉSIO (MgO)	0.18 %							
	OUTROS	15.07 %							
S2C0	SÍLICA (SiO <sub>2</sub> )	69.36 %	1.36	0.29	0.14	0.11	1.90	7.0	5.5
	ALUMINA (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	20.11 %							
	FERRO (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.04 %							
	CÁLCIO (CaO)	0.02 %							
	MAGNÉSIO (MgO)	0.11 %							
	OUTROS	9.36 %							

Quadro 5.6: Principais características químicas dos solos naturais

#### 5.3.1.4 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

As curvas de compactação leve dos solos estudados, bem como os valores do teor em água ótimo e da baridade seca máxima, estão representadas na Figura 5.11 e no Quadro 5.7, respectivamente. É de salientar a maior sensibilidade à água por parte do solo S2C0, bem como o reduzido valor do seu teor em água ótimo.

SOLO	TEOR EM ÁGUA ÓTIMO	BARIDADE SECA MÁXIMA
S1C0	17,0 (%)	16,3 (KN/m <sup>3</sup> )
S2C0	10,9 (%)	17,6 (KN/m <sup>3</sup> )

Quadro 5.7: Parâmetros ótimos para compactação das amostras S1C0 e S2C0

De referir ainda as dificuldades de homogeneização da mistura S1C0 para os teores em água mais baixos, o que dificultou a execução dos pontos situados no ramo seco da respectiva curva.

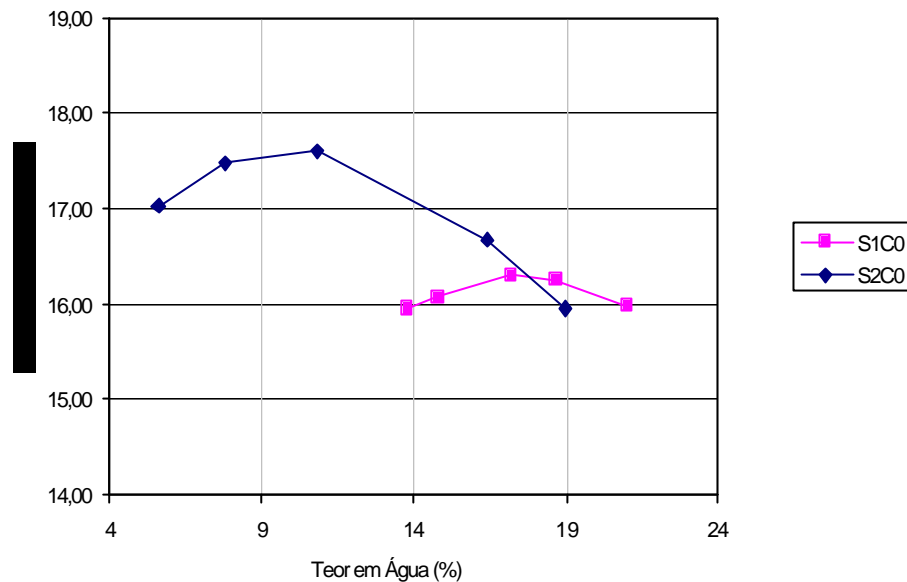


Figura 5.11: Resultados dos ensaios de compactação Proctor sobre os solos originais

### 5.3.2 A CAL E O CLORETO DE SÓDIO

Foi utilizada neste trabalho uma cal hidratada, em forma de pó, resultante de unidades de produção industrial localizada no concelho de Santarém, em pleno Maciço Calcário Estremenho (Serra dos Candeeiros). Convém recordar que, quando se procede ao estudo da formulação da mistura solo-cal mais adequada à estabilização de determinado solo, a cal utilizada em laboratório para a referida formulação da mistura deve ser a mesma a utilizar na execução das camadas de solo estabilizadas.

L2?	84.0%
L5?	53.0%
L10?	27.0%
L40?	6.0%

L50?	5.0%
L80?	1.5%
L125?	0.01%
L200?	0.0%

Quadro 5.8: Análise granulométrica da cal hidratada utilizada

A análise granulométrica da cal foi realizada pela empresa fornecedora, com recurso ao método laser. Os resultados obtidos estão indicados no Quadro 5.8.

As principais indicações normalmente fornecidas pela análise química da cal são:

- ? CaO total e CaO livre
- ? MgO
- ? CO<sub>2</sub>
- ? SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Contudo, o conhecimento dos teores em cálcio e magnésio livres são normalmente suficientes para as aplicações na estabilização de solos. As características químicas da cal hidratada utilizada, indicadas pelo fabricante, encontram-se no Quadro 5.9. Pode considerar-se que esta obedece, em termos de composição química, aos critérios referidos no Quadro 3.6 do Capítulo 3.3.3.

Para avaliar os melhoramentos resultantes da utilização, em conjunto com a cal, dos aditivos normalmente divulgados na literatura, foi estudada a evolução da resistência com o tempo de misturas de solo, cal e cloreto de sódio, tendo sido utilizado um teor em cal de 6% do solo a estabilizar. O cloreto de sódio utilizado possui um grau de pureza na ordem dos 99%, superior portanto ao valor mínimo de 95% exigido pela especificação ASTM D32-66 (in Castro, 1970) , tendo sido adicionada uma quantidade equivalente a 2% do referido teor em cal.

$\text{Ca(OH)}_2$	97.1 %
$\text{Mg(OH)}_2$	1.0 %
$\text{CO}_2$	1.0 %
$\text{CaSO}_4$	0.5 %
$\text{SiO}_2$	0.2 %
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	0.2 %

Quadro 5.9: Características químicas da cal hidratada utilizada